

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника
Вінницький національний технічний університет
Центр математичного моделювання ІППММ
ім. Я.С.Підстригача НАН України
AGH науково-технологічний університет
ім. Ст.Сташіца, Польща
Представництво "Польська академія наук" в Києві
Лудзький університет, Польща
Інститут кібернетики НАН України
Національний авіаційний університет
Фінансово-економічний інститут Таджикистану
Економічна академія "Д.А.Ценов", Болгарія
Харківський національний університет радіоелектроніки
НДІ інтелектуальних комп'ютерних систем ТНЕУ та ІК НАН України
Новий університет Лісабона, Португалія
Азербайджанська державна нафтова академія
Об'єднаний інститут проблем інформатики НАН Білорусі
Інститут інженерів з електротехніки
та електроніки (ІЕЕЕ), Українська секція
Асоціація "Інформаційні технології України"
Громадська організація "Івано-Франківський ІТ кластер"

"ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ"

**матеріали
міжнародної науково-практичної конференції**

**14 - 19 травня 2018 року
Івано-Франківськ**

**"INFORMATION TECHNOLOGIES AND COMPUTER MODELLING"
proceedings
of the International Scientific Conference
May 14-19, 2018
Ivano-Frankivsk, Ukraine**

Івано-Франківськ - 2018

УДК (004:004.2/004.9+007):33/37+51+621
ББК 22.17 32.81
I-74 Т

Науковий редактор: Л.Б. Петришин - доктор технічних наук, професор
(Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника;
Науково-технологічний університет Akademia Górniczo-Hutnicza
im. St. Staszica w Krakowie).

Рецензенти:

- Секція 1** С.В. Голуб - доктор технічних наук, професор (Черкаський національний університет ім. Богдана Хмельницького);
- Секція 2** Ю.Й. Тулашвілі - доктор педагогічних наук, професор (Національний університет водного господарства та природокористування);
- Секція 3** Р.Н. Квєтний - доктор технічних наук, професор (Вінницький національний технічний університет);
- Секція 4** В.П. Боюн - доктор технічних наук, член-кор. НАН України, професор (Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова національної академії наук України);
- Секція 5** В.А. Лужецький - доктор технічних наук, професор (Вінницький національний технічний університет);
- Секція 6** В.М. Синєглазов - доктор технічних наук, професор (Національний авіаційний університет);
- Секція 7** О.Ю. Чернуха - доктор технічних наук, професор (Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача);
- Секція 8** Я.Д. П'янило - доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача).

Матеріали статей рецензовано та опубліковано в авторській редакції.

"Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання"; матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 14-19 травня 2018 року. – Івано-Франківськ: п. Голіней О.М., 2018. –с.

Збірка містить матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції з проблем інформаційних технологій в технічних системах, в соціумі, освіті, медицині, економіці та екології; теорії інформації, кодування та перетворення форми інформації; технологій цифрової обробки інформації; захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах; математичного та імітаційного моделювання систем.

УДК (004:004.2/004.9+007):33/37+51+621
ББК 22.17 32.81
I-74 Т

ISBN

© ПНУ ім. В. Стефаника, 2018
© Автори статей, 2018

СЕКЦІЯ 1.

Інформаційні технології в технічних та системах спеціального призначення

SECTION 1.

Information technologies in technical systems and systems of special purpose

Про Один Субградієнтний Алгоритм Вирішення Завдань Стохастичного Програмування з Обмеженням

Фахріддін Мірзоахмедов
кафедра математичного та інформаційного моделювання
Державний університет фінансів та економіки Таджикистану
Душанбе, Таджикистан
mirfakh@mail.ru

On a Subgradient Algorithm for Solving Stochastic Programming Problems with Constraint

Fakhriddin Mirzoahmedov
Department of Mathematical and Information Modeling
State University of Finance and Economics of Tajikistan
Dushanbe, Tajikistan
mirfakh@mail.ru

Анотація—В статті проаналізовано субградієнтний алгоритм вирішення задач стохастичного програмування з обмеженням. Доказується сходимість алгоритму по Чезаро з вірогідністю 1.

Abstract—The article deals with the subgradient algorithm for solving the problem of stochastic programming with restriction. The convergence of the Cesaro algorithm with probability 1 is proved.

Ключові слова— субградієнт, алгоритм, рішення задачі стохастичного програмування, обмеження, збіжність по Чезаро, ймовірність.

Keywords— subgradient, algorithm, solutions to the problem of stochastic programming, constraint, Cesaro convergence, probability.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглянемо наступну задачу стохастичного програмування [1]:

$$F(x) = Mf(x, \omega) = \int_{\omega \in \Omega} f(x, \omega) d\varphi(\omega) \xrightarrow{x \in X \subset R^n} \min (1)$$

де X - опукле компактне підмножина R^n ,

$f(x, \omega)$ – вимірювана при кожному ω функція і опукла по x ;

ω – елементарна подія імовірнісного простору $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$,

де Ω – множина елементарних подій;

\mathfrak{F} – σ алгебра вимірних множин Ω ;

P - множина з певною Ω в мовірнісна міра, тобто $P(\Omega) = 1$.

II. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основні труднощі, що виникають при вирішенні задачі (1) полягають в наступному: цільова функція - опукла але яку неможливо диференціювати, точне обчислення її значення пов'язана істотними труднощами.

Вказані труднощі передодозволяються за рахунок застосування ітеративних методів негладкої оптимізації, що використовують замість неіснуючого градієнта функції його загальбудування - субградієнт (той же квазіградієнт, узагальнені градієнт). Одним із таких методів є метод стохастичного субградієнту з проектуванням [2]:

$$x^{s+1} = \pi_X(x^s - \rho_s \xi^s), \quad s = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

де s – номер ітерації;

x^0 – початкове наближення - довільний покомпонентний обмежувальний вектор;

ρ_s -шаговий множник;

ξ^s -стохастичний квазіградієнт функції в точці x^s ,
тобто $M(\xi^s / \mathcal{R}_s) = \hat{F}(x^s)$ – узагальнений градієнт;

$\pi(y^s)$ – оператор проектування точки
 $y^s = x^s - \rho_s \xi^s$ на множині X .

Збіжність алгоритму (2) доведемо по Чезаро з вірогідністю 1 і кроковим множником [3]:

$$\rho_{s+1} = \rho_s \alpha_s (\xi^{s+1}, \Delta x^{s+1}) - \delta \rho_s, s = 0, 1, \dots, \quad (3)$$

де $\alpha > 1, \delta, > 0, \rho_0 > 0, \Delta x^{s+1} = x^{s+1} - x^s$.

Нагадаємо, що під чезарською збіжності алгоритму

(2) розуміється збіжність послідовності $\{\bar{x}^s\}$, яка породжується співвідношенням

$$\bar{x}^s = \frac{\sum_0^s \rho_l x^l}{\sum_0^s \rho_l}, s = 0, 1, \dots,$$

до екстремальному множині функції $F(x)$.

Вектор \bar{x}^s представляє собою комбінацію точок траєкторії $x^l, l = 0, 1, \dots$, з ваговими коефіцієнтами $\rho_l / \sum_0^s \rho_l, l = 0, 1, \dots$

Відзначимо, що чезарну збіжність вдалося обґрунтувати при менш жорстких умовах, накладені на параметри алгоритму, ніж послідовність відповідності.

Доведенням сходимості алгоритму (2) в чезарському сенсі впливає з наступного твердження.

Теорема. Нехай $F(x)$ -опукла функція, задана на випуклі компактного множини $X \subset R^n$. Якщо виконані умови

$$\max_{x, y \in X} \|x - y\| = c_1, \text{ та } \sup_{x \in X} \|\xi^s\| \leq c_2, \forall s = 0, 1, \dots, \text{ майже мабуть,} \quad (4)$$

$$\overline{\lim}_{s \rightarrow \infty} \sup_{x \in X} \|b(s, x)\| \leq \bar{b}, \text{ i } \overline{\lim}_{s \rightarrow \infty} \sup_{x \in X} \inf_{h \in \partial_x f(x, \omega)} \|\xi^s - h\|$$

майже мабуть, (5)

$$\rho_s \xrightarrow{s \rightarrow \infty} \infty, \sum_0^s \rho_s = \infty, \text{ майже мабуть}$$

$$\text{i } M \rho_s^2 < \infty. \quad (6)$$

і виконуватися хоча б одне з наступних співвідношень:

крок ρ_s залежить від $(x^0, \dots, x^s, \xi^0, \dots, \xi^{s-1})$,
виміряємо щодо σ – алгебри, індукований

$$(x^0, \dots, x^s, \xi^0, \dots, \xi^{s-1});$$

$$\rho_s \rho_{s-1}^{-1} \longrightarrow 1 \text{ майже мабуть, } \rho_s \text{ залежить}$$

від $(x^0, \dots, x^s, \xi^0, \dots, \xi^s)$, виміряємо щодо σ –
алгебри, індукований $(x^0, \dots, x^s, \xi^0, \dots, \xi^s)$.

У співвідношеннях (5) і (6) відповідно $\partial_x f(x, \omega)$ –
множина векторів, що є ймовірними оцінками
узагальнених градієнтів функції $F(x)$ і M -знак
математичного очікування.

Тоді для послідовності, що задається (2), (3),

виконується $\overline{\lim}_{s \rightarrow \infty} F(\bar{x}^s) - F(x^*) \leq \bar{b} c_1$ майже мабуть,

при $x^* \in X^* \triangleq \{x^* : F(x^*) = \min_{x \in X} F(x)\}$.

Наслідок Якщо виконуються всі умови теореми,
функція $F(x)$ має єдиний екстремум, то з ймовірністю 1.

Доведення теореми можна завершити
використовуючи кілька допоміжних лем [3], що
відносяться збіжності рядів, з урахуванням виконання
співвідношення (4) - (6).

ВИСНОВОК

В даній роботі здійснений аналіз актуальної задачі, яка
полягає в застосуванні субградієнтного алгоритму для
вирішення задач стохастичного програмування з
обмеженням. Визначено основні проблеми, що виникають
в процесі вирішення задач стохастично програмування та
методи їх вирішення.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Ермольев Ю. М. Методы стохастического программирования. – М.: Наука, 1976.
- [2] Мирзоахмедов Ф., Урясьев С. П. Метод негладкой оптимизации с адаптивной регулировкой шага в детерминированном и стохастическом случаях. – Киев, 1981. – (Препр/ АН УССР, ИК: № 81 – 61).
- [3] Мирзоахмедов Ф., Урясьев С. П. Адаптивная регулировка шага для алгоритма стохастической оптимизации // ЖВМ МФ. – 1983. – 23, № 6. – С. 1314 – 1325.

Формалізація Семантичного Моделювання з Використанням Теорії Комбінаторної Оптимізації

Тимофієва Н.К.

відділ комплексних досліджень інформаційних технологій
МННЦІТІС НАН та МОН України
Київ, Україна
TymNad@gmail.com

Formalization of Semantic Modeling Using the Theory of Combinatorial Optimization

Tymofijeva N. K.

integrated research department of information technology
ISTCITS of NAS and MES of Ukraine
Kiev, Ukraine
TymNad@gmail.com

Анотація—Показано, що при семантичному моделюванні виникають задачі комбінаторної оптимізації, які відносяться до задач розбиття. Це – максимальне покриття ознаками певного об'єкта, кластеризація, класифікація, таксономія. Пошук необхідної інформації в базі даних проводиться за певними ознаками, які характеризують один або кілька подібних об'єктів.

Abstract—It is shown that in the case of semantic modeling, problems of combinatorial optimization arise which concern the problem of partitioning. This is the maximum coverage of signs of a particular object, clusterization, classification, taxonomy. The search for the necessary information in the database is carried out according to certain signs that characterize one or more similar objects.

Ключові слова — база даних семантичне моделювання; задача покриття; розпізнавання мовлення; кластеризація

Keywords— database; semantic modeling; problem of coverage; speech signal; clusterization

I. ВСТУП

База даних – це структурована сукупність взаємопов'язаних даних певної предметної області. Для швидкого знаходження в ній необхідної інформації ця база має бути відповідно структурована. Це стосується не лише інформації в комп'ютері, а й будь-якої інформації про об'єкти реального світу. Наприклад, для зручності знаходження потрібної книги в бібліотеці розроблено різні каталоги, які структуровані певним чином [1, 2].

Представлення інформації про предметну область пов'язано з моделюванням даних. На сьогодні існують різні моделі даних, які мають свої переваги та недоліки, і кожна з моделей має свою область застосування.

У теорії моделювання даних при проектуванні їхньої структури застосовується метод, який названо семантичним моделюванням. Він полягає в моделюванні структури даних спираючись на їхній зміст що важливо для інтелектуалізації різних систем. яке дозволяє визначати глибше сутність певного об'єкта.

Як інструмент семантичного моделювання використовуються різні варіанти діаграм сутність-зв'язок або ER-діаграми [1, 3]. Для правильного застосування ER-діаграм створюються різні математичні моделі, формулювання яких базується на основі таких математичних понять як теорія множин, теорія решіток, теорія графів. Тип сутності інтерпретується як множина, а сутність – як елемент цієї множини. Якщо проаналізувати задачі структуризації та пошуку інформації в базі даних, то можна побачити, що тут має місце покриття певними ознаками об'єктів, а також виникають задачі кластеризації або класифікації.

Оскільки при семантичному моделюванні мають місце задачі комбінаторної оптимізації, наведемо їхню математичну постановку.

II. ЗАГАЛЬНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ КОМБІНАТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Задачі цього класу, як правило, задаються однією або кількома множинами, наприклад A та B , елементи яких мають будь-яку природу [4]. Назвемо ці множини базовими. Найвні два типи задач. В першому типі кожному з цих множин подамо у вигляді графа, вершинами якого є її елементи, а кожному ребру поставлено у відповідність число $c_{ij} \in R$, яке називають вагою ребра (R – множина

дійсних чисел); $l \in \{1, \dots, n\}$, $t \in \{1, \dots, \tilde{n}\}$, n – кількість елементів множини A , \tilde{n} – кількість елементів множини B . Покладемо, що $n = \tilde{n}$. Між елементами цих множин існують зв'язки, числове значення яких назвемо вагами. Величини c_{lt} назвемо *вхідними* даними та задамо їх матрицями. В *другому* типі задач між елементами заданої множини зв'язків не існує, а вагами є числа $v_j \in R$, $j \in \{1, \dots, n\}$, яким у відповідність поставлено деякі властивості цих елементів, числові значення яких задаються скінченними послідовностями, що також є вхідними даними. Ці величини визначають значення цільової функції.

Для обох типів задач із елементів однієї або кількох із заданих множин, наприклад $a_l \in A$, $l \in \{1, \dots, n\}$, утворюється комбінаторна множина W – сукупність комбінаторних конфігурацій певного типу (перестановки, вибірки різних типів, розбиття тощо). На елементах w комбінаторної множини W вводиться цільова функція $F(w)$. Необхідно знайти елемент w^* множини W , для якого $F(w)$ набуває екстремального значення при виконанні заданих обмежень, тобто функціонал $F(w^*) = \underset{w \in W^0 \subset W}{glob \ extr} F(w)$, де $\extr = \{\min, \max\}$, W^0 – підмножина, яка визначається обмеженнями задачі.

III. КОМБІНАТОРНІ КОНФІГУРАЦІЇ

Комбінаторною конфігурацією назвемо будь-яку сукупність елементів, яка утворюється з усіх або з деяких елементів заданої множини $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ [5]. Позначимо її впорядкованою множиною $w^k = (w_1^k, \dots, w_{\eta^k}^k)$. Верхній індекс k ($k \in \{1, \dots, q\}$) в w^k – порядковий номер w^k в W , q – їхня кількість. Множину $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ назвемо базовою. Під символом $w_i^k \in A$ розуміємо як окремі елементи, так і підмножини (блоки), $\eta^k \in \{1, \dots, n\}$ – кількість елементів у $w^k \in W$. Залежно від умови задачі η позначатимемо без індексу або з верхнім індексом η^k . Дві нетотожні комбінаторні конфігурації w^k та w^i назвемо ізоморфними, якщо $\eta^k = \eta^i$.

IV. ЗАДАЧА ПОКРИТТЯ ОБ'ЄКТІВ ПЕВНИМИ ОЗНАКАМИ

При семантичному моделюванні виникає задача максимального покриття об'єкта певними ознаками, які його характеризують. Вона відноситься до задач розбиття, аргументом цільової функції в якій є розбиття n -елементної множини на підмножини.

Ознаки розділяються на такі, які характеризують лише заданий об'єкт, за якими досить просто його визначити в базі даних. В цьому випадку задача є розв'язною. Якщо однакові ознаки описують різні об'єкти, але за допомогою диференціального аналізу можна знайти потрібний об'єкт,

то така задача є частково розв'язною. Якщо одні і ті ж ознаки характеризують різні об'єкти і за ними не можна ідентифікувати пошукуваний, то виникає ситуація невизначеності. В цьому разі для розв'язання поставленої задачі необхідні додаткові умови або розробляти інші правила пошуку.

Для об'єднання спільних ознак певних об'єктів у класи необхідно розв'язати задачу кластеризації чи класифікації, які також відносяться до задач розбиття та є задачами комбінаторної оптимізації.

Розглянемо детальніше задачу покриття ознаками певного об'єкту. Змодельовавши її в рамках теорії комбінаторної оптимізації можна побачити, що аргументом цільової функції в ній є розбиття n -елементної множини на підмножини як з повтореннями так і без повторень.

Нехай задано базу даних з об'єктами різної природи. Позначимо їх множиною A . Задано ознаки, які характеризують ці об'єкти. Позначимо їх множиною B . В цій задачі необхідно вибраними ознаками, які характеризують об'єкти, оптимально їх покрити, тобто з ознак утворюються кластери. В цій задачі виділимо такі підзадачі:

- об'єкти із множини A покриваються ознаками B так, щоб останні не перетиналися.
- об'єкти із множини A покриваються ознаками B так, щоб останні повністю покривали задані об'єкти. В цьому разі один і той же елемент із B може характеризувати різні об'єкти (відноситься до різних кластерів).

Для обох задач розбиття $w \in W$ утворюється з елементів скінченної множини B .

В першій задачі утворені кластери не перетинаються, тобто $w_p \cap w_i = \emptyset$. Задача полягає в знаходженні такого розбиття $w^* \in W$, при якому об'єкт максимально покривається мінімальною кількістю ознак.

У другій задачі утворені кластери перетинаються, тобто $w_p \cap w_i \neq \emptyset$. Необхідно мінімізувати кількість ознак, які характеризують вибрані об'єкти так, щоб вони повністю їх покривали, а кількість однакових у різних кластерах елементів була б мінімальною.

Оговорена задача полягає в знаходженні такого розбиття $w^* \in W$, при якому об'єкт максимально покривається мінімальною кількістю ознак при виконанні умови, а саме: кількість однакових у різних кластерах елементів була б мінімальною.

В обох задачах цільову функцію необхідно оптимізувати за двома критеріями та розв'язати проблему мінімаксу (максиміну).

Пошук інформації в базі даних проводиться за певними ознаками, якими є вхідні дані, або за однією ознакою, за якою порівнянням з кількома еталонами, знаходиться один об'єкт. На прикладі розпізнавання

мовленнєвих сигналів покажемо, яким чином проводиться пошук інформації за другим варіантом.

V. ПОШУК ЕТАЛОНА У БАЗИ ДАНИХ, ЯКИЙ ПОДІБНИЙ ДО ВХІДНОГО ОБ'ЄКТА

Розпізнавання мови – це процес автоматичної обробки мовленнєвого сигналу з метою визначення послідовності слів, яка передається цим сигналом [5]. Цей сигнал описується послідовністю $X = (x_1, \dots, x_n)$, елемент x_i якої є значення сигналу у відліку i . Довжина n різних реалізацій сигналу певного слова – різна. Для розпізнавання з реалізацій X створюється словник еталонних слів. Еталон слова словника описується послідовністю $E_h = (e_{h_1}, \dots, e_{h_{q_h}})$, де h – номер слова у словнику, q_h – довжина сигналу еталону слова, $h \in \{1, \dots, \tilde{q}\}$, \tilde{q} – кількість еталонних сигналів у бібліотеці.

Задача розпізнавання мовленнєвих сигналів полягає у знаходженні для сигналу X найбільш правдоподібного еталона E_h з усіх можливих еталонних сигналів. Як видно з математичної моделі, наведеній у [5], задача розпізнавання мовленнєвих сигналів досить природно розділяється на дві підзадачі: перебір еталонних сигналів і порівняння еталонного та вхідного сигналів. Оскільки тут має місце перебір варіантів, то вона відноситься до задач комбінаторної оптимізації.

Нижче побудуємо математичну модель задачі розпізнавання як задачу комбінаторної оптимізації і визначимо комбінаторну конфігурацію, яка є аргументом цільової функції.

Розглянемо задачу порівняння еталонного і вхідного сигналів. Уведемо дві базові множини $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ і $B = \{b_1, \dots, b_{\tilde{n}}\}$, де $a_i = x_i \in X$, $i = \overline{1, n}$, а $b_l = e_{h_l} \in E_h$, $l \in \{1, \dots, \tilde{n}\}$, $\tilde{n} = q_h$. Вхідні дані, якими є ваги між елементами $a_i \in A$ і $b_l \in B$ задамо несиметричною матрицею $C = \|c_{il}\|_{n \times \tilde{n}}$, номери стовпців якої збігаються з нумерацією елементів $a_i \in A$, а номери рядків – з нумерацією елементів $b_l \in B$. Як описано в [5], при поелементному розпізнаванні мовленнєвого сигналу для елемента $x_i \in X$ знаходиться йому подібний $e_{h_l} \in E_h$. Оскільки з кожної базової множини A і B вибираються по одному елементу в строгому порядку, то отримана комбінаторна конфігурація є розміщення без повторень. Позначимо її $\mu^k \in M$, де M – їхня всіляка множина. Для визначення елементів $a_i \in A$ та $b_l \in B$, що вибираються з базових множин на k -му варіанті розв'язку задачі, уведемо комбінаторну (0,1)-матрицю $Q(\mu^k) = \|g_{il}^k(\mu^k)\|_{n \times \tilde{n}}$.

Якщо $g_{il}^k(\mu^k) = 1$, то з множин A і B вибрана пара (a_i, b_l) , в іншому разі – значення $g_{il}^k(\mu^k) = 0$. Для запису цільової функції в явному вигляді змодельємо вхідні дані

функціями натурального аргументу. Елементи матриці C подамо числовою функцією $\varphi(j) |_{\tilde{n}}$, а матриці $Q(\mu^k)$ – комбінаторною $\beta(f(j), \mu^k) |_{\tilde{n}}$, де $\tilde{n} = n \cdot \tilde{n}$. Кількість одиниць в комбінаторній функції дорівнює $q' = \min(n, \tilde{n})$.

Задача порівняння еталонного і вхідного мовленнєвих сигналів полягає в знаходженні такого розміщення без повторень $\mu^{k*} = (\mu_1^{k*}, \dots, \mu_{q'}^{k*})$, для якого функціонал

$$F(\mu^{k*}) = \max_{\mu^k \in M} \sum_{j=1}^{q'} \varphi(j) \beta_j(f(j), \mu^k), \quad (1)$$

де $\sum_{j=1}^{q'} \varphi(j) \beta_j(f(j), \mu^k)$ – інтегральна міра подібності, а

$\varphi(j) = g_j^i(a_i, b_l)$ – елементарна міра подібності, яка визначає подібність між елементами еталонного і вхідного сигналів. Аргументом цільової функції задачі (1) є розміщення без повторень.

Розглянемо задачу пошуку еталонного сигналу, який подібний до вхідного.

Позначимо A та $\tilde{B} = \{B_1, \dots, B_{\tilde{q}}\}$, базові множини, де $A = X$, а $B_l = E_{h_l}$. В цій задачі як ваги між еталонним і вхідним сигналами виступають значення інтегральних мір подібності, одержаних за виразом (1), числове значення яких подамо матрицею C' . Номери стовпців цієї матриці збігаються з номерами еталонних сигналів, розміщених у бібліотеці. Рядок у ній один і відповідає номеру один вхідного сигналу. Оскільки при порівнянні вхідного та еталонного сигналів з базових множин A і B вибираються два елементи, то утворений об'єкт є сполучення без повторень. Позначимо його $\mu^k \in M'$, де M' – їхня всіляка множина. Уведемо комбінаторну (0,1)-матрицю $Q(\mu^k) = \|g_{il}^k(\mu^k)\|_{n \times \tilde{q}}$. Якщо $g_{il}^k(\mu^k) = 1$, то з множин A та B вибрана пара (A, B_l) , в іншому разі – значення $g_{il}^k(\mu^k) = 0$. Елементи матриці C' подамо числовою функцією $\varphi'(j) |_{n-1}$, а матриці $Q(\mu^k)$ – комбінаторною $\beta'(f'(j), \mu^k) |_{n-1}$.

Задача пошуку еталонного сигналу, який відповідає вхідному, полягає у знаходженні такого сполучення без повторень $\mu^{t*} = (A_t, B_t)$, для якого значення заданої цільової функції було б найбільшим, тобто

$$F(\mu^{t*}) = \max_{\mu^k \in M} \sum_{j=1}^{n-1} \varphi'(j) \beta'_j(f'(j), \mu^t), \quad (2)$$

де $\varphi'(j) = \sum_{j=1}^{n-1} \varphi(j) \beta_j(f(j), \mu^k)$.

Отже, задача розпізнавання мовленнєвих сигналів розділяється на дві підзадачі, аргументом цільової функції в одній є розміщення без повторень, а у другій – сполучення без повторень. Для визначення слова чи речення, яке описує вхідний сигнал, необхідно визначити подібний сигнал-еталон у бібліотеці еталонів. Тобто, саме цей еталон відіграє роль ознак, за якими встановлюється пошукуваний об'єкт – слово. Сигнал – це ознака і еталон. Для повного покриття об'єкта ознаками створюються кілька еталонів одного і того ж слова, тобто проводиться максимальне покриття ознаками об'єкта таким чином, щоб ці ознаки максимально його характеризували.

Як видно з постановки задачі (2), пошук еталонного сигналу, подібного до вхідного, потребує повного перебору. Для зведення цієї задачі до розв'язної проведемо структурування бібліотеки еталонів.

VI. СТРУКТУРИЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ БАЗИ ДАНИХ (БІБЛІОТЕКИ ЕТАЛОНІВ)

Упорядкуємо еталонні сигнали, що відповідають заданим словам, в алфавітному порядку за такою схемою.

1. З кожного бібліотечного сигналу виділимо сегмент постійної довжини q^n , який є початком сигналу еталонного слова так, щоб він відповідав частині першої фонемі. Множину одержаних сегментів позначимо $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, а множину слів у словнику позначимо $B = \{b_1, \dots, b_n\}$. Елементу $a_i \in A$ відповідає сегмент частини першої фонемі слова, яке задається елементом b_j словника.

2. Розв'язавши задачу розбиття множини A на підмножини (кластеризацію), об'єднаємо однорідні сегменти в одну підмножину $w_s^k \subset w^k$. Підмножиною $w_s^k \subset w^k$ позначимо підмножину слів словника $B = \{b_1, \dots, b_n\}$ з подібними початковими сегментами, яка ізоморфна $w_s^k \subset w^k$, $s \in \{1, \dots, \eta^k\}$. Як і в задачі розпізнавання в цьому випадку значення функції $\phi(j) = \sum_{j=1}^q g'_j(\tilde{a}_{jr}, \tilde{a}_{jl})$ є інтегральною мірою подібності, а $g'_j(\tilde{a}_{jr}, \tilde{a}_{jl})$ – елементарна міра подібності, яка встановлюється між сегментами $a_r, a_l \in A$, $\tilde{a}_{jr} \in a_r$, $\tilde{a}_{jl} \in a_l$.

3. Кожній одержаній підмножині $w_s^k \subset w^k$ поставимо у відповідність еталон сегмента a'_j , який відповідає частині першої фонемі слова, що входить до $w_s^k \subset w^k$. Одержану множину сегментів позначимо $A' = \{a'_1, \dots, a'_n\}$. Аналогічно можна структурувати бібліотеку еталонних сигналів по другій, третій фонемі, використавши як еталони множину сегментів $A = \{a_1, \dots, a_n\}$.

Маючи еталони сегментів $a'_i \in A'$, упорядкованих в алфавітному порядку, задача (1)–(2) розв'язується таким чином. При пошуку еталонного сигналу в бібліотеці вирізаємо сегмент вхідного сигналу X довжиною q^n , що відповідає частині першої фонемі. Задачу (1) розв'язуємо з використанням відомих методів, наприклад, методу динамічного програмування. При цьому порівнюється сегмент вхідного сигналу довжиною q^n з еталонними сегментами $a'_j \in A'$ структурованої бібліотеки. Якщо значення функціоналу (2) найбільше для підмножини $\rho_s^k \subset \rho^k$, то пошук вхідного слова проводиться в цій підмножині словника B по другій, третій і т. д. фонемах.

Висновки

Отже, при семантичному моделюванні мають місце задачі комбінаторної оптимізації. Покриття об'єктів певними ознаками проводиться таким чином, щоб вони повністю його покривали. При цьому ці ознаки можуть характеризувати як один об'єкт, так і декілька. Серед них можна виділити розв'язні задачі та нерозв'язні. Пошук в базі даних певного об'єкта проводиться двома способами, а саме: за певними ознаками знаходиться один або кілька подібних об'єктів, або за однією ознакою, за якою порівнянням з кількома еталонами знаходиться один об'єкт.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Дейт К. Введение в системы баз данных, 8-е издание: Пер.с англ. / К Дейт. – К.; М.; СПб.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1328 с.
- [2] Исаченко А.Н. Модели данных и СУБД / А.Н. Исаченко, С.П. Бондаренко – Минск: БГУ, 2007. – 205 с.
- [3] Сільвейструк Л.М. Формалізація моделі "сутність-зв'язок": типи сутностей, типи зв'язків та їх обмеження. автореф. ... канд. фіз-мат. наук : 01.05.03. Сільвейструк Л.М. ; КНУТШ. Київ, 2009.– 19 с.
- [4] Тимофієва Н.К. Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації. Автореф. дис... докт. техн. наук / Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ. – 2007. – 32 с.
- [5] Винцюк Т.К. Анализ, распознавание и интерпретация речевых сигналов / Т.К. Винцюк. – К.: Наукова думка, 1987. – 262 с.

Методика Оперативної Діяльності Рішень Пошуку Безпечного Маршруту Військових Одиниць у Бойових Умовах на Основі Параметричного Синтезу та Алгоритму Рою Часток

Василь Литвин
кафедра інформаційних систем та мереж
Національний університет «ЛП»,
Львів, Україна
vasyl.v.lytvyn@lpnu.ua

Олексій Іл'юк
кафедра інформаційних систем
Національний технічний університет «ХПІ»
Чернівці, Україна
olexiyilyukm@gmail.com

Дмитро Угрин
кафедра інформаційних систем
Національний технічний університет «ХПІ»
Чернівці, Україна
ugrund@gmail.com

Method of Optional Optimization of Solutions to Search the Safety Route of Military Units in Board Conditions Based on Parametric Synthesis and Algorithm of Sections

Vasyl Lytvyn
Dept. of Information Systems and Networks
«LP» National University
Lviv, Ukraine
vasyl.v.lytvyn@lpnu.ua

Olexiy Iliiyuk
Dept. of Information Systems
«KhPI» National Technical University
Chernivtsi, Ukraine
olexiyilyukm@gmail.com

Dmytro Uhryn
Dept. of Information Systems
«KhPI» National Technical University
Chernivtsi, Ukraine
ugrund@gmail.com

Анотація—Запропоновано метод забезпечення надійності технічних систем пошуку безпечного маршруту військових одиниць в бойових умовах. Розроблено математичну модель забезпечення надійності технічних систем на основі оптимізації параметричного синтезу та алгоритму рою часток. Визначені області потенційного застосування методу

та виконаний аналіз порівняння запропонованого методу та класичних підходів.

Abstract—The method of finding a safe position of military units during combat operations by using neural networks and frogs' algorithm is proposed. The mathematical model of the safe

position finding method is developed. The SWOT analysis of the proposed method is performed. Areas of potential application of the method are determined.

Ключові слова—алгоритм рою часток; безпечний шлях; забезпечення надійності; параметричний синтез

Keywords—neural networks, safe route, forecasting solutions, covering clusters

I. ВСТУП

Нечіткі результати, що отримані процесами постановки внутрішніх параметрів технічних систем, які застосовуються при задачах, де присутній фактор дестабілізації (нечіткі системи) виникають дуже часто. Прикладом є незбіжності реальних значень при введених початкових даних у систему. У військовій спеціалізації такі системи потребують ретельного підходу і максимальної точності початкових даних.

Подальше опрацювання попередніх даних розвідки у системі не має мати в собі такі поняття як наближення та потенційний результат. В задачах такого типу має бути присутній фактор точності та надійності.

Потрібний рівень надійності системи технічного призначення можна забезпечити на стадії проектування. Одним із можливих підходів в такому випадку являється рішення задачі оптимального параметричного синтезу по критерію параметричної надійності, яка полягає у виборі таких номінальних значень параметрів, при яких система, що досліджується задовольняла б потреби функціонування протягом всього заданого періоду експлуатації.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Процес проектування надійності технічних систем пошуку безпечного маршруту військових одиниць у бойових умовах є багатостадійним процесом. Одною із стадій проектування є параметричний синтез, який виявляє оптимальні значення параметрів елементів при відомій структурі системи. Для випадку військової специфіки в якості таких параметрів зазвичай виступають пропускну здатності військових груп, вогнева та оборонна потуга.

При рішенні задач параметричного синтезу в багатьох випадках недостатньо обмежуватися лінійними моделями. До прикладу, лінійна модель, яка не враховує нелінійні параметри, тобто характер їх якості та інтенсивність змін. Отримані в результаті залежності необхідно використовувати у складі обмеження цільової функції при рішенні задач параметричного синтезу.

Наявність великої кількості параметрів на кожному графі впливають негативно на ефективність пошуку оптимального рішення. Тому необхідним є зменшити (відсіювати) вже відомі рішення, які пройшли етап синтезу.

У роботах [1–3] запропоновано динамічну модель структурно-функціонального синтезу транспортної моделі. За допомогою такої моделі забезпечується рішення задач по вибору топології і пропускну здатностей динамічної структури.

Також у методах [4–6], на основі аналізу великої кількості робіт по дослідженню трафіку IP-сітки приведена класифікація даного трафіку і кожному виду трафіку надається закон розподілення. У військовій спеціалізації такий підхід можна використовувати на кожному графі у топології місцевості. Проте він не дозволить відсіювати відомі рішення, що значно зменшить ефективність виконання алгоритму роботи.

У роботі [8] проводиться дослідження характерних ознак потоків даних. Отримані вирази дозволяють визначити значення параметра Херста для випадків, коли два потоки (в нашому випадку графі) мають однакові значення. Як наслідок такий підхід дозволить визначити два чи більше рішення на певну кількість графів [9–10].

Проаналізовані дослідження та публікації дозволяють визначити характер задачі, а саме проектування методу, який дозволить об'єднати функції синтезу отриманих рішень, їх розподілення по топології місцевості та відсіювання вже відомих раніше рішень.

III. ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ СТАТТІ

Розробити алгоритм забезпечення надійності технічних систем пошуку безпечного маршруту військових одиниць у бойових умовах використовуючи оптимізацію параметричного синтезу.

Для поставленої мети необхідно:

1. Проаналізувати існуючі рішення задач даного типу;
2. Розробити математичну модель параметричного синтезу у військовій специфіці;
3. Розробити алгоритм забезпечення надійності технічних систем пошуку безпечного маршруту військових одиниць у бойових умовах;
4. Порівняти отримані результати із класичними технічними системами.

IV. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В загальному випадку модель технічних систем можна уявити в залежності $y = y(x)$, де $x \in R^n$ і $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \in R^n$ – вихідні параметри системи. Необхідно відмітити, що моделі параметричного синтезу, на прикладі яких розглядається пропонований підхід, як правило, не задані в аналітичній формі, а є імітаційними. В процесі експлуатації технічних систем номіновані значення внутрішніх параметрів змінюються в часі. Таким чином, розглядається не лише вектор фіксованих значень, а й узагальнений процес $X = X(x_{nom}, t)$ їх зміни.

Крім модельних співвідношень задаються допуски на значення внутрішніх параметрів у вигляді нерівностей:

$$x_{i,\min} \leq x_i \leq x_{i,\max}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Ці обмеження формують n -мірний паралелепіпед допусків B_T :

$$B_T = \{x \in R^n : x_{i,\min} \leq x_i \leq x_{i,\max}, i = \overline{1, n}\}.$$

На вихідні параметри системи, керуючись вказаною специфікою системи також накладаються інтервальні обмеження, які названі умовами придатності:

$$y_{\min} \leq y(x) \leq y_{\max}.$$

Наступна умова визначає внутрішні параметри системи, а саме область роботи D_x :

$$D_x = \{x \in R^n : y_{\min} \leq y(x) \leq y_{\max}\}.$$

Результатом відмови буде вихід параметрів за межі опрацьованої області. Тому задача забезпечення надійності по поступовим відмовам полягає у виборі номінальних значень внутрішніх параметрів системи $x_{nom} = (x_{nom1}, x_{nom2}, \dots, x_{nomn})^T$. Такий процес здійснюється для того, щоб відсіювати рішення із фактором наближення.

Якщо не відсіювати рішення із фактором наближення, то у більшості випадків, вирішити задачу забезпечення надійності системи шляхом поступової відмови не буде можливим через неповноцінну вхідну інформацію.

Для забезпечення цілісності інформації необхідно використати алгоритм, який дозволить опрацьовувати вхідні дані відсіюючи хибні рішення, при цьому не втрачаючи структурної цілісності.

В середині 90-х років 20 століття психологом Джеймсом Кеннеді та інженером Расселом Еберхартом був розроблений та доведений новий метод оптимізації нелінійних функцій нульового порядку, що заснований на алгоритмі, який імітує поведінку рою. Як наслідок, іншими дослідниками були розглянуті різні модифікації оригінального методу. В даній роботі використовується модифікація класичного алгоритму рою часток, запропонованого у 1998 році та адаптовано під задачу оптимального параметричного синтезу по критерію параметричної надійності в бойових умовах.

Рій часток являє собою множину $\{P_j, j = \overline{1, L}\}$, де L є часткою із заданими зв'язками серед інших часток. Кожна частинка P_j і весь рій в цілому характеризують ряд параметрів, які визначають їх стан у конкретний момент часу:

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – розташування частинок у області внутрішніх параметрів;

$V = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T$ – швидкість частинок;

$pbest = (pb_1, pb_2, \dots, pb_n)^T$ – краща локальна точка значення координат локального оптимуму та цільової функції у заданій точці;

$gbest = (gb_1, gb_2, \dots, gb_n)^T$ – глобальне рішення.

Вектор V характеризується змінами положення частинок за одиницю часу рівно одній ітерації алгоритму. На етапі ініціалізації алгоритму вектори x та V являють собою спосіб розподілення допусків B_T . На кожній ітерації алгоритму напрямки та довжина вектора швидкості кожної із частинок корегуються у співвідношенні із отриманими вхідними даними знайдених частинок P_j на локальних оптимумах за формулою:

$$\tilde{V}_i = \omega V_i + a_1 \times rnd \times (pb_i - x_i) + a_2 \times rnd \times (gb_i - x_i),$$

де \tilde{V}_i – компонент вектора швидкості частинок на наступній ітерації, V_i – компонент вектора швидкості частинок на попередній ітерації, ω – коефіцієнт ітерації, a_1, a_2 – постійне прискорення, rnd – початкова величина.

Після початкової ініціалізації запускається ітераційний процес. На кожній ітерації алгоритму відбувається зміна положення частинок по формулі:

$$\tilde{x}_i = x_i + \tilde{V}_i.$$

На рисунку 1 представлений алгоритм роботи рою часток. Критерії зупинки в загальному випадку можуть бути різними: кількість ітерацій, час роботи, не знайдене рішення за час роботи алгоритму. В роботі використовується критерій досягнення з деякою точністю, що завчасно взята за допомогою методу глобального оптимального рішення.

Не дивлячись на нескладну логіку роботи алгоритму на практиці іноді складно досягти ефективного застосування. Алгоритм надає максимально ефективний результат тільки в тому випадку, коли дані за попередньою розвідкою є чіткими і незмінними. Від вибору топології рою часток, яка знаходиться за допомогою роботи із графами, визначаються інформаційні зв'язки. Крім того, від вибору топології, як правило, залежить швидкість руху часток і розмір популяції. Занадто великий розмір популяції може призвести до ранньої збіжності у будь-якому локальному екстремумі. Топологія буде вважатись оптимальною, у якій досягнута краще значення цільової функції. Тобто про те рішення, яке досягнула одна частинка дізнаються всі інші і використовуватимуть поточне рішення.

Від вибору значень параметрів залежить поведінка інших частинок. Якщо частинки при дослідженні області зміщуються у великій степені в бік власної знайденої початкової позиції (локального оптимуму), то в іншому випадку – в бік глобального найкращого значення, тобто початкового скупчення частинок. Коефіцієнт ітерації відповідає за плавність змін. Він контролює швидкість частинок і налаштування балансу між дослідженням області та швидкістю збіжності алгоритму. Перелічені параметри можуть бути константами або змінюватись по двом законам (лінійному або нелінійному). В роботі використовуються фіксовані значення параметрів.

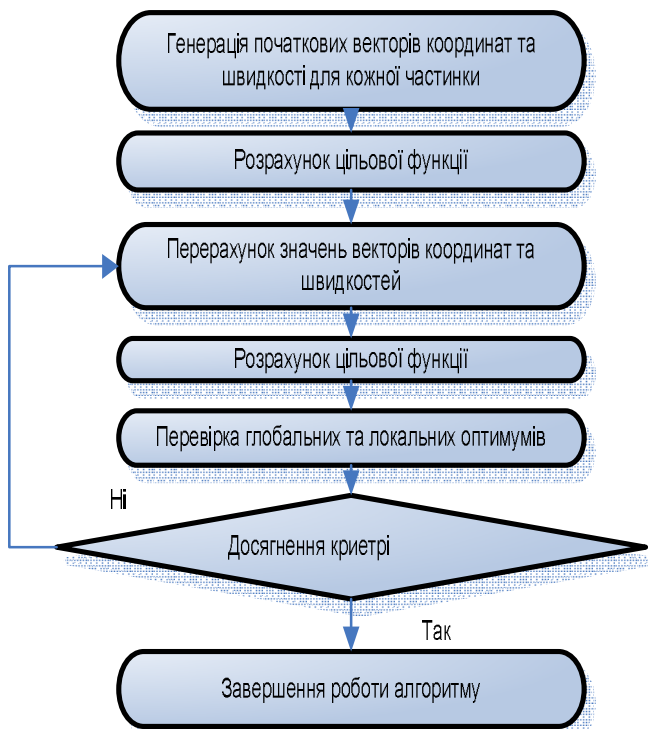


Рис. 1. Алгоритм роботи пошуку надійного рішення

Оцінка ефективності алгоритму здійснюється по наступним критеріям надійність, швидкість збіжності і час роботи алгоритму. За даними критеріями проводиться статистичний аналіз.

Надійність алгоритму – відношення числа успішних запусків, в яких алгоритм виявляє із потрібною точністю оптимальне рішення до загального числа запусків.

Швидкість збіжності – число розрахунку цільової функції (ітерацій), при якій із заданою точністю алгоритм вперше знаходить глобальний оптимум.

Час роботи – термін роботи алгоритму, що вимірний у секундах. Він виміряється від початку до кінця роботи самого алгоритму.

Для знаходження кількісних значень запропонованих критеріїв було здійснено 100 запусків алгоритму із використанням в якості результату зупинку або точку досягнення глобального оптимуму.

Значення глобального оптимуму, який використовується в якості сталону для порівняння, було визначено доволно і однаково для усіх випадків.

ВИСНОВКИ

Отримані результати порівняння із класичним підходом рою часток у впровадженні надійності технічних систем було виявлено, що при використанні методу синтезу параметричної оптимізації можна уникнути збіжності роботи системи, яка дозволяє отримати ефективніші результати навіть при динамічній зміні критерій чи параметрів процесу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // IEEE/ACM Trans, on Networking. — 1994. — Vol. 2, Issue 1. — P. 1—15.
- [2] Paxson V. Floyd S. Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling // Proc. ACM Sigcomm, London, UK. — 1994. — C. 257—268.
- [3] Ryu B., Lowen S. Point process models for self-similar network traffic, with applications // Stochastic Models. — 1998. — № 14(3). — P. 735—761.
- [4] Norros I. A Storage Model with Self-Similar Input // Queueing Systems. — 1994. — Vol. 16, No 3-4. — P. 387—396.
- [5] Шубин Е.В. Метод синтеза топологической структуры сети передачи данных по критерию минимальной стоимости с использованием генетического алгоритма: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.12.02. — X.: 2005. — 172 с.
- [6] Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks / I. Norros // Selected Areas in Communications, IEEE Journal. — 1995. — Vol. 13, Issue 6. — P. 953—962.
- [7] Patel A. Statistical Multiplexing of Self-Similar Traffic: Theoretical and Simulation Results [Electronic resource] / A. Patel, C. Williamson // University of Saskatchewan, Department of Computer Science. — 1997. — Mode of access: <http://www.cs.usask.ca/faculty/carey/papers/statmuxing.ps>
- [8] Orłowski S., Koster A.M.C.A., Raack C., Wessälly R. Two-layer network design by branch-and-cut featuring MIP-based heuristics // Proceedings of the 3rd International Network Optimization Conference (INOC 2007), Spa, Belgium – 2007. — P. 114—119.
- [9] Capone A., Carello, G., Matera, R., Multi-Layer Network Design with Multicast Traffic and Statistical Multiplexing // IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM), Washington, USA – 2007. — P. 2565–2570
- [10] Агеев Д.В. Проектирование современных телекоммуникационных систем с использованием много-уровневых графов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2010. — № 4/2 (46). — С. 75 — 77.

Реоптимізація Узагальнених Задач про Виконуваність з Допомогою Ієрархій Релаксацій як Інтелектуальна Обробка Даних в Системах Штучного Інтелекту

В.О. Михайлюк

кафедра прикладної математики та інформатики
Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки МОН України
Луцьк, Україна, mikh1709@ukr.net

Reoptimization of Constraint Satisfaction Problems With the Help of the Relaxation Hierarchies as the Data Mining in the Systems of Artificial Intelligence

V. O. Mikhailyuk

Department of Applied Mathematics and Computer Science
Lesya Ukrainka Eastern European National University, Ministry of Education and Science of Ukraine
Lutsk, Ukraine mikh1709@ukr.net

Анотація—Обґрунтовано застосування нового підходу для проектування інтелектуального програмного забезпечення для розв'язання узагальнених задач про виконуваність. Інтелектуальний аналіз даних здійснюється на основі обґрунтованої реоптимізації оптимальних розв'язків

Abstract—The application of a new approach for engineering of intelligent software for constraint satisfaction problems is substantiated. Data Mining is carried out on the basis of reasonable reoptimization of optimal solutions

Ключові слова—реоптимізація; ієрархії релаксацій; інтелектуальний аналіз даних

Keywords—reoptimization; relaxation hierarchies; Data Mining

I. ВСТУП

Ціль реоптимізації [1,2], використовуючи наближені методи для задач дискретного програмування, – застосування знання розв'язку початкового екземпляра I задачі для виконання однієї з умов: досягнення кращої якості наближення (відношення апроксимації) I' (змінений екземпляр); створення більш ефективного (по часу) алгоритму для визначення оптимального або близького до нього розв'язку I' ; попередні дві умови. Узагальнені задачі про виконуваність (Constraint Satisfaction Problems, CSPs) описують великий клас задач дискретної та комбінаторної оптимізації [1,2].

Означення 1. Узагальнена задача про виконуваність ($MAX\ k - CSP(P)$) може бути задана скінченими множинами $k \in N, \Sigma$, сімейством предикатів (функцій) P з Σ^k в $\{0,1\}$. Клас $CSP_{\Sigma}(P)$ складається з усіх екземплярів виду I , де $I \in$ підмножиною множини

$$\{f : \Sigma^n \rightarrow \{0,1\} : f(x) = P(x_{i_1}, \dots, x_{i_k}) \in P$$

для $i_1, \dots, i_k \in [n] = \{1, 2, \dots, n\}$.

(Якщо $\Sigma = \{0,1\}$, то підіндекс будемо опускати.)

Значення екземпляра $I \in CSP_{\Sigma}(P)$ (позначення $val(I)$)

визначається як $\frac{1}{|I|} \max_{x \in \Sigma^n} |\{f \in I : f(x) = 1\}|$.

Означення 2. Для $k \in N, \Sigma$ скінчених та $P \subseteq \Sigma^k \rightarrow \{0,1\}$ визначимо сімейство предикатів згенерованих P (позначення $\langle P \rangle$) як множини

$$\{P' : \Sigma^k \rightarrow \{0,1\} : \exists P' \in P, \sigma_1, \dots, \sigma_k \in \Sigma : P(x_1, \dots, x_k) = P'(x_1 + \sigma_1, \dots, x_k + \sigma_k)\},$$

де $\Sigma = \{0, 1, \dots, |\Sigma| - 1\}$ і додавання виконується по модулю $|\Sigma|$.

Нехай $MAX\ k-CSP(P)$ довільна $CSP(P)$ задача. Нехай I є довільний екземпляр задачі, екземпляр I' задачі $MAX\ k-CSP(P)$ отримується з екземпляра I додаванням довільного обмеження $P' \notin P$. Визначимо реоптимізаційний варіант задачі $MAX\ k-CSP(P)$.

Задача $Ins-MAX\ k-CSP(P)$. Вхідні дані. Довільний екземпляр I задачі $MAX\ k-CSP(P)$, x^* є оптимальний розв'язок екземпляра I .

Результат. Знайти оптимальний розв'язок екземпляра I' (отриманого виходячи з I , як описано вище) задачі $MAX\ k-CSP(P)$, використовуючи x^* .

Мета. Знайти x , який максимізує число виконаних обмежень екземпляра I' .

Означення 3. (Цілочислового розриву). Цілочисловий розрив максимізаційної задачі Π визначається як:

$$\alpha_{\Pi} = \sup_{I \in \Pi} \left\{ \frac{OPT_{R_{\Pi}}(I)}{OPT_{\Pi}(I)} \right\}, \text{ де } OPT_{\Pi}(I) \text{ є оптимальний}$$

розв'язок екземпляра I задачі Π , $OPT_{R_{\Pi}}(I)$ є оптимальним розв'язком екземпляра I релаксації R_{Π} задачі Π . Для мінімізаційної задачі Π береться супремум оберненого відношення.

Використовуючи UGC, гіпотезу $P \neq NP$ та ієрархію напіввизначених релаксацій вдалося отримати такий результат.

Теорема 1.[1]. Припустимо, що має місце унікальна ігрова гіпотеза (UGC). Нехай Z – довільна $MAX\ k-CSP(P)$ задача з цілочисловим розривом

$$\alpha_z = \sup_{I \in Z} \left\{ \frac{SDP(I)}{OPT(I)} \right\} \text{ і } k = const, \text{ тоді для задачі}$$

$Ins-MAX\ k-CSP(P)$ (реоптимізація $MAX\ k-CSP(P)$) існує поліноміальний $\psi(\alpha_z)$ -наближений оптимальний алгоритм, де $\psi(\alpha_z) = \frac{1}{2 - \alpha_z}$.

II. ІЄРАРХІЇ РЕЛАКСАЦІЙ

Відомо, що обчислення (оцінка) цілочислових розривів опуклих релаксацій (LP або SDP) оптимізаційних задач сама по собі є складною задачею. Згідно схеми загального методу релаксації спочатку задачі формулюються у вигляді цілочислових задач лінійного програмування (IP). IP потім конвертуються в LP (LP-релаксація) або в SDP (SDP-релаксація). Потім здійснюється заокруглення. Якщо, наприклад, розв'язується максимізаційна задача, для якої істинний оптимум є OPT , опукла релаксація дає розв'язок $FRAC$, який не менший ніж OPT (цілочисловий розв'язок є допустимим опуклим розв'язком). Алгоритм заокруглення, використовуючи розв'язок опуклої релаксації зі значенням цільової функції $FRAC$, дає цілочисловий розв'язок зі значенням $ROUND$.

Аналіз алгоритму потім зводиться до аналізу цих трьох величин, які задовольняють нерівності $ROUND \leq OPT \leq FRAC$.

Для максимізаційної задачі цілочисловий розрив визначається як супремум відношення $FRAC/OPT$ (згідно означення 3) по всім екземплярам задачі. Цілочисловий розрив в цьому випадку не менший 1 і «великий» розрив характеризує «погану» якість наближення. Оцінюючи відношення $FRAC/ROUND$, отримуємо оцінку зверху для цілочислового розриву.

Важливим є отримання нижніх оцінок цілочислового розриву. Одним із підходів є застосування ієрархій релаксацій Ловаша-Схрейвера, Шералі-Адамса і Лассерра [1]. Наведемо коротко підхід ієрархії релаксацій Ловаша-Схрейвера. Ловаш і Схрейвер (Lovasz and Schrijver) описали метод, відомий як $LS(LS_+)$, посилення (tightening) LP-релаксацій цілочислових 0/1 програм. Метод додає додаткові змінні і допустимі нерівності до LP-релаксацій (причому це можна робити кілька разів послідовно) для отримання послідовності (ієрархії) все більш жорстких релаксацій. Метод, названий Ловаша-Схрейвера ієрархією опуклих релаксацій, дає жорсткі і ефективно розв'язувані релаксації. Для LP-релаксації K позначимо $N(K)$ релаксацію, отриману застосуванням LS методу і $N^k(K) = N^{k-1}(N(K))$ релаксацію, отриману застосуванням k раз ($k > 1$) методу LS (або за прийнятою термінологією k раундів або рівнів LS). Якщо початкова лінійна програма K має n змінних і $poly(n)$ обмежень, тоді можливо знайти оптимальний розв'язок $N^k(K)$ за час $n^{O(k)}$, який поліноміальний для $k = const$ і субекспоненціальний для $k = o(n/\log n)$. Ловаш і Схрейвер показали, що $N^k(K)$ забезпечує всі допустимі лінійні нерівності k -кортежів змінних і, зокрема, $N^n(K)$ містить тільки опуклі комбінації допустимих цілочислових розв'язків. Таким чином, опукла програма, отримана після n раундів ієрархії Ловаша-Схрейвера має цілочисловий розрив 1, тобто дає точний розв'язок. Метод LS_+ – більш сильний, оскільки в ієрархії можливі не тільки LP-релаксації, але й SDP-релаксації.

III. ОПИС ЙМОВІРНІСНИХ СИСТЕМ ПЕРЕВІРКИ ДОВЕДЕНЬ

Наведемо формальні означення [1]. Будемо визначати системи доведень з допомогою властивостей перевіряючого. Для перевірки тверджень перевіряючому потрібні помічники, будемо вважати, що він має доступ до одного або більше оракулів. У багатьох варіантах систем доведень обговорюються поняття осіб, що доводять (proovers, прувери) і записаних доведень. Записані доведення еквівалентні доведенням, що використовують оракули, де зчитування i -ого біта відповідає питанню « i ?» до оракулу. Взагалі кажучи, прувери більш могутні, ніж оракули, оскільки можуть бути випадковими й історично залежними.

Означення 4. Оракул є функція $\Sigma^* \rightarrow \{0,1\}$ (де Σ^* – множина скінченних рядків в алфавіті Σ).

Типовий перевіряючий $V^\pi(x,r)$ є ймовірнісна машина Тюрінга (РТМ), де π – оракул, x – введення, а r – внутрішня випадкова стрічка. Кажуть, що перевіряючий приймає, якщо він виводить 1 ($V^\pi(x,r)=1$), в протилежному випадку він відкидає.

Означення 5. Нехай c і s дійсні числа, такі, що $0 \leq s < c \leq 1$. Поліноміальна ймовірнісна машина Тюрінга V є перевіряючий в ймовірнісній системі перевірки доведень (РСР-системі) з повнотою c і коректністю s для мови L тоді і тільки тоді, коли для $x \in L$ існує оракул π , такий, що $\Pr_r[V^\pi(x,r)=1] \geq c$; для $x \notin L$, для всіх π виконується нерівність $\Pr_r[V^\pi(x,r)=1] \leq s$.

Означення 6. Перевіряючий V використовує логарифмічну випадковість, якщо існує абсолютна константа c , така, що для кожного входу x і доведення π довжина випадкового рядка r , який використовує V^π , оцінюється зверху як $c \log|x|$.

Означення 7. Перевіряючий V читає c біт в РСР-системі, якщо для кожного результату випадкових випробувань і кожного доведення π , перевіряючий V^π задає не більше c питань оракулу.

Теорема 2 (РСР-теорема) [1]. Існує універсальне ціле c , таке, що мова в NP має РСР-перевіряючого V з коректністю $\frac{1}{2}$ та повнотою 1, де V використовує логарифмічну випадковість і читає не більше c біт в доведенні.

Теорема 3 (варіант РСР-теорема) [1]. Нехай L – мова в NP і x – рядок. Існує універсальна константа $c < 1$, така, що за час поліноміальний відносно $|x|$ можна сконструювати $E3$ - CNF формулу $\varphi_{x,L}$, таку, що якщо $x \in L$, то $\varphi_{x,L}$ – виконувана; якщо $x \notin L$, то $\varphi_{x,L}$ не більше, ніж c – виконувана. Більше того, кожна змінна зустрічається рівно 5 разів.

IV. ГІПОТЕЗИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основна гіпотеза дослідження – це основна гіпотеза сучасної теоретичної інформатики відносно співвідношення по включенню основних класів складності задач, а саме $P \neq NP$. Відмітимо, що більшість спеціалістів теоретичної інформатики вважають цю гіпотезу істинною. Якщо це не так (тобто $P = NP$), то більшість результатів сучасної теоретичної інформатики (і теорії складності обчислень) втрачають свій зміст.

Ще одна гіпотеза – це так звана унікальна ігрова гіпотеза (Unique Games Conjecture, UGC) [1]. Вона є деяким посиленням РСР теореми і була запропонована для доведення результатів з неапроксимованості, де не

підходить РСР теорема. Грубо цю гіпотезу можна сформулювати так. Заданий дводольний граф G , велика константна множина міток $[M]$, перестановка $[M]$, записана на кожному ребрі, розглядається задача знаходження міток вершин (маркування вершин) графа G з $[M]$ так, щоб задовольнялась (виконувалась) кожна перестановка на ребрі. Гіпотеза полягає в тому, що якщо M достатньо велика константа, то являється NP -складним відрізати екземпляри, де 99% реберних перестановок виконуються, від екземплярів, де 1% реберних перестановок виконуються. Сформулюємо гіпотезу більш точно[1].

Для спрощення роботи UGC часто формулюється з допомогою унікальної задачі покриття мітками (Unique Label Cover problem, ULC).

Означення 8. Унікальна задача покриття мітками (ULC) $L(V,W,E,[m],\{\sigma_{v,w}\}_{(v,w) \in E})$ визначається так: заданий дводольний граф з лівими вершинами V і правими вершинами W , і множина ребер E . Мета полягає в тому, щоб приписати мітку до кожної вершини графу, де $[m]$ – множина допустимих міток. Маркування повинно виконувати (задовольняти) обмеження, задані взаємно-однозначними відображеннями (бієкціями) $\sigma_{v,w} : [m] \rightarrow [m]$. Є одне таке відображення для кожного ребра $(v,w) \in E$. Маркування виконує (задовольняє) ребро (v,w) тоді і тільки тоді, коли $\sigma_{v,w}(label(w)) = label(v)$. Оптимальне значення OPT задачі ULC визначається як максимальна доля ребер, що виконується довільним маркуванням.

Гіпотеза 1. Варіант унікальної ігрової гіпотези (UGC, [1]). Для довільних $\eta, \gamma > 0$ існує константа $m = m(\eta, \gamma)$, така, що являється NP -складним розрізняти чи ULC задача з розміром m множини міток має оптимум не менший, ніж $1 - \eta$ або не більший, ніж γ .

Якщо перейти до розривних версій задач, то гіпотеза стверджує, що $GapULC_{1-\eta,\gamma}$ являється NP -складною.

V. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Ієрархія Шералі-Адамса визначає ієрархію лінійних програм і є розширенням LS процедури. Ієрархія Лассерра є послідовність «зростаючих посилень» релаксацій напіввизначеного програмування. В даних тезах використовується ієрархія напіввизначеного програмування методу суми квадратів (Sum of Squares semidefinite programming hierarchy) або SOS ієрархія, а також ієрархія Шералі-Адамса [3,4,5]. Завдяки цьому буде справедлива теорема 1 з заміною UGC на загальновідому гіпотезу теорії складності обчислень $P \neq NP$. Будемо говорити [5], що k -місний предикат $P \in \langle P \rangle$ підтримує розподіл попарної незалежності μ на $[q]^k$, якщо $\forall j \in [q] \forall i \in [k] \Pr_{x \in [q]^k, \mu} [x_i = j] = 1/q$ і для довільних $1 \leq i \neq j \leq k$ та для всіх $a, b \in [q]$ слідує, що

$\Pr_{x \in \{q\}^k, \mu} [x_i = a, x_j = b] = 1/q^2$. Використовуючи результати з [3,4,5] отримаємо.

Теорема 4. Припустимо, що $q=2$ і предикат $P: \{0,1\}^k \rightarrow \{0,1\}$ з $\langle P \rangle$ підтримує розподіл попарної незалежності μ на $\{0,1\}^2$, Нехай Z – довільна MAX $k-CSP(P)$ задача з цілочисловим розривом $\alpha_Z = \sup_{I \in Z} \left\{ \frac{SDP(I)}{OPT(I)} \right\}$, тоді для задачі $Ins - MAX$ $k-CSP(P)$ існує поліноміальний $\psi(\alpha_Z)$ -наближений оптимальний алгоритм, де $\psi(\alpha_Z) = \frac{1}{2-\alpha_Z}$ і $\alpha_Z = \frac{P^{-1}(1)}{q^k}$.

Теорема 5. Припустимо, що предикат $P: \{0,1\}^k \rightarrow \{0,1\}$ з $\langle P \rangle$ підтримує розподіл попарної незалежності μ на $\{0,1\}^q$, Нехай Z – довільна MAX $k-CSP(P)$ задача з цілочисловим розривом α_Z , тоді для задачі $Ins - MAX$ $k-CSP(P)$ існує поліноміальний $\psi(\alpha_Z)$ -наближений оптимальний алгоритм, де $\psi(\alpha_Z) = \frac{1}{2-\alpha_Z}$ і $\alpha_Z = \frac{P^{-1}(1)}{q^k}$ отримається з допомогою cn рівнів ієрархії напіввизначеної релаксації Шералі-Адамса

Теорема 6. Для довільного $\varepsilon > 0$ і $P: \{\pm 1\}^k \rightarrow \{0,1\}$, якщо існує попарно незалежний розподіл μ підтримуваний на $P^{-1}(1)$, тоді існує $\delta > 0$ таке, що для всіх $n \in$ множина $I = \{C_1, \dots, C_m\}$ k -кортежів літералів над x_1, \dots, x_n така, що

$$\text{Для довільного } x \in \{\pm 1\}^n \ E_{C \in I} P(C(x)) \leq \frac{|P^{-1}(1)|}{2^k} + \varepsilon.$$

Значення степені δn SOS релаксації для долі обмежень I , що виконується, рівне 1.

Для задачі $Ins - MAX$ $k-CSP(P)$ існує поліноміальний $\psi(\alpha_Z)$ -наближений оптимальний алгоритм, де $\psi(\alpha_Z) = \frac{1}{2-\alpha_Z}$ і $\alpha_Z = \frac{P^{-1}(1)}{2^k}$ отримується з допомогою ієрархії степені δn SOS релаксації.

VI. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОБРОБКА ДАНИХ

Для того, щоб провести автоматичний аналіз даних, використовується **Data Mining** (здобич (витягання) знань) [6]. Це нова технологія інтелектуального аналізу даних з метою виявлення прихованих закономірностей у вигляді значущих особливостей, кореляцій, тенденцій і

шаблонів. Сучасні системи здобичі даних дозволяють знаходити розчинену в терабайтних сховищах не очевидну, але вельми цінну інформацію.

Відомо [1], що якщо цілочисловий розрив задачі рівний α_Z , то існує поліноміальний алгоритм з відношенням апроксимації α_Z для її розв'язання. Розглянута серія теорем (теореми 1, 4, 5 та 6) дає змогу в реоптимізаційному варіанті отримати для незначно модифікованих задач поліноміальні алгоритми з відношенням апроксимації $1/(2-\alpha_Z)$, що більше від α_Z (звичайно, при $\alpha_Z \neq 1$). При цьому ці алгоритми є непракращеними та поліноміальними (пороговими, оптимальними) при прийнятті загально відомих гіпотез теорії складності обчислень. Таким чином, даний підхід дає змогу використати Data Mining (що в даному випадку представляє собою точний розв'язок задачі, отриманий тим чи іншим методом) для рзв'язання цілого сімейства задач із значно кращою якістю наближення.

ВИСНОВКИ

Як відомо хмарні обчислення виникли як логічна еволюція інформаційних технологій (ІТ) [6,7]. Рівень Data Mining надає спосіб, яким знання придбане, використовується, знайдено, опубліковано, щоб допомогти користувачам досягати своїх специфічних цілей. Тут знання подаються як інформація, застосована для досягнення мети, вирішення проблеми або прийняття рішення.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Михайлюк В.О., Сергієнко І. В. "Постооптимальний аналіз та наближені алгоритми реоптимізації для задач дискретного програмування", Київ: Наукова думка, 2015. 248 с.
- [2] Bockenhauer H.-J., Hromkovic J., Momke T., Widmayer P. "On the hardness of reoptimization." in SOFSEM, Lecture Notes in Computer Science, V. Geffert, J. Karhumaki, A. Bertoni etc. (eds.), Springer, 2008, vol. no. 4910, pp. 50 – 65.
- [3] Ghosh Mrinalkanti, Tulsiani Madhur, "From weak to strong LP gaps for all CSPs." [Online]/Electronic Colloquium on Computational Complexity, 2016. Revision 1 of Report No 117. 29 p. Available: <http://eccc.hpi-web.de>.
- [4] Boaz Barak, Siu On Chan, and Pravesh K. Kothari. "Sum of squares lower bounds from pairwise independence" in Proceedings of the forty-seventh annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC), 2015, pp. 97–106.
- [5] Siavosh Bannabas, Konstantinos Georgiou, Avner Magen, and Madhur Tulsiani. "SDP gaps from pairwise independence", Theory of Computing. 8(12), pp. 269–289, 2012.
- [6] Andrei Furda, Colin Fidge, Alistair Barros, Olaf Zimmerman, "Reengineering data-centric information systems for the cloud – a method and architectural patterns promoting multitenancy", in Software Architecture for Big Data and the Cloud, ed. By Ivan Mistrik, Rami Bahsoon, Nour Ali, etc., Cambridge, United States, Elsevier, 2017, CH XIII, Part 3, pp.227 – 251.

A System for Determining the Rheological Characteristics of Marine Technical Liquids

Vitalii Nikolskyi

National University "Odessa maritime academy"
dept. of Theory of automatic control and
computer technology
Odessa, Ukraine
prof.Nikolskyi@ukr.net

Mark Nikolskyi

National University "Odessa maritime academy"
dept. of of Automation of Vessel Gas Turbines
and Diesel Installations
Odessa, Ukraine
markdezert@ukr.net

Kyrylo Berezhnyi

National University "Odessa maritime academy"
dept. of Theory of automatic control and
computer technology
Odessa, Ukraine
90demon777@ukr.net

Oleg Bloshenko

National University "Odessa maritime academy"
dept. of Theory of automatic control and
computer technology
Odessa, Ukraine
prtfnx@gmail.com

Abstract—Ship's technical fluids (heavy fuel oil and lubricating oil) when operating diesel engines are considered as "Newtonian" and when operating on nominal revolutions are guided by kinematic viscosity. When bunkering the vessel, a technical passport with one value of kinematic viscosity and density is provided on them. In recent years, cases of operation of the main engines at the turning points, which are half the par value, have become more frequent.

When located in the gaps of tribotechnical units of diesel engines, ship's technical fluids manifest themselves as "non-Newtonian" with the effect of thixotropy. Not taking into account these properties increases the wear of elements of fuel equipment and bearings. This leads to an increase in accidents and operating costs. The negative effect is amplified in the maneuverable mode of the diesel engine with a sharp variation in the load characteristics and, consequently, a sharp change in the viscosity coefficients.

We have created a computer system that includes a submersible probe rheometer with a piezoelectric drive. The novelty of the system is the possibility of its use in the complex analysis of "non-Newtonian" liquids and the study of the effect of thixotropy in real time. Existing ship's stationary laboratories do not allow for detailed analyzes.

Keywords—"non-Newtonian" thixotropic fluid; tribotechnical unit; computer system; rheological characteristics; viscosensor with piezoelectric drive

I. INTRODUCTION

In recent years there are two trends in the operation of ship diesel engines: the use of two kinds of fuel - fuel and heavy gas; continuous operation at partial loads.

Ship technical liquid (cylinder and lubrication oils, heavy fuel oil) arrive in the clearances of diesel engines movable parts and the fuel injection equipment, which gaps constitute

10-25 microns and experience deformation leading to change in their properties [1, 2, 3]. They behave like thixotropic liquids [3]. At the same time, when bunkering a vessel for oil and fuel, a passport is issued, which indicates a number of parameters and, in particular, one kinematic viscosity value corresponding to the nominal operating mode of the internal combustion engine.

"Viscosensor" viscosity regulators are widely used on vessels, the work of which is based on the vibrational method. They consist of two parts: on one controller a viscometer is made; on the second - the viscosity regulator.

However, the operation of the ICE is not limited to the nominal mode (clear passage). A significant part is the maneuvering regimes (mooring operations, narrow passage, drift). In such modes reverses alternate with start, acceleration and braking of ICE. Changing the load on the motor during the excitement also leads to a change in the shear strains that the liquids experience. The failure statistics of the ICE elements and nodes indicate that most of the failures in operation occur precisely in the maneuvering operating modes. Measuring probes of ship viscometers [4] do not allow covering the entire range of shear deformations.

In [5] a computer system for determining the rheological characteristics of marine technical fluids in laboratory conditions is presented, which includes: measuring probe, the operation of which is based on the method of coaxial cylinders, with a drive on a linear piezoelectric actuator (LPA) [6]; programmable logic controller (PLC) from the company Phoenix Contact series ILC 151 [7] from the TATU SmartLab [8]; software based on functional blocks from the standard library of the integrated project development environment [9, 10].

The computer system tests revealed deficiencies in the use of accessories made on a 3-D printer and software that allows

measurements at 4 speeds at the same temperature.

In order to use such a system on the ship, it is necessary to synchronize with the operation of the internal combustion engine and to connect to the steam supply actuator for heating the heavy fuel oil.

II. PURPOSE OF WORK

The purpose of the study is to modernize the computer system that takes into account the operational features of technical marine fluids in diesel: the temperature range; needle nozzle speed; thickness of the gap in the tribotechnical unit.

III. CONTENTS AND RESULTS OF THE RESEARCH

We suggest upgrading the system, which includes a temperature control unit and software for reading data in real "hard" time and transferring data to an array followed by processing and transmission to the human machine interface (HMI) (Fig. 1), where 1 is a container with a heating element to create conditions testing of technical fluid, close to the temperature conditions of ICE; 2 - immersion nozzle; 3 - test liquid; 4 - measuring probe; 5 - reversible linear piezoelectric engine LPE-5; 6 - sensors for fixing the movement of the motor guide; 7 - ILC 150 GSM / GPRS controller (PLC) and WP 04T touch screen WEB-panel [11] with a user-friendly interface that is used as a real-time monitor; 8 - single-phase full-wave thyristor voltage converter for regulating the actual voltage on the heating element; 9 is a rotary piezoelectric actuator (RPA) [12], which rotates the coupled resistor and performs two functions.

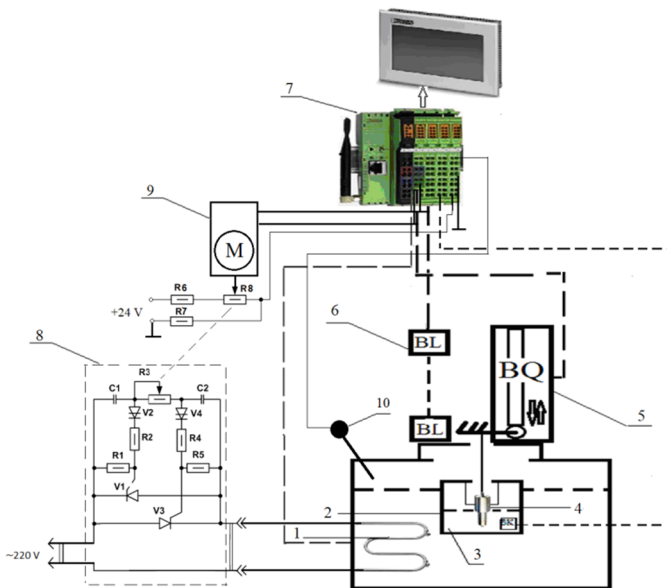


Fig. 1. Functional scheme of computer system

First, set the moving speed of the movable part of the measuring probe and measure the time intervals between two points. The second is the temperature control of the liquid to be tested. 10 - temperature sensor. R3, R8 - paired resistor, which, on the one hand, sets the control angle of the thyristor converter, and, on the other hand, it performs the function of the rotor angle sensor of the LPE.

Software for the controller is developed with the help of PC Worx. For the subsequent processing and visualization of the data, the programs Visu +, Microsoft Excel using MS ACCESS database were used.

When programming, it was taken into account that the controller operates in the "real hard time" mode. He performs a consecutively infinite cycle of performing all the specified operations. To prevent collisions of data processing, a "semaphore" system was used, described below.

The task of the controller software is to control the piezoelectric motor and measure the time of the cylinder passing through the liquid. The engine moves the cylinder in the fluid at speeds corresponding to the nozzle needle speeds. Measuring the travel time of a cylinder of a given segment at different engine speeds and fluid temperatures, it is possible to construct a rheological characteristic.

The project was carried out from the calculation of the engine speed change in 6 modes. The cylinder has two moves - from top dead center (TDC) to bottom dead center (BDC) and from BDC to TDC. And these movements can occur at different speeds due to the structural features of the cylinder. To take this condition into account, the time is measured in 12 modes (2 per speed mode). The temperature varies in 13 modes. As a result, you need to get 156 values.

To structure the received data, the type of variables "array" was used. It is declared in the data types in the "Arrays" file (Fig. 2). A total of 12 arrays have been created to record 12 speed modes. Each array contains 13 integer values, for each temperature mode.

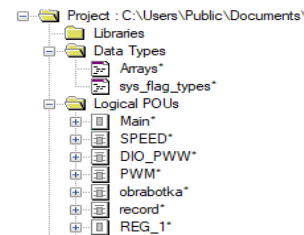


Fig. 2. Project tree

The main function block Main consists of blocks in the language FDB and separate blocks in the language ST (Fig. 3). The SPEED unit generates a piezoelectric motor control signal at a predetermined rate. The DIO_PWW block locks the cylinder's travel time from one end position to the other. The PWM unit generates a digital pulse width modulation signal. The record block forms and fills the array. The obrabotka block processes arrays to construct a rheological characteristic.

Variables $I_{0_1_1_1}$ and $I_{0_1_1_2}$ indicate the position of the cylinder, TDC and BDC, respectively. When you start work (translating the value of the variable Start to 1) and the cylinder reaches one of the boundary positions, a signal is generated to one of the CTU_1 or CTU_2 counters. Each of them sends a signal to control the engine in one of the speed modes, from 1 to the value of the variable SET_01, which is equal to 6 in this study (Fig. 4).

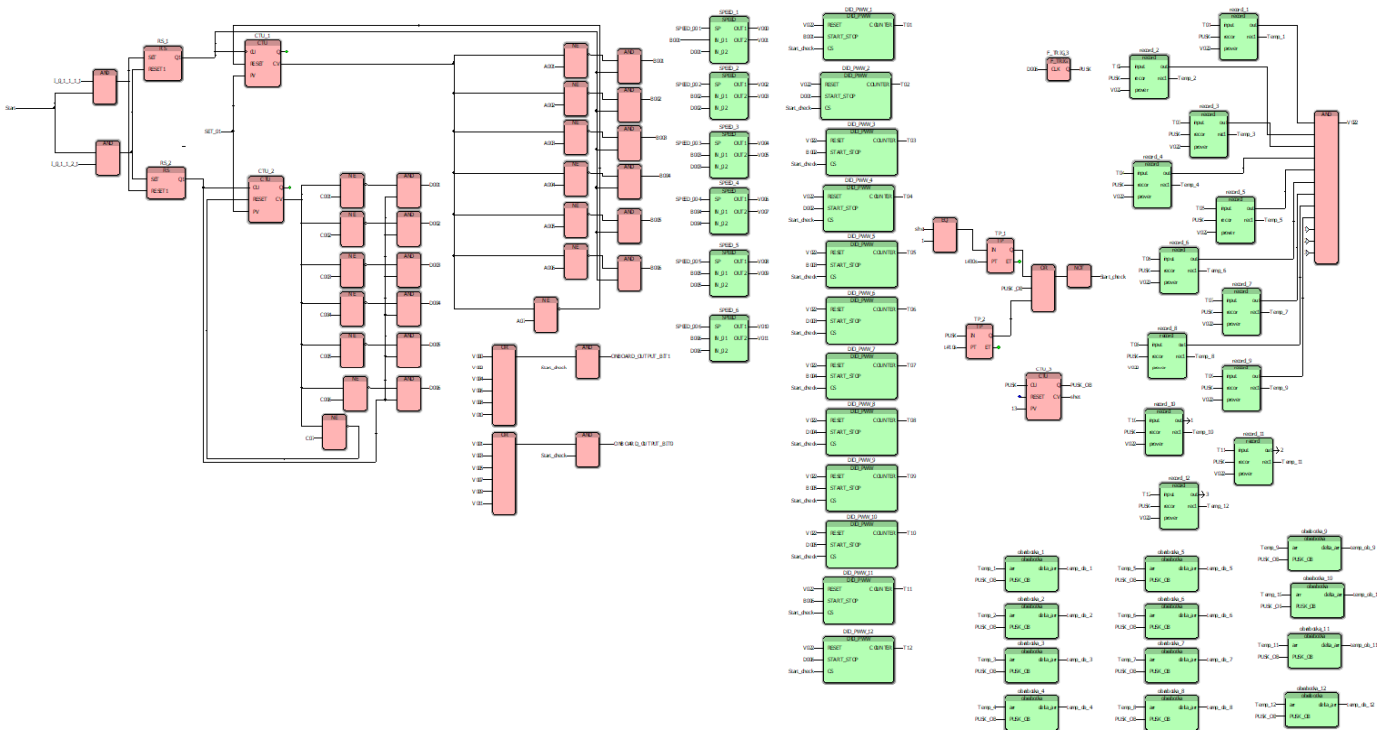


Fig. 3. Function block diagram Main

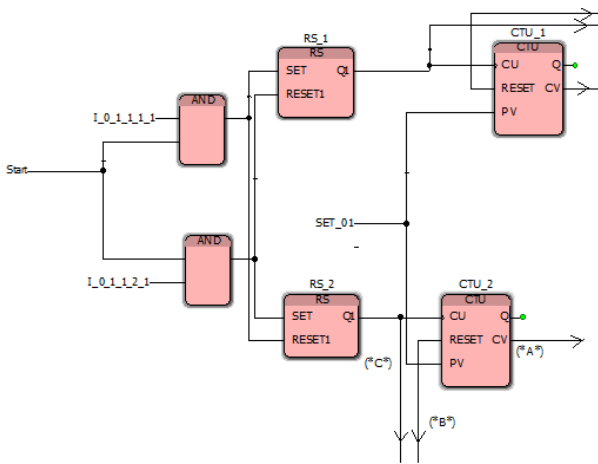


Fig. 4. Running and determining the position of the cylinder

In Fig. 5, depending on the pass number (compare the value of the variable C00 (1-7) and the counter value), a control signal is applied to the variable D00 (1-6) corresponding to the specific speed mode. Similarly for the counter CTU_1, giving the control signal to the variable B00 (1-6).

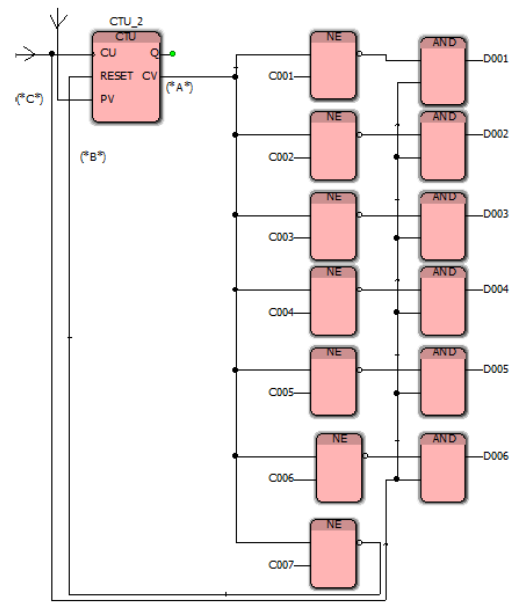


Fig. 5. Control of cylinder strokes at different speeds

In the variables SPEED_00 (1-6), the speed of the linear motor is set. The output of V000 (Fig. 6) corresponds to the movement of the cylinder down, and V001 to the movement of the cylinder upward. Similarly for the remaining blocks SPEED_ (2-6)

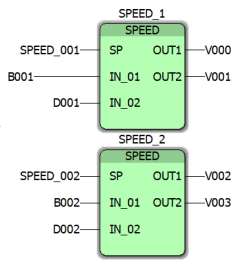


Fig. 6. Control and setting the cylinder speed

The PWM is made in the structural language of ST and generates a signal using the Pulse Width Modulation, which in the FB Speed (Fig. 7) generates the final signal to the piezoelectric motor, depending on the control signal. The controller performs one cycle of its work in 1 ms. Hence, at a frequency of 100 Hz, the speed can be changed in 10 modes.

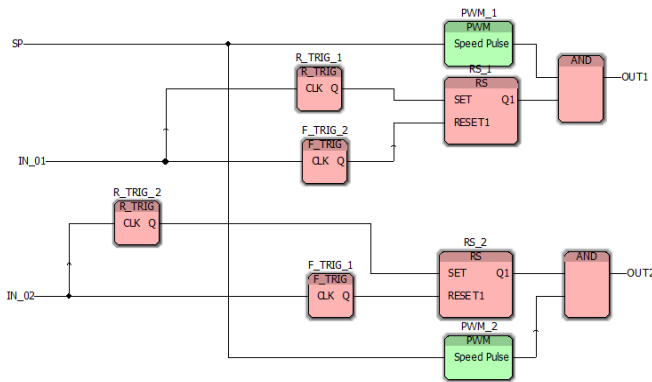


Fig. 7. FB(functional block) Speed

The variable ONBOARD_OUTPUT_BIT1 and ONBOARD_OUTPUT_BIT0 (Fig. 8) controls the motion of the piezo motor down and up respectively. The variable Start_check sets the engine to "pause".

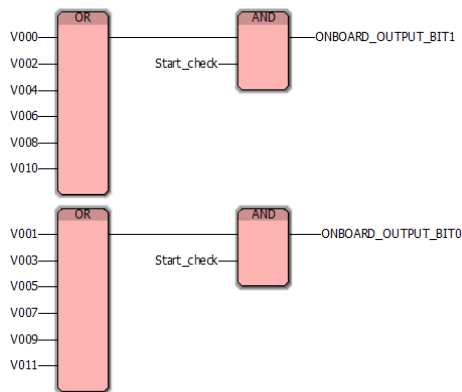


Fig. 8. Control of signal supply to engine movement

The variable V022 (Fig. 9) clears the variables T0 (1-12). B00 (1-6) and D00 (1-6) are the control signals that determine the movement of the cylinder. The variable Start_check stops the movement of the cylinder, and, accordingly, the counter is placed on the "pause". The time of motion of the cylinder is recorded in the variable T0 (1-12). Similarly for the remaining

DIO_PWW_ (3-12).

TP_4 generates a periodic sequence of pulses with a period of the specified variable V005, which are counted by the counter CTU_1. The control is performed by the control signal of variable START_STOP and CS.

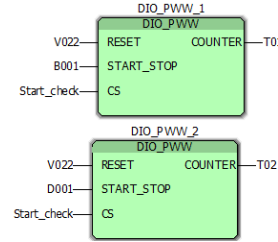


Fig. 9. Record the time of movement of the cylinder from the extreme positions

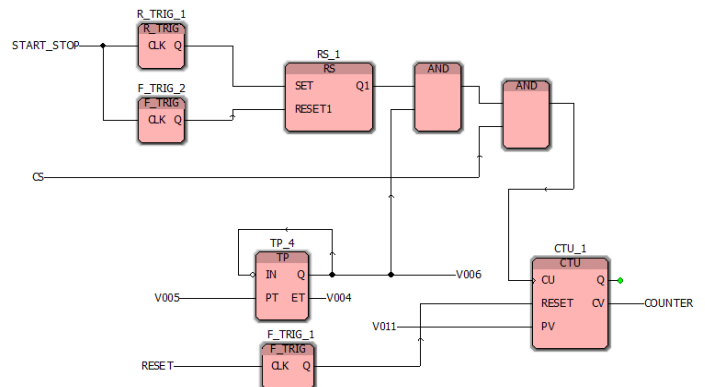


Fig. 10. FB DIO_PWW

After the 6-speed cylinder passes the CTU_1 and CTU_2 counters are reset and the values of T0 (1-12) are written into arrays (Fig. 11)

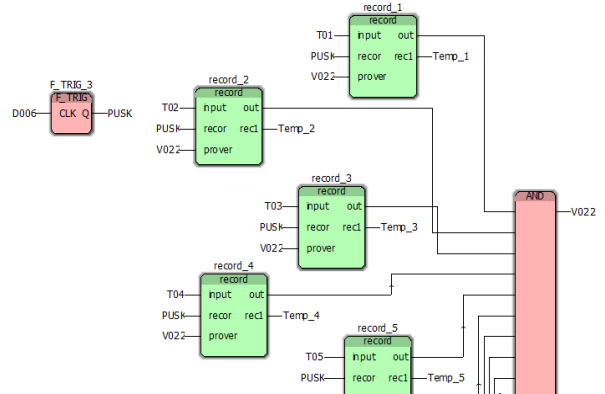


Fig. 11. Recording information in an array and managing synchronization

The F_TRIG_3 block translates the value of the PUSK variable to 1 when the cylinder completes the movement up in the sixth speed mode.

When translating the PUSK variable to 1, a control signal is applied to the blocks record_ (1-12). The program has input variables: Input - the time to be written; recor - control signal; prover is a semaphore. With its value 1, the work stops.

Output: out is a variable that takes the value 1 when the time recording ends. When out of all the blocks record_ (1-12) takes the value 1, the semaphore V022 takes the value 1, blocking the operation of the block. This is necessary to synchronize the recording of values; rec1 is an array containing time values for one speed mode.

Internal: step - initial value 1, determines the index of the array in which the time is written, is equal to the iteration number of the measurements.

The engine may overheat during operation. For this, pauses are introduced between the full passages of the cylinder for all 6 speeds (Fig. 12).

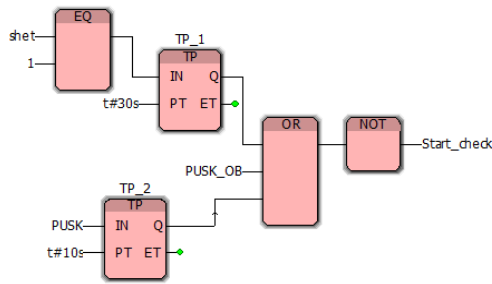


Fig. 12. Organization of a pause of the engine between the passages of the cylinder

TP_1 and TP_2 form a time pulse translating the variable Start_check to the value FALSE. The engine stops for 30 seconds after the first pass and 10 seconds after each next. The variable PUSK_OB signals the shutdown.

Counter CTU_3 (Fig. 13) counts the number of changes in the PUSK variable. That is, the number of passes of the cylinder for all 6 speeds is counted. The pass number is written to the variable shet, and when 13 is reached, the PUSK_OB variable takes the value 1, passing the control signal to the obrabotka_block (1-12) (Fig. 14).

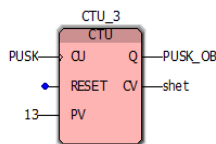


Fig. 13. Calculation of the passage phases of the cylinder at different speeds

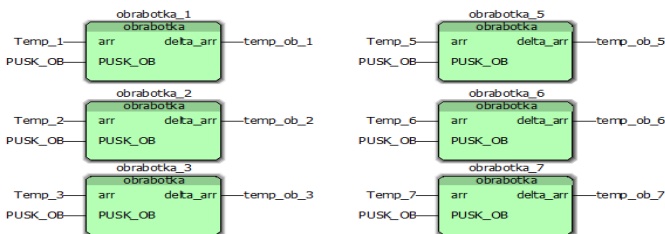


Fig. 14. Processing of received arrays

The program has such input variables: arr - an array with the duration of the piston motion at the same speed level; PUSK_OB is the control signal. Output: delta_arr - processed

array. Internal: i - counter of iterations of the inner loop.

For the construction of a rheological characteristic, a difference between the value at idle and "under load" is necessary, which is calculated by the obrabotka block. The array temp_ob_ (1-12) (Fig. 15) is the result. Each array corresponds to the speed mode, and contains measurements at a nominal value (1 index), and the difference between the mode under load and nominal (2-13 indices).

Variable	Value	Default value	Type	Instance
temp_ob_1			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_1
temp_ob_2			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_2
temp_ob_3			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_3
temp_ob_4			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_4
temp_ob_5			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_5
temp_ob_6			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_6
temp_ob_7			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_7
temp_ob_8			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_8
temp_ob_9			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_9
temp_ob_10			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_10
temp_ob_11			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_11
temp_ob_12			rec	STD_CNFDSTD_RESSTD_TSK.Main.temp_ob_12

Fig. 15. Resulting arrays

The temp_ob_ (1-12) arrays are marked with an OPC check mark in the Variables Worksheet. This makes them available for transfer to the OPC server.

Fig. 16 shows a program for controlling the temperature of a test fluid in FBD language in the range of 30 to 100 ° C. To implement this function, an AI2ME module was added to the Interbus bus. The analog voltage inputs receive information from the temperature sensor (10) (Fig. 1) and the resistor R7, which is paired with the resistor R3 and sets the angle of the thyristor unlocking.

The piezoelectric actuator (9) (Fig. 1) executes the PLC commands to change the angle of rotation R3.

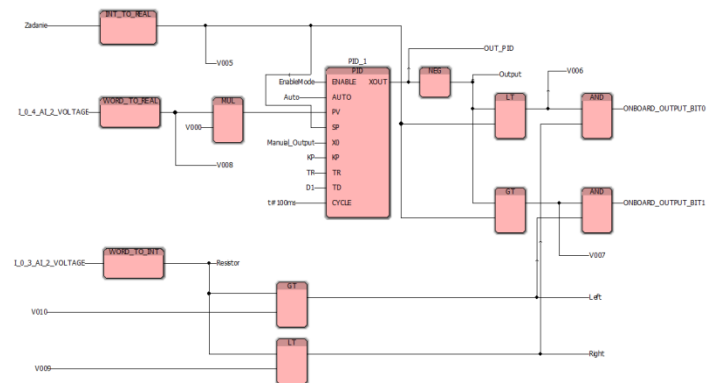


Fig. 16. Temperature controller program

To process and visualize the received data, a connection was established between the controller and the PC through the OPC server "AX OPC-server", the client on the PC for which SCADA is the VISU + system. Through the "ODBC DSN" protocol, the SCADA system supports a real-time database in "MS ACCES". Information from the database gets "Microsoft Excel", in which dependency charts are already being built. The information exchange is shown on Fig. 17.

The upgraded system is universal, it allows you to quickly rebuild from the version for laboratory studies to the viscosity regulator of heavy fuel. The connection of the rotary piezoelectric motor allows testing of the cylinder oil.

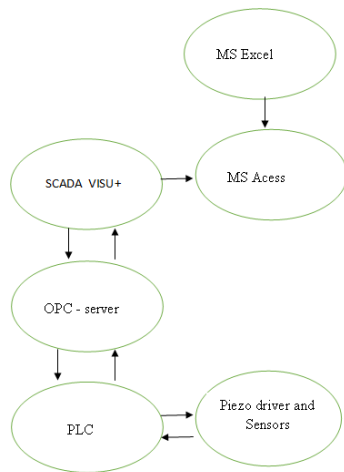


Fig. 17. Scheme of information transfer

During the tests, the data provided in Temp_(1-12) was obtained. This graph (Fig. 18) represents the dependence of the time of passage of the cylinder on the number of the experiment, at different speeds before processing the data and calculating the difference. This is done for clarity. As can be seen from the graphs, at low speeds, deviations reach 10%. At high speeds, graphics are almost linear. This is due to the fact that the software implementation of the pulse width modulation was chosen. To reduce the deviation, it is necessary to use hardware modules, for example the Phoenix Contact IB IL PWM / 2-PAC module, which will significantly increase the accuracy.

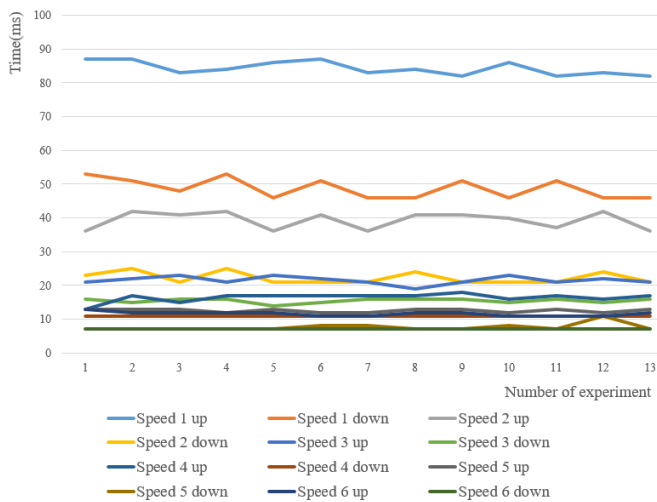


Fig. 18. Chart of the time of passage of the cylinder at different speeds

IV. CONCLUSION

Thus, the task of modernizing the system for determining the rheological characteristics of marine technical fluid has been fulfilled. The processes occurring in the measuring probe correspond to the actual processes in the fuel equipment of the low-speed diesel. However, the nonlinearity of the linear

piezoelectric motor is due to the low carrier frequency of the pulse-width modulation of engine control by software. At ILC 150 GSM/GPRS controllers, the cycle time is at least 1 msec. It has been experimentally established that the carrier frequency of 100 Hz allows for sufficient smoothness of speed change. At a frequency of 100 Hz, one period is 10 ms, and this is 10 cycles to the controller. Therefore, at a discreteness of 1 ms, 10 values of the speed of a linear piezoelectric motor can be provided. But at these speeds, the moving part of the engine at certain speeds does not reach the extreme points, which leads to an increase in the measuring time.

REFERENCES

- [1] Altoiz B. A. Tribological features of boundary lubricating layers of ship fuels and oils / B.A. Altoiz, SA Khanmamedov // Ship power systems: scientific and technical. Sat - 2003. - Issue 9. - P. 80 - 86.
- [2] Khanmamedov S.A. Improvement of the functional properties of the lubrication systems of ship power plants: Dis. ... doc. tech Sciences: 05.08.05. - Nikolayev, 1990. - 382 pp.
- [3] Altoiz B. A. Rotary Viscometer for the Study of Micron Layers / B.A. Altoiz, SK Aslanov, AF Butenko // [Electron resource]. - Mode of access: http://phys.onu.edu.ua/files/journals/fas/articles/42/fas42_altoiz.pdf (Application Date 09.03.2017).
- [4] Nikolsky MV, Berezhniy K.Yu. Software for determining the rheological characteristics of marine technical liquids // Automation of ship's technical equipment: scientific. tech Sat - 2017 - Issue 23. Odessa: NU "OMA". - P. 70 - 76.
- [5] Nikolsky VV Fundamentals of creation of devices of piezoactive mechanics for systems of control of internal combustion engines: diss. dock. tech Sciences: 05/13/05. - Odessa, 2005. - 230 p.
- [6] Nikolsky MV Piezoelectric Viscometer / MV Nikolsky, K.Yu. Berezhnaya // Scientific papers of the BSU them. Peter the Grave. - Series: "Computer Technologies". - Whip 275. - Vol. 287. - Nikolaev, 2016. - P. 60-63.
- [7] Viscometer. - No. 119814; Statement U2017 03735 of 18.04.17. Pubwished 10.10.2017 Bull. No. 19
- [8] Nikolsky VV, Berezhny K. Yu., Nikolsky MV Patent for utility model,
- [9] Gorb SI, Nikolsky VV, Shapo VF, Hnyunin SG Programming controllers in a tool environment: tutorial. - Kharkiv: Publisher of FLP Panov AN, 2017. - 172 p.
- [10] Nikol'skii, VV Computer system for determining the rheological characteristics of ship's technical liquids / VV Nikolsky, K. Yu. Berezhny, MV Nikolsky // Information technologies and computer modeling; Materials of Articles of the International Scientific and Practical Conference, Ivano-Frankivsk, May 15-20, 2017. - Ivano-Frankivsk: 2017 - pp. 261-264.
- [11] Nikolsky MV, Berezhniy K.Yu. Software for determining the rheological characteristics of marine technical liquids // Automation of ship's technical equipment: scientific. tech Sat - 2017 - Issue 23. Odessa: NU "OMA". - P. 70 - 76.
- [12] Training in Automation Technology for Ukraine: TATU Study Book / Collective of Authors including Gorb S., Nikolsky V., Shapo V., Khniunin S. Editors Christian Madritsch and Wolfgang Werth. June 9, 2017 - 211 p.
- [13] Touchpad - WP 04T - 2913632 [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ua?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2913632&library=uauk&pccck=P-14-15-06-09&tab=1> (Application deadline 09.03. 2017).
- [14] Lavrinenko VV, Koval VS, Petrenko SF, Lukin VV, Franchenko R.V. Patent for invention No. 76759 of Ukraine, IPC (2006) H02N 2/00 Piezoelectric motor. - No. 20040110441; Declared December 18, 2003.

Вимірювання Локації Об'єктів за допомогою Сенсорних Мереж

А.С. Дуднік
кафедра мережевих та інтернет технологій
Київський Національний університет імені Т. Шевченка
Київ, Україна
a.s.dudnik@gmail.com

Measuring the Location of Objects Using Sensor Networks

A. Dudnik
Department of network and Internet technologies
Kyiv National Taras Shevchenko University
Kyiv, Ukraine
a.s.dudnik@gmail.com

Анотація— Однією з актуальних задач є визначення місця розташування окремих об'єктів мережі. Неодмінною умовою при експлуатації будь-яких систем моніторингу та контролю є прив'язка даних, зібраних всією системою до географічних координат для відображення зібраної інформації на карті і подальшого аналізу. Крім того, така мережа (на відміну від традиційних радіомереж) за наявності вбудованої підсистеми позиціонування окремих об'єктів може бути розгорнута практично де завгодно з мінімальними витратами. Це може бути зроблено, наприклад, шляхом розкидання об'єктів мережі з літака.

Крім прив'язки отриманих мережею даних в процесі роботи до карти місцевості, інформація про координати об'єктів буде необхідна в процесі функціонування самої мережі (побудова ефективних з точки зору енергоспоживання алгоритмів маршрутизації, збір отриманих даних).

У зв'язку з цим розробка алгоритмів визначення координат об'єктів в сенсорній мережі стає актуальним завданням.

Abstract— One of the topical tasks is to determine the location of individual network objects. An indispensable condition for the operation of any monitoring and control system is the binding of data collected by the system to geographic coordinates for displaying the collected information on the map and further analysis. In addition, such a network (unlike traditional radio networks) in the presence of a built-in subsystem of the positioning of individual objects can be deployed virtually anywhere with minimal costs. This can be done, for example, by scattering objects from the aircraft.

In addition to the binding of the data received in the process of work to the map of the area, information about the coordinates of objects will be needed in the process of functioning of the network itself (building efficient in terms of energy consumption of routing algorithms, collection of data).

In this regard, the development of algorithms for determining the coordinates of objects in the sensor network becomes an urgent task.

Ключові слова— безпроводна сенсорна мережа; вузол; якор; похибка; локалізація; zigbee.

Keywords— sensor networks; node; anchor; error; localization; zigbee.

I. ВСТУП

Невизначеність на відстані призвела до появи методу імовірнісних підходів для обчислення позиції вузла. У імовірнісному підході обчислення позиції не зводиться до одного єдиного пункту, як в інших випадках, але у ряді пунктів є вірогідності того, щоб це буде реальна позиція невідомого вузла.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оцінка відстані імовірнісного підходу змодельована як нормальна випадкова змінна. Коли невідомий вузол отримує пакет від опорного вузла, це може бути у будь-якому місці навколо опорного вузла з імовірністю як зображено на рисунку 1.а. Коли інший пакет отриманий від іншого опорного вузла, невідомий вузол обчислює свою позицію знову як зображено на рисунку 1.б. Коли

нова інформація розташування інших вузлів отримана, тоді стає можливим, щоб ідентифікувати імовірне місце розташування невідомого вузла, як зображено на рисунку 1.в.

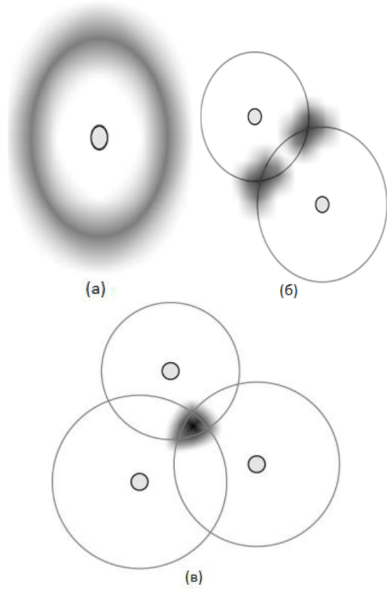


Рис. 1. Імовірнісний підхід

III. [АНАЛІЗ ІМОВІРНІСНОГО ПІДХОДУ]

Основна проблема цього підходу – висока обчислювальна потужність і простір пам'яті. Дослідження цього методу показують, що, якби ми розглядали типовий розмір як матрицю $d \times d$, складність цього методу була б $O(3d^2)$. Вся суть роботи цього(методу полягає в передаванні зібраної інформації до центрального вузла, на якому проводяться обчислення позицій [1].

IV. ОБМЕЖЕННЯ КВАДРАТУ

Метод обмеження квадрату (Bounding Box), використовує квадрати – замість кругів, які використовуються наприклад в методі трilaterації, – обмежуючи можливі положення вузла. Приклад цього методу зображений на рисунку 2.10 [2].

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\frac{\max(x_i - d_i) + \min(x_i + d_i)}{2}, \frac{\max(y_i - d_i) + \min(y_i + d_i)}{2} \right).$$

Незважаючи на похибку цього методу при завершенні обчислення, яка більша, ніж у методі трilaterації, але значно менша кількість ресурсів процесора використовується для обчислення перетину квадратів, ніж обчислення перетину кіл.

V. ОБМЕЖЕННЯ КВАДРАТУ

Відповідно до припущення, що найвірогідніше розміщення вузла – центральна точка серед усіх опорних вузлів, ми можемо обчислити позицію невідомого вузла без потреби оцінки відстаней або кутів, але тільки при використанні методу на основі дальності сигналу.

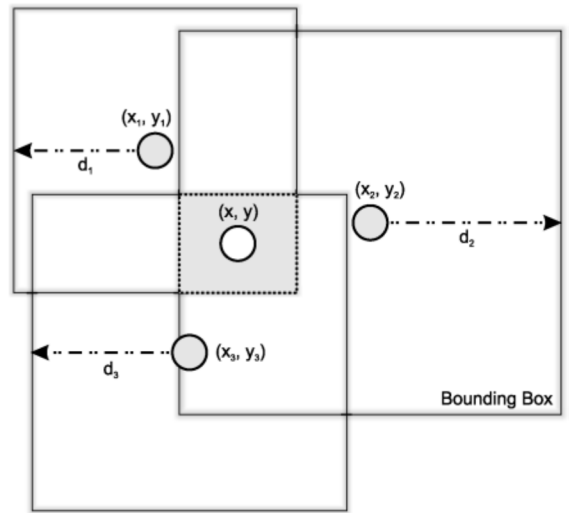


Рис. 2. Метод Bounding Box

Для кожного i опорного вузла, обмежуючий квадрат, визначений як квадрат з центром у позиції цього вузла (x_i, y_i) , із сторонами розміру $2d_i$ (де d – передбачувана відстань), з координатами:

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \text{ та } (x_i + d_i, y_i + d_i)$$

Перетин усіх обмежуючих квадратів може бути обчислений без потреби обчислень з плаваючою комою, беручи максимально низькі і мінімально високі координати усіх зв'язуючих квадратів:

$$\left(\max(x_i - d_i), \max(y_i - d_i) \right) \text{ та } \left(\min(x_i + d_i), \min(y_i + d_i) \right)$$

Отримуємо заштрихований прямокутник який можна побачити на рисунку 2. Позиція невідомого вузла потім обчислюється як центр перетину усіх зв'язуючих квадратів:

В цьому випадку, позиція вузла вичислена при використанні наступного рівняння [28]:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right)$$

де n – кількість опорних вузлів.

Цей метод є найбільш простим з точки зору обчислювальних ресурсів та необхідної інформації. Тільки операції з плаваючою комою (де n – кількість опорних вузлів), обов'язкові для обчислення позиції. З іншого боку,

отримані рішення не точні, головне щоб кількість опорних вузлів була невеликою.

VI. АЛГОРИТМИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ

Алгоритм локалізації – головний компонент системи локалізації. Цей компонент визначає, яким чином будуть використовувати інформацію про відстані та положення об'єктів, щоб обчислити розташування вузлів сенсорної мережі із найменшими помилками.

Алгоритми локалізації класифікуються по таких категоріях:

- розподілені чи централізовані (Distributed or Centralized) Розташування вузлів можуть бути обчислені розподіленим способом вузлами мережі (само позиціонування), або єдиним центральним вузлом (наприклад, більш потужнішим вузлом – маршрутизатором) [3]
- з або без інфраструктури. Якщо немає ніякої потреби в інфраструктурі чи якщо є потреба перепроектувати попередню інфраструктуру, щоб дозволити функціонування алгоритму локалізації (наприклад, ручне розміщення якірних вузлів) [4]
- відносне або абсолютне розташування. Обчислені позиції можуть бути пов'язані з глобальними координатами (наприклад, широта, довгота), або пов'язані з вузлом або пунктом мережі [5]

One Hop або Multi Hop. Якщо всі невідомі вузли мають прямий зв'язок з опорними вузлами або необхідно здійснити декілька переходів по мережі. [6]

Для оцінки продуктивності використовують наступні визначення:

- вартість зв'язку. Визначає складність алгоритму з точки зору обміну пакетами. Він також визначає вартість локалізації системи в сенсорній мережі
- кількість визначених вузлів. Визначає відсоток мережевих вузлів, які змогли обчислити свої

позиції в кінці локалізації алгоритму. В ідеалі потрібно, щоб всі вузли в змозі розрахувати свої позиції, але в багатьох випадках це не можливо

- кількість якірних вузлів. Визначає кількість якірних вузлів для роботи алгоритму локалізації. Якірні вузли, як правило, дорожчі, ніж звичайні вузли, і їх використання повинно бути зведене до мінімуму.

Деякі мережеві характеристики можуть торкнутися продуктивності алгоритму локалізації. Важливо зробити експерименти для кожної запропонованої системи локалізації, щоб оцінити їх поведінку, змінюючи характеристики, які включають:

- щільність мережі. У щільних мережах, невеликі відстані між вузлами, що призводить до зниження помилок в оцінці відстані, а також помилок локалізації системи. Крім того, велике число сусідів призводить до додаткової інформації, яка може бути використана невідомими вузлом щоб краще обчислити його положення
- масштаб мережі. Збільшення кількості вузлів (зберігання і щільність мережі, що збільшує площу) призводить до підвищення кількості хопів. Як правило, велике число хопів призводить до більш неточних розрахунків розташування, підвищення середньої помилки локалізації системи
- кількість якірних вузлів. Розгортаючи більш високе число якірних вузлів маяка в мережі, помилка системи локалізації має тенденцію зменшуватися, і число опорних вузлів має тенденцію збільшуватися
- точність GPS. GPS не дає ідеальної локалізації, особливо в сенсорних мережах. Оскільки більша частина якірних вузлів використовують GPS, щоб отримати свої координати, точність GPS вплине на остаточне положення про помилки локалізації системи, які залежать від цієї послуги.

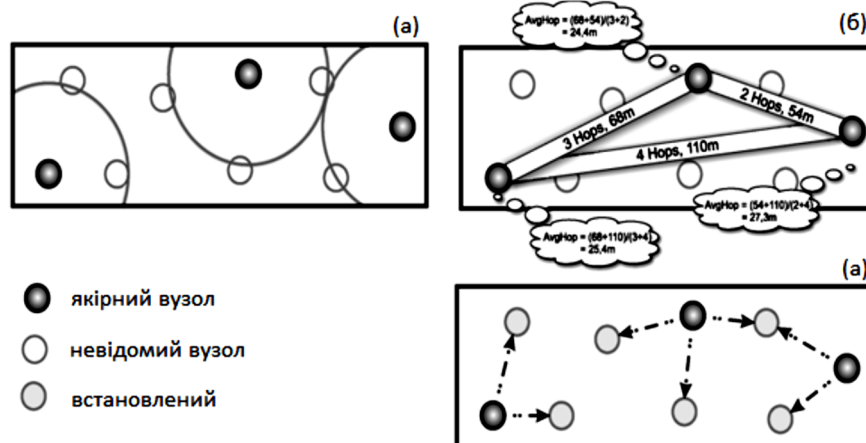


Рис. 3. Метод DV-Hop

VII. СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ В AD НОС

В алгоритмі локалізації Ad Hoc Positioning System (APS), кожен вузол оцінює свою відстань до опорних вузлів в хопів. Як тільки ці відстані оцінені, вузли можуть обчислити свої позиції, використовуючи трилатерацію. Розглянемо два методи: DV-Hop, DV-Distance [7].

У методі DV-Hop якірні вузли в радіусі своєї дії передають серії повідомлень (рисунок 3.а). Працюючи як розширення векторного алгоритму відстані, усі вузли отримують інформацію про розташування усіх якірних вузлів так само як кількість хопів до цих якорів. Коли якірний вузол отримує інформацію позиції від інших якірних вузлів, у нього є достатньо інформації, щоб вчислити середній розмір одного хопу, заснованого на його власній позиції, на позиції інших якірних вузлів, і також на кількості хопів серед них (рисунок 3.б).

Коли невідомий вузол отримує виправлення, він у змозі перетворити його відстань до якірного вузла від кількості хопів у метри (рисунок 3.в).

Метод DV-Distance працює так само як DV-Hop. Але, замість того, щоб поширювати кількість хопів, він поширює передбачувані відстані (наприклад, використовуючи RSSI) і кожен вузол, перш, ніж відправити інформацію позиції якірних вузлів, додає свою передбачувану відстань до того, що містилося в пакеті. В цьому випадку, немає ніякої потреби в коефіцієнті виправлення, тому що відстані до якірних вузлів вже вказані в метрах.

Перевага специфікації система позиціонування Ad Hoc, полягає в тому, що її алгоритм локалізації вимагає невеликої кількості якірних вузлів, щоб працювати. Проте, спосіб, яким відстані передаються, так само як шлях відстані, - перетворений з хопів до метрів в DV-Hop, результати в помилковому обчисленні позиції, збільшують кінцеву помилку локалізації системи.

ВИСНОВКИ

Вибір методу оцінки відстані між вузлами в системі локалізації є важливим коефіцієнтом, який впливає на продуктивність системи. Зазвичай, щоб оцінити точне розташування вузла потрібно використовувати принаймні три оцінки відстані.

Також не мало важливим є вибір методу обчислення позиції. Тому що обраний метод може також впливати на кінцеву продуктивність системи локалізації. Залежно від використовуваного алгоритму локалізації, помилка в обчисленні позиції може завдати шкоди у великий або незначній мірі системі локалізації в цілому. У деяких алгоритмах, наприклад, вузли які були невідомими обчисливши свою позицію розташування використовуються, щоб допомогти іншим невідомим вузлам обчислювати свої позиції. В цьому випадку, маленька помилка в обчисленні позиції може внести великі помилки роботу системи локалізації.

Інформація розташування і відстаней, зібраних вузлом і доступними ресурсами процесора також, обмежує вибір методу, який буде використовуватися.

Алгоритм локалізації - основний компонент системи локалізації. Цей компонент визначає, яким чином інформація, дана від якірних вузлів, за оцінками відстаней, і по обчисленнях позиції, буде управлятися, щоб дозволити інформації про локалізацію розповсюджуватися від якірних вузлів до вузлів мережі.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Sichitiu M., Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon // In Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2004), FL, October 2010. – P. 174–183.
- [2] Simic S., Sastry S. Distributed localization in wireless ad hoc networks. // Technical Report UCB/ERL M02/26, UC Berkeley. – 2003.
- [3] Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice, 4th edition // Springer-Verlag, Berlin. – 2003.
- [4] Priyantha N., Balakrishnan H., Teller S. The cricket compass for context aware mobile applications // In 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, July 2006. – P. 325.
- [5] Niculescu D., Nath B. Ad hoc positioning system (aps) using aoa // I Proceedings of INFOCOM 2003, San Francisco, CA. – 2009. – P. 238.
- [6] Savvides A., Han C. Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors // In 7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2010. – P. 166–179.
- [7] Whitehouse K. The design of calamari: An ad hoc localization system for sensor networks // M.S. thesis, University of California at Berkeley. – 2009.

Information and Analytical Technology for Control and Operation Management of Gas Transportation Systems Operation Modes

A. Tevyashev

Department of Applied Mathematics
Kharkiv National University of Radio Electronic
Kharkiv, Ukraine
andrew.teviashev@nure.ua

S. Iievlieva

Department of Applied Mathematics
Kharkiv National University of Radio Electronic
Kharkiv, Ukraine
svitlana.iievlieva@nure.ua

Abstract–The purpose of the study is to develop new information and analytical technologies and tools for optimal stochastic control of the technological processes of production, preparation, transportation and distribution of energy resources in the gas transportation systems of Ukraine.

The achievement of this goal will enable us to implement a unified, well-balanced approach to the modernization and rational development the gas transportation systems of Ukraine based on achieving maximum indicators in resource saving and environmentally friendly technologies in energy, which is currently extremely relevant.

Keywords: *Gas Transportation Systems, Optimal Stochastic Control, Information and Analytical Technologies.*

I. INFORMATION AND ANALYTICAL TECHNOLOGY OF OPERATIONAL DISPATCH CONTROL

The problem of optimizing the operational dispatch control (ODC) by the operation modes of gas transmission systems (GTS) has appeared since the moment of their creation and is becoming more urgent at the present time [1]. Modern GTS belong to the class of large technical systems and consist of an interconnected system of multi-line main gas pipelines with multi-station compressor stations (CS), multi-line linear sections with outlets that are connected by system bridges. In addition, the GTS also includes deposits and underground gas storage facilities (UGS), including well systems, gas gathering manifolds and booster compressor stations (BCS). The structure of the GTS can be linear, tree-like and / or annular. Multipurpose compressor stations are equipped with gas-pumping units (GPU) with an adjustable drive. To cool the gas at the outputs of all CS installed air-cooled (AC) with a regulated electric drive. Gas distribution stations (GDS) and natural gas consumers are connected to the outlets.

The emergence of a competitive natural gas market in Ukraine, the continuous increase in its cost, the natural aging of technological equipment, and the increasing intensity of its failures, have led to the need to manage not only the volumes and quality of gas supplied to consumers more quickly and efficiently, but also the directions of flows (up to the reverse) of transport gas in the GTS. Moreover, at the present day the

problems of energy saving and environmental safety of the GTS have sharply escalated. All this led to the fact that the traditional methods of ODC lost their technological and economic efficiency [1,2,3]. The report considers one of the ways of systemic solution of the resource and energy saving problem in the GTS on the basis of the developed information and analytical technology (IAT) of the ODC.

The ITU ODC for a given time interval $[0, T]$ is an ordered sequence of solutions and realizations of the following problems:

- Operational forecasting (at zero time $t = 0$ with anticipation T) of own production volumes and contracted volumes of supplies by all natural gas contractors in the GTS on the time interval $[0, T]$;
- Operational forecasting (at zero time $t = 0$ with anticipation T) of natural gas consumption volumes by all categories of GTS consumers, depending on contract terms, chronological, meteorological and organizational factors;
- Calculation of the estimation of the dynamic balance of natural gas in the gas transportation system in the time interval $[0, T]$, estimation of the predicted operating conditions of each UGS (storage, injection, selection of natural gas) and the formation of boundary conditions for their work on the control interval $[0, T]$;
- Operational planning of quasi-stationary operating modes of BCS and UGS for a given time interval $[0, T]$;
- Operational planning of the quasi-stationary receiving mode, transporting and distributing the forecasted volumes of natural gas in the gas transportation system for a given time interval $[0, T]$;
- Operative receipt, processing and analysis of operational information, assessment of the actual state and operating mode of the GTS equipment for each time t $[0, T]$;
- Adoption and implementation of decisions on the need to correct operational schedules of the operating mode of BCS

and underground gas storage facilities and gas turbines for $t \in [0, T]$;

- Adoption and implementation of decisions on the transfer of the operating mode of the gas transportation system from the actual at time $t \in [0, T]$ to the planned quasi-stationary state;
- Stabilization of planned values of natural gas pressures and temperatures at the compressor station outputs for each time $t \in [0, T]$.

Mathematical statements are given and algorithms for solving a number of ODC problem are considered in [2,3,4].

II. MATHEMATICAL FORMULATION OF THE TASK OF THE OPERATIONAL PLANNING TRANSPORTING AND DISTRIBUTING OF NATURAL GAS IN THE GAS TRANSPORTATION SYSTEMS

A. The Gas Transportation Systems structure model

GTS structure is determined by its technological scheme, in which all open taps correspond to nodes between technological items, and closed-point gap between the technological elements. Changing the structure of the GTS by opening/closing cutting taps and is a function of the system interface. As a model for the structure of the GTS will use oriented linked graph $G(V, E)$ [2], which is supplemented with zero node and fictitious arcs connecting the zero node with all inputs and outputs of the GTS and inputs all active elements (AE), where V ($|V| = m$) – the set of nodes, E – the set of arcs ($|E| = n$). Choose a tree graph $G(V, E)$ so that its branches have become real and fictitious parts of the arc corresponding to the input of GTS. Then set of the graph arcs E is representable as a union of the following disjoint subsets: the real sections M ; fictitious sections on the network inputs L ; fictitious sections on the network output K ; fictitious sections, connecting the input of the active elements with the zero node (fictitious additional network input) T ; real tree branches M_i ; real tree branches, which correspond to passive M_{1i} and active M_{12} elements; real chords of the graph M_2 ; real chords of the graph which correspond to passive M_{2i} and

active M_{22} elements; fictitious branches of a tree, which correspond to inputs L_i ; branches of a tree on the inputs of the network with a preset flow L_{11} , pressure L_{12} and temperature L_{13} ; chords of the graph, which correspond to inputs L_2 ; chords of the graph of the network inputs with the preset flow L_{21} , pressure L_{22} , temperature L_{23} ; fictitious chords which correspond to outputs K_2 ($K_2 = K$); fictitious chords on the outputs of the network with a preset flow K_{21} pressure K_{22} , temperature K_{23} ; fictitious chords of the graph, corresponding to fictitious additional network input (arcs connecting the input of the active elements with the zero point) with a preset flow T_{21} . To construct stochastic models of technological elements of technological equipment quasi-stationary operating modes, we by introducing mathematical concept of a probability space, which has three components (Ω, B, P) – cartesian product of probability spaces (Ω_i, B_i, P_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ ($\Omega = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \dots \times \Omega_n$, $B = B_1 \times B_2 \times \dots \times B_n$, $P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$, where Ω_i – space of elementary events; B_i – σ -algebras of Ω_i ; P_i – probability measures on B_i).

Then $\forall \omega \in \Omega: X(\omega)$ – denotes a random value, while $P_i(\omega)$, $q_j(\omega)$, $T_i(\omega)$ – the random values characterizing the pressure and temperature of natural gas in the i -th node of the GTS and the flow at the j -th the section of the GTS; $M_\omega\{X(\omega)\}$ – the expected value $X(\omega)$.

B. Stochastic Model of Quasi-Stationary Non-Isothermal Mode of Transport and Distribution of Natural Gas in The Gas Transportation Systems.

Following [5] Stochastic model of quasi-stationary non-isothermal mode of transport and distribution of natural gas in the GTS can be expressed as:

$$f_r = M_\omega \left\{ \beta_r(\omega) q_r(\omega)^2 + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega)^2 + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ni}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right)^2 - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - I \right) P_{ni}(\omega)^2 \right\} \right\} = 0, \quad r \in M_{21}; \quad (1)$$

$$f_r = M_\omega \left\{ \tilde{c}_r(\omega) \left(q_r(\omega) - \frac{\tilde{b}_r(\omega) P_{rh}(\omega)}{2\tilde{c}_r(\omega)} \right)^2 - \left(\tilde{a}_r(\omega) + \frac{\tilde{b}_r^2(\omega)}{4\tilde{c}_r(\omega)} - I \right) P_{rh}(\omega)^2 + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega)^2 + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ni}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right)^2 - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - I \right) P_{ni}(\omega)^2 \right\} \right\} = 0, \quad r \in M_{22}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
f_r = M_\omega & \left\{ -P_{kr}(\omega)^2 - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ki}(\omega)^2 - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ik}^{+2} + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega)^2 + \right. \\
& \left. + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{hi}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right)^2 - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - I \right) P_{hi}(\omega)^2 \right\} \right\} = 0, \quad r \in L_{21}; \tag{3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_r = M_\omega & \left\{ -P_{kr}^{+2} - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ki}(\omega)^2 - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ki}^{+2} + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega)^2 + \right. \\
& \left. + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{hi}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right)^2 - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - I \right) P_{hi}(\omega)^2 \right\} \right\} = 0, \quad r \in L_{22}; \tag{4}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_r = M_\omega & \left\{ P_{hr}(\omega)^2 - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ki}(\omega)^2 - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ki}^{+2} + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega)^2 + \right. \\
& \left. + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{hi}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right)^2 - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - I \right) P_{hi}(\omega)^2 \right\} \right\} = 0, \quad r \in K_{21}; \tag{5}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_r = M_\omega & \left\{ P_{hr}^{+2} - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ki}(\omega)^2 - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ki}^{+2} + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega)^2 + \right. \\
& \left. + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{hi}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right)^2 - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - I \right) P_{hi}(\omega)^2 \right\} \right\} = 0, \quad r \in K_{22}; \tag{6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_r = M_\omega & \left\{ -P_{kr}(\omega)^2 - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ki}(\omega)^2 - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ki}^{+2} + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega)^2 + \right. \\
& \left. + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{hi}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right)^2 - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - I \right) P_{hi}(\omega)^2 \right\} \right\} = 0, \quad r \in T_{21}; \tag{7}
\end{aligned}$$

$$f_r = M_\omega \left\{ \sum_{r \in M_2 \cup L_{22} \cup K_{22}} b_{1ri} q_r(\omega) + \sum_{r \in L_{21} \cup K_{21}} b_{1ri} q_r^+ - q_i^+ \right\} = 0; \tag{8}$$

$$f_r = M_\omega \left\{ T_{kr}(\omega) - T_{zp} - (T_{hr}(\omega) - T_{zp}) e^{-\theta_r(\omega)L} \right\} = 0, \quad r \in M_{11} \cup M_{21}; \tag{9}$$

$$f_r = M_\omega \left\{ T_{kr}(\omega) - T_{hr}(\omega) \left(P_{kr}(\omega) / P_{hr}(\omega) \right)^{\frac{\mu_r(\omega)-1}{\mu_r(\omega)}} \right\} = 0, \quad r \in M_{12} \cup M_{22}; \tag{10}$$

$$f_r = M_\omega \left\{ T_{hr}(\omega) \sum_{i \in G_r^+} q_i(\omega) - \sum_{i \in G_r^-} q_i(\omega) T_{ki}(\omega) \right\} = 0, \quad r \in V; \tag{11}$$

$$f_r = M_\omega \left\{ n_k^r(\omega) \sum_{i \in G_r^-} q_i(\omega) - \sum_{i \in G_r^+} q_i(\omega) n_k^i(\omega) \right\} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad r \in V; \tag{12}$$

$$f_r = M_\omega \left\{ T_{cpr}(\omega) - T_{zp}(\omega) + [(T_{hr}(\omega) - T_{zp}(\omega)) / \theta_r(\omega)L] (1 - e^{-\theta_r(\omega)L}) \right\} = 0, \quad r \in M_{11} \cup M_{21}; \tag{13}$$

$$f_r = M_\omega \left\{ P_{hr}^2(\omega) - P_{kr}^2(\omega) - \beta_r(\omega) q_r^2(\omega) \right\} = 0, \quad r \in M_{11} \cup M_{21}; \tag{14}$$

$$f_r = M_\omega \left\{ \tilde{a}_r(\omega) P_{hr}^2(\omega) - P_{kr}^2(\omega) + \tilde{b}_r(\omega) P_{hr}(\omega) q_r(\omega) - \tilde{c}_r(\omega) q_r^2(\omega) \right\} = 0, \quad r \in M_{12} \cup M_{22}. \tag{15}$$

where:

$\bar{P}_{ni}^+, \bar{P}_{ki}^+, \bar{T}_{ni}^+, \bar{T}_{ki}^+, \bar{q}_r^+$ – marks the preset quantities, given by estimates of their mathematical expectations and variances $\sigma_{P_{ni}^+}^2, \sigma_{P_{ki}^+}^2, \sigma_{T_{ni}^+}^2, \sigma_{T_{ki}^+}^2, \sigma_{q_r^+}^2$;

G_i^+, G_i^- – the set of elements on which the gas comes into the i -th node, and is bled from it, respectively;

b_{lri} – cyclomatic matrix element, located at the intersection of the r -th row and the i -th column;

$P_{ni}(\omega), P_{ki}(\omega); T_{ni}(\omega), T_{ki}(\omega)$ – random variables, characterizing the pressure and the temperature at the beginning and the end of the i -th arc;

$q_i(\omega)$ – random variable characterizing the commercial flow of i -th arc;

$n_k^i(\omega)$ – estimation of the concentration of the k -th component of the natural gas in the incoming flow in r -th node of the GTS;

$n_k^r(\omega)$ – estimation of the concentration of the k -th component of the natural gas in the outgoing flow from r -th node of the GTS;

$\beta_i(\omega)$ – random variable characterizing the assessment ratio of hydraulic resistance of pipeline of i -th arc:

$$\beta_i(\omega) = \frac{\Delta(\omega) L T_{cp_i}(\omega) \cdot Z_{cp_i}(\omega)}{\tau_i \alpha_i^2 \phi_i^2 E_i^2(\omega) D_i^{5.2}},$$

where $\Delta(\omega)$ – random variable characterizing the assessment ratio of the relative density of natural gas in the air, L – length i -th section of pipeline; $T_{cp_i}(\omega), Z_{cp_i}(\omega)$ – random variable characterizing the estimation of the average temperature and average density of natural gas of i -th arc, $E_i(\omega)$ – random variable characterizing the assessment of effectiveness ratio i -th section of pipeline, D_i – diameter i -th section of pipeline. In order to take into account the deviation of the gas flow mode from the quadratic effect appropriate correction factors are introduced α_i, ϕ_i, τ_i – numerical coefficients, the value of which depends on the selected units of measurement.

$\theta_i(\omega)L$ – Shukhov's criterion, random variable defined by the expression:

$$\theta_i(\omega)L = 62.6 K_{T_i}(\omega) D_{H_i} L / 10^6 q_i(\omega) \Delta(\omega) B(\omega),$$

where $K_{T_i}(\omega)$ – random variable characterizing the estimate of the average values of the coefficient of heat transfer from the gas in the ground on the i -th section of the pipeline,

$B(\omega)$ – a random variable characterizing the estimate of the coefficient of the specific heat of natural gas, D_{H_i} – outside diameter i -th section of the pipeline.

$\tilde{a}_i(\omega), \tilde{b}_i(\omega), \tilde{c}_i(\omega)$ – random variable characterizing the approximation estimates for the coefficients describe the degree of compression of AE from the commercial flow for AE-owned i -th arc:

$$\tilde{a}_i(\omega) = a_{2i}(\omega), \tilde{b}_i(\omega) = b_{2i}(\omega) \frac{n}{n_0} \frac{\gamma_0 Z(\omega) R T_{ni}(\omega)}{1440},$$

$$\tilde{c}_i(\omega) = c_{2i}(\omega) \left(\frac{n}{n_0} \frac{\gamma_0 Z(\omega) R T_{ni}(\omega)}{1440} \right)^2,$$

where:

$$a_{2i}(\omega) = n_i^{v_i}(\omega) \cdot a_{li}(\omega) + 2n_i^{v_i}(\omega) (1 - n_i^{v_i}(\omega)) a_{oi}(\omega) + (1 - n_i^{v_i}(\omega))^2,$$

$$b_{2i}(\omega) = n_i^{v_i}(\omega) \cdot b_{li}(\omega) + 2n_i^{v_i}(\omega) (1 - n_i^{v_i}(\omega)) b_{oi}(\omega),$$

$$c_{2i}(\omega) = n_i^{v_i}(\omega) \cdot c_{li}(\omega) + 2n_i^{v_i}(\omega) (1 - n_i^{v_i}(\omega)) c_{oi}(\omega),$$

where $a_{oi}(\omega), b_{oi}(\omega), c_{oi}(\omega)$ и $a_{li}(\omega), b_{li}(\omega), c_{li}(\omega)$ – random variables characterizing the estimates of coefficients of approximation polynomials of the degree of compression AE

first and second degree, respectively, at $\left(\frac{n}{n_0} \right)_{np} = 1$.

CONCLUSIONS

The proposed model and optimization strategy for quasi-stationary operating modes of gas transmission systems is an effective tool for solving the multicriteria task of operational scheduling of GTS operation modes based on the use of the specific features of natural gas transport along linear sections of main gas pipelines and its compression at compressor stations that significantly expand the agreement area of the multicriteria problem and significantly increase all technical and economic indicators planned regimes.

REFERENCES

- [1] N. N. Novitsky, M. G. Sukharev, A. D. Tevyashev, "Pipeline energy systems: mathematical modeling and optimization" Science, Novosibirsk (2010).
- [2] V. S. Smirnova, A. D. Tevyashev, "Investigation of the properties of the solution of the Cauchy problem for the system of stationary gas flow equations in a pipeline" Kharkov National University "Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems" (863), 245-251 (2009).
- [3] V. S. Smirnova, A. D. Tevyashev, "Mathematical modeling of unsteady non-isothermal gas flow along the gas pipeline section". Radioelectronics and Informatics (2), 21-27 (2008).
- [4] [ONTP-51-1-84: Trunk pipelines. State Standard of Ukraine, Kiev (1999).

Переписування Семантики Історій Користувача

Сьцібор Собієські, Бартош Зієлінські, Павел Масьянка
Кафедра комп'ютерних наук,
факультет фізики та прикладної інформатики,
Університет Лодзь,
Лодзь, Польща
{scibor.sobieski, bzielinski, pmaslan}@uni.lodz.pl

Rewriting Semantics of User Stories

Ścibor Sobieski, Bartosz Zieliński, Paweł Maślanka
Department of Computer Science,
Faculty of Physics and Applied Informatics,
University of Łódź,
Łódź, Poland
{scibor.sobieski, bzielinski, pmaslan}@uni.lodz.pl

Анотація—Ми описуємо виконувану семантику, засновану на мультиміжній перезапису для користувацьких історій - популярного формату для опису вимог користувача. Семантика зосереджена на захопленні основних операцій (CRUD) з передачею даних та потоків даних між учасниками, що беруть участь у розповідях, і абстракції від складних операцій як незрозумілі терміни (кодування залежностей даних). Семантика достатня для аналізу доступності. Переклад історій користувача, доповнений моделлю даних у систему перезапису, досі є посібником, але ця робота є основою для майбутнього компілятора історій користувачів.

Abstract—We describe an executable semantics based on multiset rewriting for user stories — a popular format for describing user requirements. The semantics focuses on capturing the basic (CRUD) operations on data and data flow between actors involved in the stories and abstracts away complex operations as uninterpreted terms (encoding data dependency). The semantics is sufficient for reachability analysis. Translation of user stories augmented with data model into a rewriting system is manual so far, but the present work is a foundation for a future user story compiler.

Ключові слова—користувацькі історії; багатозаписний перепис; виконувана семантика; вимоги техніки;

Keywords—user stories; multiset rewriting; executable semantics; requirements engineering;

I. INTRODUCTION

The two established formats for describing user requirements — *user stories* and *use cases* — are intended mainly for human consumption. They are written in natural (though usually constrained) language, easily understandable by non-programmer stakeholders. While specifications in the form of user stories or use cases are not necessarily machine unreadable (cf. [1]), automated verification and testing requires some kind of formal semantics.

In this paper, we attempt to provide an executable semantics for user stories (in the Csee format [2]). More precisely, we associate to a collection of stories augmented with a data model a multiset rewriting system, representable as a coloured Petri Nets with inhibitor edges and ability to generate fresh nominal values (cf. [3]). Currently the association is done manually, however, we are working on a "compiler" for user stories (written in a constrained English parsable without natural language processing tools, cf. [4]).

Creating the executable semantics we focused on capturing the basic (CRUD) operations on data and data flow between actors involved in the stories. The result bears similarity to specification of artifact-centric business process (see e.g., [5], [6]). Complex operations are abstracted away as uninterpreted terms (encoding data dependency). The semantics is detailed enough to perform reachability analysis to prove that desirable final states of a case are attainable through legal user actions, and undesirable data transformations and accesses are not.

When presenting the semantics, we decided to dispense with Petri Net pictures which would be too complex and less susceptible to piecewise introduction. Instead we use actual multiset rewriting rules. Note that such rules are directly translatable into rewriting language and system Maude [7] often used to express and test formal specifications (see e.g., [8], [9], [10] and also to simulate a variety of Petri Nets [11], [12]).

II. FACTS AND MULTISSET REWRITING

A. Values

All values we use are typed. Types can be divided into abstract and concrete ones. Concrete ones contain defined operations and relations (usually through equations). Abstract types may contain constructors, but no defined operators and relations. We allow matching (e.g., in rewrite rules) only on

fully reduced terms which may contain constants, variables and constructors but no defined operators. Thus, e.g., in case of natural numbers \mathbb{N} (a concrete type) we can match on 0 , $s(m)$, $s(s(m))$ or $3:=s(s(s(0)))$, where $m: \mathbb{N}$ is a variable, and $s: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ and $0: \rightarrow \mathbb{N}$ are natural numbers constructors (successor and zero, respectively), but we cannot match on $m+n$ as “+” is a defined operator.

Abstract types are further divided into nominal ones (for which the only constructors are constants) and non-nominal ones (with non-constant constructors). Nominal types serve as identifiers of objects, and for each nominal type we can generate fresh values of this type. Non-nominal abstract types serve as representations of computed values where we want to keep the computation abstract.

B. Facts

Facts are instances of base predicates (one can think of them as rows in a database table, if each row stored also a table name). A fact $P(a_1, \dots, a_n)$ consists of a predicate name P and a list of values a_1, \dots, a_n (fully reduced terms serving as predicate arguments). Non-ground facts may contain variables among (or inside) arguments a_i .

A predicate signature is a tuple of types. We write $P: T_1, \dots, T_n$ if P is a predicate name with signature T_1, \dots, T_n . In this case all facts $P(a_1, \dots, a_m)$ with P as predicate name are such that $m=n$ and $a_i: T_i, i \in \{1, \dots, n\}$.

C. Multisets of facts

We represent state of the system as a multiset of ground facts. Changes to this state are represented by multiset rewrites. We assume usual multiset operations $\Gamma \cup \Delta$ (union) $\Gamma \cap \Delta$ (intersection), $\Gamma - \Delta$ (difference). \emptyset is the empty multiset. When writing rules we often identify facts with single-element multisets and consider “,” (comma) to be an associative and commutative multiset constructor corresponding to multiset union. We denote by $\text{Var}(\Gamma)$ the set of variables occurring in the multiset Γ .

Multisets of facts, apart from representing state of the system may also appear as arguments of abstract aggregate functions.

D. Domain conditions

A domain condition is a quantifier free, first order formula which can refer to domain predicates (such as ordering on numbers) but not to base predicates stored in the multiset database.

E. Rewrite rules

A rewrite rule $\lambda=(p, C, \Gamma, \Delta, \Delta')$ consists of term p of type Person denoting agent of the action, domain condition C and three (non-ground) multisets Γ , Δ , and Δ' such that $\text{Var}(C) \cup \text{Var}(\Gamma) \cup \text{Var}(p) \subseteq \text{Var}(\Delta)$ and any $x \in \text{Var}(\Delta') - \text{Var}(\Delta)$ is of nominal type.

We say that a ground multiset of facts Ψ rewrites to a ground multiset Ψ' with rule λ , agent a , and ground substitution

σ (i.e., $\sigma(x)$ is a ground term for all $x \in \text{Var}(\Delta') \cup \text{Var}(\Delta)$), which we denote by $\Psi \rightarrow_{\lambda, \sigma, a} \Psi'$, if and only if

- $\sigma(C)$ is true,
- $\sigma(p)=a$,
- $\sigma(\Gamma) \not\subseteq \Psi$ and $\sigma(\Delta) \subseteq \Psi$,
- $\Psi' = (\Psi - \sigma(\Delta)) \cup \sigma(\Delta')$,
- for all $x \in \text{Var}(\Delta') - \text{Var}(\Delta)$, $\sigma(x)$ is fresh.

Let $\Psi_0 \rightarrow_{\lambda_0, \sigma_0, a_0} \Psi_1 \rightarrow_{\lambda_1, \sigma_1, a_1} \dots \rightarrow_{\lambda_i, \sigma_i, a_i} \Psi_{i+1}$, where Ψ_0 is some initial multiset of facts. A value c of nominal type is fresh at $i \geq 0$ if it did not occur in $\Psi_0 \cup \dots \cup \Psi_{i-1}$.

To improve readability we use an alternative syntax for rules. Namely, we write

$$C; \neg \alpha, \beta; \gamma \Rightarrow \rho \delta,$$

where $\neg \alpha = \neg \alpha_1, \dots, \neg \alpha_n$, $\beta = \beta_1, \dots, \beta_m$, etc., and α_i 's, etc., are facts, to denote the rule

$$(p, C, \alpha, \{\beta\} \cup \{\gamma\}, \{\beta\} \cup \{\delta\}).$$

F. Rewrite systems

A rewrite system R is a set of rewrite rules. We write $\Psi \rightarrow_{R, a} \Psi'$ if there exists some $\lambda \in R$ and a ground substitution σ such that $\Psi \rightarrow_{\lambda, \sigma, a} \Psi'$.

III. FROM USER STORIES TO REWRITING SYSTEM

In this section we show how to construct from a collection of user stories augmented with data model a multiset rewriting system. We will use as a running example an actual specification of a system supporting national selection of candidates for study programmes at the universities in New Guinea. Because of peculiar conditions of life in New Guinea, candidates do not apply to a particular university. Instead, they submit their applications to the Department of Higher Education, Research, Science and Technology (DHERST). Higher education institutions (HEI) submit information about study programmes. Then, during national selection, candidates are matched with programmes and universities based on plethora of factors, which include student abilities, level of education and personal preferences.

A. From entities to predicates

As remarked above, our rewriting semantics does not attempt to capture all of requirements contained in user stories. Instead, it focuses mostly on CRUD operations on data. Thus, we need to augment the user stories with data model of business entities referred to in the stories, perhaps partially extracted from stories themselves using techniques described in [1]. If entities are modeled using E/R technique, then the E/R model can be converted to definitions of predicates using usual techniques for transforming E/R model into relational schema. That is, key and obligatory single-valued attributes of an entity

or relationship become a arguments of a predicate with the same name as the entity/relationship, and nullable and many-valued attributes give rise to separate predicates with the same name as the corresponding attribute. As an example consider the entities corresponding to HEI and the list of HEI:

entity HEI(**id_T id**, **string name**, **string street**, **person chief**),

entity HEIList(**id_T id**, **year year**, **id_T multival hei**).

In the second entity, the year attribute says for which year the list was composed. The first entity gives rise to a single predicate

HEI : **id_T**, **string**, **string** , **person**

The second entity gives rise to two predicates, the second of which corresponds to the multivalued attribute hei containing identifiers of higher education institutions taking part in national selection:

HEIList : **id_T**, **year**, hei : **id_T**, **id_T**.

Thus, hei(x,y) means that a higher education institution x belongs to the list y.

B. User stories and rewriting rules

Each user story gives rise to one or more rewriting rules. We assume that each story corresponds either to some CRUD operation (creation or update of entities) or to using data to compute or view something. The latter is abstracted as creation of special facts, e.g., of the form view(x, y), i.e., person x viewed entity with identifier y.

C. Tokens

Tokens are special facts. While the usual facts encode business relevant data, tokens encode information related to control flow. Names of tokens start with “#”. The basic token is argument-less and named #next. This token symbolizes the choice of the next story. If the user story is implemented with more than one rewriting rule, the story’s “entry” rule replaces #next with story-specific token. The rule ending execution of a given story recreates the #next token. This token can be thought of as corresponding to the non-deterministic choice of an applicable story, and sometimes of value from the active domain. “Internal” tokens of the given story often have a natural argument corresponding to the maximal re-creation count to prevent infinite executions, as well as other arguments which store values which must be the same across all rewrites within execution of the same user story, such as the agent.

D. Example rules

Consider the following user story:

As a DHERST admin I would like to **create** list of HEI if it doesn’t exist for the current year *that would take part in National Selections*.

The italicized part above is an explanation for humans. What is important for our semantics is the agency description “As a DHERST admin), and main verb “create” followed by object “list of HEI for the given year” and additional condition “if it doesn’t exist”. Thus, from the point of view of our semantics, the story describes creation of the new HEIList

entity by a person assigned role of DHERST admin. The “current year being x” and “x having the role DHERST admin” is described by predicates with obvious names. The list is created empty (default interpretation of creation is that many-valued and optional attributes are unassigned). Thus, the semantics of the above story is captured by the following single rule (x, y, z, p are variables):

true; ¬HEIList(x, y), DHERSTAdmin(p), year(y) ; #next
 \Rightarrow_p HEIList(z, y), #next.

Above, z is a variable not bound by the left hand side of the rule, and thus it will be assigned a fresh identifier of the HEIList entity when this rule is executed. Note that the rule consumes the #next token but then it recreates it. Let us now consider the example of a story which compiles into multiple rules:

As a DHERST admin I want to **update** list of HEI for the current year.

Here the main verb is “update”. In this context it means deleting some HEI from the list and adding new ones. We assume that the information about a given higher education institution already exists in the system, so “adding a new one” means picking the HEI entity and adding it to the list. We utilize additional token predicate #upd : \mathbb{N} , Person, id_T. The token #upd(n, p, l) stores an agent (with role DHERST admin) who is the subject of this story, and the identifier l of the list of HEI which is being updated, so that all the rules update the same list. The number in the first argument limits the number of possible recreations of the token so that a given user story execution makes a limited number of elementary update operations and we avoid infinite loops when simulating. The first rule simply picks up the agent and the list to be updated and stores them in the token:

true; DHERSTAdmin(p), HEIList(x,y); #next
 \Rightarrow_p #upd(N, p, x).

In the above rule, p, x, y are variables, however N is not a variable but some fixed number describing a maximal number of recreations of the #upd token. Observe that the #next token is not recreated. This ensures rewritings corresponding to different user stories cannot occur until this story is finished.

The next two rules add an existing HEI to the list (if it is not there already, or deletes some HEI from the list. Note that both rules require the #upd token with first argument greater than 0 (which is ensured by matching with s(0)) and that both rules recreate the #upd token with first argument decreased by 1:

true; ¬hei(h, x), HEI(h, n, a, c); #upd(s(m), p, x)
 \Rightarrow_p hei(h, x), #upd(m, p, x).

true; ; hei(h, x), #upd(s(m), p, x) \Rightarrow_p #upd(m, p, x).

Note that instead of matching against s(m) we could have instead use the condition part of the rule, e.g.,

m > 0; ; hei(h, x), #upd(m, p, x) \Rightarrow_p #upd(m-1, p, x).

The last rule serves to non-deterministically finish execution of the present story by recreation of the #next token. Observe that because we do not limit variable m, the story ends after no more, but possibly less than N elementary update steps, where N was the first argument of the #upd token created in the first rewrite rule:

$$\text{true}; \# \text{upd}(m, p, x) \Rightarrow_p \# \text{next}.$$

In the last example of converting user story to rewrite rules we show how to abstract non-trivial computation. The story we want to implement is as follows:

As a DHERST admin I can run Gale Shapley algorithm to find best matching of available candidates and programs.

Clearly, we do not want to model or specify Gale Shapley algorithm, as it is out of the scope of our executable semantics. However, we can model the associated data flow. To make the presentation more readable in the small space available, we simplify significantly the data model. Namely, we suppose that we have the following two two-argument predicates:

$$\text{Cand} : \text{Cand_T}, \quad \text{Prog} : \text{Prog_T}.$$

We assume that elements of types Cand_T and Prog_T store all the data about candidates and study programmes, respectively. We also assume that we have constructor ga-sh : FactMultiset \rightarrow Matching, and a predicate match : Matching, where Matching is the abstract type corresponding to the results of Gale-Shapley algorithm, and FactMultiset is a type of multisets of facts used when defining abstract aggregate functions such as ga-sh. The story is implemented with the following four rules:

$$\begin{aligned} & \text{true}; \text{DHERSTAdmin}(p); \# \text{next} \\ & \Rightarrow_p \# \text{dh}(p), \text{match}(\text{ga-sh}(\emptyset)) \\ & \text{true}; ; \# \text{dh}(p), \text{Cand}(c), \text{match}(\text{ga-sh}(S)) \\ & \Rightarrow_p \# \text{dh}(p), \text{match}(\text{ga-sh}(S \cup \{ \text{Cand}(c) \})), \\ & \text{true}; ; \# \text{dh}(p), \text{Prog}(c), \text{match}(\text{ga-sh}(S)) \\ & \Rightarrow_p \# \text{dh}(p), \text{match}(\text{ga-sh}(S \cup \{ \text{Prog}(c) \})), \\ & \text{true}; \neg \text{Cand}(c), \neg \text{Prog}(c'), \text{match}(\text{ga-sh}(S)); \# \text{dh}(p) \\ & \Rightarrow_p \# \text{next}, S \end{aligned}$$

The first one picks DHERST admin and stores the choice in a token, as well as creates an empty matching term. The next two gather candidates and study programs, the last one finishes story execution when all candidates and programs have

been aggregated. Note that it recreates facts about candidates and programs temporarily removed from the multiset database.

CONCLUSION

We outlined how to assign an executable semantics to a collection of user stories. Executable semantics we describe is based on multiset term rewriting, and it tries to capture the basic CRUD operations. Currently the assignment is done manually, but we are working on a user story compiler.

REFERENCES

- [1] M. Landhausser, A. Genaid, "Connecting user stories and code for test development," in Recommendation Systems for Software Engineering (RSSE), 2012 Third International Workshop, pages 33-37, June 2012.
- [2] Connextra. Connextrastorycard.
- [3] M. Montali, A. Rivkin. "Model checking petri nets with names using data-centric dynamic systems," Formal Aspects of Computing, 28(4):615-641, 2016.
- [4] Ś. Sobieski, B. Zieliński, "User stories and parameterized role based access control," in Model and Data Engineering, pp. 311-319, Cham, 2015. Springer International Publishing.
- [5] R. Hull, "Artifact-centric business process models: Brief survey of research, results and challenges," in On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2008, pp 1152-1163, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- [6] P.A. Abdulla, C. Aiswarya, M.F. Atig, M. Montali, O. Rezine. "Recency-bounded verification of dynamic database-driven systems," in Proceedings of the 35th ACM SIGMOD-SIGACT-SIGAI Symposium on Principles of Database Systems, PODS '16, pp.195-210, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [7] M. Clavel, F. Duran, S. Eker, P. Lincoln, N. Marti-Oliet, J. Meseguer, C. Talcott. "The Maude 2.0 system," in Rewriting Techniques and Applications (RTA 2003), LNCS pp. 76-87. Springer-Verlag, June 2003.
- [8] G. Denker, J. Meseguer, C. Talcott, "Protocol specification and analysis in Maude," in Proc. of Workshop on Formal Methods and Security Protocols, 1998.
- [9] Ś, Sobieski, B. Zieliński, "Using Maude rewriting system to modularize and extend SQL," in Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing, pp. 853-858. ACM, 2013.
- [10] Ś, Sobieski, B. Zieliński, "Modularisation in Maude of parametrized RBAC for row level access control," in Advances in Databases and Information Systems, pp. 401-414. Springer, 2011.
- [11] M.O. Stehr, J. Meseguer, P.C. Olveczky. "Rewriting logic as a unifying framework for Petri nets," in Unifying Petri Nets: Advances in Petri Nets}, pp. 250-303, Berlin, Heidelberg, 2001. Springer Berlin Heidelberg.
- [12] J. Padberg. A. Schulz, "Model checking reconfigurable Petri nets with Maude," in Graph Transformation, pp. 54-70, Cham, 2016. Springer International Publishing.

Analiza Korelacji Notowań Bitcoina

Vasyl Fedoriv
Wydział Zarządzania
Akademia Górniczo-Hutnicza im.St.Staszica
Kraków, Poland
fedorivas@gmail.com

Jacek Obrzud
Wydział Zarządzania
Akademia Górniczo-Hutnicza im.St.Staszica
Kraków, Poland
jobrzud@zarz.agh.edu.pl

Streszczenie—W artykule przeanalizowano zmiany notowań wybranych indeksów giełd światowych i kursów walut, a także bitcoina i Special Drawing Rights w okresie od 1.01.1998 do 30.03.2018. Obliczono funkcje autokorelacji i korelacji wzajemnej szeregów przyrostów dziennych opóźnionych (do 6 dni) i miesięcznych (do 12 miesięcy). Stwierdzono akceptowalną stacjonarność badanych parametrów statystycznych przyrostów szeregów. Wykazano brak istotnej korelacji z opóźnionymi przyrostami cen, co może być skutkiem obecnego powszechnego braku akceptacji dla bitcoina.

Abstract—The article studied changes of the rates of selected indexes of world stock exchanges and currencies exchange rates, Bitcoin, Special Drawing Rights and USD Value from 1.01.1998 to 30.03.2018. Autocorrelation and cross-correlation functions have been calculated for daily increments (up to 6 days) and monthly (up to 12 months). It was found that the statistical parameters of the series increments were considered as acceptable. There has been no significant correlation of the delayed price increments, which may be the result of a widespread lack of acceptance of Bitcoin.

Słowa kluczowe—kryptowaluty, bitcoin, analizy zmienności korelacji finansowych szeregów czasowych

Keywords— cryptocurrency, bitcoin, rolling cross-correlation of financial time series

I. WPROWADZENIE

Dyskusje na temat międzynarodowego pieniądza, w ostatnich latach są dość żywe, o czym świadczą konferencje tematyczne, a także publikacje w światowej literaturze ekonomicznej. Dyskutowane są liczne idee reform obecnego systemu walutowego. Obecny światowy system walutowy oparty jest na dolarze USA, który pełni rolę waluty kluczowej. Z pozostałych walut, część pełni funkcje walut regionalnych, są też takie, które nie aspirują do pełnienia funkcji międzynarodowych. Interesującym pomysłem są SDR¹-y, których wartość zależy od koszyka walut krajów mających największy wpływ na rozwój gospodarki światowej. W swojej historii SDR przyczyniły się do zwiększenia międzynarodowej stabilności finansowej. Jednak biorąc pod uwagę uwarunkowania funkcjonowania SDR można sformułować tezę, że będą one raczej pełnić funkcję jednostki obrachunkowej MFW, a ich funkcja jako składnika aktywów rezerwowych będzie marginalna. Realnie, powszechna jest opinia, że nie ma też możliwości przekształcenia SDR w

pieniądz światowy [7]. W ostatnich latach wzrasta wykorzystanie juana (jest większe niż SDR) i rośnie międzynarodowa pozycja waluty chińskiej. Ważnym jest fakt, że renminbi jest pieniądzem, podczas gdy SDR nim nie jest. Co do roli złota to wydaje się, że w dzisiejszym świecie złoto jest towarem jak każdy inny towar, a rezerwy złota, to już tylko konserwatyzm bankierów. Wprawdzie złoto odgrywa przydatną rolę, np. jest wygodnym towarem, który łatwo można zamienić na dowolną walutę np. w celu utrzymania kursu i dobrze nadaje się też do akumulacji wartości ale złoto nie zabezpiecza waluty, która dzisiaj tego nie wymaga. Wydaje się, że bardziej użyteczne będą rezerwy w postaci np.: zapasów zbożowych (na wypadek słabych zbiorów) czy też zapasów ropy naftowej (na wypadek niepokoju w rejonach wydobywania) itp..

Jednocześnie obecny międzynarodowy system walutowy nie wydaje się być systemem przyszłości, ale też trudno jest przypuszczać, że lepszy system wykreuje się samoistnie, np. przy pomocy „niewidzialnej ręki rynku”. Prowadzone są żywe dyskusje i powstaje wiele propozycji zmian obecnego systemu.

Historycznie złożyło się tak, że praktycznie wszędzie pieniędzmi rządzi państwo, począwszy od ich produkcji, poprzez ustalanie przepisów, aż do ich utylizacji. Taka sytuacja ma swoje plusy i minusy, jednak usunięcie „minusów” jest praktycznie niemożliwe, gdyż były by to działania nielegalne. W takiej sytuacji Międzynarodowego Systemu Walutowego pojawiły się kryptowaluty. Pierwsza kryptowaluta – bitcoin – była innowacją, i co jest ważne nie była inicjatywą państwa. Bitcoin nie jest podobny np. do dolara czy euro, czyli do walut, które znajdują się pod kontrolą banków centralnych i dużych międzynarodowych instytucji finansowych. Bitcoin to pieniądze, które tworzą i utrzymują sami użytkownicy, a ich emisja powoli rozpowszechnia się wśród użytkowników, którzy wspomagają pracę sieci. Jest to system z wcześniej zaprogramowaną emisją, która wyklucza polityczne manipulacje lub nadużycia związane z możliwością zarządzania np. wydaniem pieniędzy. Jest to system, który nie wymaga zaufania, a jego prawidłowe działanie jest gwarantowane przez matematykę i interfejs użytkownika do kryptografii a nie przez prawne umowy, co całkowicie eliminuje czynnik ludzki. Bitcoin stał się pierwszą praktyczną realizacją udanej pracy blockchain-systemów².

¹ Special Drawings Rights

² Blockchain jest nową technologią rozproszonych baz danych. Jedną z jej właściwości jest to, że dokonanie jakiegokolwiek zmiany w zapisach

Światowy biznes jest już gotowy wprowadzać krypto waluty, a największe światowe banki badają możliwości technologii blockchain. Przemysł nazywa blockchain jednym z najbardziej obiecujących współczesnych trendów i tylko brak prawnych regulacji obecnie nie daje tej technologii się rozwinąć.

Problematyka ta ostatnich lat jest przedmiotem dużego zainteresowania wielu autorów [3-6] głównie pod kątem funkcjonowania bitcoin³ i blockchain, problematyki bezpieczeństwa bitcoinów, anonimowości użytkowników i rolikrypto walut dzisiejszym świecie.

Przeprowadzone badania dotyczą poszukiwań formalnego podobieństwa i związku kursów bitcoina ze światową gospodarką. Przebiegi bitcoin różnią się swoim charakterem od przebiegów indeksów, co ukazują wykresy na rysunkach 1 i 2. Celem analiz było stwierdzenie, czy te jakościowe różnice znajdują potwierdzenie formalne? Czy kurs bitcoina posiada związku ze światową koniunkturą gospodarczą?

II. ANALIZY KORELACYJNE

Sytuację w światowym łańdź monetarnym w przeprowadzonych analizach reprezentowały dzienne szeregi czasowe za okres od 1 stycznia 1998 do 4 marca 2018 roku. Dla analizy zostały wybrane dzienne notowania DAX, Nikkei 225, Dow Jones Industrial Average, WIG, SP 500, SDR, kursy BTC/USD, EUR/USD, CNY/USD, BTC/PLN oraz Nominal Major Currencies Dollar⁴. Unormowane wartościami maksymalnymi przebiegi badanych wskaźników przedstawia rysunek 1 i 2.

Na wykresach zaznaczono ważne wydarzenia o charakterze globalnym, takie jak atak na WTC, rozpoczęcie działań wojennych w Iraku, akcesja 10 krajów Europy Centralnej do Unii Europejskiej, światowy kryzys finansowy. Można zauważyć, że wydarzenia te silnie wpłynęły na wielkości indeksów na giełdach światowych. Jak widać na rysunkach profile czasowe analizowanych szeregów czasowych swoim kształtem odzwierciedlają wahania światowej koniunktury gospodarczej.

Jak widać z wykresów (rys.1 i 2) wszystkie wskaźniki charakteryzują się dużą zmiennością i mają niestacjonarny charakter. Jednocześnie, trudno nie zauważyć charakterystyczny jakościowo podobny kształt niemal wszystkich przebiegów.

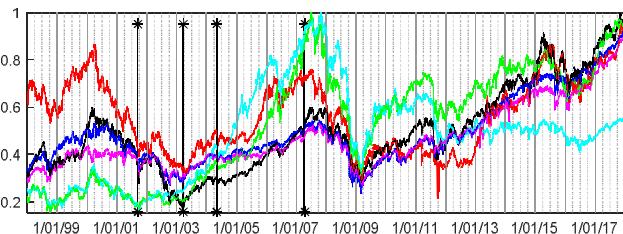
Podstawowym narzędziem formalnym badania współzależności zjawisk w ekonomice jest analiza

historycznych jest niemożliwe. Nie ma centralnego serwera, który mógłby być podatny na cyberataki, ponieważ – podobnie jak sam internet – blockchain jest oparty na rozwiązaniach *peer-to-peer* (P2P). Według Światowego Forum Gospodarczego (WEF), technologia blockchain będzie jedną z najważniejszych w „bankach przyszłości”. Konsorcjum ponad największych banków i firm na świecie (m.in. Barclays, Goldman Sachs, JP Morgan, Deutsche Bank, Santander) założyło we wrześniu 2015 r. spółkę R3, której celem jest opracowanie technologii blockchain na potrzeby ww. konsorcjum. W sierpniu 2016 r. Dubai Future Foundation uruchomił akcelerator startupów o budżecie ok. 275 mln dol. w ramach którego inkubowane są projekty zastosowania technologii blockchain w sektorach, które rząd Zjednoczonych Emiratów Arabskich uznał za „strategicznie ważne”

3

⁴Nominal Major Currencies Dollar - indeks dolara USA jest jednym z trzech głównych indeksów siły nabywczej dolara USA: Broad (indeks - 26 walut), Major Currencies (indeks głównych partnerów handlowych USA - 7 walut), OITP (indeks 19 walut głównych partnerów handlowych USA

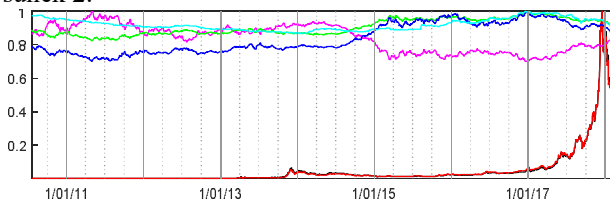
korelacyjna. W przypadku szeregów czasowych, analiza taka może obejmować nie tylko współczynniki korelacji, ale także korelacje szeregów przesuniętych względem siebie w czasie, czyli funkcje korelacyjne. W analizach danych giełdowych istotną rolę odgrywają przyrosty dzienne a także miesięczne (okresy kontraktowania są najczęściej wyrażane w miesiącach). Do takich analiz zastosowano dedykowane procedury wydzielające miesięczne odstępy czasu, z uwzględnieniem długości miesiąca.



Rys. 1. Przebiegi szeregów czasowych dziennych notowań wybranych indeksów giełdowych unormowane wartościami maksymalnymi w okresie od 01.01.1998 do 04.03.2018 roku. Oznaczenia kolorów linii, notowania: DAX – czarna, Nikkei 225 – czerwona, Dow Jones Industrial Average – purpurowa, WIG – kolor zielony, SP 500 – kolor niebieski, PX50 –kolor fioletowy. Pionowe linie zakończone gwiazdką oznaczają zdarzenia o charakterze globalnym: 11.09.2001 – atak na WTC w Nowym Jorku, 20.03.2003 – początek wojny w Iraku, 1.05.2004 – akcesja 10 krajów Europy Centralnej do Unii Europejskiej, kwiecień 2007 rok – umowny początek światowego kryzysu finansowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych: <https://www.oanda.com/>, <https://stooq.pl/>

Interesujące, że jedynie charakter zmian kursów bitcoina odbiega od przebiegów pozostałych badanych indeksów (w tym kursów euro, yuana, valueUSD i SDR co pokazują rysunek 2.



Rys. 2. Przebiegi szeregów czasowych dziennych notowań unormowane wartościami maksymalnymi w okresie od 19.07.2010 do 04.03.2018 roku. Oznaczenie kolorów: bitcoin/dolar US (BTC/USD) – kolor czarna, BTC/PLN – czerwona, EUR/USD – purpurowa, Special Drawing Rights/USD – kolor zielony, ValueUSD – kolor niebieski, CNY/USD –kolor fioletowy

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych:

<https://www.oanda.com/fx-for-business/historical-rates?srcrent=rightnav>, https://stooq.pl

Ze względu na niestacjonarność badanych szeregów analizę korelacyjną przeprowadzono dla ich przyrostów. W ekonometrii wykorzystuje się przyrosty zwykłe, względne lub logarymiczne wybierając typ najlepiej spełniający założenie stacjonarności. Pierwszym etapem przeprowadzonej analizy był dobór typu przyrostu na podstawie wizualnej oceny stacjonarności analizowanych szeregów.

Klasyczną techniką badania współzależności szeregów czasowych jest analiza korelacyjna. Oprócz stosowanego powszechnie współczynnika korelacji można takie badanie

poszerzyć badając korelacje szeregów przesuniętych względem siebie w czasie, tworząc funkcje korelacyjne.

Dla szeregów $X_N = \{x_1, \dots, x_N\}$, $Y_N = \{y_1, \dots, y_N\}$ definiuje je formuła (1):

$$R_{yxd} \stackrel{def}{=} \frac{E\{(Y_N - \bar{y})(X_{N-d} - \bar{x})\}}{\sqrt{E\{(Y_N - \bar{y})^2\}E\{(X_{N-d} - \bar{x})^2\}}} \cong \frac{1}{N-d} \frac{1}{\sigma_y \sigma_x} \sum_{n=d+1}^N (y_n - y_{sr})(x_{n-d} - x_{sr})$$

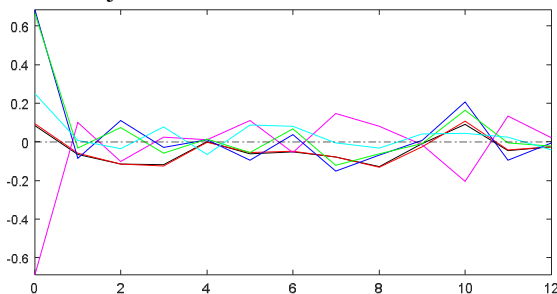
gdzie σ_x , σ_y , \bar{y} , \bar{x} , y_{sr} , x_{sr} oznaczają dyspersje i wartości oczekiwane i średnie ciągów X i Y , d – opóźnienie.

Wzór (1) można zastosować dla dowolnych ciągów, ale funkcja R_{yxd} jest miarodajna, gdy są one stacjonarnymi szeregami czasowymi [1,2]. Jeśli szeregi Y_N , X_{N-d} są stacjonarne, mają zerowe średnie ($y_{sr}=0$, $x_{sr}=0$) i są powiązane liniową funkcją regresji o postaci: $\hat{y}_n = ax_{n-d}$, to

$$a = (\sigma_y / \sigma_x) \cdot R_{yxd} \text{ oraz } \sigma_e / \sigma_y = \sqrt{1 - R_{yxd}^2},$$

gdzie σ_e – dyspersja reszt (2)

W przypadku szeregów niestacjonarnych, analizę korelacyjną można prowadzić dla reszt z uzyskanych dla przyrostów szeregów (po tzw. ustacjonaryzowaniu szeregu) lub po ekstrakcji trendów.



Rys. 3. Funkcje autokorelacji dla przyrostów miesięcznych analizowanych szeregów czasowych. Oznaczenia kolorów: BTC/USD – kolor czarny, BTC/PLN – czerwony, EUR/USD purpurowy, SDR/USD – niebieski, ValueUSD – zielony, CNY/USD – lazurowy.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych: <https://www.oanda.com/>, <https://stooq.pl/>

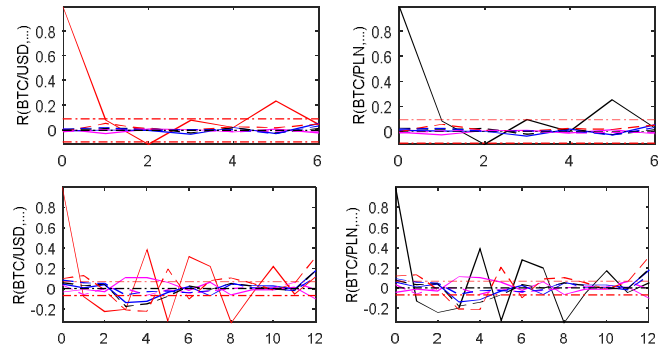
W analizie notowań giełdowych pewne problemy wynikają z niekompletności danych spowodowanej przerwami świątecznymi i technicznymi w działalności giełdy. Takie przerwy stanowią wprawdzie niewielką część wykorzystywanych tu danych (rzędu 1%) niemniej w każdym przypadku konieczne jest zapewnienie spójności wszystkich badanych szeregów.

W tych badaniach brakujące dane uzupełniono poprzez liniową interpolację. Uwzględnienie podstawowego czynnika dynamicznej współzależności szeregów, jakim jest opóźnienie, dostarcza istotnych informacji o randze poszczególnych parkietów i ujawnia wiodące giełdy a także wskazują na możliwości prognozowania wskaźników na podstawie wartości istotnych czynników. [1,2].

Przebiegi funkcji autokorelacji dla przyrostów miesięcznych, (autokorelacja oryginalnych danych nie wnosi tu żadnej informacji ze względu na niestacjonarność) wybranych wskaźników przedstawiono na rysunku 3. Jak

widać we wszystkich przypadkach autokorelacja jest pomijalna, gdyż wartości współczynników dla opóźnień większych od 0 są dużo mniejsze od 1. Oznacza to, że kolejne przyrosty są statystycznie niezależne, co wskazuje na brak wpływu wewnętrznej dynamiki parkietów na wartości wskaźników.

Podobne rezultaty otrzymano w badaniach funkcji autokorelacji dla przyrostów dziennych, gdzie praktycznie nie występuje autokorelacja dla poszczególnych szeregów badanych wskaźników.



Rys. 4. Przebiegi funkcji korelacji dla przyrostów dziennych do 6 dni (górny wykres) oraz dla przyrostów miesięcznych (wykres dolny) do 12 miesięcy. Oznaczenie kolorów: BTC/USD – kolor czarny, BTC/PLN – czerwony, EUR/USD – purpurowy, SDR/USD – kolor zielony, ValueUSD – kolor niebieski, CNY/USD – kolor lazurowy

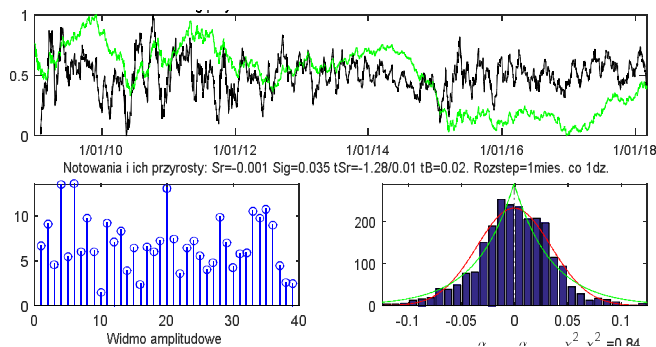
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych:

<https://www.oanda.com/fx-for-business/historical-rates?srcont=rightnav>, <https://stooq.pl>

Miarą powiązań bitcoina z gospodarką światową może być korelacja jego notowań z innymi wskaźnikami rynkowymi. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki analiz korelacyjnych w postaci przebiegów funkcji korelacji bitcoina z wybranymi walutami i notowaniami SDR dla opóźnień dziennych od 0 do 6 dni oraz dla opóźnień miesięcznych od 0 do 12 miesięcy.

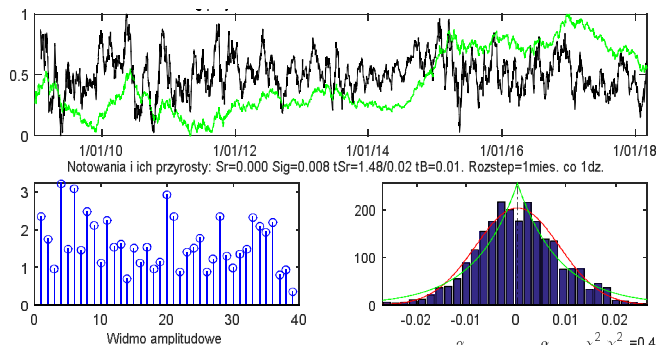
Jak widać z wykresów analiza korelacji wzajemnej przyrostów dziennych (rysunek górny) praktycznie nie ujawniła współzależności. Istnieje korelacja pomiędzy BTC/USD i BTC/PLN z opóźnieniem 5 dni lecz jest ona nieznaczna. Nieco ciekawsza sytuacja występuje dla opóźnień miesięcznych od 4 do 10 miesięcy. Tu interesujące mogą być współczynniki ujemne - w inwestycji może sugerować uniknięcie ryzyka. Jednak ten wynik ma marginalne znaczenie i nie poszerza wiedzy o relacjach bitcoina i światowej ekonomiki.

Na rysunkach 5-7 zestawiono charakterystyki wybranych szeregów przyrostów. Widać, że właściwości szeregów przyrostów (zamieszczone pod wykresami) dla kursów Euro i SDR w przybliżeniu można uznać za stacjonarne. Również widmo amplitudowe kolejnych elementów tych szeregów sugeruje niezależność statystyczną. Wahania widma można uznać za przypadkowe. W szczególności nie obserwuje się wyraźnych pików wskazujących na obecność dominujących składowych okresowych. Histogramy można uznać za typu „gausowskiego”



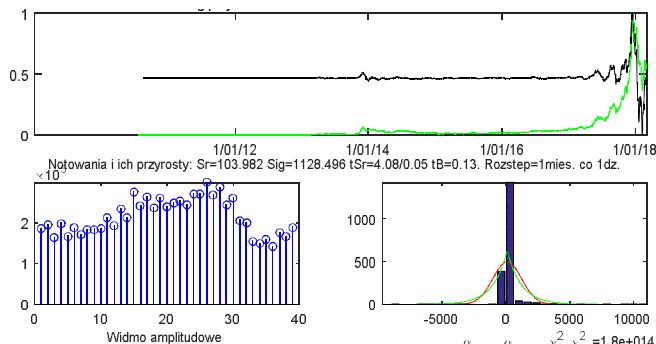
Rys. 5. Szereg przyrostów EUR/USD w okresie od 01.01.2009 do 04.03.2018

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Szereg przyrostów SRD/USD w okresie od 01.01.2009 do 04.03.2018

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Szereg przyrostów BTC/USD w okresie od 01.01.2009 do 04.03.2018

Źródło: opracowanie własne

III. ZAKOŃCZENIE

Każdy z analizowanych szeregów czasowych funkcjonuje w otoczeniu rynkowym. Można to zauważyć, na rysunkach 1 i 2 gdzie jakościowy charakter zmian tendencji, czyli wzrosty i spadki odwzorowują zdarzenia o charakterze globalnym jak np.: wyjście Wielkiej Brytanii z Unii Europejskiej, atak na WTC w Nowym Jorku, wojna w Iraku, akcesja 10 krajów

Europy Centralnej do Unii Europejskiej czy światowy kryzys finansowy. Rynek jest wrażliwy na zdarzenia globalne i żadne wnikliwe analizy nie dają gwarancji o słuszności wnioskowania.

Bitcoin, jest pozbawiony wpływów inflacyjnych, decyzji banków centralnych i można by rzec, że jest pomysłem idealnym. Jednak jego zachowanie, w szczególności w ostatnim roku, kiedy ujawnił swój nieobliczalny charakter, wykazując niemożliwe do wyjaśnienia duże skoki, (pozwoliły one na realizację znacznych zysków i strat), sprawia, że jest walutą(?) wysokiego ryzyka.

Przeprowadzone analizy wykazują istnienie korelacji pomiędzy różnymi walutami [1]. Jednak w naszych badaniach tak dla opóźnień dziennych i jak miesięcznych, dla par w których występuje bitcoin korelacja się nie ujawniła. W każdym przypadku pary waluty z bitcoinem nie obserwowano korelacji, lub korelację na bardzo niskim poziomie. Oznacza to, że przeprowadzone badania nie poszerzyły naszej wiedzy. Mimo to niektórzy analitycy twierdzą, że na podstawie informacji o niskich korelacjach można np. bezpiecznie budować swoje portfele inwestycyjne.[3]. Jednak specyfika bitcoina i nieobliczalne jego zachowanie w ostatnim roku raczej wykluczają takie działania. Bitcoin jest bardzo niestabilny, nie koreluje z żadnym z analizowanych szeregów. Trudno też przypuszczać, że zachodzi powtarzalność sytuacji na jego rynku, ale ta teza wymaga zbadania. Brak korelacji na rynku walutowym, z żadną z walut, może być też skutkiem powszechnego braku akceptacji dla bitcoina. O wiele bardziej korelują ze sobą waluty tradycyjne, które spełniają wszystkie wymagania związane z definicjami i funkcjami pieniądza. Bitcoin jako twór współczesności, nie pozwala dzisiaj jednoznacznie odpowiedzieć czy jest tworem wiarygodnym.

LITERATURA REFERENCES

- [1] A. Augustynek, A. Duda-Kekus "Effects of European Union Enlargement on East European stock markets and World Economy Indices", in *Business Management*, Bulgaria, 2006, No 3, p. 20-36
- [2] J.T. Duda, A. Augustynek, "Statistical links of Polish zloty and European currencies exchange rates with prices of petroleum products on world markets during the crisis 2008–12", in *Marketing management – selected issues* eds. Honorata Howaniec, Wiesław Waszkielewicz. — Bielsko-Biała, ATH, 2012, p. 163–190.
- [3] M. Gal, A. Pyć, "Rola kryptowaluty bitcoin na rynku walutowym", in *Journal of Capital Market and Behavioral Finance*, 2017, Vol. 3(7), p. 17–26.
- [4] A. Narayanan, J. Bonneau, *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: A Comprehensive Introduction*, Princeton University Press, 2016
- [5] A. Piotrowska, „Bitcoin a definicja i funkcje pieniądza”, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Oeconomia*, nr 3, 2014
- [6] K.S. Rogoff, *The Curse of Cash*. Princeton University Press, 2016
- [7] J. Williamson, *Understanding Special Drawing Rights SDRs*, Peterson Institute for International Economics Policy Brief, No. PB09-11, June 2009

Classification of Dermatological Shape Asymmetry Measures of Skin Lesion

Piotr Milczarski, Zofia Stawska

Faculty of Physics and Applied Informatics, University of Lodz, Pomorska str. 149/153, Lodz, Poland
{piotr.milczarski, zofia.stawska}@uni.lodz.pl

Анотація—У роботі обговорюється класифікація асиметрії ураження шкіри за допомогою різних методів. Ми коротко представляємо дерматологічну міру асиметрії за формою (DASMSHape) і показуємо її дві реалізації. Порівнюючи результати вимірювань DASMSHape та асиметрію ураження, дані експертами в наборі даних PH2, ми досягли найкращої точності (83,2%), використовуючи SVM з функцією ядра RBF для DASMSHape. Хоча результати NN знижуються на 9,5%, це завжди завищує асиметрію.

Abstract—In the paper, a classification of the skin lesion asymmetry using different methods is discussed. We present shortly dermatological asymmetry measure in shape (DASMSHape) and show its two implementations. Comparing the results of DASMSHape measures and a lesion asymmetry given by the experts in PH2 dataset we achieved the best accuracy (83.2%) using SVM with RBF kernel function for the DASMSHape. Although the NN results are lower by 9.5% it is always overestimating the asymmetry.

Ключові слова—дерматологічна асиметрія ураження шкіри, сегментація дерматологічних особливостей; класифікація ураження шкіри, підтримка векторної машини, kNN, нейронних мереж;

Keywords—dermatological asymmetry of skin lesion, dermatological features segmentation; skin lesions classification, support vector machine, kNN, neural networks;

I. INTRODUCTION

American Cancer Society (ACS) reports that the risk of Americans developing cancer over their lifetime is 37.6% for woman and 39.7% for males, where the melanoma risk is 1 in 42 cases for woman and 1 in 27 cases for males [1]. Detection of the early stage of melanoma is a fundamental task for dermatologists, because with the early diagnosis, the patients probability of survival increases greatly. To correctly identify the lesion we need to assign specific methods for diagnosis of disease symptoms. Under the 2001 Consensus Net Meeting on Dermoscopy (Argenziano G., J Am Acad Dermatol 2003), it was assumed that a three-point checklist is sufficient to avoid melanoma unrecognition.

Studies show the effectiveness of this method in the case of non-experts who achieved 96.3 % detection of malignant lesions [2,3]. However, the specificity achieved by non-experts was 32.8% in comparison to 94.2% achieved by the experts [2]. The presence of more than one feature suggests that the lesion is suspect for malignancy.

Presented above statistics of malignant melanoma detection suggest that the non-experts that are usually general practitioners need support. One of the ways to support the non-experts in the diagnosis can be an automated expert system [4,5,6]. Several computer-aided diagnostic systems to facilitate the early detection of suspicious skin lesions have been developed. To correctly identify the lesion we need to assign specific methods for diagnosis of disease symptoms, a 3-point checklist of dermatology (3PCLD) [2,7] or 7-point checklist (7PCL) [8] are sufficient to avoid melanoma unrecognition [9].

The three-point checklist [7] is based on a simplified pattern analysis and is intended for use by non-experts as a screening technique. The three-point checklist does not differentiate between melanocytic and non-melanocytic lesions. Its aim is to identify all potentially malignant lesions, including basal cell carcinoma and melanoma, with a high degree of sensitivity.

The three-point checklist is based on three dermoscopic criteria: (a) asymmetry in shape, hue/color and structure; (b) atypical pigment network; and (c) blue-white structures. The presence of two or three features suggests that the lesion is suspect for malignancy.

The paper is organized as follows. In Section 2, a general approach to the skin lesions recognition and classification is presented. Section 3 shows dermoscopic datasets. In the next section, dermoscopic asymmetry measure as a function of a shape, hue/color and structure is presented. Section 5 describes the dermatological asymmetry measure of shape of the skin lesions. In addition, results and observations of different asymmetry of shape functions are shown in Section 7. Conclusions are also drawn in that final section.

II. GENERAL APPROACH TO SKIN LESIONS RECOGNITION

To achieve a final prediction computer-aided diagnostic system must perform three steps:

The first step is image processing to achieve lesions segmentation with their borders.

The second essential step is clinical feature segmentation [9] with resulting binary masks of clinical feature segments basing on the first step.

The final classification (**the third step**) is based on the feature selection and classifier model optimization taking into account two previous steps as well as patient dermographic data [10].

Skin lesion is most often characterized by a texture or color different than in normal skin. Segmentation of lesions

means finding lesions borders and it can be done by various well-known methods [11,12].

The raw images and dermographic data of the patient can be kept in a single or distributed database. Construction of classifier requires set of features characterizing the samples. Some features can be taken using dermoscopic images, but others have to be collected clinically. Final step is using this features in selected classification method. Commonly used classifiers are neural network, k-nearest neighbors or support vector.

There are a few publicly available databases of dermoscopy images. PH2 [13] and EDRA [14] image databases are most commonly used by the research communities. The other example is the ISIC Archive for the Melanoma project which is a large public database of dermoscopy images [15] created by International Skin Imaging Collaboration (ISIC).

In our research we use PH2 [13] as the reference datasets. It contains 200 dermoscopic 8-bit RBG color images with a resolution of 768x560 pixels along with the corresponding medical annotations, comprising 80 common nevi, 80 atypical nevi, and 40 malignant melanomas acquired using a magnification of 20x under unchanged conditions.

III. THE THREE-POINT CHECKLIST OF DERMOSCOPY (3PCLD)

To correctly identify the lesion we need to assign specific methods for diagnosis of disease symptoms. Such methods are ABCD evaluation scale, 3-point checklist of dermoscopy (3PCLD) and 7-point checklist (7PCL).

Calculating asymmetry of shape, structures, and hue is one of the most important factors of correct diagnosis process of skin lesion [16]. In the paper, we focus on calculating asymmetry of shape. It is a starting point to asses asymmetry of the lesion because it is defined as asymmetry of shape, structures and hue.

3-point checklist of dermoscopy, 3PCLD is defined as:

- Asymmetry of shape, hue and structures in 1 or 2 perpendicular axes;
- Atypical pigment network with thickened lines and irregular distribution;
- Blue-white structures (veil) - any blue and/or white color within the lesion.

Two or more points suggest the diagnosis of atypical/malignant lesion.

IV. DERMATOLOGICAL ASYMMETRY MEASURE, DASM

In [17] Dermatological Asymmetry Measure (DASM) have introduced – integral asymmetry measure depending on shape, hue/color and structure.

In the above mentioned databases, especially PH2 the values for calculating asymmetry are given as follows encountered value 0 means fully symmetric, 1 means symmetric in 1 axes, 2 means fully asymmetric.

To achieve more precision we have proposed specific values to perform DASM (Dermatological Asymmetry

Measure). These values are continuous and are described as follows:

- •Shape $\langle 0, 2 \rangle$
- •Color/hue $\langle 0, 2 \rangle$
- •Structure $\langle 0, 2 \rangle$

We have also increased the asymmetry count by adding the asymmetry of hue and structure. Our method predicts the asymmetry division into asymmetry of shape, hue/color and structure.

V. DERMATOLOGICAL ASYMMETRY MEASURE OF SHAPE, DASMSHAPE

After segmentation of the lesion and the features in the lesion, we have acquired binary masks. The next step is to select features for the classification of the lesion. One of the features is asymmetry of the shape, hue and structure. In the [17] we proposed a new measure to estimate the asymmetry of the shape of the lesion. The shape of the lesion in our case means a binary mask of the lesion. We propose the dermatological asymmetry as a real value from $\langle 0,2 \rangle$.

In the paper, we use the following definitions and abbreviations defined in [17]:

- DAS – Dermatological Asymmetry, it is asymmetry of the shape, hue and structure. In dermatology, as we mentioned above, the value of the asymmetry can be: 0 for fully symmetric shapes; 1 for symmetric ones in one axis or 2 for asymmetric ones.
- DASM – Dermatological Asymmetry Measure – real asymmetry measure depending on shape, hue/color and structure;
- DASMShape – Dermatological Asymmetry Measure of Shape symmetry/asymmetry;
- DASM Hue – Dermatological Asymmetry Measure of Hue/Color symmetry/asymmetry distribution;
- DASMStruct – Dermatological Asymmetry Measure of Structure symmetry/asymmetry distribution;
- GSSPT - a geometrical shape symmetry precision threshold of binary mask of the lesion is a threshold that after the axial transformation the original binary mask and mirror are the same in at least threshold value. GSSPT values are real values from $\langle 0,1 \rangle$, e.g. 0.95 threshold means that the mirrored images are in 95% cover each other. The bigger the threshold the bigger similarity between mirrored images. The symmetry axis, SAx, depends on the GSSPT as well as the number of the symmetry axes for a given shape.
- NSA – number of symmetry axes depending on GSSPT.
- VoSS – a vector of shape symmetry, it as a vector which coefficients are equal to the number of symmetry axes.

Figures 2a-c show different masks for lesions with their corresponding dermatological asymmetry values assessed by the dermatology experts [13].

TABLE I. THE EXAMPLES OF \mathbf{W} VECTOR FOR IMAGES FROM PH2 DATASET

Image ID from PH2	VoSS vector \mathbf{W} coefficient values					DAS (PH2)	DASMShape values for $f(\mathbf{W})$ and coefficients \mathbf{a}				
	$n(0.9)$	$n(0.93)$	$n(0.94)$	$n(0.95)$	$n(0.97)$		a_x	a_y	a_z	a_k	a_m
IMD075	1	1	1	0	0	2	1.80666	1.86479	1.66943	1.78412	1.25000
IMD211	2	1	1	1	0	1	1.25627	1.48164	1.18193	1.31406	0.90909
IMD406	13	6	5	2	0	2	0.00747	0.02969	0.00290	0.61862	0.28571



Fig. 1. The masks of the selected lesions from PH2 dataset [13] with dermatological asymmetry DAS:

a) IMD075 (Atypical nevus) DAS=2; b) IMD211 (Nodular Melanoma) DAS=1; c) IMD406 (Nodular Melanoma) DAS= 2

The method of deriving and estimating the new dermatological asymmetry measure value can be described as follows:

1. Calculate the number of symmetry axes for a given set of GSSPT thresholds $n(t_i)$, where t_i is a given threshold. After our experimental research we propose to choose the threshold values as a subset of a set of: $\{0.9, 0.91, 0.92, 0.93, 0.94, 0.95, 0.96, 0.97, 0.98\}$.
2. From the values of $n(t_i)$ construct a vector of shape symmetry (VoSS) \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} = [n(t_1), n(t_2), \dots, n(t_k)], \quad (1)$$

where $k \geq 2$.

3. Design the DASMShape, Dermatological Asymmetry Measure of Shape, as a function of VoSS. Because the values of DASM and DASMShape are real value from $\langle 0, 2 \rangle$ we propose two types of functions that have

positive, normalized to maximum value of 2 and are continuous measures.

- a. The first type defined as an exponent of function depending on a VoSS vector \mathbf{W} :

$$DASMShape(\mathbf{W}) = 2 \exp(-f(\mathbf{W})), \quad (2)$$

where function $f: R^k \rightarrow R^+ \cup \{0\}$.

- b. The second type defined as rational function depending on a VoSS vector \mathbf{W} :

$$DASMShape(W) = \frac{2}{f(W)} \quad (3)$$

where inner function $f: R^k \rightarrow \langle 1, \infty \rangle$.

For each of the DASMShape functions let us introduce a set of two crisp shape thresholds (ST): $ST = \{1st, 2st\}$, where

TABLE II. SKIN LESION ASYMMETRY CLASSIFICATION RATE USING THE BEST CLASSIFIERS

Classifier	Type of DAS/ DASMShape	Number of Corr. Classified Instances	Number of Incorr. Classified Instances	Class. ratio	TP rate for a class			FP rate for a class		
					0	1	2	0	1	2
3NN	DAS(PH2)	57	110	34.1	18.7	61.3	62.1	10.0	55.9	20.3
	DASMShape1	97	70	58.1	30.2	100	82.1	0.0	49.3	0.0
	DASMShape2	100	67	59.9	28.9	96.7	95.7	0.0	48.2	0.8
SVM (RBF)	DAS(PH2)	83	84	49.7	48.6	41.9	62.1	23.3	31.6	19.6
	DASMShape1	134	33	80.2	75.6	96.0	80.4	1.2	22.5	0.0
	DASMShape2	139	28	83.2	71.1	100	95.7	2.6	19.0	0.0
NN	DAS(PH2)	76	91	45.5	40.2	45.2	65.5	16.7	33.8	25.4
	DASMShape1	107	60	64.1	53.5	60.0	82.1	8.6	31.7	7.2
	DASMShape2	123	44	73.7	58.9	76.7	100	0.0	27.0	5.8

$$0 \Leftrightarrow \text{DASMShape}(W) < lst$$

$$ST(\text{DASMShape}(W)) = 1 \Leftrightarrow lst \leq \text{DASMShape}(W) < ust \quad (4)$$

$$2 \Leftrightarrow \text{DASMShape}(W) > ust$$

The values of lst and ust will depend on the DASMShape function type and will be derived after optimization of results. The number of misclassified images should have minimum value parallelly with the number of underestimated cases.

VI. RESULTS AND CONCLUSIONS

In our experimental research we have tested several versions of function $f(\mathbf{W})$ in (2) and (3) with different coefficients and for a different subset of GSSPT thresholds. The smaller the number of thresholds values the faster deriving of VoSS vector \mathbf{W} defined as in (1). We have achieved the best results for the following subset of threshold values:

$$\{0.9, 0.93, 0.94, 0.95, 0.97\} . \quad (4)$$

In our experiments we have tested three versions of kNN (1NN, 3NN, 5NN), 2 versions of SVM (RBF and linear function) and NN classifiers with different set of properties. We have prepared the training set containing 38 cases of shape symmetry (VoSS) \mathbf{W} vectors. The training set cross-validation accuracy was 86.8% for 3NN, 97.4% for NN and 100% for SVM.

In the Tab. II, the best classification ratios as well as true positive and false positive classification ones are presented. We achieved the best results for 3NN, SVM with radial basis kernel function (RBF) and neural network with one hidden layer with 10 nodes. Although for the DASMShape2 measure, the SVM with RBF is achieving the best results (83.2% accuracy), the NN classifier (73.7%) always overestimated the asymmetry of the lesion while SVM was underestimating the classification results in two asymmetric cases (DASM=2) and gave them the asymmetry equal 0. DAS measure from PH2 is giving the lowest results but that measure takes also into account color and structure asymmetry.

REFERENCES

- [1] ACS – American Cancer Society - <https://www.cancer.org/research/cancer-facts-statistics.html>.
- [2] G. Argenziano, H. P. Soyer, S. Chimenti, R. Talamini, R. Corona, F. Sera, M. Binder, L. Cerroni, G. De Rosa, G. Ferrara and R. Hofmann-Wellenhof, "Dermoscopy of pigmented skin lesions: results of a consensus meeting via the Internet," *Journal of the American Academy of Dermatology*, vol. 48, no. 9, pp. 679-693, 2003.
- [3] C. Carrera, M.A. Marchetti, S.W. Dusza, G. Argenziano, et al., "Validity and Reliability of Dermoscopic Criteria Used to Differentiate Nevi From Melanoma: A Web-Based International Dermoscopy Society Study," *JAMA Dermatol.* 2016 Jul 1; 152(7), pp 798–806.
- [4] P. Milczarski, Z. Stawska, L. Was, S. Wiak, M. Kot., "New Dermatological Asymmetry Measure of Skin Lesions," *Int. Journal of Neural Networks and Advanced Applications*, Vol.4, 32-38, 2017.
- [5] P. Milczarski, Z. Stawska and P. Maslanka, "Skin Lesions Dermatological Shape Asymmetry Measures," in: *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS*, pp. 1056-1062, 2017.
- [6] L. Was., P. Milczarski, Z. Stawska, et al., "Analysis of skin diseases using segmentation and color hue in reference to melanocytic lesions," in *LNCIS 10245*, Springer, pp. 677-689, 2017.
- [7] H. P. Soyer, G. Argenziano, I. Zalaudek, R. Corona, F. Sera, R. Talamini, et al., "Three-point checklist of dermoscopy. A new screening method for early detection of melanoma," *Dermatology* 2004; 208(1):27–31, 2004.
- [8] G. Argenziano, G. Fabbrocini, P. Carli, V. De Giorgi, E. Sammarco, M. Delfino, "Epiluminescence microscopy for the diagnosis of doubtful melanocytic skin lesions. Comparison of the ABCD rule of dermoscopy and a new 7-point checklist based on pattern analysis," *Arch. Dermatol.* 134, 15631570, 1998.
- [9] C. Barata, M. Ruela, M. Francisco, T. Mendonça and J. S. Marques, "Two systems for the detection of melanomas in dermoscopy images using texture and color features," *IEEE Systems Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 965-979, 2014.
- [10] M. Abedini, Q. Chen, N. C. F. Codella, R. Garnavi and X. Sun, "Accurate and Scalable System for Automatic Detection of Malignant Melanoma," in *Dermoscopy Image Analysis*, M. E. Celebi, T. Mendonça and J. S. Marques, Eds., Boca Raton, CRC Press, pp. 293-343, 2015.
- [11] A.K. Jain, "Fundamental of Digital Image Processing," Prentice Hall of India, 2002.
- [12] P. Wighton, T.K. Lee, H. Lui, D.I. McLean, M.S. Atkins, "Generalizing common tasks in automated skin lesion diagnosis," *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* 15, 622- 629, 2011.
- [13] T. Mendonça, P. M. Ferreira, J. S. Marques, A. R. S. Marcal, J. Rozeira, "PH2 – A dermoscopic image database for research and benchmarking," in: *35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Osaka, pp. 5437-5440, 2013.
- [14] G. Argenziano, H. P. Soyer, V. D. Giorgio, D. Piccolo, P. Carli, M. Delfino, A. Ferrari, R. Hofmann-Wellenhof, D. Massi, G. Mazzocchetti, M. Scalvenzi and I. H. Wolf, "Interactive atlas of dermoscopy," Milan: Edra Medical Publishing & New Media, 2000.
- [15] The International Skin Imaging Collaboration: Melanoma Project - <http://isdis.net/isic-project/>
- [16] C. Rosendahl, A. Cameron, I. McColl, D. Wilkinson, "Dermoscopy in routine practice: 'Chaos and Clues'," *Aust Fam Physician.* 41(7), 482487, 2012.
- [17] P. Milczarski, Z. Stawska, L. Was, S. Wiak and M. Kot, "New Dermatological Asymmetry Measure of Skin Lesions," *Int. Journal of Neural Networks and Advanced Applications*, Prague, pp. 32-38, 2017.

Розв'язання Задачі Підрахунку Об'єктів при Складних Умовах Отримання Зображень

Роман Кветний
Кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної
техніки,
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
rkvetny@sprava.net

Олег Бісікало
Кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної
техніки,
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
obisikalo@gmail.com

Володимир Коцюбинський
Кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної
техніки,
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
vkotsyubinsky@sprava.net

Роман Маслій
Кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної
техніки,
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
romas4580@gmail.com

Олександр Кириленко
Кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної
техніки,
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
sasha.kyrylenko@gmail.com

Solving the Problems of Counting Objects in Complicated Conditions for Obtaining Images

Poman Kvyetnyy
Department of automation and information measuring
devices,
Vinnytsia national technical university,
Vinnytsia, Ukraine
rkvetny@sprava.net

Oleg Bisikalo
Department of automation and information measuring
devices,
Vinnytsia national technical university,,
Vinnytsia, Ukraine
obisikalo@gmail.com

Roman Maslii
Department of automation and information measuring
devices,
Vinnytsia national technical university,,
Vinnytsia, Ukraine
romas4580@gmail.com

Volodymyr Kotsyubinsky
Department of automation and information measuring
devices,
Vinnytsia national technical university,,
Vinnytsia, Ukraine
vkotsyubinsky@sprava.net

Alexandr Kyrylenko
Department of automation and information measuring
devices,
Vinnytsia national technical university,,
Vinnytsia, Ukraine
sasha.kyrylenko@gmail.com

Анотація—в даній роботі досліджуються задача обробки зображень, отриманих у складних умовах, використовуючи згорткові нейронні мережі, для визначення кількості автомобілів з відеозаписів низької якості, які записуються камерами.

Abstract—in this paper we investigate the problem of processing images obtained in difficult conditions using convolutional neural networks to determine the number of cars from low quality video recorded by cameras.

Ключові слова - виявлення об'єктів, підрахунок кількості об'єктів, глибоке навчання, OpenCV.

Keywords - object detection, object counting, deep learning, OpenCV.

I. ВСТУП

На сьогоднішній день велика кількість міст оснащена сотнями відеокамер на вулицях та перехрестях. Вони цілодобово записують рух транспортних засобів, збираючи велику кількість відеоданих. Ці камери можуть виконувати багато функцій, адже завдяки засобам комп'ютерного зору вони можуть аналізувати потік автомобілів та рахувати кількість перехожих; проте, такі їхні можливості наразі не використовуються у повній мірі.

Підрахунок кількості автомобілів є досить важливою задачею в багатьох сучасних застосуваннях, наприклад, в управлінні трафіком міського транспорту. Проте, водночас це є надзвичайно складною задачею, через обмеження пропускну здатності мереж, недостатній об'єм пам'яті для збереження записів та проблеми приватності. Крім того відео отримані з таких камер характеризуються: низькою роздільною здатністю, низькою частотою кадрів; великим відсотком перекриття автомобілів іншими автомобілями, особливо в години пік; великою перспективою. Все це ускладнює підрахунок автомобілів за допомогою відеокамер.

Метою даної роботи є аналіз підходів до підрахунку кількості об'єктів у реальному часі в відеопослідовностях та дослідження задачі підрахунку на прикладі автомобілів.

II. ПІДХОДИ ДО ПІДРАХУНКУ ОБ'ЄКТІВ

В якості об'єктів для підрахунку у відео послідовності були вибрані автомобілі. В результаті аналізу літературних джерел виділимо такі підходи до підрахунку [1]:

frame differencing based (методи основані на різниці у фреймах) – характеризуються легким налаштуванням параметрів, але мають високу чутливість до шумів, різких змін освітлення та змін на задньому фоні;

detection based (методи основані на виявленні об'єктів) - успішно відстежують окремі автомобілі в кожному кадрі, проте не показують високих результатів при низькій роздільній здатності відео та великому відсотку перекриття автомобілів іншими автомобілями;

motion based (методи основані на русі об'єкту) – здійснюють відстеження автомобілів, але не здатні підраховувати кількість автомобілів у реальному часі при низькій частоті кадрів.

density estimation based (методи основані на оцінці щільності ймовірності) – не показують високих результатів при великій перспективі та автомобілів великих розмірів;

методи основані на глибокому навчанні (deep learning based) - останнім часом показують високі результати виявлення та підрахунку автомобілів, що робить їх досить перспективними при застосуванні у складних умовах.

III. ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ПІДРАХУНКУ ОБ'ЄКТІВ

Застосування багатошарового перцептрона з традиційною структурою при вирішенні реальних задач розпізнавання і класифікації зображень викликає певні труднощі. По-перше, зображення, як правило, мають велику розмірність, внаслідок чого зростає число нейронів і синаптичних зв'язків у мережі. У свою чергу, це вимагає збільшення навчальної вибірки, внаслідок чого збільшується час і обчислювальна складність процесу навчання. По-друге, ігнорується топологія вхідних даних. Компоненти вхідного шару можуть бути представлені в будь-якому порядку, без урахування мети навчання. Однак зображення мають строго двовимірну структуру, в якій існує залежність між просторово-сусідніми пікселями [2].

Від цих недоліків вільні так звані згорткові нейронні мережі, які являють собою особливий клас багатошарових перцептронів, спеціально створених для розпізнавання двовимірних поверхонь з високим ступенем інваріантності до масштабування, зсуву, повороту, зміни ракурсу та інших просторових спотворень, і глибокі НМ побудовані на базі автоенкодерів, попереднє навчання яких здійснюється на базі обмежених машин Больцмана [2].

Глибока нейронна мережа (DNN – Deep Neural Network) це штучна нейронна мережа з декількома прихованими шарами. Подібно до звичайних нейронних мереж, глибокі нейронні мережі можуть моделювати складні нелінійні відносини між елементами. У процесі навчання глибокої нейронної мережі отримувана модель намагається представити об'єкт у вигляді комбінації простих примітивів (наприклад, у задачі розпізнавання осіб такими примітивами можуть бути частини обличчя: ніс, очі, рот і так далі). Додаткові шари дозволяють будувати абстракції все більш високих рівнів, що і дозволяє будувати моделі для розпізнавання складних об'єктів реального світу.

Як правило, глибинні мережі будуються як мережі прямого поширення. Однак останні дослідження показали, як можна застосувати техніку глибинного навчання для рекурентних нейронних мереж. Згорткові нейронні мережі використовуються в області машинного зору, де цей підхід показав себе як ефективний. Також згорткові нейронні мережі були застосовані для розпізнавання мови.

Згорткова нейронна мережа (ЗНМ) – тип багатошарової нейронної мережі, яка свою назву «згорткова мережа» отримала за назвою операції – згортка, вона часто використовується для обробки зображень і може бути описана наступною формулою

$$(f \times g)[m, n] = \sum_{k, l} f[m - k, n - l] \cdot g[k, l],$$

де f – вихідна матриця зображення; g – ядро (матриця) згортки.

Неформально цю операцію можна описати наступним чином – вікном розміру ядра g проходимо з заданим кроком (зазвичай 1) все зображення f на кожному кроці поелементно множимо вміст вікна на ядро g , результат сумується і записується в таблицю результату.

Ідея згорткових нейронних мереж полягає в чергуванні згорткових шарів (англ. convolution layers) і субдискретизуючих шарів (англ. subsampling layers, верств підвибірки) [2].

Структура мережі – односпрямована (без зворотних зв'язків), багатошарова (рис. 1). Модель згорткової мережі складається з трьох типів шарів: згорткові (convolutional) шари, субдискретизуючі (subsampling, підвибірка) верстви і прошарки «звичайної» нейронної мережі – перцептрона.

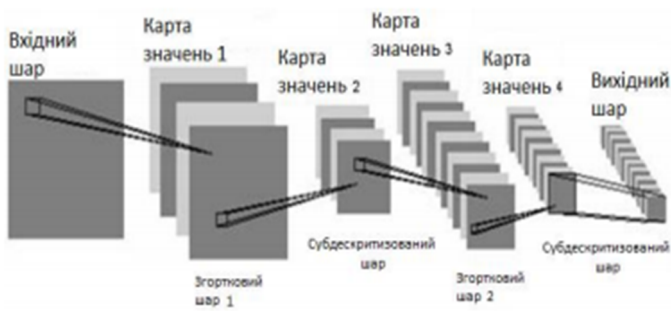


Рис. 1. Структура згорткової мережі.

Архітектура згорткових нейронних мереж реалізує три ідеї, які забезпечують інваріантність мережі до невеликих зрушень, змін масштабу і спотворень [2]:

- кожен нейрон отримує вхідний сигнал від локального рецептивного поля (local receptive fields) у попередньому шарі, що забезпечує локальну двовимірну зв'язність нейронів;
- кожен прихований шар мережі складається з безлічі карт ознак, на яких всі нейрони мають загальні ваги (shared weights), що забезпечує інваріантність до зміщення і скорочення загальної кількості вагових коефіцієнтів мережі;
- за кожним шаром згортки слідує обчислювальний шар, який здійснює локальне усереднення та підвибірку, що забезпечує зменшення розширення для карт ознак.

Робота згорткової нейронної мережі забезпечується двома основними елементами.

Фільтри (filters) (визначники ознак).

Кarti ознак (feature maps).

Кarti ознак (feature maps).

Фільтр – це невелика матриця, що представляє ознаку, яку необхідно знайти на вихідному зображенні. За допомогою верхнього фільтра визначаються частини вихідного зображення з вертикальними лініями, нижній фільтр служить для визначення частин зображення з горизонтальними лініями.

Безпосередньо процес визначення заснований на операції згортки фільтром оригінального зображення. Результати згортки, які визначають місце розташування ознак вихідного зображення, називаються картами ознак [2].

Мета процесу згортки – зменшити розмірність карти ознак до такої міри, щоб з повним набором ознак могла працювати мережа прямого поширення (в більшості випадків багатошаровий перцептрон). Згортковий шар реалізує ідею локальних рецептивних полів, тобто кожен вихідний нейрон з'єднаний тільки з певною (невеликою) областю вхідної матриці і таким чином моделює деякі особливості людського зору [2].

Недоліками згорткових нейронних мереж (ЗНМ) є:

- висока складність архітектури;
- повнозв'язаність;
- фіксована площа вікна шару згортки.

З метою підвищення ефективності роботи ЗНМ необхідно знайти оптимальні значення наступних параметрів:

- кількість карт ознак;
- щільність зв'язків між картами ознак;
- розмір вікна;
- площа перекриття;
- початкова ініціалізація ваг [2].

IV. ПРОЕКТУВАННЯ ТА НАВЧАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ПІДРАХУНКУ ОБ'ЄКТІВ

DIGITS (Deep Learning GPU Training System) - система підготовки глибокого навчання при використанні графічних процесорів NVIDIA [3]. Дана система використовується вченими та інженерами для швидкої підготовки та навчання глибоких нейронних мереж для задач класифікації зображень, сегментації та виявлення об'єктів.

За допомогою даної системи, було спроектовано згорткову нейронну мережу та здійснено її навчання на наборі даних KITTI [4], результати навчання нейронної мережі зображено на рисунку 2.

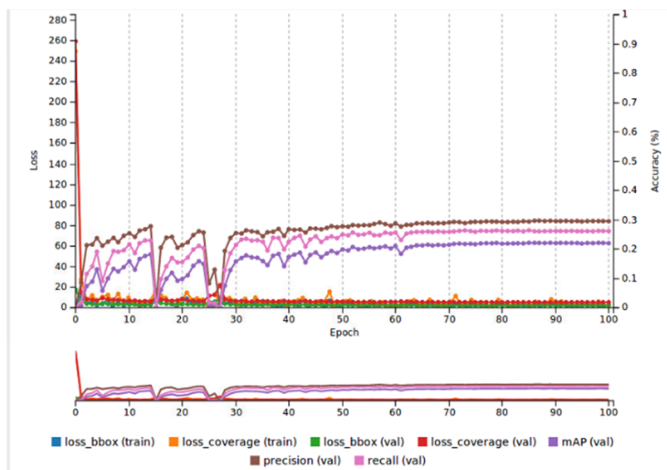


Рис. 2. Результат навчання нейронної мережі в DIGITS

В результаті навчання нейронної мережі на 100 епохах було досягнуто таких показників вірогідності виявлення на валідаційному наборі даних: precision (val) = 82%, recall (val) = 73%, mAP (val) = 62%.

Приклад виявлення автомобілів у складних умовах освітлення на тестовому зображенні при використанні навченої нейронної мережі зображено на рисунку 3.

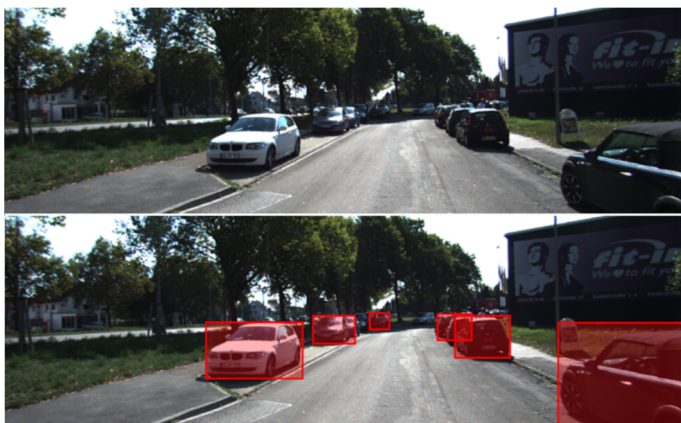


Рис. 3. Приклад виявлення автомобілів

На основі моделі, отриманої в результаті глибокого навчання нейронної мережі при використанні NVIDIA DIGITS, було розроблено програму, що здійснює виявлення та підрахунок автомобілів у відеопослідовностях. Програма розроблена на мові Python з використанням бібліотеки OpenCV. Результат роботи програми зображено на рисунку 4.



Рис. 4. Результат роботи програми

ВИСНОВКИ

У роботі проведений аналіз підходів до підрахунку кількості об'єктів при складних умовах отримання зображень. Розглянуто переваги та недоліки методів. Перспективним для подальших досліджень визначено підхід, що використовує глибоке навчання, так як існуючі методи з цього підходу показують найкращі результати по критерію вірогідності, в тому числі при складних дорожніх умовах, низькій роздільній здатності та низькій частоті відеокадрів.

Розроблено програму, що здійснює виявлення та підрахунок автомобілів у відеопослідовностях, на основі моделі отриманої в результаті глибокого навчання нейронної мережі при використанні NVIDIA DIGITS.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Zhang Sh. FCN-rLSTM: Deep Spatio-Temporal Neural Networks for Vehicle Counting in City Cameras / Sh. Zhang, G. Wu, J. P. Costeira, J. M. F. Moura // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2017.
- [2] Синеглазов В. Глибокі нейронні мережі для вирішення завдань розпізнавання і класифікації зображення [Електронний ресурс] В. Синеглазов, О. Чумаченко. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://itcm.comp-sc.if.ua/2017/Sineglazov.pdf>.
- [3] NVIDIA DIGITS [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://developer.nvidia.com/digits>. – Назва з екрану.
- [4] Fritsch J. A New Performance Measure and Evaluation Benchmark for Road Detection Algorithms / J. Fritsch, T. Kuehnl, A. Geiger // International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) – 2013.

Some Aspects of Functional Programming Languages Application in the Parallelization Problems

Orest Geiko
Department of Computer Science
Vasyl Stefanyk Precarpathian
National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
ifgo69@gmail.com

Artur Martsinkovskyi
Department of Computer Science
Vasyl Stefanyk Precarpathian
National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
arthurmarz.learn@gmail.com

Деякі Аспекти Використання Функціональних Мов Програмування в Задачах Паралелізації

Орест Гейко
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника
Івано-Франківськ, Україна
ifgo69@gmail.com

Артур Марцінковський
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника
Івано-Франківськ, Україна
arthurmarz.learn@gmail.com

Abstract—This article is a consideration of some aspects of functional programming, that are used for parallel computation and creation of asynchronous applications on the basis of referential transparency, pure functions; persistent data structures and data immutability. This is a review of features that functional algorithms like Map/Reduce possess in the usecases of the parallel data processing of huge datasets.

Анотація—В статті розглянуто деякі аспекти функціонального програмування, які використовуються для паралелізації обчислень та формування асинхронних додатків на основі прозорості посилань, чистих функцій; персистентних структури даних та імутабельності даних. Розглянуто особливості функціональних алгоритмів для паралельної обробки гігантських наборів даних, таких як Map/Reduce.

Keywords—*distributed programming, functional programming, execution in parallel.*

Ключові слова—*дистрибутоване програмування, функціональне програмування, паралелізм.*

I. INTRODUCTION

From the 80-s years of XX-th century the orders of growth of speed of the hardware like processors and RAM[1] of information systems have allowed us to use substandard software that lacked optimisation. The flaws of software were neglected due to the fast growth of the computational power. The scale of data processed was not very huge. the nature of the tasks that computers had to perform was far from complex

either permissible in the means of time of execution. Recent development and comprehensive nature of computer networks caused rapid change in the scale of data that needed to be transmitted, stored and processed. At the same time, orders of growth for capabilities of computers are not as high as the need for them, that requires multithreading and clusterization efforts to be able to process data streams coming in.[2] This makes parallel execution a requirement for any modern system. Parallel execution can be regarded as a powerful tool for making data processing more efficient, but it also puts some additional requirements and brings up issues that have never been a problem in sequential programming. These problems mostly consist of modification and access issues that can come to life in any system that processes and stores data in parallel. Functional programming and algorithms are the efficient way to handle such issues.

II. RESEARCH RELEVANCE

Usual imperative paradigm, as well as object-oriented paradigm is not very suitable for the distributed data processing. Programs in these paradigms are sequential and have side effects, that can affect on the process of execution unexpectedly. On the other hand, functional programs when composed in the right fashion, can make parallelization much easier. There is a multitude of features that are unique to the functional paradigm: immutability of data, pure functions, referential transparency, recursive algorithms, functors, convolutions and higher order functions, persistent data

structures. All of these elements of functional programming let us to avoid some classes of errors that are usual for parallel execution, like deadlocks, data corruption on simultaneous write, race conditions. Also, functional algorithms are better at scaling and distribution amongst multiple computers. The main elements of functional programming that provide us with advanced parallelization techniques are[2]:

- Pure functions. Pure functions are functions that do not have IO side effects and memory(the are stateless, which means that they don't have any state and return same values for different calls with same arguments). They allow reinterpretations and optimizations on the compile(interpreter processing) stage. The result of pure function call can be cached in a hash table, allowing substantial speed-up for recursive algorithms. Also, such functions can be considered thread-safe.
- Referential transparency. Referential transparency is one of the fundamental principles of the functional programming; only referentially transparent functions can be memoized(transformed into the equivalent functions that use cached results). Some languages provide the programmer with tools to guarantee this structure. Some other on the other hand require referential transparency in all functions. Due to the fact that this features requires same output for same input in any time, the referentially transparent expression is determined by the definition. This allows the programmer to avoid some extra calculations that frequently appear in the flow of parallel programming.[6]
- Persistent data structures. Persistent data structures are kind of data structures that retain access to the previous versions. If we have the sequence of p elements and we have to change the element n in it, we create the new version of the structure that is different from the previous only be the value of the n-th element. As a result, we will have two versions of the sequence with access to each one of them. This technique lets the programmer keep the data structure fast an immutable at the same time sparing memory by reusing it.
- Functors. Any class or data type, that stores values and implements method map is called a functor. Also, functor should return the collection with the same type to the collection passed to it.[7] For example, array is a functor, because an array is data structure that stores values and implements method map that allows us to apply the function against the values it stores. A benefit from such approach to the parallelization lies in the fact that transformation of the elements is independent which means that the sequence can be divided into ranges each of which would be transformed in parallel.
- Monads. The main application of monads in the functional programming is the isolation of the IO and stateful behaviour. The principle of monad

application is the fact that function that don't create the side effect itself, it can create and can be used later. But IO and statefulness are not the only usecases for monads. They are useful when the programmer wants to describe the calculations in purely functional manner, at the same time executing other calculations in parallel.[4] Thus, two main usecases of monads are sequential calculations and handling of the inherently side-effect generated data.

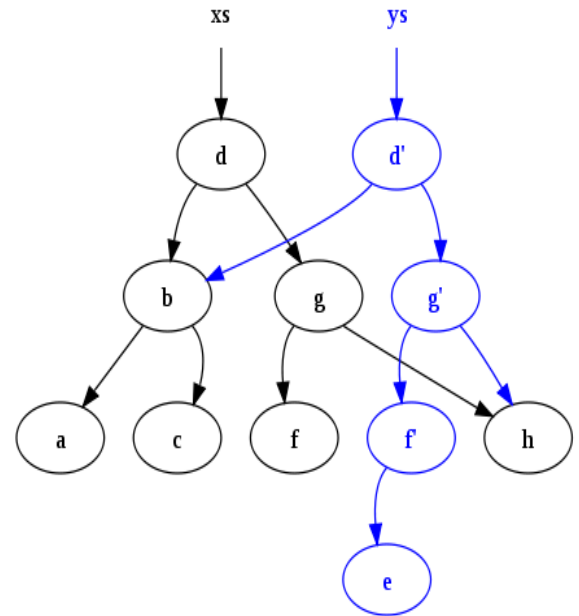


Fig 1. Representation of the work of persistent data structures (hash tables, vectors, lists, etc.)

III. PRACTICAL IMPLEMENTATION OF FUNCTIONAL PROGRAMMING IN PARALLELIZATION

The most famous use of the ideas of functional programming in parallel for relatively fast analysis and processing of huge amounts of data is the Google MapReduce algorithm.

This algorithm consists of two successive steps: the clustering of functors to an array of data and subsequent convolution, map steps and reduces accordingly (there can be more than one functor, for example, on Figure 2. there are three of them).

In the map step, a conversion is applied to each element of an array of input data that changes its contents, but retains the number of elements. In the case of distributed architecture, for the map step, the host computer receives the input data array, marks it and distributes it between its nodes by specifying the transformation. This process can take place several times before the convolution.

In the reduce step, a convolution of pre-processed data occurs. The main node receives responses from the working units and, based on them, forms the result - a solution to the problem that was initially formed.

The advantage of this algorithm is the possibility of its almost unlimited scaling, the absence of a global state and

the possibility of an iterative data flow with multiple transformations and reductions, of which even the hierarchical system can be built [4].

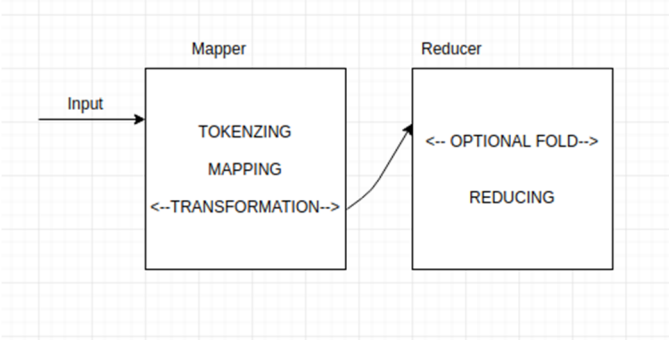


Fig 2. Listing an application of the Map Reduce algorithm for counting words in incoming texts with the possibility of parallelisation on Clojure

```
(defn map-reduce[documents]
  (merge-count-reduce
    (map
      (comp
        count-reduce
        sanitize-map
        word-filter) documents)))

(def docs [["a" "." "c"] ["mine" "token" "is"
"here" "a"]])
```

```
(require '[clojure.string :as str])

;; Function for processing nodes on the Map step
;; для першочергової фільтрації вхідних даних.
(defn word-filter[words]
  (filter #(re-matches #"\\w*" %) words))

;; Function that is used by processing nodes on
the Map step
;; for data transformation into indexed original
form
(defn sanitize-map[words]
  (map #(.toLowerCase %) words))

;; Function for Reduce step that is used for
data array convolution in the occurrence hashmap
form.
(defn count-reduce[words]
  (reduce #(assoc %1 %2 (inc (%1 %2 0)))
    {}
    words))

;; Reduce step function for the final merge and
accumulation of values of the first-step
convolutions
(defn merge-count-reduce[occurrence-maps]
  (reduce #(merge-with + %1 %2)
    (hash-map)
    occurrence-maps))
```

CONCLUSION

Functional programming is an effective paradigm for software development, which is becoming more and more important with the gradual obsolescence of Moore's law and a significant increase in the number of processed data. Pipelining, which can be achieved with state-of-the-art functionality, the ability to cache and memorize the results of pure functions, the advantage of persistent data structures that occupy significantly less memory and the unchangeability of data with the isolation of the data in the individual elements of the program allows you to develop faster and less prone to program mistakes that allow you to avoid problems that are traditionally encountered during parallelization.[3] The functional approach allows you to create abstractions based on data and perception of functions in the form of data, which contributes to abstraction and allows you to use the mathematical apparatus organically when solving practical problems.

However, on the other hand, functional programming is now faced with a number of problems that make it difficult to use in the industry from a commercial point of view. First of all, this is an inadequate qualification of most programmers who traditionally use the imperative paradigm of programming and its derivatives in the form of object-oriented languages. Also, functional programming requires a lot of training in connection with many fundamentally new concepts and theoretical constructions that take time to assimilate. Compilers and interceptors of such languages are considerably more complex because they require the implementation of different calculation procedures simultaneously, the implementation of high-speed garbage collector (GC) and the distribution of clean and "contaminated" data zones.[8]

Another problem with functional programming is the complexity of simulating simulations and fast-changing systems that make lazy computing and immutability a burden rather than an advantage in connection with the constant

change of contexts and the complex indivisible interconnections of such systems [5,6].

In general, the prospect of using functional programming widely in the industry and academic environment is likely to be the gradual incorporation of the mature and appropriate elements of functional programming in more common programming development languages, as well as the formation of the appropriate ecosystems and communities of purely functional programmers with respect to tasks that are most in line with the rules. and points of benefit from the use of this type of language.

REFERENCES

- [1] C. Okasaki "Purely Functional Data Structures" Cambridge University Press 1998
- [2] G. Cousineau "The Functional Approach to Programming" Cambridge University Press 1998
- [3] T. VanDrunen "Discrete Mathematics and Functional Programming" Paperback – October 16, 2012
- [4] G. Michaelson "An Introduction to Functional Programming Through Lambda Calculus (Dover Books on Mathematics)" Copyright, 1989
- [5] B. Jay "Pattern Calculus: Computing with Functions and Structures" Broadway NSW 2007
- [6] G. E. Revesz "Lambda-calculus, Combinators and Functional Programming (Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science)" Cambridge University Press 1998
- [7] Ben Vandgrift "Clojure Applied. From practice to practioneer" Pragmatic Programmer Bookshelf 2015
- [8] Michael Linn Functional programming patterns in Scala and Clojure Pragmatic Programmer Bookshelf 2013

СЕКЦІЯ 2.

***Інформаційні технології в соціумі, освіті, медицині, економіці,
управлінні, екології та юриспруденції***

SECTION 2.

***Information technologies in society, education, medicine, economics,
management, ecology and jurisprudence***

Інформаційний Портал для Обміну Контентом між Соціальними Мережами

О. Гладка

кафедра комп'ютерних наук
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
o.m.hladka@nuwm.edu.ua

Я. Бабич

кафедра комп'ютерних наук
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна

Information Portal for Exchange Content between Social Networks

O. Hladka

Department of Computer Science
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.m.hladka@nuwm.edu.ua

Ya. Babych

Department of Computer Science
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine

Анотація—Розроблено Web-сервіс з організації інформаційного порталу для автоматизованого обміну даними між різними соціальними мережами. Розроблений Web-ресурс забезпечує централізоване управління процесом розповсюдження контенту у соціальних мережах та максимально спрощує його для користувача.

Abstract—The Web-service for the organization of an information portal for automated data exchange between different social networks has been developed. The developed web-resource provides centralized management of the process of distribution of content in social networks and maximally simplifies it for the user.

We reviewed the main features of interaction with social networks, analyzed the existing software solutions that provide automated content management. The main advantages and disadvantages of these systems were determined and we selected the main tendencies in the development of the functional, which ensure the originality of its own software solution.

The actual technologies of the development are investigated and the most convenient for deployment of the project based on the client-server model are selected, in particular: Python, Django, SQLite, HTML 5, CSS 3, JS, jQuery, Bootstrap. In the development process, modern design tools, such as the integrated development environment of PyCharm Educational Edition and the Git version control system with a remote repository in the GitLab repository system, were used.

Ключові слова—Web-сервіс; соціальні мережі; обмін контентом; мова програмування Python

Keywords—Web-service; social networks; exchange content; programming language Python

I. ВСТУП

Очевидним є той факт, що Інтернет вже давно є не просто засобом обміну інформацією, а окремим самостійним ринком зі своєю інфраструктурою. Сьогодні кожен може за лічені секунди залишити свій слід у нескінченному цифровому потоці, і основна проблема будь-якого інформаційного ресурсу – не відкрити доступ до контенту, а донести його до максимальної кількості людей. На допомогу у цьому приходять соціальні мережі, які стали однією з ключових ланок цієї системи. Розповсюдження контенту у популярних соціальних мережах є стандартною маркетинговою стратегією, спрямованою на популяризацію продуктів [1].

Залучення трафіку або уваги до бренду чи продукту через соціальні платформи – Social Media Marketing (SMM) (англ. Маркетинг в соціальних мережах) або, якщо більш точно, просування в соціальних мережах (Social Media Promotion) – комплекс заходів щодо використання соціальних медіа в якості каналів для просування компаній і вирішення інших бізнес-завдань є на сьогодні чи не найбільш динамічним і перспективним напрямком розвитку сучасного бізнес-ринку [2]. При цьому акцент робиться на створенні контенту, який люди будуть поширювати через соціальні мережі самостійно, вже без участі організатора, оскільки вважається, що повідомлення, які передаються соціальними мережами, викликають більше довіри у потенційних споживачів товару чи послуги. Це узгоджується з рекомендаційною схемою поширення в соціальних медіа за рахунок соціальних зв'язків, які лежать в основі взаємодії [3].

Просування в соціальних мережах дозволяє точно впливати на цільову аудиторію, вибирати майданчики, де ця аудиторія представлена більшою мірою, і найбільш підходящі способи комунікації з нею, при цьому щонайменше зачіпаючи незацікавлених в цій рекламі людей. Важливо відзначити, що просування в соціальних мережах застосовується не тільки для товарів і послуг – дану технологію активно використовують також засоби масової інформації. Вони створюють свої облікові записи в соціальних мережах, розміщують свій контент і тим самим збирають передплатників – читачів свого продукту.

Зазвичай процес розповсюдження контенту у популярних соціальних мережах є рутинним і не раціональним. Враховуючи задачу, яка полягає у розповсюдженні однієї і тієї ж інформації на велику кількість інформаційних ресурсів виникає потреба в автоматизації та оптимізації даного процесу шляхом реалізації сервісу з автоматичного розповсюдження матеріалу, який забезпечить зручність роботи SMM-спеціаліста або користувача, що веде активну діяльність у соціальних мережах. Ця концепція має потенціал до розвитку у вигляді системи відслідковування статистики зворотнього зв'язку, системи збору та відправки повідомлень користувачам, публікування матеріалів у заданий час, підбору потенційних клієнтів тощо.

Описана вище проблема не є новою, а тому на ринку існує чимало професійних вирішень з досить потужним функціоналом. Проте, зазвичай, проаналізовані сервіси є комерційними з платним користуванням і не розраховані на українського користувача. У англійських (та й інших) сервісах, як правило, відсутня підтримка української мови, а використання російських (російськомовних) сервісів (які, зазвичай, зрозумілі українськомовним користувачам), зокрема, таких як NovaPress, KUKU.io, SMMR тощо, є небажаним (чи навіть небезпечним) через можливість доступу до облікових даних зі сторони державних органів РФ.

II. ОПИС ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ

Оскільки розроблюване програмне забезпечення не вимагає високої обчислювальної потужності для реалізації проекту було обрано web-платформу, що надає низку переваг, зокрема: можливість зберігати дані на сервері, що забезпечує їх захист від фізичної втрати девайсу користувачем; можливість користуватись сервісом з різних платформ (Windows, Ubuntu, MacOS, Android, IOS тощо); основні обчислення проводяться на стороні сервера, що забезпечує низькі апаратні вимоги до пристрою користувача; для використання сервісу не потрібна інсталяція програмного комплексу; можливість створення гнучкого інтерфейсу завдяки тенденції розвитку web-платформ в останні роки.

Принципова схема роботи web-сервісу наведена на рис. 1.



Рис. 1. Принципова схема роботи web-сервісу

Ця схема візуалізує сценарій, що реалізований програмним продуктом: користувач реєструється на сайті для того, щоб система змогла зберігати у базі даних матеріали з його соціальних мереж; користувачем надається доступ системі до аккаунтів соціальних мереж зі списку, що наданий системою; за допомогою відповідного інтерфейсу користувач створює запис, який хоче поширити; система відправляє запити до соціальних мереж з метою публікації та записує результати у базу даних.

Відповідно до поданої схеми розроблене програмне застосування задовольняє такі технічні вимоги: прив'язка аккаунтів соціальних мереж без використання логіна та пароля користувача web-сервісу; керуванням доступом (можливість відкликати дозвіл на використання особистих даних); створення записів; інтерфейс моніторингу відправлених записів; зручна навігація сайтом; крос-платформність; наявність засобів адміністрування; можливість одночасної роботи великої кількості (100 і більше) користувачів.

Надійне функціонування програмного комплексу забезпечене шляхом контролю коректності та повноти вхідних даних (всі дані, що вводяться користувачем, перевіряються на формальну коректність); надання можливості періодичного створення резервних копій інформаційної бази; ведення протоколів дій користувачів.

Захист інформації від несанкціонованого доступу забезпечується такими засобами як: формування різних рівнів доступу із переліком допустимих прав; авторизація користувачів; дані, необхідні для функціонування програмного комплексу, зберігаються на сервері програмного комплексу у зашифрованому вигляді.

III. АРХІТЕКТУРА СЕРВІСУ

Для реалізації проекту обрано класичну архітектуру «клієнт-сервер». Клієнтська програма (браузер) відправляє HTTP-запити до сервера, а він, в свою чергу, обробляє їх і у відповідності до параметрів запитів формує правильні запити до бази даних. Відповідь від бази даних також обробляється сервером і повертається повноцінний об'єкт, який трансформується у зручне подання програмним забезпеченням на стороні клієнта.

Модель даних (рис. 2) має таку структуру:

AbstractUser – абстрактна модель сутності «Користувач», що використовується для авторизації користувачів на сайті;

Credentials – відповідає за облікові дані користувачів у відповідних соціальних мережах;

Attachment – забезпечує зберігання зображень, містить одне поле формату “image”, в яке може бути додано зображення з файлової системи користувача;

PublishInfo – зберігає посилання та назву соціальної мережі, в який було опубліковано запис;

Record – модель запису, створеного користувачем.

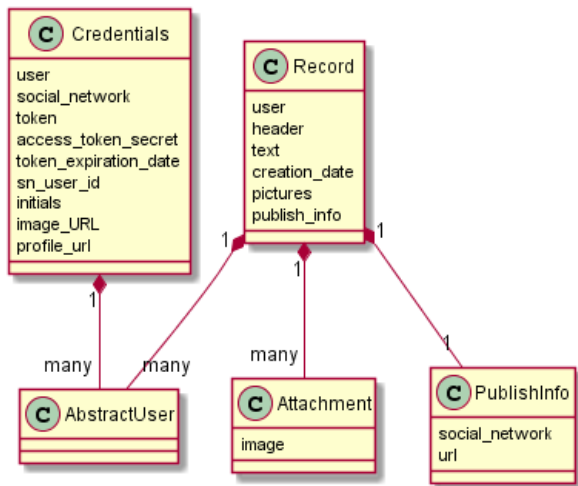


Рис. 2. Модель даних

IV. ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ СЕРВІСУ

Для реалізації програмного продукту використано інтегроване середовище розробки PyCharm Educational Edition та систему контролю версій Git [8] з віддаленим сховищем у системі репозиторіїв GitLab.

Серверна частина програмного застосування написана мовою Python [5], зокрема, з використанням веб-фреймворка Django [6] – безкоштовного, з відкритим вихідним кодом пакета веб-розробки, який забезпечує швидку і легку розробку безпечних та надійних сайтів. Django допомагає розробникам уникнути багатьох помилок у впровадженні загальної безпеки, створюючи основу для автоматичного захисту сайту. Зокрема, передбачається безпечний спосіб управління обліковими записами користувачів, що забезпечує уникнення поширених помилок, таких як зберігання інформації у файлах “cookies”, де вона є вразливою або зберігання паролів у “сирому” вигляді, замість використання хешу. Також, за замовчуванням, Django забезпечує захист від багатьох вразливостей, зокрема, SQL-ін’єкцій, міжсайтового скриптингу, підробки запитів та клікджекінгу (англ. Clickjacking – механізм обману користувачів Інтернету, при якому зловмисник може отримати доступ до конфіденційної інформації або навіть його на зовні нешкідливу сторінку чи запровадивши

шкідливий код на безпечну сторінку) [7]. Схему обробки запитів системою Django наведено на рис. 3.

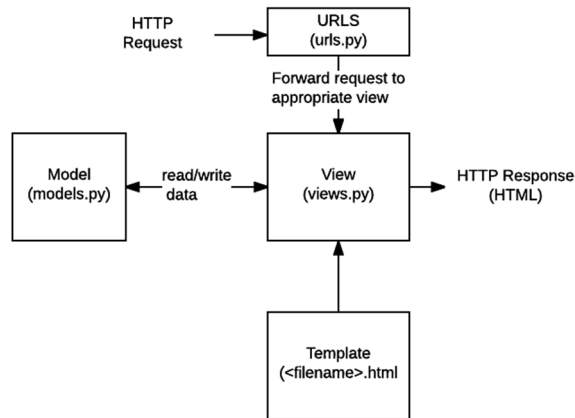


Рис. 3. Візуалізація обробки HTTP-запитів системою Django

Для проектування і реалізації бази даних використано бібліотеку SQLite, яка є вбудованою реляційною базою даних за замовчуванням при створенні проекту на базі Django. Сама бібліотека SQLite написана на C, але існує велика кількість прив'язок до інших мов програмування, в тому числі до Python. Оскільки ядро і інтерфейс реалізовані як єдине ціле, величезною перевагою SQLite є висока продуктивність – для більшості типових завдань невеликий і середній за обсягом додаток, побудований на SQLite, працює швидше, ніж при використанні MySQL, в 2-3 рази і ніж PostgreSQL – в 10-20 разів. Особливо актуальним є використання SQLite у випадках, коли в основному проводяться операції запису і зчитування даних. Однак при надзвичайно активному зверненні до даних SQLite працює повільніше від своїх конкурентів через вбудований механізм блокування файлів (тільки при модифікації даних) і необхідності перевірки типу полів для вибору способу сортування.

Для реалізації ПЗ на стороні сервера використано також NGINX – безкоштовний HTTP-сервер з відкритим вихідним кодом, а також проксі-сервер IMAP/POP3. NGINX відомий своєю високою продуктивністю, стабільністю, великим набором функцій, простою конфігурацією, а також низьким споживанням ресурсів. На відміну від традиційних серверів, NGINX не залежить від потоків для обробки запитів. Замість цього він використовує набагато більш масштабовану асинхронну архітектуру. Ця архітектура використовує невеликі, але що більш важливо, більш передбачувані обсяги пам'яті.

При створенні програмного забезпечення на стороні клієнта (браузерної частини сервісу) використано набір інструментів для створення сайтів і веб-додатків Bootstrap 3, що включає в себе HTML- і CSS-шаблони оформлення для типографіки, веб-форм, кнопок, міток, блоків навігації та інших компонентів веб-інтерфейсу, а також JavaScript-розширення.

Для забезпечення інтерактивності веб-сервісу використано jQuery – JavaScript-бібліотеку з відкритим вихідним кодом. jQuery є вільним програмним

забезпеченням під ліцензією MIT. Синтаксис jQuery розроблено таким чином, щоб зробити орієнтування у навігації зручнішим завдяки вибору елементів DOM, створенню анімації, обробки подій, і розробки AJAX-застосувань.

V. ОПИС РОБОТИ З ПРОГРАМНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ

Головна сторінка web-сервісу є максимально простою і не перенасиченою зайвою інформацією, а тому складається лише з трьох частин: головного меню, інформаційного слайдера та блоку з інструкцією.

При спробі доступу до будь-якого з розділів сайту, користувачу пропонується авторизуватися чи зареєструватися у випадку відсутності облікового запису.

Після успішної авторизації сайт перенаправляє користувача у розділ «Профіль», де можна змінити основну інформацію про себе та зв'язати аккаунти у соціальних мережах з обліковим записом сайту. Для тестування сервісу використовувалися три популярні соцмережі: Facebook, Google+ та Twitter. Також реалізовано можливість зміни пароля. Цей розділ є модульним і його відображення можливе після натискання відповідної кнопки «Змінити пароль».

За умови, що користувач надав доступ до керування своїми записами програмі, на сайті буде відображено інформацію про аккаунт. Дана інформація включає в себе ім'я користувача у соцмережі, id – унікальний ідентифікатор, який також є посиланням на профіль у відповідній соціальній мережі та час дії доступу, який вказує на дату закінчення доступу з наявним ключем. Після закінчення терміну дії ключа доступу сервіс відправить відповідний запит до прикладного інтерфейсу на оновлення ключа. Якщо доступ ще не було надано, користувач буде мати можливість прив'язати аккаунт за допомогою відповідного посилання «Активувати». Після переходу за посиланням, сервіс перенаправить користувача на вікно авторизації відповідної соціальної мережі, де буде вказано, які саме рівні доступу будуть доступними розробленому додатку. Зазвичай, для повноцінної роботи сервісу потрібні наступні дозволи: доступ до загальної інформації користувача; можливість публікації від імені користувача; можливість зчитувати наявні записи.

Після активації потрібних соцмереж користувач може приступити до створення запису у розділі «Створити запис». Далі, після збереження запису, управління перейде до сервісу і контент буде відправлено відповідно до активованих соціальних мереж. Після цього слідує перенаправлення користувача у розділ «Мої записи», де відображається інформація про запис та соціальні мережі, в яких його було опубліковано. Мережі, які не приймали участі у поширенні контенту, будуть мати не активний статус і позначені сірим кольором. Шляхом клацання на одній із активних іконок можна відкрити у новій вкладці вікно з записом у відповідній соцмережі.

Крім основного функціоналу на сайті є панель адміністрування, за допомогою якої можна керувати усіма записами сайту, а також створювати групи користувачів з різними рівнями доступу. Це дозволяє проводити гнучкі маніпуляції з існуючою базою, не змінюючи код проекту.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто основні особливості взаємодії з соціальними мережами, проаналізовано існуючі програмні рішення, які забезпечують автоматизоване керування контентом. Визначено основні переваги та недоліки даних систем, обрано основні тенденційні напрями у розробці функціоналу, що забезпечують оригінальність власного програмного рішення.

Результатом роботи є web-сервіс для автоматичного розповсюдження контенту між соціальними мережами, що реалізує запланований функціонал і відповідає сучасним стандартам сайтобудування: має дружній до користувача інтерфейс, адаптивність та надійне зберігання даних.

Досліджено актуальні технології розробки та обрано найзручніші для розгортання проекту на базі моделі «клієнт-сервер», зокрема: Python, Django, SQLite, HTML 5, CSS 3, JS, jQuery, Bootstrap. В процесі розробки використано сучасні засоби проектування, зокрема інтегроване середовище розробки PyCharm Educational Edition та систему контролю версій Git з віддаленим сховищем у системі репозиторіїв GitLab.

Структура web-сервісу спроектована таким чином, щоб його можна було легко розширювати. Передбачено прикладний інтерфейс (API) для зручної роботи з даними сервера, що в свою чергу дає можливість для портування сервісу на мобільні платформи.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] О.М. Степанова, Розробка комунікаційної стратегії із застосуванням аналізу даних соціальних медіа / О.М. Степанова, А.А. Волков // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції. – Івано-Франківськ, 2016. – С. 53-57.
- [2] G. Gregory, M. Karavdic and Sh. Zou, "The Effects of E-Commerce Drivers on Export Marketing Strategy", Journal of International Marketing, Vol. 15, No. 2, pp. 30-57, Jan. 2007.
- [3] C. Trattner, F. Kappe, : Social Stream Marketing on Facebook: A Case Study, International Journal of Social and Humanistic Computing (IJSHC), 2012.
- [4] К.В. Молодецька, Соціальні інтернет-сервіси як інструмент масової комунікації / К.В. Молодецька // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції. – Івано-Франківськ, 2016. – С. 60-61.
- [5] М. Лутц, Изучаем Python, 4-е издание. – Пер. з англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 1280 с.
- [6] Дж. Форсьє, П. Біссек, У. Чан, Django. Разработка веб-приложений на Python – Пер. з англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2010. – 456 с.
- [7] «Web Notes», замітки веб-розробника. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://webnotes.by/docs/sql/259>
- [8] Система контролю версій «Git». / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://git-scm.com/book/ru/v1/>

Моделювання Інтуїції на Засадах Парадигми Граничних Узагальнень

Юрій Прокопчук

відділ системного аналізу та проблем управління
Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ
Дніпро, Україна
itk3@ukr.net

Олександр Білецький

кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Український державний хіміко-технологічний
університет
Дніпро, Україна
alexverba2@ukr.net

Modeling Intuition Based on the Paradigm of Limiting Generalizations

Yurii Prokopchuk

Department of Systems Analysis and Control Problems
Institute of Technical Mechanics of NASU
Dnipro, Ukraine
itk3@ukr.net

Oleksandr Beletsky

Department of Specialized Computer Systems
Ukrainian State University of Chemical Technology
Dnipro, Ukraine
alexverba2@ukr.net

Анотація—Існуючі технології освіти націлені на розвиток вербальної компоненти мислення з опорою на штучні логічні схеми. При цьому інтуїтивно-образне мислення, основою якого є природна логіка, практично цілеспрямовано не розвивається. Таке положення обумовлене, передусім, відсутністю адекватних математичних моделей адаптивного несвідомого, які розкривали б генезис імпліцитного (невід'ємного) знання. Цілями цієї роботи є: (1) побудова математичної моделі імпліцитного формування "тонких зрізів" (граничного сенсу) в завданнях розрізнення; (2) розробка конструктивних алгоритмів штучної інтуїції для реалізації в інтелектуальних системах; (3) розробка методології побудови когнітивних тренажерів. Моделювати роботу інтуїтивно-образної сфери суб'єкта, включаючи ухвалення рішень, автори пропонують на основі природної логіки у рамках парадигми граничних узагальнень. Модель підказує шляхи створення когнітивних тренажерів широкого спектру.

Abstract—For many people, intuition is a wonderful, mysterious, and near-magical phenomena. What do we refer to when we use this term? Existing educational technologies are aimed at developing the verbal component of thinking on the basis of artificial logical schemes. In doing so, there is little, if any, purposeful development of intuitive image thinking, which is based on natural logic. This is due, first of all, to the lack of adequate mathematical models of the adaptive unconscious, which would reveal the genesis of implicit inherent knowledge. The aim of this work is (1) the construction of a mathematical model of implicit formation of "thin sections" (limiting sense) in

discrimination problems (diagnosis, forecasting, management), (2) development of constructive algorithms for artificial intuition, and (3) the development of a methodology for cognitive simulator construction. The authors propose that the work of intuitive image component of an individual, including decision making, be simulated on the basis of natural logic in the framework of a limiting generalization paradigm (LGP). Natural logic leads to the origination of rationality as an adaptive tool, which is not identical to the rules of formal or fuzzy logic or to the rules of probability calculus. The key components of the intuition model are: basic entities of the LGP; a task-inductor space, event space, an "artificial connectom", coherence mechanisms; Thin Slices. The model also suggests ways to develop broad-spectrum cognitive simulators.

Ключові слова—інтуїтивне прийняття рішень; когнітивний підхід; формування компетенцій; інтуїтивно-образне мислення; природна логіка; парадигма граничних узагальнень

Keywords—intuitive decision making; cognitive approach; competence formation; intuitive and creative thinking; natural logic; paradigm of limiting generalizations

I. ВСТУП

Наш мозок володіє фантастичною здатністю. Ми можемо з безлічі ситуацій, подій, фактів виокремлювати суть, знаходити сутності, які лежать в основі явищ. Дивно те, що таке узагальнення відбувається не в результаті роздумів, спроб зрозуміти чи іншої розумової діяльності, а «автоматично», без усвідомлення самого факту

узагальнення. Узагальнення без усвідомлення - це одне з фундаментальних властивостей пам'яті [1 – 10]. Воно полягає в тому, що накопичення інформації супроводжується формуванням структур, що відповідають за виділення загальних ознак, властивих різним явищам. Ці ознаки можуть не збігатися з предметами або явищами, які ми знаємо, а відображати внутрішні приховані сутності або закономірності. Коли накопичується достатньо досвіду і формується узагальнююча властивість, вона починає використовуватися в роботі мозку, але це не означає, що ми можемо її назвати або дати їй трактування. Тільки коли ми задумаємося над причинами того, що об'єднує для нас певні явища, ми можемо в результаті аналізу спробувати витлумачити вже наявне у нас узагальнення і, якщо це вдасться, усвідомити його природу [1 – 10].

Особливу увагу інтуїції приділив Daniel Kahneman (лауреат Нобелівської премії з економіки, один з основоположників психологічної економічної теорії), вважаючи її ключовим фактором в дія економічних агентів [4]. Специфіка інтуїтивного процесу рішення невизначених завдань обговорюється, зокрема, в рамках напряму «naturalistic decision making» [5]. Відзначається, що класичні методи прийняття рішень є анти-інтуїтивними [6] і тому мало використовуються на практиці. Це необхідно враховувати при обговоренні «A Standard Model of the Mind» [10].

В цілому успішність і ефективність вирішення складних і нових завдань в невизначеному середовищі (ключова когнітивна компетентність) за влучним висловом відомого канадського дослідника Malcolm Gladwell [3] залежить від оволодіння мистецтвом «тонких зрізів» - вміння виділяти з величезного числа змінних малу кількість значущих чинників. Це здатність нашого несвідомого знаходити закономірності в ситуаціях і поведінці, спираючись на надзвичайно тонкі шари пережитого досвіду. Цей висновок є, по суті, формулюванням парадигми граничних узагальнень (ПГУ) [1]. Необхідно зрозуміти і побудувати математичну модель технології еволюційного формування «тонких зрізів» в задачах розрізнення [1, 2].

Цілями даної роботи є: (1) побудова математичної моделі імпліцитного формування «тонких зрізів» (граничного сенсу) в задачах розрізнення (діагностики, прогнозування, управління); (2) розробка конструктивних алгоритмів штучної інтуїції для реалізації в у інтелектуальних системах; (3) розробка методології побудови когнітивних тренажерів з використанням штучної інтуїції.

Потрібно створити точне глибинне уявлення про виникаючі імпліцитні знання. Ці підходи співзвучні ідеям «критичного мислення», де, в першу чергу, потрібно «вчити мислити», в тому числі «мислити про сенс», «мислити про своє мислення» [2].

II. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ

В рамках ПГУ до первинних сутностей ментальної сфери, що грають важливу роль в природних механізмах інтуїції і глобальної когерентності, можна віднести [1]:

орграфи значень і доменів тестів (кваліа), орграфи начерків образів, орграфи метаморфозів, системопатерни і структурну енергію. В орграфи значень, доменів, начерків вкладає система автоматичних інтуїтивних інтерпретацій явищ предметної області, тобто семантичний рівень. Можливість інтерпретувати дані та результати обробки даних в системі понять предметної області є необхідною умовою отримання корисного результату.

Крім системи інтерпретації, орграфи значень, доменів, начерків відповідають за породження понад надмірності і понад різноманітності даних, які в процесі категоризації дозволяють природним шляхом виявити гранично стислий зміст. Втілена когерентність на безлічі всіх даних (власна функція середовища знань) є найважливішим механізмом інтуїції [1, 2].

Базовими актами розумового процесу є розрізнення (термін «розрізнення» – «differance» ввів французький філософ Жак Дерріда). Будь-яку цільову множину об'єктів розрізнення позначимо Z, а відповідний акт розрізнення назовемо Z-задачею розрізнення. Приклади: задачі діагностики, розпізнавання, прогнозування, вибору управління, прийняття рішень.

«Тонкий зріз» в рамках будь-якої Z-задачі розрізнення являє собою сукупність інваріантів «внутрішні коди» (ВК) – $\{S^*\}$, на базі яких формуються базиси граничних моделей знань (базиси ГМЗ). Деякі ВК описують параметри порядку ситуацій дійсності. Базиси ГМЗ вирішують Z-задачі. Їх робота - процес вирішення Z-задачі розрізнення - це спонтанний процес, регульований тільки наявними ресурсами (енергією), тобто протікає, як правило, «несвідомо» (поза логічного контролю). ВК можуть виступати в якості мети управління, забезпечуючи єдність інтуїтивного рішення задач розрізнення і управління.

III. БАЗОВІ СУТНОСТІ МОДЕЛІ

Розглянемо докладніше дію первинних механізмів інтуїції на основі глобальної когерентності в рамках задачно-індукторного простору.

Конфігуратором тесту називається процедурна реалізація орграфу доменів тесту [1]. Загальну схему конфігуратору з використанням синтаксису лексичних дерев можна представити таким чином:

```

Тест [ ^Тест... ] [#ТестХ... ] {
D_N [ ^D_N... ] [#DomX... ] { ; ; } [ {On}_N ] [ {S, R}_N ] [ {NN}_N ]
...
D_2 [ ^D_2... ] [#DomY... ] { ; ; } [ {On}_2 ] [ {S, R}_2 ] [ {NN}_2 ]
D_1 [ ^D_1... ] { ; ; } [ {On}_1 ] [ {S, R}_1 ] [ {NN}_1 ],

```

де 'Тест' - назва тесту; '^Тест...' - список умовних позначень тесту; '#ТестХ...' - список посилань на більш загальні тести; 'D_K' - назва K-го домену; '^D_K...' - список умовних позначень K-го домену; '#DomX...' - посилання на домени предки; { ; ; } - список альтернативних елементів домену; {On}_j - онтологічні угоди; {S, R}_j - авто асоціативна модель знань (S - синдроми, R - провісники); {NN}_j – нейронні мережі.

Кожен елемент домену може мати власний список позначень, які також грають роль символів груп узагальнення. Елементи доменів можуть містити параметри, які забезпечують однозначність обчислювальних схем в залежності від тих чи інших факторів, наприклад, статі. Порядок розміщення доменів в конфігураторі - зверху вниз і зліва направо - означає зростання точності значень тесту за рахунок більшої деталізації (збільшення числа елементів). У впорядкованій послідовності доменів мітки елементів будь-якого домену явно задають однозначні правила перерахунку значень з поточного домену в інший, розміщений вище або зліва (транзитивні обчислення).

Завдяки структурній когерентності завжди породжується смислова траєкторія узагальнення будь-якого значення будь-якого домену. Крім того, активізація будь-якого значення автоматично запускає в рішення і дозрівання відповідної домен-задачі. Активізується не тільки «дозрівання» задач, але також запускається пошук рішення цих задач (якими б «зрілими» не були інструменти). З плином часу інструменти удосконалюються, відповідно, поліпшується оцінка, прогноз, так відбувається вдосконалення механізмів інтуїції і формування досвіду.

Моделі знань $\{S, R\}_j$ формуються автоасоціативно. Вони є основою інтуїції (адаптивного несвідомого) і моделі «континуум задач» [1], яка забезпечує «швидкі рішення» (прототип ургентних обчислень - Urgent Computing або Extreme Computing). Для кожного значення домену задані як мінімум чотири класи індукторів: транзитивні обчислення по ієрархії доменів (узагальнюють дані первинних вимірювань); обчислення на основі онтологічних угод; обчислення на основі автоасоціативних моделей знань; обчислення на основі нейронних мереж. Розрахункове значення тесту повинно бути погоджено за сигналами від різних індукторів і це накладає обмеження на сукупність можливих станів всієї системи, забезпечуючи системну цілісність.

Нехай $\Omega = \{V\}_0$ - це банк прецедентів, а V - це закономірності, які мають загальний вигляд $\{V(\underline{a}/A), \underline{z}/Z\}$. Вони дозволяють однозначно встановити результат \underline{z}/Z на основі даних $\{a/A\}$. Банк тестів формує оператор категоризації W_Z , за допомогою якого імпліцитно та еволюційно формується «тонкий зріз». Загальну схему категоризації в рамках окремої Z -задачі («стріла пізнання», конденсацію сенсу) представимо у вигляді [1]:

$$\{V\}_0 \rightarrow W_Z(\{V\}_0) \rightarrow \dots \rightarrow \{S^*\}_{Full} \rightarrow \{\{S^*\}_{Min}\}_{Full}, \quad E_Z \geq 0, \quad (1)$$

де E_Z - енергія (параметр порядку), $\{S^*\}_{Full}$ - інваріантні внутрішні коди; $\{\{S^*\}_{Min}\}_{Full}$ - базис граничних моделей знань. Для кожної Z -задачі оператор категоризації свій.

«Стріла пізнання» реалізує ключове вміння виділяти тільки істотну інформацію, незважаючи на обсяг бази прецедентів. Вважається, що саме в фільтрації істотного лежить ключ до розуміння принципів, за якими буде працювати Ambient Intelligence. Моделі «стріла пізнання» і «спіраль пізнання» розкривають імпліцитний механізм формування Z -компетентності (рішення Z -задачі

розрізнення). Всі ресурси рішення Z -задачі розрізнення об'єднуються в модуль компетентності [1].

Ключовий елемент творчості - багаторазове рішення Z -задач у внутрішньому плані, без реалізації в зовнішньому плані (суть переживання). При цьому відбувається внутрішнє всебічне оцінювання системо квантів досягнення бажаного результату \underline{z}/Z . За допомогою переживання, уяви, фантазій здійснюється оптимізація патернів поведінки і накопичення досвіду в каузально бідному середовищі.

Базис ПМЗ і масштабована, багатопланова функція оцінювання дозволяють реалізувати внутрішній механізм «гри з самим собою» (Self-Play) на основі «клонів свідомості», «роздвоєння особистості». Даний механізм дозволяє самонавчатися без зовнішніх прикладів, що успішно реалізовано в ігровій системі Google AlphaZero [7]. Відмінність Zero від попередніх версій в тому, що програма вчиться з нуля, спочатку грає випадковими ходами. І навчається (вдосконалюється функція оцінювання), використовуючи тільки партії з самою собою. Механізм Self-Play - один з ключових творчих механізмів саморозвитку інтуїції (зокрема, вдосконалення вродженої оціночної функції).

Відтворення розвитку ситуацій у внутрішньому плані з генерацією нових сценаріїв, системоквантів є різновидом «Self-Play with a General Reinforcement Learning Algorithm» [7].

Примітка. Поняття Tabula rasa («з чистого аркуша») використав англійський філософ Джон Локк у своєму творі «Досвід про людське розуміння». Розробники AlphaGo також вважають [7], що «Довгострокова мета штучного інтелекту - це алгоритм, який вчить tabula rasa, надлюдської майстерності в складних областях», «навіть в найскладніших областях: можна вчитися на надлюдському рівні, без людських прикладів або вказівок», «починаючи з tabula rasa». Ми стверджуємо, що ці претензії перебільшені з кількох причин. Зокрема, штучний інтелект потребує більшої уваги до вроджених когнітивних механізмів і ПГУ показує, як може виглядати ця вродженість (орграфи значень, доменів, начерків, «Connectome», «стріла пізнання», оператори категоризації).

Основну роль в розвитку інтуїції відіграє природний або штучний «Connectome». У нейрофізіології терміном "Connectome" позначили повний опис структури зв'язків у нервовій системі людини [9]. Це комп'ютерний аналіз будови природних нейронних мереж, свого роду картографування нейронних зв'язків. Connectome пояснює, чому мозок володіє такою приголомшливою автоасоціативністю. Багато когнітивних функцій є похідні від його мережевої топології. Концепція Connectome дозволяє виявити ключові властивості природних нервових мереж, які важливі для створення штучних когнітивних систем та тренажерів. Виникає важлива проблема інженерії коннектомів, як основи розробки штучних когнітивних систем з інтуїцією.

Нехай є кадр даних $\{\tau/T_0\}$ і банк тестів $\{G(\tau)\}$, де $\{\tau\}$ - тести. Без втрати спільності прийемо, що кожен тест

входить в кадр не більше одного разу. Потік даних являє собою поточну сукупність всіх кадрів $\cup_i \{\tau/T_0\}_i$.

Побудова мікро Connectome на основі потоку даних з кадром $\{\tau/T_0\}$ означає наступне [1]: 1) фіксується поточна безліч даних; 2) фіксується довільний тест $z \in \{\tau\}$; 3) фіксується довільний домен Z з $G(z)$; 4) всі дані z -тесту в потоці $\cup_i \{\tau/T_0\}_i$ перетворюються до домену Z , отже, виникає Z -задача з базою прецедентів $\Omega = \cup_i \{\tau/T_0\}_i$; 5) для Z -задачі формуються базиси моделей знань (1). Процедура повторюється для всіх $z \in \{\tau\}$ і всіх Z з $G(z)$. Після додавання нового кадру в потік весь процес повторюється заново. В результаті оновлюються всі авто / гетеро-асоціативні моделі знань мікро Connectome.

Збудження частини тестів через тисячі зв'язків з іншими тестами Connectome здатне майже моментально викликати багатющу мережу інтуїтивних асоціацій [1].

IV. ЕМОЦІЙНИЙ ІНТЕЛЕКТ ТА ІНТУЇЦІЯ

Апарат емоцій - найважливіша багатофункціональна підсистема, що формує різноманітні емоційні оціночні функції і задає мотивацію для керуючої системи. Кожен образ забезпечується своєю «емоційною» емпірично знайденою оцінкою. Емоційні оціночні функції – важливий елемент інтуїтивних міркувань [1].

Велику роль відіграють суб'єктивні оцінки якості, достовірності, значимості і надійності (Subjective Estimates of Quality, Credibility, Salience, and Reliability). Емоційний словник суб'єкта, агента можна описати банком тестів [1]: $\{G(\varepsilon)\}_{em} = \{G(\text{Біль}), G(\text{Страх}), G(\text{Злість}), G(\text{Радість}), G(\text{Краса}), G(\text{Загроза}), \dots\}$.

Емоційними подіями назовемо кортежі

$$Ev = \langle \tau/T, \varepsilon/E, \tau/\Lambda \rangle, \quad Ev = \langle \{f/\mu\}, \varepsilon/E, \tau/\Lambda \rangle$$

де τ/T - значення тесту τ , ε/E - емоція, τ/Λ - час, $\{f/\mu\}$ - патерн. Кожна компонента має свій масштаб. Всі події формують простір подій. Ключову роль відіграє автоматичне (імпліцитне) встановлення зв'язків в просторі подій або в «Life Space» (життєвому просторі). Саме ці зв'язки відіграють важливу роль в інтуїтивному мисленні. В роботі [1] розглядаються формальні аспекти встановлення деяких різновидів таких зв'язків, зокрема: «finding structure in time».

Модифікуючи оцінку подій, суб'єкт може мислити вельми несподівано, парадоксально, асоціативно-метафорично. Емоції вносять не просто додаткову динамічну ступінь свободи, але разом з орграфами начерків образів розкривають природу когнітивної понад невизначеності і аутопоезису - перманентної мінливості, незавершеності, саморуху.

Додавання емоції «розцвічує» всі події, робить їх оцінку змінною, а часто і суперечливою, неоднозначною, що залежить від контексту. Іншими словами оцінка будь-яких минулих, нинішніх чи майбутніх подій може перманентно і стрибкоподібно змінюватися, що створює

рефлексивну динаміку і специфічну емоційну категоризацію. Процес емоційного «перефарбування» подій є різновидом суб'єктивних переживань. Емоційне перефарбування минулих подій настає щоразу, коли відбувається стрибкоподібне зміна моделей знань (катастрофа реконфігурації). Події, помічені негативними емоціями, стають об'єктами рефлексії (в деяких випадках - аналог почуття провини). Емоційні «стрибки» можуть викликати моментальні зміни в поведінці, які оточуючі часто не можуть пояснити. Поведінка змінюється завдяки різкій зміні операціональних характеристик внутрішніх кодів S , які обирають в якості цілей управління [1].

ВИСНОВКИ

На основі парадигми граничних узагальнень побудована формальна модель механізму інтуїції. Тим самим розкривається глибинний механізм генезису імпліцитних знань в рамках природної логіки і обчислювальної епістемології. Запропонована модель є методологічною основою створення гібридних систем, людино-машинного інтерфейсу, когнітивних тренажерів широкого спектру, інтуїтивних роботів.

Представлені моделі та алгоритми дозволяють наблизитися до цілісного розуміння в теорії інтелекту фундаментальних процесів об'єднання, синтезу і появи нової (суб'єктивної) інформації, яка і обумовлює дію механізмів інтуїції. Моделі інтуїтивних процесів необхідно враховувати при розробці «A Standard Model for the Mind».

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Ю.А. Прокопчук, *Набросок формальной теории творчества*. Днепро: Изд-во ПГАСА, 2017.
- [2] Ю.А. Прокопчук, "Алгоритмы искусственной интуиции для реализации сильного ИИ," *Сборник научных трудов «Строительство. Материаловедение. Машиностроение»*. Вып. 101, сс. 184 – 189. Днепро: Изд-во ПГАСА, 2017.
- [3] M. Gladwell, *Blink: The Power of Thinking Without Thinking*. Back Bay Books, 2007.
- [4] D. Kahneman, *Thinking, Fast and Slow*. Pub Farrar, Straus and Giroux, 2011.
- [5] G. Klein, "A naturalistic decision making perspective on studying intuitive decision making," *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, no. 4, pp. 164–168, 2015.
- [6] M. Maldonato, *Natural Logic: Exploring Decision and Intuition*. UK: Sussex Academic Press, 2011.
- [7] D. Silver, J. Schrittwieser, K. Simonyan et al, "Mastering the game of Go without human knowledge," *Nature*, vol. 550(7676), pp. 354-359, 2017.
- [8] O. Diaz-Hernandez, V. J. Gonzalez-Villela, "Analysis of human intuition towards artificial intuition synthesis for robotics," *Mechatronics and Applications: An International Journal (MECHATROJ)*, vol. 1, no.1, pp. 23 – 39, 2015.
- [9] S. Seung, *Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are*. New York: Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company, 2012.
- [10] J. E. Laird, C. Lebiere and P. S. Rosenbloom, "A Standard Model for the Mind: Toward a Common Computational Framework across Artificial Intelligence, Cognitive Science, Neuroscience, and Robotics," *AI Magazine*, vol. 38, no. 4, pp. 13-26, 2017

Доповнена та Віртуальна Реальність як Ресурс Навчальної Діяльності Студентів

Ірина Мельник
кафедра інформаційних технологій
та математичних дисциплін
Київський університет імені Бориса Грінченка
Київ, Україна
iy.melnyk@kubg.edu.ua

Надія Задерей, Галина Нефьодова
кафедра математичного аналізу
та теорії ймовірностей
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
Київ, Україна
zadereypv@ukr.net, g.nefyodova@gmail.com

Augmented Reality and Virtual Reality as the Resources of Students' Educational Activity

Iryna Melnyk
Department of Information Technology and
Mathematical Sciences
Borys Grinchenko Kyiv University
Kyiv, Ukraine
iy.melnyk@kubg.edu.ua

Nadia Zaderei, Galyna Nefodova
Department of Mathematical Analysis and
Probability Theory
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
zadereypv@ukr.net, g.nefyodova@gmail.com

Анотація—Проводиться дослідження основних особливостей та відмінностей віртуальної реальності (virtual reality, VR), доповненої реальності (augmented reality, AR) та об'єднаної реальності (merged reality, MR). Розглядаються аспекти можливого використання технологій реальності в сучасних умовах. Розглянуто існуючі в світі додатки доповненої та віртуальної реальності, які використовуються в сучасному освітньому процесі. Зазначена важливість формування STEM-компетентності студентів, створення інноваційної моделі STEM-освіти. Означена необхідність спеціального технічного обладнання, спеціалізованої віртуальної лабораторії для реалізації систем віртуальної та доповненої реальності для сучасного освітнього процесу. Наведені комплексні висновки відносно розглянутої проблеми.

Abstract—The article explores some key features of virtual reality (VR), augmented reality (AR), and merged reality (MR) as well as the differences between them. The aspects of possible usage of reality technologies in the contemporary world are considered. The attachments to augmented and virtual realities that exist and are used in modern educational process are reviewed. The importance of forming of the students' STEM competence and the creation of the innovated STEM-education model are indicated. The article denotes the need of special technical equipment and special virtual laboratory for the implementation of virtual and augmented realities' systems into the modern educational process. The examples how to create

virtual VR-content are given. The conclusions of the problem studied in this article are given as well.

Ключові слова—рамки цифрової компетентності; віртуальна реальність (VR); доповнена реальність (AR); об'єднана реальність (MR); STEM-освіта.

Keywords—digital competence framework; virtual reality (VR); augmented reality (AR); merged reality (MR); STEM-education.

I. ВСТУП

Стрімкий розвиток сучасного інформаційного суспільства нерозривно пов'язаний з гнучким оновленням та інтенсивним переосмисленням системи університетської освіти, якість та ефективність якої базується на глибокому зануренні як студентів, так і викладачів у цифрове інформаційне середовище.

Підвищення цифрової компетентності громадян стало пріоритетним напрямком в освітньому просторі більшості країн світу. В 2013 році в Європейському Союзі ЄвроКомісією була оприлюднена Система впровадження цифрової компетентності DigComp, яка є своєрідним стандартом, і одночасно інструментом підвищення рівня компетентності громадян ЄС у галузі цифрових технологій. У 2016 та 2017 роках рамки цифрової компетентності були оновлені, що було зафіксовано

формулярами DigComp 2.0 і 2.1, які описують п'ять вимірів цифрової компетентності: області компетентності, визначені як частини цифрової компетентності; дескриптори компетентності та назви, що відповідають областям; рівні оволодіння кожною компетентністю; знання, вміння та ставлення, що стосуються кожної компетентності; приклади використання, застосування компетентності для різних цілей [1].

Вдосконалення чи оновлення цифрової компетентності викладача і студента полягає у вмінні знаходити, аналізувати, критично оцінювати та керувати цифровим контентом; використовувати цифрові пристрої та технології для створення знань та інновацій в освітніх просторах; співпрацювати та вчитися за допомогою цифрових технологій та пристроїв; бути здатним захистити свої доробки, враховуючи належним чином надійність та конфіденційність; творчо використовувати цифрові технології для вирішення освітніх, технічних, наукових задач та проблем; невпинно займатися процесом самовдосконалення та саморозвитку; розумно обмірковувати ризики та небезпеки, що супроводжують нераціональне використання новітніх технологій.

З основними аспектами концептуального оновлення рамок цифрової компетентності сучасних студентів тісно пов'язані процеси отримання знань, нових компетенцій на основі новітніх інструментів, одним з яких є засоби доповненої та віртуальної реальності.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відповідно до теорії поколінь, розробленої Вільямом Штраусом (William Strauss) і Нілом Хоувом (Neil Howe), та доповненої сучасними вченими, наше майбутнє творитиме нове покоління Z, народжене в епоху Інтернету, якому не відоме життя без нього. Навколишній світ для них не ділиться на цифровий і реальний, пошук будь-якої інформації займає лічені хвилини, перевага віддається спілкуванню в мережі. Можна впевнено говорити, що це покоління "живе" в Інтернеті і розуміє особливості кожної соціальної мережі [2].

Для сучасного покоління студентів освітній процес в рамках доповненої та віртуальної реальності є природним та зрозумілим. Використання методів штучного інтелекту для синтезу систем віртуальної реальності орієнтовано на уніфікацію навчання. Відмітимо, що такі системи є мотивуючими для студентів при оволодінні новими знаннями, дозволяють слідкувати викладачам за навчальним процесом та успішністю кожного студента і при потребі втручатися у цей процес для додаткового керування. Крім того, в таких системах характер помилок студента або невірна інтерпретація ним теми автоматично визначає тип потрібної допомоги. Адаптація віртуальних процесів означає, що зміст інформаційної сторінки складається із таких тем чи розділів конкретної дисципліни, що найбільш повно відповідали би рівню підготовки студента. Таким чином, система адаптується до рівня знань студента, його намірів, переваг, базових знань (це дуже важливо, бо на сьогодні рівень вхідних знань студентів дуже різниться), досвіду та швидкості сприйняття нового матеріалу. Студенти повинні мати

достатні уявлення про можливості управління навчанням у віртуальному освітньому середовищі, це допоможе їм самостійно планувати процес навчання. Педагоги разом зі студентами, спираючись на потенціал віртуального освітнього середовища, спільно визначатимуть послідовність та темпи вивчення навчального матеріалу.

III. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Темою даного дослідження є аналіз використання віртуальної та доповненої реальності в освітніх цілях.

Віртуальна реальність (virtual reality, VR) – це світ, створений за допомогою спеціальних технічних засобів, які дають можливість кожному студенту потрапити в даний вигаданий світ. Особливість віртуальної реальності – максимальний вплив майже на усі органи чуття людини – зір, слух, нюх, дотик. Доповнена реальність (augmented reality, AR) – це технологія, в якій уявлення користувача в реальному світі посилюється й доповнюється додатковою інформацією комп'ютерних моделей, що дозволяє користувачеві залишатися на зв'язку із реальним навколишнім середовищем. Це основна відмінність від віртуальної реальності VR, в якій користувач повністю занурюється в штучний світ і є відокремленим від реального світу. AR система виводить цифровий пристрій до реального робочого середовища користувача, в той час як VR система пробує привнести навколишній світ на цифровий пристрій користувача.

Активне застосування віртуальної VR і доповненої AR реальності в самих різних областях формує об'єднану реальність (merged reality, MR), в якій стираються межі між доповненим, віртуальним і фізичним світами. До такого висновку прийшли експерти дослідницького підрозділу Ericsson Consumer Lab, вивчивши вплив технологій AR і VR на звички і уподобання користувачів.

Майбутнє фізичного реального світу формуватиметься за допомогою об'єднаної реальності MR, на основі доповненої AR та віртуальної VR реальності.

Дослідження merged reality показало, що 70% користувачів очікують, що технології VR/AR кардинально змінять шість областей: медіа, освіту, роботу, соціальне спілкування, подорожі і роздрібну торгівлю. Також 50% користувачів вважає, що VR/AR технології будуть інтегровані в одному пристрої, об'єднавши окуляри для AR і вбудовані функції VR. В злитті віртуальної і доповненої реальності з фізичним світом ключову роль гратимуть технології 5G, які забезпечать мобільність, покращать рівень соціального спілкування і вирішать проблеми ряду VR-додатків.

Технології доповненої реальності (AR) породжують унікальні можливості в освіті. Застосовуючи дані технології AR в освітньому середовищі, доповнюючи їх належною наочною інформацією, можна побудувати візуальну модель навчального матеріалу. Як результат, отримаємо розвинення просторової уяви студентів, що посилює глибоке розуміння ними процесів, властивостей, доведення теорем тощо.

Зокрема, при освоєнні студентами технічних вишів тем “Векторна алгебра”, “Побудова просторових кривих”, “Поверхні другого порядку” дуже важко, а часом і неможливо, засобами реального світу наочно продемонструвати тривимірні образи та їх властивості так яскраво, як це можна зробити, маючи відповідний відео-контент.

Розглядаючи геометричний зміст похідної функції однієї змінної з допомогою інструментів AR, студенти безпосередньо спостерігають наближення січної до дотичної в даній точці. Аналітичне доведення багатьох теорем диференціального числення поглиблюється зрозумілою наочною інтерпретацією [3].

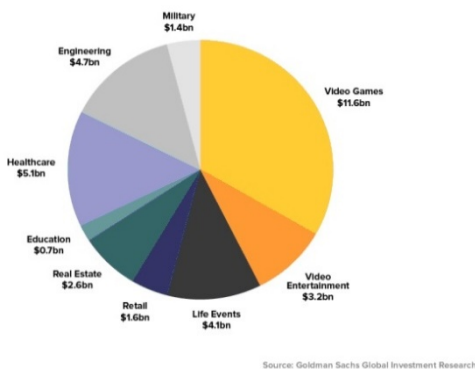


Рис. 1. Застосування AR/VR в різних галузях

При вивченні тем з аналітичного аналізу “Числові ряди”, “Ряди Тейлора”, “Ряди Фур’є” можливості AR надають змогу студентам глибше зрозуміти означення суми ряду, побудову частинних сум, знаходження суми числових рядів, процес наближення поліномів Тейлора до функцій, амплітудний та частотний спектри ряду Фур’є, фізичний зміст рядів Фур’є та їх застосування в техніці. При цьому значно покращується процес осмислення та запам’ятовування навчального матеріалу, у навчання привноситься ігровий елемент з динамічними елементами анімації.

Наведемо приклад одного з сучасних проєктів, який втілено на замовлення Міністерства внутрішніх справ Швейцарії - відео для соціальної компанії «Молодь і медіа» (Jugend und Medien), покликаною звернути увагу молоді на небезпеку, що існує в світі цифрових технологій. Кожен з шести епізодів серії присвячено різній темі: безпека у мережі, ігрова залежність, доступ до забороненого контенту тощо [4].

Розглянемо існуючі додатки в світі доповненої та віртуальної реальності, які використовуються в освітньому процесі.

Mel chemistry – додаток, пов’язаний з хімічними дослідженнями з широкими можливостями для розгляду різнопланових процесів. Наприклад, при вивченні процесів запису інформації на тривимірні диски для студентів спеціальності «Комп’ютерні науки», цікавим був би віртуальний розгляд процесу фотополімеризації,

при якому багатошаровий диск виходить складанням шарів одним за іншим, що формуються з «тонких відбитків» (або інформаційних шарів). Виготовлення одного інформаційного шару є виготовлення пластикової плівки з певними оптичними характеристиками. Товщина плівки варіюється від 25 до 30 мікрон. Плівка, на яку незабаром буде нанесена інформація, або штампється, або вирізається лазером до необхідного розміру. Такий процес спостерігати в віртуальному середовищі цікаво й дуже корисно.

Додаток Anatomyou, який є корисним як для школярів, так і для студентів і викладачів, займає провідне місце VR в галузі, багато інших розробників взяли його за основу. Наприклад, користувачі Oculus мають у своєму розпорядженні 3D Organon VR Anatomy [6].

Додаток Creator AVR дозволяє створювати навчальні завдання, обмінюватись враженнями за допомогою мобільних пристроїв без необхідності програмування. Creator AVR допомагає студентам та викладачам швидко створювати переконливий, інтерактивний навчальний зміст безпосередньо на своїх планшетах та смартфонах для відтворення в мобільному телефоні у сенсорному режимі. В Creator AVR є компонент Coliseum, який дозволяє педагогам вести заняття, одночасно відстежуючи усю групу. Студенти мають можливість задавати питання та відповідати на них, як в домашніх умовах, так і працюючи в аудиторії [5].

Додаток Google Expeditions - це подорож в будь-яку точку Землі і всесвіту, не виходячи з аудиторії, - незвичне поєднання реальної екскурсії з віртуальним світом в форматі навчання у віртуальній реальності. Це надає студентам можливість відправитися, наприклад, у “Космічну подорож”, або вирушити у штаб-квартиру Lehman Brothers, де можна ознайомитися з досвідом антикризового планування. Використання додатку Google Expeditions дозволяє забезпечити занурення студентів в події, що відбуваються на екрані, створивши враження, що глядач є свідком винаходів, історичних процесів. Демонстрація та обговорення побаченого допомагає посилити інтерес аудиторії до пізнавальної діяльності, а панорамна демонстрація певних понять дає можливість студентам краще засвоїти їх.

Відтворення процесів віртуальної та доповненої реальності тісно пов’язано з STEM-освітою. STEM-освіта в Україні – це впровадження е-навчання, різноманітних олімпіад, конференцій, семінарів, круглих столів, майстер-класів, хакатонів за методикою CISCO, Всеукраїнських змагань “Роботрафік”, Всеукраїнського фестивалю “ROBOfirst”, турнірів, конкурсів, виставок, фестивалів науки “Sikorsky Challenge”, тренінгів, зустрічей з менторами, екскурсій, обмін досвідом та участь у міжнародних навчальних школах, наукових пікніках і багато іншого. Переваги підходу полягають насамперед в наочності, в посиленні мотивації, в процесі фокусування на проблемах, в індивідуалізації та диференціації навчання [6].

Опитування серед американських педагогів, яке було проведено GfK у 2016 році на замовлення Samsung

показало, що 85% з них погоджуються з тим, що VR технологія матиме позитивний вплив на процес викладання, 83% вважають, що VR технологія допоможе покращити освітній результат, 77% впевнені, що VR технологія допоможе студентам краще зрозуміти викладений матеріал, 71% стверджують, що VR технологія підвищить рівень залучення студентів, 84% гадають, що VR технологія посилить мотивацію студентів.

Для реалізації системи віртуальної та доповненої реальності необхідно мати спеціальне технічне обладнання, спеціалізовану віртуальну лабораторію. Визначимо мінімальний комплект обладнання, який потрібен для реалізації такого підходу:

- Необхідна кількість смартфонів та VR шоломів;
- Планшет педагога;
- Wi-Fi роутер;
- Система віддаленого оновлення;
- Навчальні відео для педагогів.

Система XR case дає змогу провести заняття на 10, 16 або 30 пристроях віртуальної реальності.

При наявності спеціального обладнання вирішується питання створення віртуального контенту. Один із шляхів створення VR-контенту - віртуальні тури. Існують можливості створення 360-градусних фотографій, як в Google Street View так і в Яндекс-панорамах. 360-градусні фотографії можна створювати за допомогою мобільного пристрою, встановивши спеціальні додатки: Panorama 360 (Android, iOS), Google Карти (Android, iOS), Photosynth (iOS).

Ще один з напрямків створення віртуального VR-контенту - створення 360-градусного відео. Для практичної реалізації такого контенту сьогодні використовують або складні конструкції з 4-8-12 фотоапаратів, або екшн-камери, або спеціальні пристрої, наприклад, Ricoh Theta. Відео, зняте кількома пристроями, об'єднують в спеціальних програмах, наприклад, в Autorano Video. Щоб подивитись таке відео потрібно здійснити поділ даного відео на два потоки для кожного ока. Для реалізації такого завдання використовується додаток Krapo Panorama Viewer, який дозволяє створювати відео одночасно і для 360-градусного перегляду в браузері, і за допомогою VR-окулярів. В сучасному просторі існують спеціальні додатки для створення власного VR-контенту. Зазначимо декілька з них.

Photo Sphere, дозволяє робити панорамні світліни за допомогою простих вказівок на екрані, навколишній простір фотографується декілька разів, а потім за допомогою відповідної програми все збирається в єдине зображення, що завантажується в Google Maps.

360 Panorama, використовує камеру iPhone, обробляючи зображення і створюючи контент у форматі 360 градусів.

Panorama 360, доступна на Google Play Store і містить все необхідне для формування 360-градусного зображення, а також фільтри, різноманітні ефекти, є можливість поділитися з друзями і сумісність з Google Cardboard.

Splash, простий і зрозумілий інтерфейс, можливість підключення соціальних мереж для того, щоб поділитися відео з друзями, переглядати відео через Google Cardboard.

ВИСНОВКИ

Використання технологій доповненої та віртуальної реальності надає студентам вишів нові можливості та перспективи, спрямовані на практико-орієнтовне навчання, сприяє розвитку і самоосвіті кожного студента, надає можливості в отриманні ними найсучасніших знань, практичної підготовки до професійної діяльності. Застосування технологій реальності привносить науку до життя, відтворює реальні життєві ситуації, допомагає створити вигадані простори для невирішених задач. Це створює нові можливості для оволодіння практичними навичками, надає досвід дослідницької роботи, робить навчання яскравим процесом, унеможливорює відволікання від навчання та підвищує мотивацію до навчального процесу, допомагає більш глибоко зрозуміти складні поняття, означення, теореми, властивості, які мають засвоїти студенти під час навчання.

Сучасні цифрові технології на основі VR/AR реальності формують основні критерії підготовки фахівців, такі, як орієнтація на практичну складову освіти, продуктивність освітнього процесу, посилення концентрації та уваги, пошук інформації, провідна роль практики та самостійної роботи в навчальному процесі, підвищення мотивації, інтерактивність освіти, неперервна та комплексна оцінка навчальних досягнень, покращення розвитку просторових, творчих здібностей та пам'яті.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Рамки цифрової компетентності (The Digital Competence Framework for Citizens) DigComp 2.1 (2017) // European Commission, Joint Research Centre Publications Repository – Електронний ресурс: [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC106281/web-digcomp2.1.pdf_\(online\).pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC106281/web-digcomp2.1.pdf_(online).pdf)
- [2] Howe, Neil; Strauss, William (1997). The Fourth Turning: What the Cycles of History Tell Us About America's Next Rendezvous with Destiny. New York: Broadway Books. P. 2-3
- [3] Дополненная реальность в образовании - Електронний ресурс: <https://vr-i.ru/stati-i-obzory/dopolnennaya-realnost-v-obrazovanii/>
- [4] Chancen und Gefahren Jugend und Medien (Можливості та загрози. Молодість та засоби масової інформації) - Електронний ресурс: <http://www.jugendundmedien.ch/de/chancen-und-gefahren.html>
- [5] 3 D Jragon VR Anatomy – Електронний ресурс: <https://www.oculus.com/experiences/rift/872418872856459/>
- [6] Задерей Н. М., Мельник І. Ю., Нефьодова Г. Д. Сучасні підходи до STEM-навчання в університетській освіті. - Scientific Journal "Virtus" Issue # 5, February, 2016. – P. 152 – 155.

Управління Інтелектуальними Ризиками в Проектах Транспортування Великогабаритних Вантажів

Іраїда Становська

кафедра вищої математики та моделювання систем
Одеський національний політехнічний університет
Одеса, Україна
stanovska@opu.ua

Сергій Кошулян

кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування
Одеський національний політехнічний університет
Одеса, Україна
sergkoshul1990@rambler.ru

Олексій Торопенко

кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування
Одеський національний політехнічний університет
Одеса, Україна
alexey.toropenko@geomoras.net

Олеся Дадерко

кафедра комп'ютерних систем та мереж
Одеський національний політехнічний університет
Одеса, Україна
jqutel@gmail.com

Intellectual Risk Management in Projects of Transportation of Large Vehicles

Iraida Stanovska

Department of Mathematics and Modeling Systems
Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine
stanovska@opu.ua

Sergiy Koshulyan

Dept. of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering
Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine
sergkoshul1990@rambler.ru

Oleksii Toropenko

Dept. of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering
Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine
alexey.toropenko@geomoras.net

Olesya Daderko

Department of Computer Systems and Networks
Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine
jqutel@gmail.com

Анотація—Показано, що транспортування великогабаритних вантажів є проектом, в якому команда останнього постійно стикається із інтелектуальними ризиками протидії оточуючого середовища у вигляді субпідрядників (шляховиків, електриків, автоінспекції, тощо) виконанню окремих етапів проекту. Управління цими ризиками містить різні форми співпраці із субпідрядниками, – від об'єднання (SCRUM-технології) до конкурентної гри із «супротивником». Запропоновано адаптивну комплексну структуру технології проектної діяльності з перевезення великогабаритного багажу, яка передбачає на початку кожного етапу виявлення форми співпраці із субпідрядником та гнучку технологію роботи із ним.

Abstract—It has been shown that the transport of large-sized cargoes is a project in which the latter team constantly faces the intellectual risks of counteracting the environment in the form of subcontractors (roadmakers, electricians, road inspectors, etc.) for the implementation of individual stages of the project. Managing these risks involves various forms of cooperation with subcontractors, from the merger (SCRUM-technology) to the game with the "opponent". The adaptive complex structure of the project activity on transportation of large-sized luggage is offered, which provides at the beginning of each stage the identification of the form of cooperation with the subcontractor and the flexible technology of work with it. The aim of the work is to reduce the time and cost of implementing large baggage transportation projects by managing the intellectual risks of

counteraction from subcontractors of the project through the development and implementation of an adaptive integrated structure of the project activity technology, which foresees, at the beginning of each phase of the project, the identification of the form of cooperation with the next subcontractors and the flexible working technology with them. To achieve this goal, the following tasks were set and solved: analyzed problems of transportation of large-sized cargoes and revealed design features of such activity; Estimated intellectual risks of counteraction to project activity from "subcontractors" of the project; proposed adaptive complex structure of technology project activity, which combines SCRUM technology and game; the industrial tests of the results of the research with a positive technical and economic effect have been carried out. The results of the work were used in the system of support for the adoption of design decisions in the context of intellectual risks "SOLINTR". The system "SOLINTR" was involved in the PEO "ECHO" when planning and equipping the project of transportation of large-sized cargo at a distance of 235 km with a positive technical and economic effect.

Ключові слова—великогабаритні вантажі; інтелектуальні ризики; SCRUM-технології; конкурентна гра; адаптивна комплексна структура

Keywords—large-sized cargoes; intellectual risks; SCRUM-technology; competitive game; adaptive complex structure

I. ВСТУП

Перевезення спеціального вантажу – один з найскладніших видів вантажоперевезень. Особливість спеціальних вантажів (важка дорожня техніка; великогабаритні бочки; комбайни; нафтогазове обладнання; верстати виробничого призначення; труби; негабаритні ємності; складні архітектурні композиції, тощо) полягає в тому, що за своїми технічними характеристиками вони не можуть перевозитися звичайним автотранспортом і по дорогах загального користування; це може бути промислове, важковагове обладнання та техніка, складні, великогабаритні та негабаритні конструкції, труби та ін. (рис. 1).



Рис. 1. Великогабаритний вантаж на автомобільній платформі (фото с сайту компанії DSV)

Для перевезення спеціальних вантажів розробляється спеціальний маршрут [1], вибирається спеціальний транспорт на проектується спеціальне обладнання [2, 3]. Розглянемо таку діяльність в якості проектної, оскільки вона, як правило, унікальна, обмежена в часі та ресурсах,

виконується окремою командою, має чітко окреслену мету і в процесі виконання протидіє внутрішнім та зовнішнім ризикам, які на цей проект очікують [4].

При реалізації подібного проекту в деяких випадках необхідно піднімати лінії електропередач або навіть змінювати ландшафт, що не завжди «подобається» відповідальним за це особам. Труднощі такого перевезення полягають також в тому, що для проекту повинен бути розроблений дуже точний план, оскільки від кожного ризику залежить обсяг збитків і результат перевезення.

Таке протистояння ризиків призводить до відмінностей планової та фактичної тривалості робіт. Затримки виконання проекту одним з учасників призводить, в свою чергу, до штрафу або відсутності нагороди у іншого учасника проекту. Це призводить до несправедливого розподілу штрафів та нагород і, як наслідок, до відсутності мотивації до скорочення термінів виконання проекту [5].

Дуже велика міра ризиків, які супроводжують такий проект визначається також значними витратами на їхню компенсацію [6]. Існують три типові стратегії реагування на появу ризиків, здатних негативно вплинути на досягнення цілей проекту: ухилення, передача і зниження. Четверта стратегія – прийняття, може використовуватися як для негативних, так і для позитивних ризиків (сприятливих можливостей). Кожна з цих стратегій реагування на ризики здійснює різний і унікальний вплив на стан ризику. Обрані стратегії повинні відповідати ймовірності настання ризику та його впливу на загальні цілі проекту.

В підсумку маємо такі властивості управління проектами у цих умовах: наявність кількох учасників, невизначеність поведінки учасників, конфлікт інтересів учасників, взаємозв'язок поведінки (наявність відомих усім учасникам правил поведінки), раціональності рішень, що приймаються [7]. Такі особливості при наявності згоди між учасниками восходять до ауторсингу у вигляді SCRUM-технологій управління проектами [8], а при відсутності такої – до теорії ігор [9].

II. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є зниження термінів та витрат на реалізацію проектів перевезення великогабаритного багажу шляхом управління інтелектуальними ризиками протидії від субпідрядників проекту за рахунок розробки та впровадження адаптивної комплексної структури технології проектної діяльності, яка передбачає на початку кожного етапу проекту виявлення форми співпраці із черговими субпідрядниками та гнучку технологію роботи із ними.

Для досягнення цієї мети в роботі були поставлені і вирішені наступні задачі: проаналізовані проблеми транспортування великогабаритних вантажів і виявлені проектні ознаки такої діяльності; оцінені інтелектуальні ризики протидії проектної діяльності від «субпідрядників» проекту; запропонована адаптивна комплексна структура технології проектної діяльності, яка поєднує SCRUM-технологію та конкурентну гру; здійснені виробничі

випробування результатів дослідження із позитивним техніко-економічним ефектом.

III. Викладення основного матеріалу

Розглянемо зовнішні ризики, тобто такі, які породжує турбулентне оточуюче середовище. Усі зазначені вище протистояння відносяться саме до таких ризиків, адже субпідрядники діють за межами проекту.

В найпростішому випадку усі ризики мають рівну ймовірність виникнення (рис. 2, а). Така гіпотетична ситуація відповідає рівню «повний хаос» і не зустрічається у випадках, коли ризики виникають як протидія з боку одухотворених об'єктів. На рис. 2, б наведений випадок, коли оточуюче середовище вже структуроване, ймовірність виникнення ризиків різна, але їхня поява все ще не персоніфікована.

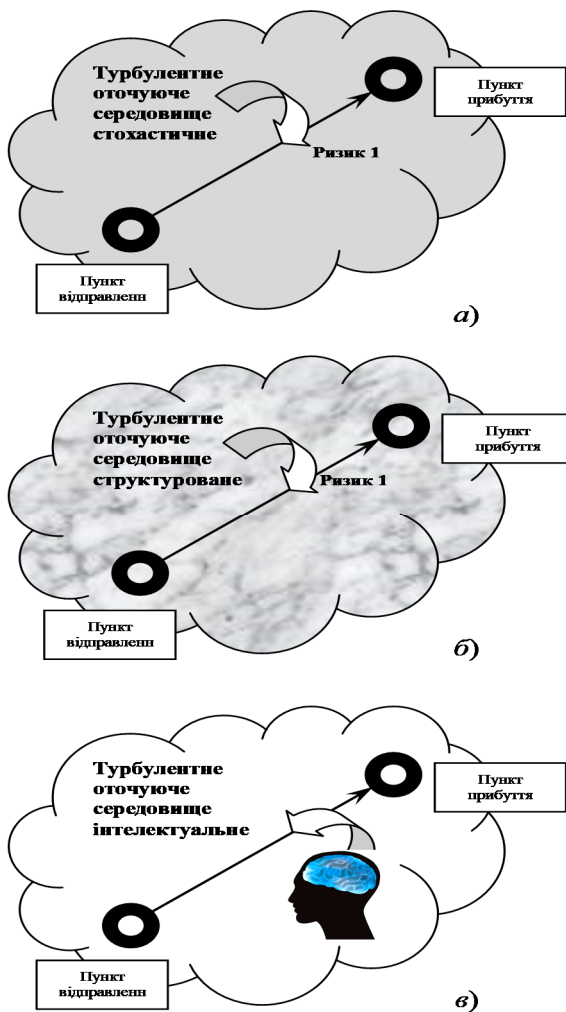


Рис. 2. Схема взаємодії проекту перевезення великогабаритного вантажу із ризиками: а – стохастичними; б – структурованими; в – інтелектуальними

Нарешті, рис. 2, в містить ознаки інтелекту: рішення про ризикову дію на проект приймає людина (або штучний інтелект), менеджер проекту змушений управляти такими ризиками за допомогою теорії ігор.

Застосування теорії ігор в управлінні проектами дозволяє достовірно прогнозувати найбільш ймовірний результат подій та зменшує час, який витрачається на такий прогноз [5]. При цьому математична теорія ігор дозволяє включити до розгляду такі аспекти управління проектами, як знання [10, 11], конфлікти [12], прийняття рішень [13], терміни [14 – 16] та ризики [17].

Таким чином, маємо, як мінімум, двох учасників проекту: організація, яка здійснює проект переміщення вантажу, та інфраструктура на шляху такого переміщення, яка, м'яко кажучи, в цьому переміщенні зацікавлена. До цього слід додати, що фактично така інфраструктура, як правило, складається з окремих «учасників», а взаємодія з нею розпадається на кілька попарних взаємодій із зовсім різними інтересами, виконавцями та іншими можливостями та бажаннями.

Ролі реальних інтелектуальних партнерів-супротивників, без яких жодну з цих проблем розв'язати неможливо, можуть бути інтерпретовані в проектному менеджменті як «друг», «байдужий учасник» або «супротивник». Тому перед початком конкретного поточного аутсорсингу [18] необхідно спочатку ідентифікувати, до якої з цих ролей відноситься тимчасовий партнер, а потім, залежно від результату, запропонувати йому місце в черговому спринті Скраму або «викликати на конкурентну гру».

В результаті для прикладу з перевезення спеціальних вантажів отримуємо адаптивну комплексну систему управління проектом, яка передбачає наявність центрального ядра (ЦЯ) – проектного менеджменту – та периферійних субпідрядників, до яких послідовно звертається ядро і заключає із ними різні умови відношень (рис. 3).

Далі підключається інтелектуальна система (наприклад, нейронна мережа), яка розпізнає образ субпідрядника: «друг» або «супротивник».

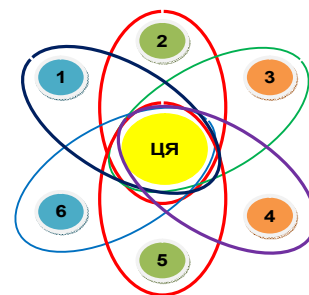


Рис. 3. Схема адаптивної системи управління проектом перевезення великогабаритного багажу: 1 – забезпечення спеціального транспорту (SCRUM); 2 – навантаження (SCRUM); 3 – забезпечення дорожнього руху (гра); 4 – забезпечення електричних мереж (гра); 5 – підготовка мостів та тунелів (гра); 6 – розвантаження (SCRUM)

В залежності від результатів розпізнавання виконуються аутсорсинг частини проекту в рамках поточного спринту SCRUM-технології або здійснюється виклик «супротивника» на конкурентну гру.

В роботі в якості об'єкту дослідження розглядається процес виконання проекту або програми транспортування великогабаритних вантажів.

В деяких випадках цей процес стикається із протидією з боку різних інтелектуальних організацій-субпідрядників (наприклад, шляховиків, електриків, автоінспекції, тощо), з якими доводиться або домовлятися і, навіть, тимчасово залучати їх до команди проекту, або вступати із ними в конкуруючу за час, ресурси та кошти гру.

У цих організацій різні цілі і кожна ціль має вартість. Інтелектуальність інфраструктури визначається тим, що вона розбита на підсистеми, кожна з яких приймає рішення за допомогою людини.

Цілі гравців, як правило, конкуруючі, наприклад, першому гравцю потрібно перевезти вантаж через міст, а другий «не хоче» реконструювати міст, перекривати дорожній рух, витратити гроші на відповідні повідомлення, тощо.

Результати роботи підтверджують можливість ефективного використання для управління проектами перевезення великогабаритного вантажу гібридної комбінованої системи, яка на кожному етапі проекту виявляє кризи, що випливають від позитивної або негативної дії субпідрядників. Для протидії цим кризам система створює тимчасові групи виконавців, діючих або в рамках SCRUM-технології управління, або згідно із правилами конкурентної гри. Все це дозволяє пришвидшити виконання проекту в цілому, а також заощадити значні кошти усім учасникам проектної діяльності на виконанні кожного з етапів останнього.

ВИСНОВКИ

Проаналізовані проблеми транспортування великогабаритних вантажів крізь об'єкти із розвинутою інфраструктурою (міста, магістральні шляхи, тощо) і виявлені проектні ознаки такої діяльності: унікальність кожного процесу, наявність цілі, обмеження в часі та ресурсах, команда проекту, тощо. Інтелектуальні ризики протидії проектній діяльності випливають із різних інтересів деяких субпідрядників, участь в проекті для яких є вимушеною (наприклад, адміністративно) та збитковою. Запропонована адаптивна комплексна структура технології проектної діяльності, яка, в залежності від інтересу субпідрядника, змушує менеджмент проекту поєднуватися із ним у SCRUM-команду або починати із ним конкурентну гру із втратами.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

[1] Особенности перевозок негабаритных грузов. – [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://www.packer3d.ru/node/60>.

- [2] O.C. Савельева, Інформаційні технології оптимізації конструкції та технології виготовлення гумометалевих виробів / O. C. Савельева, I. I. Становська, O. Ю. Лебедева, A. B. Торопенко // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии*. – Харьков, 2016. – № 2/2 (80). – С. 28-33. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65456
- [3] O. Saveleva, Optimization of uniformly stressed structures of cylindrical tanks in CAD / O. Saveleva, I. Stanovska, Yu. Khomyak, A. Toropenko, Ie. Naumenko // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии*. – Харьков, 2016. – № 6/7 (84). – С. 10-16. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85451
- [4] O.C. Савельева, Управління програмою супроводження систем аварійного захисту АЕС / O. C.Савельева, I. I. Становська, Т. В. Бібік, К. І. Березовська // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Процессы управления*. – Харьков, 2016. – № 2/3 (80). – С. 49-56. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65641
- [5] Е. Гришина, Перспективы развития теории игр в управлении проектами / Е. Гришина– М.: Высшая школа экономики, 2013. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pmconf.hse.ru/data/2014/06/22/1310547696/Гришина%20Е.%200.-8.01.2018>
- [6] Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK®) . – 5-Е изд. – USA/США: *Project management institute*. – 2013. – 586 с.
- [7] A. Aliahmadi, A new intelligence expert decision making using game theory and fuzzy AHP to risk management in design, construction, and operation of tunnel projects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(5–8), p. 789-798
- [8] S. Bandyopadhyay, P. Pathak, Knowledge sharing and cooperation in outsourcing projects. A game theoretic analysis. *Journal Decision Support Systems*, 2007, 43(2), 349-358.
- [9] Л.А. Петросян, Теория игр / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. В. Шевкопляс. – СПб: БХВ-Петербург. – 2012. – 432 с.
- [10] Y. Li, J. Li, Knowledge sharing in communities of practice: A game theoretic analysis. *European Journal of Operational Research*, 2010, p. 1052-1064.
- [11] R. Sharma, S. Bhattacharya, Knowledge dilemmas within organizations: Resolutions from game theory. *Knowledge-Based Systems*, 2013, p. 45, 100-113.
- [12] A. Barough, M. Shoubi, M. Skardi, Application of Game Theory Approach in Solving the Construction Project Conflicts. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, p. 58, 1586-1593.
- [13] L. Castillo, C.A. Dorao, Decision-making in the oil and gas projects based on game theory: Conceptual process design. *Energy conversion and management*, 2013, p. 66, 48-55.
- [14] G. Bergantiños, E. Sánchez, NTU PERT games // *Journal Operations Research Letters*, 2002, 30(2), p. 130-140.
- [15] J. Castro, et al. A project game for PERT networks // *Operations Research Letters*, 2007, 35(6), p. 791-798.
- [16] A. Estevez-Fernandez, A game theoretical approach to sharing penalties and rewards in projects. *Tinbergen Institute Discussion Paper*, 2012, p. 1-32.
- [17] X. Huaifeng, L. Qihong, The game theory analysis of risk share for PPP project based on shapley value. *The 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering*, 2010, p. 1-11.
- [18] B.A. Aubert, A framework for information technology outsourcing risk management. *The Data Base for Advances in Information Systems*, 2006, 13(2), 122-1

Інтегрована Інформаційна Система для Підтримки Smart-Туризму

Юрій Тулашвілі

кафедра комп'ютерних наук
Національний університет водного господарства та
природокористування
Рівне, Україна
i.j.tulashvili@nuwm.edu.ua

Тетяна Жовтан

ІТ студія кафедри комп'ютерних наук
Національний університет водного господарства та
природокористування
Рівне, Україна
zhovtan_ak17@nuwm.edu.ua

Integrated Data System to Support Smart-Tourism

Yurii Tulashvili

Dept. of Computer Science
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
i.j.tulashvili@nuwm.edu.ua

Tatyana Zhovtan

IT Studio of Dept. of Computer Science
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
zhovtan_ak17@nuwm.edu.ua

Анотація—Метою даного дослідження є визначення структури інтегрованої інформаційної системи туристичного інформаційного супроводу. Розглянуто деякі шляхи та можливості створення інтегрованої інформаційної системи для зберігання інформації неоднорідного змісту, системи управління туристичною мережею. Розроблено базову структуру інтегрованої інформаційної системи як системи управління туристичною дилерською мережею. Структура бази даних включає в себе знання туристичних об'єктів, їх можливості та параметри. Запропонована формальна модель та методи інтеграції ресурсів системи інформаційної підтримки туристів.

Abstract—The purpose this paper of the study the structure of integrated data system for tourist information. Some ways and possibilities of integrated data system development for information storage of heterogeneous content of tourist dealer network as management system are considered in this paper. The basic structure of integrated data system of tourist dealer network management system has been developed. The structure of the database includes knowledge of tourist relevant objects, their possible and parameters. Formal model and methods of integration of resources of support systems of tourist were proposed.

Ключові слова—інтегрована інформаційна система, мережа керування послугами туристів, системи підтримки туристів

Keywords— integrated data system, network of management of tourist services, support systems of tourist

I. ВСТУП

Використання сучасних інформаційних технологій у туристичній галузі сприяє її популяризації та динамічному розвитку. Особливо це відчутно для такого напрямку туристичної індустрії як культурний туризм, серед якого можна виділити міський. Впровадження нових туристичних ІТ-продуктів в сфері міського культурного туризму забезпечує просування туристичних послуг, підвищення рівня їх інформаційно-консультаційного забезпечення, є запорукою ефективного економічного росту безпосередньо цього виду туризму.

Інтернет-ресурси сьогодні є найпоширенішими засобами туристичної реклами та менеджменту туристичного бізнесу. В сфері міського культурного туризму вони широко використовуються для реклами, комунікації, інформаційного супроводу, онлайн резервування та придбання готельних місць і проїзних квитків, автоматизації управління та обліку, розширенню міжнародних зв'язків для просування національного туристичного продукту на світовому ринку. Створення інформаційних порталів на основі Інтернет-сервісів та програмного забезпечення сучасних гаджетів сьогодні є одним з перспективних напрямів розвитку туристичної галузі. Прикладні системи поєднуючись із Smart-методом сприяють впровадженню концепції регіонального Smart-туризму, формуванню «розумних міст».

Smart процес в туризмі розглядається як процес надання туристичної послуги, який дає можливість ефективного задоволення потреб Smart-туриста. Smart

турист – споживач туристської послуги, який постійно використовує Smart-елементи для досягнення нової якості процесів в туризмі з метою найбільш повного задоволення своїх туристських потреб [1].

Метою проведеного дослідження є розвиток сучасної концепції використання інтегрованих інформаційних систем (ІС), що поєднують Інтернет-сервіси та програмні додатки сучасних гаджетів. Це обумовлено необхідністю синтезу інформаційної технології із Smart-методом в сфері міського культурного туризму шляхом створення нових інформаційних систем для управління доступом до інформаційних потоків мережі туристичних послуг, що являє собою актуальне науково-прикладне завдання.

II. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Загально визнано, що ІС розглядається як ієрархічно організований комплекс організаційних методів, технічних, програмних, алгоритмічних та інформаційних засобів, які мають модульну структуру та забезпечують наскрізне узгоджене управління потоками інформації. До ІС висувуються наступні функціональні вимоги: підтримка розширених процедур узгодження даних; підтримка оперативного доступу до даних; керування підтримкою даних, типи яких можуть значно змінюватися в залежності від застосування; підтримка визначених стандартних та/або фактичних об'єктних моделей даних; забезпечення взаємного відображення (мапування) протоколів і перетворень; підтримка управління даними через організаційні межі [2].

Процес створення ІС управління різними видами рухомих об'єктів, що є актуальним й для туристичної галузі, пов'язується з: розробленням організаційної, функціональної та інформаційної структури ІС управління потоками інформації; створенням і впровадженням перспективних засобів зв'язку та навігації; розробленням і впровадженням новітніх технологій оброблення інформації; інтеграцією засобів інформаційного супроводу, зв'язку та навігації у рамках ІС; створенням умов для подальшого розвитку ІС [3].

Ставлячи за мету створення ІС як інформаційного порталу з функціями інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму проаналізуємо наявні інформаційні ресурси, що активно використовуються споживачами туристичної продукції та туроператорами.

На ринку туристичних послуг впевнено функціонують глобальні дистриб'юторські системи бронювання «Amadeus», «Galileo», «Sabre», «Worldspan», які пропонують туристичним фірмам доступ до баз даних постачальників туристичних послуг по всьому світу. Туристичні портали України «УкрТуризм» (www.ukrtourism.com), «Наші подорожі» (www.hometravel.com.ua), «Подорожі в Україні» (travel.kyiv.org), «UKRTRAVEL» (www.ukrtravel.net) та інші дозволяють туроператорам розміщувати свої пропозиції в єдиному інформаційному полі та оперативно управляти ними, а споживачам туристичного продукту

отримувати різноманітну інформацію стосовно туристичних регіонів.

Серед програмного забезпечення сучасних гаджетів слід виділити: LONELY PLANET - англомовний електронний гід, що дозволяє безкоштовно закачати один додаток Guides з описом значної кількості великих міст світу; 2GIS - безкоштовний набір офлайн-мап 2D та 3D відображення з навігатором по містах і довідником з контактами, що має україномовну та російську версії інтерфейсу; DOROGA.MOBILE - путівник по Україні для ОС Android - одна з найбільш детальних баз туристичних об'єктів (понад 12 тис.) з наявними офлайн-картами; GOOGLE TRIPS - додаток глобального супроводу туристичних подорожей за допомогою мап Google, що дозволяє збирати та зберігати на гаджетах інформацію про поїздки локально й в хмарних сховищах та мати доступ до інформації в режимах онлайн і офлайн; BOOKING.COM, TRIPADVISOR для бронювання готелів, що допомагають знайти готель, відгуки про їх відвідування, світлини номерів тощо; додатки SEATGURU, SKYSCANNER та FLIGHTRADAR24, що містять плани салонів лайнерів і переліки послуг на борту, дозволяють відстежувати переміщення на літаках, а також є сервісами з купівлі авіаквитків.

У результаті аналізу наявних типових інформаційних ресурсів, які активно використовуються споживачами туристичної продукції та туроператорами визначено, що позитивний ефект від запровадження ІС як інформаційного порталу з функціями інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму може бути отримано із застосуванням концепції сховищ даних (Data Warehouse, DW) і системи оперативної аналітичної обробки даних (Online Analytical Processing, OLAP) на принципах відкритих систем, з дотриманням визначених стандартів і використання апробованих рішень.

У джерелі [4] система централізованого зберігання даних визначається як така, що дозволить створити надійне сховище даних з централізованим управлінням усією інформацією, що отримана з різноманітних джерел даних. «Data Warehouse consolidation system will provide a secure, centrally administered data repository for all information imported from all data sources».

Автор [5] розкриває основну ідею OLAP, що полягає в забезпеченні навігації через надання даних користувачам, що не є експертами, щоб вони могли інтерактивно генерувати спеціальні запити без втручання фахівців з інформаційних технологій. «Its main idea is providing navigation through data to non-expert users, so that they are able to interactively generate ad-hoc queries without the intervention of IT professionals».

Обрання інформаційно-інтелектуально-аналітичної компоненти проектованої ІС дає змогу забезпечити ефективність інформаційного супроводу та надання сервісних послуг користувачам міського культурного туризму. Реалізація такої архітектури дає можливість для проведення аналізу даних залучати зовнішні інформаційні ресурси (сайти туристичних агентств) та для сервісної

підтримки використовувати апробовані програмні додатки з вільним доступом.

Визначені результати аналітичних досліджень з аналізу елементів ІС доводять, що децентралізація функцій формування та підтримання розподілених інформаційних ресурсів ІС сприяє її живучості та надає можливості розвитку [2, 3].

Накопичення інформації щодо туристичних об'єктів (дестинацій) здійснюється у централізованому сховищі даних (ЦСД) шляхом застосування процесу пошуку інформації на сайтах з відкритим доступом. ЦСД, своєю чергою, є основним джерелом даних у ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму.

Кожен турист в межах ІС стає автономною одиницею споживання туристичних послуг міського культурного туризму та користувачем системи, що оперує розширеними інформаційними потоками, програмними та іншими ресурсами. Зв'язок користувача міського культурного туризму зі ЦСД забезпечується через програмний мобільний додаток (МД). МД також виконує роль засобу видобування, завантаження, перетворення та переміщення даних від користувача міського культурного туризму до ЦСД, що забезпечує можливість інтеграції та накопичення різноманітних даних, сформованих туристами у формі постів. Різноманітність інформаційних ресурсів, що формуються користувачами міського культурного туризму із застосуванням МД як вузлів мережі ІС, надає інформації додаткової гнучкості, здатності бути адаптованими до реальних умов Smart-процесів в туризмі, бути поширеним у середовищах Smart-туризму.

Повнофункціональна ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму, має загальний вигляд, який представлений на рис. 1, та охоплює зокрема такі процеси:

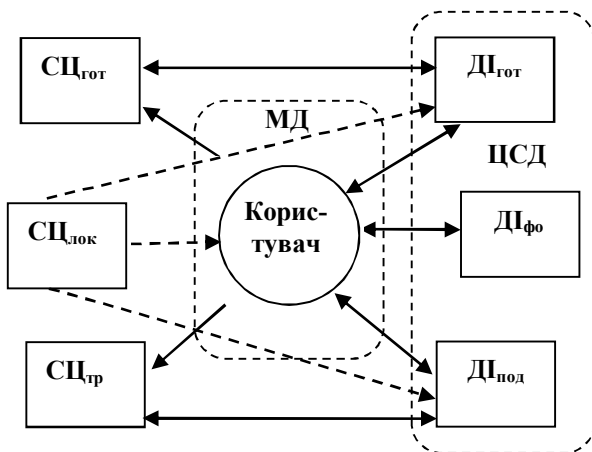


Рис. 1. Загальний вигляд структури ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму.

- формалізовані описи об'єктів міського культурного туризму (джерела інформації Д_{фо});
- маршрути подорожей (джерела інформації Д_{под});

- зв'язки між туристичними об'єктами та готельною інфраструктурою (джерела інформації Д_{гот});
- зв'язки з онлайн-системами резервування та придбання готельних місць (сервісний центр СЦ_{гот});
- зв'язки з онлайн-системами резервування та придбання проїзних квитків (сервісний центр СЦ_{гр});
- зв'язки з онлайн-системами геолокаційних засобів (сервісний центр СЦ_{лок}).

На рис. 1 пунктирною лінією відокремлено МД та ЦСД, подані зв'язки з сервісом системи геолокації. Для визначення місцеположення туристів та закладів різноманітних послуг за допомогою геолокації використовується загальноживаний сервісний додаток GOOGLE MAPS, що вже інтегровано входить до складу більшості мобільних пристроїв. Всі ці компоненти після агрегування дають можливість реалізувати ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму.

В основу ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму покладено процеси споживання туристичного продукту. Відповідно, основними елементами (сутностями) ІС є:

- турист - фізична особа, що є споживачем туристської послуги, яка постійно використовує Smart-елементи;
- ЦСД - Інтернет ресурси, що ґрунтуються на використанні даних у сховищах на основі хмарних технологій;
- сервіси - сайти сервісних центрів резервування та продажу готельних місць та проїзних квитків;
- мобільний додаток GOOGLE MAPS - сервіс, що здійснює геолокацію місцеположення туриста та геолокацію різних закладів обслуговування.

На основі визначення основних понять предметної області ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму та їх функцій складено діаграму прецедентів (Use Case Diagram) (див. рис. 2), яка дає змогу специфікувати загальні особливості поведінки системи чи будь-якої іншої сутності предметної області без розгляду внутрішньої структури цієї сутності. Кожен прецедент (варіант використання) визначає послідовність дій, які повинні бути виконані системою, що проектується, при взаємодії з відповідним актором.

Під час проектування ІС на основі системної інтеграції використовувалося п'ять рівнів інтеграції. Перший рівень - інтеграція туристичних об'єктів і процесів, яка зводиться до інтеграції інформаційного забезпечення турсервісів та їх послуг. На цьому рівні інтеграції використовуються WEB та комунікаційні технології. Другий рівень інтеграції - користувацький, що реалізує інтеграцію мобільних додатків і засобів для інтерактивної взаємодії користувачів

з ресурсами системи. Для реалізації користувацького інтерфейсу розроблено мобільний додаток. Третій рівень - архітектурний, на якому визначається оптимальна архітектура системи. Четвертий рівень - інтеграція даних і додатків, яка зводиться до побудови і застосування ЦСД. На цьому рівні інтеграції реалізується збирання й структурування даних, розробляється універсальна стратегія доступу до даних. П'ятий рівень - інтеграція апаратно-програмних платформ, що зводиться до оптимального вибору стандартних платформ та організації їх взаємодії в складі ІС.

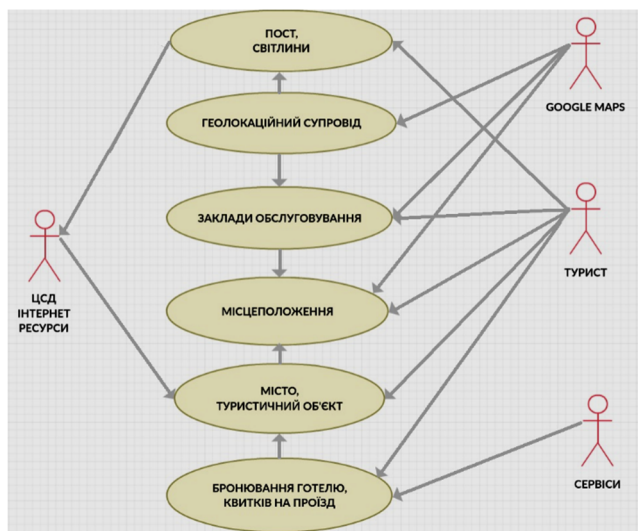


Рис. 2. Діаграма прецедентів ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму.

Під час побудови формальної моделі ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму взаємодія конкретного користувача системи S^{def} подається у вигляді сукупності взаємодіючих сутностей:

- туристичних об'єктів;
- замовлень туристичної послуги у сервісних центрах;
- суб'єктів-споживачів туристичної послуги.

Взаємодію сутностей для конкретного користувача ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму можна виразити залежністю:

$$\Sigma S^{def} = \{N, R \mid N \in G\}, \quad (1)$$

де N - множина туристичних об'єктів - носіїв системи; R - множина замовлень туристичної послуги, що характеризується бінарними відношеннями; G - множина суб'єктів-споживачів туристичної послуги, що утворюють відношення чітко визначеного часткового порядку з їх бінарними зв'язками у середині ІС.

Суб'єкт-споживач туристичної послуги - активна системна складова, до якої застосовується політика конфіденційності, а туристичний об'єкт - пасивна.

Використання запропонованої формальної моделі дозволяє з точки зору формалізованого подання інформаційної технології управляти процесом інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму використовуючи всі елементи ІС.

ВИСНОВОК

Основною проблемою, яку розглянуто в статті, є проблема інформаційного забезпечення та надання послуг в мережі сервісного обслуговування міського культурного туризму на основі аналізу накопиченої інформації про туристичні об'єкти та послуги. Запропонований спосіб вирішення проблеми - це повна або часткова інформатизація взаємодії туроператорів та споживачів туристичної послуги, зокрема, процесів забезпечення інформаційного супроводу та надання сервісних послуг. Таким чином, у результаті проведених досліджень визначено основні складові елементи та функції окремих елементів ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму. До складу елементів входять знання туристичних об'єктів, їх можливості та параметри, що формують данні інформаційного супроводу за допомогою ЦСД, периферійні сервіси онлайн резервування та придбання готельних місць і проїзних квитків та здійснення геолокації місцеположення туриста та геолокації різних закладів обслуговування. Розроблено базову структуру інтегрованої інформаційної системи та визначені принципи взаємодії в середині туристичної дилерської мережі з вільним доступом. Запропонована формальна модель та методи інтеграції ресурсів системи підтримки туристів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на поглиблення знань про об'єкти запропонованої ІС інформаційного супроводу та надання сервісних послуг в сфері міського культурного туризму та уточнення взаємозв'язків в середині системи, а саме: конкретизацію структури баз даних; створення методів оптимальної інтеграції інтелектуальних інформаційних систем; оцінку повноти та оперативності надання послуг туристам.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Н.Н. Кормягина, "Smart-туризм как часть Smart-концепции," Маркетинг и логистика: научно-практический журнал, Выпуск №6 (14), 2017, с. 45-57.
- [2] О.Я. Матов, І.О. Храмова, "Сучасні технології інтеграції інформаційних ресурсів", - Реєстрація, зберігання і обробка даних, Т. 11, № 1, 2009, с.33-42.
- [3] О.А. Смірнов, А.С. Кожанова, О.В. Коваленко, "Обґрунтування необхідності створення систем технічної діагностики інтегрованих інформаційних систем", Системи обробки інформації, № 6 (113), 2013, с. 255-257.
- [4] Э. Спирли, "Корпоративные хранилища данных". Планирование, разработка и реализация, Том.1, М.: Издательство Вильямс, 2001, 400 с.
- [5] O. Romero, A. Abell'o, "On the Need of a Reference Algebra for OLAP", in Proceedings of the International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery (DaWaK'07), volume 4654, pp. 99-110, 2007. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/bb99/36dc85acfc794636140f02644f4f29a754c9.pdf>.

Application of OBDII Technology in the IoT Conception

J. Rogowski
Institute of Information Technology
Lodz University of Technology
Lodz, Poland
jan.rogowski@p.lodz.pl

Застосування Технології OBDII в Концепції IoT

Я. РОГОВСЬКИЙ
Інститут інформаційних технологій
Технологічний університет м. Лодзь
Лодзь, Польща
jan.rogowski@uni.lodz.pl

Abstract— This paper describes a system built on the basis of the Internet of Things concept enabling the monitoring of vehicle location and operation parameters. The system reads the vehicle operation parameters and its location, transmits this data from the vehicle to the server using a secure connection, displays vehicle operating parameters in the user interface in a real time and creates reports using software operating in a distributed environment. The deployment of the system allows for complete monitoring of the work of professional drivers in a large transport company or globally.

Анотація— У цій статті представлена система, побудована на основі концепції Інтернету речей, яка дозволяє контролювати місцезнаходження та параметри роботи транспортного засобу. Система читає параметри роботи транспортного засобу та його місцезнаходження, передає ці дані з транспортного засобу на сервер за допомогою безпечного з'єднання, відображає робочі параметри транспортного засобу в користувацькому інтерфейсі в режимі реального часу та створює звіти за допомогою програмного забезпечення, що працює в розподіленому середовищі. Розгортання системи дозволить здійснювати повний моніторинг роботи професійних водіїв у великій транспортній компанії або у всьому світі.

Keywords— *Internet of Things; OBD II; ELM327; complete vehicle monitoring*

Ключові слова— *Інтернет речей; OBD II; ELM327; повний моніторинг автомобіля*

I. INTRODUCTION

The Internet of Things concept involves the combination of devices equipped with sensors that allow one to interact with the physical world in a common network. Such connected items are referred to as intelligent. They can communicate with each other, surroundings and other devices. The idea also

includes mutual communication between a man and a machine and between two machines. Some of the benefits of the Internet of Things include increased situational awareness, decision analytics controlled by sensors, immediate control and reaction. The Internet of Things is developing in many areas, including, among others: intelligent buildings, vehicles, cities, industry, environmental monitoring, threats and health. It can be classified into three categories: detection, processing and communication. Detection requires the use of sensors and includes, for example, the measurement of atmospheric pressure, temperature or speed. Data collected in this way can be processed by processors or microcontrollers. The devices themselves are connected using technologies such as OBD (On-Board Diagnostics), Wi-Fi, Bluetooth, GPS or RFID.

The work presents a system that allows one to register any number of vehicles and monitor the work parameters and location of these vehicles in real time using a distributed environment.

System acquires vehicle operating parameters using OBDII. This data via the ELM327 adapter connected to the DLC port is transferred using Bluetooth technology to the device operating on the Android platform. The location of the vehicle is obtained using a positioning module of the Android device. Then the device transfers the collected data to the server module that operates in a distributed environment. The server module allows one to monitor the operating parameters and the location of any number of vehicles registered in the system.

For a system, a collection of monitored vehicles is a collection of things, so the system is inherently associated with the concept of the Internet of Things. Presented system can be integrated with other solutions to create a larger intelligent transport system.

II. ON-BOARD DIAGNOSTIC LEVEL 2

OBD in the automotive industry is the definition of vehicle self-diagnosis possibilities. It allows access to data and status of some vehicle systems. The available number of diagnostic data is constantly increasing, modern OBD implementations offer standardized digital communication by providing vehicle data over time and a set of error codes that allow one to identify potential problems with a vehicle.

OBDII (On-Board Diagnostic level 2) is a unified on-board diagnostic system complied with ISO and SEA standards. Using the diagnostic device one can connect and read the necessary data from any vehicle that is compliant with this standard regardless of the brand or car model. In addition, the OBDII system defines a set of diagnostic procedures that allow for early detection of a fault, which in turn may affect the emissions of toxic compounds. Initially, OBDII was created for the purpose of monitoring emissions exhaust. Currently, vehicle manufacturers use it to monitor components not affecting the exhaust. The OBDII system is a mandatory standard in vehicles: sold after January 1, 1996 in the USA and sold after January 1, 2001 in the European Union.

ECU (Engine Control Unit) can mean one or more modules that have a task to monitor and control vehicle functions. ECU parameter tuning can allow to change the levels of engine performance and its economy. The most popular ECU types are:

- Engine control module, ECM, controls the engine, including things like ignition, fuel mixture and idling speed,
- Transmission control module, TCM, manages things like fluid temperature, clutch position and speed,
- Electronic brake control module, EBCM, the module reads data and controls the wheel lock prevention system during braking (ABS, Anti-Lock Braking System),
- Body control module, BCM, the module controls body parts, such as electric windows and mirrors, heated seats.

The monitor in the context of the OBD system means the diagnostic procedure that is carried out using equipment and software. The purpose is checking the correct operation of the vehicle system or component. An additional task of monitors is to store the test results and notifications about detecting fault. These types of diagnostic procedures are mainly focused on the power and emission systems.

A single monitor oversees the work of one element. In connection with this, the number of the monitors in vehicles is very diverse. It depends mainly on the vehicle engine and on emission control system. Monitors are divided into: continuous and conditional. Continuous monitors are diagnostic procedures that control components while driving, and their testing can be started and disabled without affecting operation of other monitors. Conditional monitors are used in elements and subassemblies in which the identification of the damage requires longer observation, what translates into a longer

reaction time. This is because conditional monitors use data provided from other elements, which in turn are supervised by other monitors.

The detailed conditions for activating a given monitor depend on many factors such as thermal and dynamic condition of the engine. The vehicle manufacturer is responsible for the proper working conditions of the monitor.

The OBDII system allows to distinguish two types of faults:

- Type A. These are mainly errors related to exhaust emissions. With this type of fault, an error code and a frozen frame are remembered and a MIL indicator light is lighted.
- Type B. As in the case of type A errors, an error code and a frozen frame are remembered, but only after two occurrences of the malfunction during a single driving cycle. In a case when the fault does not occur again, the error code may be removed.

One of the required OBDII functions is to remember the errors associated with faults that affect the exhaust composition and signaling this using indicator Check-Engine.

The DTC (Diagnostic Trouble Code) error code is standardized fault code consisting of one letter and four digits. If a fault is detected by the motor controller, it is remembered together with so-called frozen frame. This is done by saving parameters from some sensors that are in the car. Thanks to this treatment it is possible to precisely determine the conditions in which the fault occurred. These data can be overwritten by a higher priority error. Data that can be found in such a frame are, for example, engine speed, vehicle speed, engine load or fuel pressure.

The Data Link Connector (DLC) is a 16-pin diagnostic connector through which all information from the vehicle system covered by the OBDII standard is available. In order to read the information, a scan tool is needed, which is attached to the DLC connector. Using DLC it is possible to read such information as current engine parameters and error codes.

The ELM327 adapter - a microcontroller manufactured by ELM Electronics that can be used to scan the car's operation [1]. It is one of the most popular diagnostic interfaces that is able to connect to the majority of car engines on the CAN bus. This scanner only needs to be connected to the DLC diagnostic connector and it should be paired via bluetooth with the selected device with the Android system installed. The scanner does not require a battery, because the power supply is from the OBD2 connector of the vehicle.

III. OBTAINING LOCATION INFORMATION USING MOBILE DEVICES

Mobile devices enable obtaining locations in multiple ways using the following systems: GPS system, A-GPS system and via wireless Wi-Fi network.

The most popular and the most accurate solution is the GPS system, or rather GPS-NAVSTAR (Global Positioning System - Navigation Signal Timing and Ranging). It is a satellite

navigation system whose task is to provide the user with precise information about his location and to facilitate navigation around the site. It consists of three main segments, namely the space segment, the ground segment and the user segment. The most important segment are satellites orbiting the Earth on a medium orbit, because thanks to them, the user gets information about his location. Accuracy of the determined location is estimated at about 1-3 m. In addition, the use of this system is completely free. The disadvantages of this approach in the case of mobile devices are relatively high battery consumption and a relatively long waiting time for accurate location information [2].

Another way to get information about the location is the A-GPS system. It is a solution supporting the standard method of GPS, which consists in retrieving information from the mobile phone network operator about the location of the nearest satellite and transferring them to the GPS module in the phone, which allows to reduce battery consumption and speed up the acquisition of user position. This solution may be particularly useful in places where there are a lot of tall buildings, because in such conditions propagation of the radio signal is difficult. The disadvantage of this approach is dependence on the network operator to which the user belongs.

The last solution is the determination of the location using wireless networks. Interestingly, to get the location using this solution, user does not need to connect to any network, because the location is calculated using nearby networks and their signal strength. Thanks to this information, it is possible to determine the approximate location. The biggest disadvantage is the need to have several networks nearby and the accuracy of the location, with error limit of 200 m.

IV. SYSTEM PROJECT

The system was designed in a client-server architecture. The server application should consist of two modules: the user interface (presentation layer) and business logic layer responsible for data processing. The data should be stored in a database that is independent of the server application. The presentation layer is implemented as a Single Page Application. In addition, the server application must provide the API (Application Programming Interface) compatible with the REST architecture.

The client application is designed to read measurements from the OBDII interface together with the current location of the vehicle on the globe and send this data via the Internet to the server application. Using API on the server side allows for the different implementations of the client application, ensuring a high level of flexibility of the solution.

A. Server application

The functional requirements of the server application are identified as follows.

- Only registered user can possess the access to the full functionality of the application.
- The user can create, modify and delete things, constituting the representation of a physical vehicle.

- The user can create, modify and delete drivers. The driver has a list of vehicles assigned to him and routes traveled.
- The user can define, modify and delete values for individual things alarms.
- The user can create, delete and modify the reports based on the collected data for single routes or for a selected historical period of measurements.
- The user can view the current measurements from the selected thing.
- The user can view the generated reports.
- Things can send measurements to the application.

The non-functional requirements of the server application are identified as follows.

- Incoming data from things should update the user interface state without the need of manual refresh.
- The user interface of the application should be responsible.

The users of the server application are *Authorized user*, an entity that has access to all application functions and a *Thing*, that is a vehicle with a client application installed.

B. Client application

The functional requirements of the client application are identified as follows.

- Acquiring vehicle self-diagnosis data at cyclical intervals.
- Acquiring the current position using the GPS module.
- Sending collected data to a server application.

The non-functional requirements of the client application are identified as follows.

- Operation on a device that supports the Bluetooth standard and operates under control of Android, version at least 4.0.
- Ability to act as a service without the need to keep the device screen on.

The users of the client application are *User*, a person who has a device operating under the control of the Android system with installed application and internet access.

V. IMPLEMENTATION DETAILS

Java programming language, Android Studio and Android Software Development Kit [3] were used to implement the client application.

AngularJS was used to implement the server application. AngularJS is a JavaScript-based programming framework created for building internet applications. It was created based on the idea of using declarative programming for building user interface and connecting individual components, and using imperative programming to create business logic of the

application. It allows to extend the functionality offered by the HTML language for dynamic content presentation using two-way data binding, which ensures automatic view and model synchronization. AngularJS implements the MVC pattern to separate the presentation layer, data and application logic [4].

In order to ensure the secure transmission of information, all communication between clients and server are carried out using the HTTPS protocol [5]. This protects against man in the middle attacks, however, due to the fact that the service receiving messages from customers is publicly available, the additional security should be implemented, whose task is to ensure that the received message was actually sent by the customer with the given identifier. For this purpose, the password mechanism is used. Each message that is sent must have a secret key that acts as a password. Secret key for a given thing is created when the thing is created or modified. In order to use it later, it is stored in a database. In a case a secret key sent does not match the one assigned to a specific thing, the *403 Forbidden* error code is returned in response. If the message received does not contain any secret key value, the error code *400 Bad Request* is returned.

One of the requirements that were put on the system was checking the received messages for defined rules indicating the occurrence of an alarm value. If an alarm value is detected, information about such an occurrence is stored in a database.

Another requirement for the server application was to generate reports on historical database. Considering the potentially very large collections of those gathered data, the processing of which would be necessary to generate a report, Apache Spark distributed computing engine was used in conjunction with MapReduce.

MapReduce is a style of computing that has been implemented in several systems. It enables to manage many large-scale computations in a way that is tolerant of hardware faults. All is needed to write are two functions, called Map and Reduce, while the system manages the parallel execution, coordination of tasks that execute Map or Reduce, and also deals with the possibility that one of these tasks will fail to execute [6]. MapReduce consists of two phases: mapping and reduction. Mapping is the first calculations phase, it consists of executing a Map function that accepts one of the data pairs as an argument. The input must be in the form of a list of key and value pairs. After completing the mapping phase, the data is sorted, grouped in relation to the keys and passed to the Reduce function, whose task is to combine the received data and prepare the final value. The result of the reduction is the final result of the calculation.

Apache Spark is an open source general computing engine used for processing and analysis of large data sets. The solution is written in Scala programming language operating on the basis of a Java Virtual Machine. Spark allows to disperse data on the computer cluster and performs calculations in parallel using Resilient Distributed Datasets as a data structure. It operates based on the master/slave architecture, one main coordinator and many distributed processes that process the data [7].

Apache Cassandra was used as a database that stores received messages that ensured high performance IO operations. Apache Cassandra is a scalable, non-relational database offering high availability, linear scaling and data distribution between multiple data centers. Cassandra is a general-purpose database that can be successfully used for many different applications, it works particularly well in applications, where quick storage of large amounts of incoming data is required [8].

During the operation of the server application the new tasks are added to the fixed-volume thread pool. Using this solution the resources consumed on the machine on which the server application works are significantly limited in the case of a large number of tasks. The report execution task transfers the calculation to the Apache Spark driver. The query is parameterized, thanks to that it is protected against SQL injection attacks. It is also necessary to transfer the implementation of the Map and Reduce functions. These functions define calculations to be performed on the Apache Spark cluster. The reducing function is designed to calculate the minimum, maximum and average values for each parameter passed for the entire defined period for historical data. The calculations are passed to the Apache Spark driver whose job is to distribute the entire work to be done among all available executors. Data needed to execute the report are downloaded automatically from the database, without the need to engage the server application. Thanks to this, the necessary physical resources of the machine are reduced and efficiency is increased.

CONCLUSION

The system built on the basis of the Internet of Things concept is present. A system enables the monitoring of the vehicle location and operation parameters.

The number of vehicles whose parameters can be tracked by the system is not fundamentally limited. The system uses the Apache Spark distributed computing engine and the MapReduce algorithm to process large amounts of incoming data. For this reason system can be used for complete monitoring of the work of professional drivers in a large transport company or globally.

REFERENCES

- [1] ELM327 product web page. [Online], Available: <https://www.elmelectronics.com/ic/elm327/> [Accessed: Apr. 10, 2018].
- [2] GPS technical documentation. [Online], Available: <http://www.gps.gov/technical/ps/> [Accessed: Apr. 10, 2018].
- [3] Android Studio web page. [Online], Available: <https://developer.android.com/studio/index.html> [Accessed: Apr. 10, 2018].
- [4] AngularJS developer guide. [Online], Available: <https://docs.angularjs.org/guide> [Accessed: Apr. 10, 2018].
- [5] HTTPS protocol specification. [Online], Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc2818> [Accessed: Apr. 10, 2018].
- [6] J. Leskovec, A. Rajaraman, and J. Ullman, *Mining of Massive Datasets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [7] Apache Spark product web page. [Online], Available: <https://spark.apache.org/> [Accessed: Apr. 10, 2018].
- [8] Apache Cassandra product web page. [Online], Available: <http://cassandra.apache.org/> [Accessed: Apr. 10, 2018].

Фрактальна Обробка Цифрових Медичних Зображень при Проектуванні Систем Підтримки Прийняття Рішень в Медицині

Анатолій Поворознюк
кафедра обчислювальної техніки та програмування
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Харків, Україна
ai.povoroznjuk@gmail.com

Халед Шехна
кафедра обчислювальної техніки та програмування
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Харків, Україна
khaled-shehna@hotmail.com

Fractal Processing of Digital Medical Imaging for Designing of Support Decision Systems in Medicine

Anatoliy Povoroznjuk
Department of Computer Science and Programming
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"
Kharkiv, Ukraine
ai.povoroznjuk@gmail.com

Khaled Shehna
Department of Computer Science and Programming
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"
Kharkiv, Ukraine
khaled-shehna@hotmail.com

Анотація—У роботі розглянуто застосування фрактальної обробки напівтонових медичних зображень для виявлення діагностично значимих характеристик. Розроблено алгоритм розрахунку фрактальної розмірності медичних зображень або виділених фрагментів та його програмну реалізацію. Робота програми протестована на реальних мамограмах.

Abstract—The article considers the using of fractal processing of halftone medical images for the revelation of diagnostically significant characteristics. An algorithm for calculating the fractal dimension of medical images or selected fragments and its program realization has been developed. The work of program has been tested on real mammograms.

Ключові слова—комп'ютерна система; медичне зображення, мамограма, фрактальна розмірність.

Keywords— computer system, medical image, mammogram, fractal dimension.

I. ВСТУП

Впровадження комп'ютерних та інформаційних технологій в медичну практику привело до створення широкого спектру медичних інформаційних систем (МІС) від електронних історій хвороби до складних систем підтримки прийняття рішень (СППР). Найбільшого

поширення МІС отримали в складі діагностичних комплексів, за допомогою яких проводяться різні інструментальні обстеження пацієнтів.

Переважає більшість діагностичної інформації містять дані, які одержані при візуалізації і морфологічному аналізі (виділення діагностично-значущих структурних елементів на тлі перешкод) біомедичних сигналів та зображень [1]. Медичні зображення (рентгенограми, мамограми, УЗД та ін.) є одним з важливих засобів отримання візуальної інформації про внутрішні структури і функції людського тіла, яка не сприймається безпосередньо зором.

Процес обробки інформації в біомедичних СППР складається з послідовності відповідних етапів, одним з яких є етап морфологічного аналізу біомедичних зображень (БМЗ) з локально зосередженими ознаками (ЛЗО). БМЗ з ЛЗО – це зображення, що мають таку структуру, при якій діагностичні ознаки зосереджені на невеликих фрагментах їх області визначення. Завданням морфологічного аналізу є виділення на тлі перешкод інформативних фрагментів (структурних елементів) БМЗ, в результаті якого формуються діагностичні ознаки у вигляді параметрів знайдених структурних елементів.

Морфологічний аналіз БМЗ з ЛЗО є одним з відповідальних етапів, так як помилки на цьому етапі призводять до прийняття помилкових діагностичних рішень або до відмови від прийняття рішення взагалі. Цей етап вимагає використання спеціалізованих методів морфологічного аналізу даних, що враховують особливості БМЗ з ЛЗО і методи їх перетворення [2]. Найбільш повно теорія морфологічного аналізу розроблена для обробки зображень і сцен різної природи [3, 4]. Однак у медичній практиці для морфологічного аналізу БМЗ з ЛЗО частіше використовуються різні евристичні методи обробки, які на інтуїтивному рівні оперують поняттями форми сигналу або зображення в цілому або окремих їх ділянок.

Існуючі методи цифрової обробки не враховують особливості БМЗ з ЛЗО, мають обмежену сферу застосування при обробці медичних зображень, так як зазначені зображення є малокоонтрастними, містять значну шумову складову, а діагностичні елементи – значну варіабельність. Крім того, деякі елементи мають нерегулярну (фрактальну) структуру (наприклад – мікрокальцинати в мамографії). Тому актуальність теми полягає в розробці спеціалізованих методів поліпшення візуалізації і морфологічного аналізу, які засновані на врахуванні особливостей розглянутих зображень у вигляді моделей корисних сигналів, зокрема моделей фрактальної розмірності з метою підвищення якості інструментального обстеження пацієнта при проектуванні біомедичних систем на основі морфологічного аналізу БМЗ з ЛЗО.

Метою роботи є розробка методів та технологій виявлення діагностично значимих характеристик напівтонових медичних зображень на основі їх морфологічного аналізу з урахуванням фрактальних розмірностей.

II. РОЗРОБКА МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ БІОМЕДИЧНИХ НАПІВТОНОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ З УРАХУВАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ

Обробка цифрових зображень давно стала складовою досліджень практично у всіх областях науки. Робота зі зразками з будь-якої предметної області передбачає не тільки витяг деяких даних із зображень, але і класифікацію знімків, роботу зі складноструктурованих зразками, з неочевидними закономірностями і особливостями, часто помітними лише фахівцям в цій області. У медицині можливість автоматично обробляти великі набори зображень, розпізнавати знімки мікроскопа певної тематики, визначати тип тканини, виявляти пухлини, визначати наявність будь-яких з'єднань може значно вплинути на хід досліджень, полегшити процес роботи з зображеннями, наприклад, прискорити виявлення хвороби, постановки діагнозу, що допомагає підібрати своєчасне і адекватне лікування.

Один із широко використовуваних підходів до аналізу зображень – фрактальний аналіз. Фракталами, за визначенням Б. Мандельброта, називають множини, для яких їх фрактальна розмірність більше топологічної. Як правило, такі множини мають властивості самоподібності. Характеристикою, що відображає цю самоподібність, є фрактальна розмірність. Нетрадиційні для класичної

геометрії підходи, застосовувані при фрактальному аналізі, допомагають отримати нові дані про досліджуваний об'єкт, проаналізувати його досить складну, нерегулярну структуру.

При обчисленні фрактальної розмірності різних природних і штучних об'єктів виникає ряд проблем, пов'язаних з тим, що існує кілька визначень фрактальної розмірності. Базовим поняттям є розмірність Хаусдорфа, але її оцінка часто виявляється досить непростю справою. Тому на практиці частіше використовуються розмірності, що відносяться до так званого класу box–computing (або box–counting).

При такому підході досліджувана множина покривається клітинами (box) однакового розміру δ і розглядається число елементів покриття $N(\delta)$. Передбачається, що це число залежить в деякій мірі від розміру клітини δ .

Розглядається відношення

$$f = \frac{\log_2 N(\delta)}{\log_2(\delta)}$$

і досліджується його поведінка при зміні масштабу δ . Якщо існує межа цього відношення, то вона дорівнює числу d , яке і називається ємнісною розмірністю даної множини

$$d = \lim_{\delta \rightarrow 0} f = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log_2 N(\delta)}{\log_2(\delta)}. \quad (1)$$

Для точки, відрізка, квадрата і т. п. ця величина збігається з добре відомою геометричною розмірністю і є цілим числом ($d = 0, 1, 2$ відповідно). Для фрактальних множин розмірність не дорівнює цілому. Таким чином, основною ідеєю введення цього класу розмірностей є поняття «вимірювання за шкалою δ »: для кожного δ вимірюється об'єкт таким чином, що ігнорується нерівномірність об'єктів розміром менше δ і розглядаються вимірювання при δ , що прагне до 0.

Безпосереднє визначення фрактальної розмірності по (1) використовується при аналізі бінаризованих зображень, але для визначення фрактальної розмірності напівтонових зображень в роботі ми застосовуємо один з алгоритмів, який наведений в [5]. Ідея полягає в побудові поверхні графіка функції градації сірого, обчислення об'єму спеціального "покривала" для цієї поверхні і потім – в обчисленні фрактальної розмірності поверхні. Виявляється, що в цьому випадку розмірність Мінковського збігається з найчастіше використовуваною ємнісною, але спосіб обчислення простіше. Таким чином, до кожного зображення зіставляється вектор розмірності, близькість зображень оцінюється по близькості векторів.

Метод засновано на побудові над напівтоновим зображенням графіка поверхні функції градації сірого. Потім ця поверхня «потовщується» – для неї будується спеціальне δ -паралельне тіло, так зване покривало. Обчислюється його об'єм, наближення до площі поверхні і фрактальна розмірність поверхні.

Нехай для напівтонового зображення задана множина пікселів:

$$F = \{Z_{ij}, i = \overline{0, k}, j = \overline{0, l}\},$$

де $Z_{ij} \in \{0, 255\}$ – значення інтенсивності для пікселя з координатами (i, j) .

Оскільки градація сірого визначена тільки для пікселя, F можна розглядати як функцію від цілочислених аргументів. Довизначимо F для точок з дійсними координатами (x, y) , $i \leq x < i+1$, $j \leq y < j+1$, тоді ми можемо говорити про площу поверхні графіка побудованої функції F (довизначити можна значенням Z_{ij} або використовуючи будь-яку апроксимацію). Якщо розглядати отриману поверхню як фрактал, то за значенням її площі визначається фрактальна розмірність. В аналізі зображень множина значень функції градації сірого завжди не порожня і обмежена в \mathbb{R}^3 .

Розглянемо всі точки, що знаходяться на відстані δ від поверхні графіка функції градації сірого. Вони утворюють «покривало» товщиною 2δ , яке є δ -паралельним тілом і визначається верхньою поверхнею $u_\delta(i, j)$ та нижньою поверхнею $b_\delta(i, j)$. Для $\delta = 1, 2, \dots$ поверхні визначаються ітеративно:

$$u_\delta(i, j) = \max \{u_\delta(i, j) + 1, \max_{|(m,n)-(i,j)| \leq 1} u_\delta(m, n)\} \quad (2)$$

$$b_\delta(i, j) = \min \{u_\delta(i, j) - 1, \min_{|(m,n)-(i,j)| \leq 1} u_\delta(m, n)\} \quad (3)$$

Як видно з (2, 3) в обчисленнях екстремальних точок ми використовуємо чотирьох ближніх сусідів.

Точка $F(x, y)$ включена у δ -паралельне тіло, якщо

$$b_\delta(i, j) \leq F(x, y) < u_\delta(i, j).$$

Об'єм δ -паралельного тіла обчислюється як

$$V_\delta = \sum_{i,j} (u_\delta(i, j) - b_\delta(i, j)) \quad (4)$$

Площа поверхні фракталу обчислюється за наступною формулою

$$S_\delta = \frac{V_\delta}{2\delta}. \quad (5)$$

Так як $S_\delta \approx \beta \delta^{2-D}$ [4], то фрактальна розмірність D визначається з співвідношення:

$$D = 2 - \frac{\log_2 S_\delta}{\log_2 \delta}. \quad (6)$$

Обчислення площі поверхні графіка функції F можна виконати для всього зображення або розбити його на клітини в координатах (x, y) і виконати обчислення для кожного клітини.

Враховуючи те, що розрахована по (6) фрактальна розмірність D буде відрізнятися при різних δ , середнє значення відношення

$$\frac{\log_2 S_\delta}{\log_2 \delta}. \quad (7)$$

знаходиться за методом найменших квадратів як кутовий коефіцієнт a_1 прямої $y = a_0 + a_1 x$ в координатах

$$x = \log_2 \delta; y = \log_2 S_\delta.$$

На основі вищесказаного пропонується наступний алгоритм обчислення фрактальної розмірності напівтонових зображень:

1. Для всього зображення, або для виділеного фрагменту будуємо функцію градації сірого Z_{ij} .

2. Визначаємо початкові значення двовимірної масиви точок верхньої та нижньої поверхні δ -паралельного тіла при $\delta=0$:

$$u_0(i, j) = b_0(i, j) = Z(i, j), i = \overline{0, k}, j = \overline{0, l}$$

3. Організується цикл зміни шкали δ ($\delta = \overline{1, 256}$), на кожному етапі якого виконуються наступні дії:

3.1. Обчислюються двовимірні масиви точок верхньої $u_\delta(i, j)$ та нижньої $b_\delta(i, j)$ поверхні δ -паралельного тіла за формулами (2) і (3).

3.2. Обчислюється об'єм δ -паралельного тіла V_δ за формулою (4).

3.3. Обчислюється площа поверхні фракталу S_δ за формулою (5).

3.4. Розраховуються та зберігаються значення $\log_2 \delta$ та $\log_2 S_\delta$ в відповідні масиви.

4. Методом найменших квадратів розраховуються коефіцієнт a_1 лінійної регресії виду $y = a_0 + a_1 x$ в координатах $x = \log_2 \delta; y = \log_2 S_\delta$. Розраховане значення a_1 приймається в якості середнього значення відношення (7), яке потім використовується в формулі (6).

5. За формулою (6) знаходимо фрактальну розмірність зображення або виділеного фрагменту.

III. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ

При розробці програмної реалізації наведеного вище алгоритму розрахунку фрактальної розмірності обґрунтовано вибір операційної системи (ОС) Windows, яка займає майже 90% ринку ОС для персональних комп'ютерів. Крім того, її API дозволяє ефективно побудувати необхідний інтерфейс користувача. Мовою програмування було обрано мову C#. Дана мова дозволяє використовувати безпосередньо API системи Windows, має гнучкі можливості для роботи з пам'яттю, має багато бібліотек для роботи з інтерфейсом.

Розроблений програмний продукт «FractalMed» має наступні можливості:

- відкриття зображень різних форматів;
- відкриття файлів знімків мамограм з розширенням .mat;
- перегляд зображення;

- приближення та віддалення;
- вибір області розрахунку фрактальної розмірності;
- розрахунок фрактальної розмірності зображення.

Розроблений програмний продукт «FractalMed» було протестовано на реальних зображеннях мамограм. Файли мамограм в форматі *.mam були люб'язно представлені розробниками вітчизняних мамографів – фірмою ДП АТ НДІРВ «Радмір», м. Харків. Проаналізовано 60 мамограм, серед них 40-без явних патологій і 20-з наявними

патологічними структурами різних типів (пухлини, внутрішньопротокові утворення та мікрокальцинати). Була розрахована фрактальна розмірність всього зображення та виділених фрагментів. Першим фрагментом обирався фрагмент без явних патологій, другим з явними патологіями. Приклади оброблених медичних зображень наведено на рис. 1. Результати обробки наведено в табл. 1.

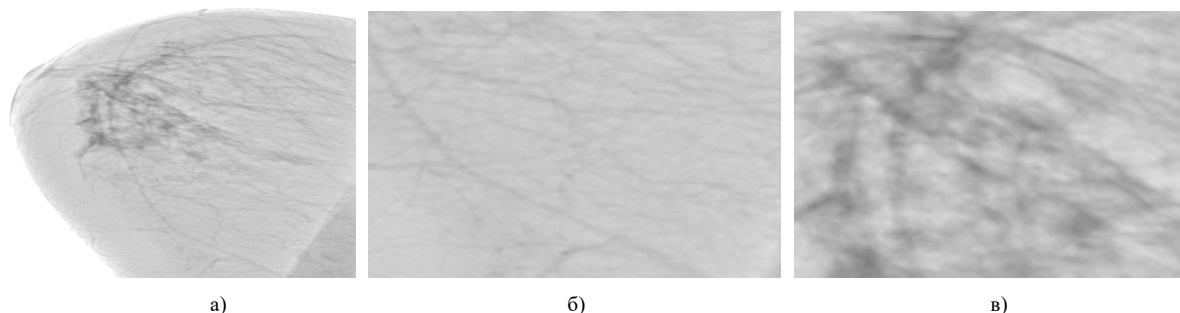


Рис. 1. Приклади оброблених зображень: а) файл 0120.mam, б) фрагмент без патологій файлу 0120.mam, в) фрагмент з патологіями файлу 0120.mam

ТАБЛИЦЯ 1. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ НА РЕАЛЬНИХ МЕДИЧНИХ ЗНИМКАХ

Назва файлу	Фрактальна розмірність всього зображення	Фрактальна розмірність фрагмента без явних патологій	Фрактальна розмірність фрагмента з явними патологіями
0157.mam	2,466	2,495	2,711
0111.mam	2,414	2,531	2,683
0120.mam	2,402	2,482	2,702
0162.mam	2,482	2,681	2,650

В табл. 1 наведені дані обробки файлів мамограм: 0157.mam – без явних патологій; 0111.mam – патологічне утворення (темна пляма на мамограмі) 0120.mam – мікрокальцинати; 0162.mam – внутрішньопротокові утворення.

Аналізуючи дані табл. 1, можна зробити висновок, що фрактальна розмірність всього зображення не дає статистично-значущих результатів про наявність чи відсутність патологій, у всіх зображеннях фрактальна розмірність лежить в діапазоні від 2,4 до 2,5. Але якщо робити розрахунки фрактальної розмірності на виділених фрагментах, то результати сильно різняться. Можна прослідити закономірність, що чим більше явних патологій на фрагменті, тим більша фрактальна розмірність.

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано застосування фрактальної обробки напівтонових медичних зображень зображень для

виявлення діагностично значимих характеристик. Розроблено метод виявлення діагностично значимих характеристик напівтонових медичних зображень на основі їх морфологічного аналізу з урахуванням фрактальних розмірностей. Розроблено алгоритм розрахунку фрактальної розмірності медичних зображень або виділених фрагментів та його програмну реалізацію. Робота програми протестована на реальних мамограмах. Подальші дослідження направлені на розробку методу класифікації напівтонових медичних зображень з урахуванням їх фрактальних розмірностей.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] А.И.Поворознюк, Системы поддержки принятия решений в медицинской диагностике. Синтез структурированных моделей и решающих правил / А.И. Поворознюк – Saarbrücken Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 314 с.
- [2] Q. Guo, A novel approach to mass abnormality detection in mammographic images / Q. Guo, V. Ruiz, J. Shao, F. Guo // In Proceedings of the IASTED International Conference on Biomedical Engineering. – Innsbruck. – 2005. – P. 180–185.
- [3] А.Ю. Рубис, Морфологическая фильтрация изображений на основе взаимного контрастирования / А.Ю. Рубис, М.А. Лебедев, Ю.В. Визильтер, О.В. Выглов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 73–79.
- [4] Ю.В. Визильтер, Сравнение изображений по форме с использованием диффузной морфологии и диффузной корреляции / Ю.В. Визильтер, В.С. Горбачевич, А.Ю. Рубис, О.В. Выглов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 265–274.
- [5] N.B. Ampilova, On Fractal, Statistical and Morphological Methods of Digital Image Analysis in Medical Research / N.B. Ampilova, I.P. Soloviev, Yu.V. Shupletsov // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems – 2014. – № 1 (188) – P. 51–61/

Алгоритм Сугено у Системі Підтримки Прийняття Судових Рішень

Анна Бакурова, Еліна Терещенко, Марія Пасічник
кафедра системного аналізу та обчислювальної математики
Запорізький національний технічний університет
Запоріжжя, Україна
abaka111060@gmail.com, elina_vt@ukr.net, mashali@ukr.net

Support System for Making Judicial Decisions Based on Sugeno Algorithm

Anna Bakurova, Elina Tereschenko, Mariia Pasichnyk
Zaporizhzhya National Technical University
Zaporizhzhya, Ukraine
abaka111060@gmail.com, elina_vt@ukr.net, mashali@ukr.net

Анотація—Покарання винного в незаконних діях призначається судом у межах санкції статті Особливої частини Кримінального кодексу України з урахуванням ступеню тяжкості вчиненого злочину, особи винного та обставин, що пом'якшують та обтяжують покарання. При цьому можливі розбіжності при призначенні вироків для схожих за складом та обставинами незаконних дій. Це визначається присутністю окрім об'єктивної складової вироку ще і суб'єктивної, а саме судового угляду, оцінки особи винного та визначення тяжкості злочину. Впровадження більш формального підходу визначення цих складових у судову практику дозволить уніфікувати процес вибору співвимірного покарання. Системи підтримки прийняття судових рішень на базі нечіткої продукції дозволить фахівцям «спілкуватися» з системою на мові професійної діяльності, застосовуючи основні структурні компоненти мови людського спілкування. В роботі розроблено модель системи підтримки прийняття судових рішень як нечіткої продукційної системи алгоритмом Сугено для конкретної статті Кримінального кодексу України.

Abstract—In unlawful actions the punishment of the perpetrator is imposed by the court within the sanction limits of the article of the Special Part of the Criminal Code of Ukraine, taking into account the severity of the crime, the person of perpetrator and the circumstances that mitigate and burden the punishment.

At the same time, there may be differences in the designation of sentences for similar in composition and circumstances of unlawful actions. This is determined by the presence, in addition to the objective component of the sentence, of the subjective,

named, judicial review, the assessment of the perpetrator and the determination of the severity of the crime.

The introduction of a more formal approach to defining these components in judicial practice will unify the process of sentence choosing. Judicial decision support systems, that bases on fuzzy logic, will allow professionals to "communicate" with the system in the language of professional activity, using the main structural components of the language of human communication. In the paper, the model of the system of support for the adoption of court decisions is developed as a fuzzy production system by the Sugeno algorithm for a specific article of the Criminal Code of Ukraine.

Ключові слова—система підтримки прийняття рішення, алгоритм Сугено, судові рішення, санкції

Key words—fuzzy output, decision support system, SUGENO ALGORITHM, court decision, sanctions

I. ВСТУП

При виборі вироку суддя повинен оцінити усі елементи злочину і усі обставини його здійснення в цілях визначення міри відповідальності підсудного і призначення йому співвимірного покарання. Відповідно до ст. 65 Кримінального кодексу України (КК України), суд призначає покарання у межах, установлених у санкції статті Особливої частини КК, що передбачає відповідальність за вчинений злочин, відповідно до положень Загальної частини КК, враховуючи ступінь тяжкості вчиненого злочину, особу винного та обставини, що пом'якшують та обтяжують покарання. Закон визначає

вид і діапазон розміру кари в залежності від складу злочину, що дозволяє формально визначати її максимальне та мінімальне значення. Вибір виду покарання у разі, коли закон передбачає альтернативні санкції залишається за суддею. Отже, слабо формалізованою частиною вироку залишається важення обставин здійснення злочину й характеристики особи винного. При тому, що від судді не вимагається детальне коментування критеріїв оцінки, чітко регламентується необхідність досить мотивованого вибору покарання. Введення більш формалізованих оцінок пом'якшуючих та обтяжуючих обставин, особи винного та тяжкості злочину дасть підґрунття для винесення схожих вироків при схожих за складом та обставинами злочинах.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В Україні ратифіковано «Конвенцію про захист прав людини і основоположних свобод» [1], де в статті 6 «Право на справедливий суд» наведено критерії справедливого судового розгляду: незалежність і безсторонність суду, встановлення судом обґрунтованості кримінального обвинувачення.

При цьому припускається, що кожен суддя має своє уявлення про справедливість. Як зазначає автор Ладиченко В. [2], справедливість не стільки теоретично усвідомлюється, скільки інтуїтивно сприймається, інколи з підсвідомим її розумінням: люди ніби виважують правильність того чи іншого акту судової влади на «внутрішніх вагах» справедливості. В монографії Дядькина Д. [3] розроблено алгоритмічний підхід до визначення вироку за нормами законодавства. Автор демонструє на прикладі оцінки соціальної небезпеки злочину можливості формального підходу, застосовуючи нечітке логічне виведення.

Нечітке логічне виведення є ефективним інструментарієм для формалізації знань та досвіду експертів в різних галузях людської діяльності [4, 5]. Метою статті є побудова моделі системи підтримки прийняття рішень (СППР) у суді як нечіткої продукційної системи на базі алгоритму Sugeno.

Для побудови нечіткої продукційної системи за алгоритмом Sugeno необхідно сформувати базу з узгоджених нечітких продукційних правил, які містять формалізовані знання експертів предметної області. Правило має вид «IF A THEN B», де посилка A є нечітким висловлюванням. Посилка A побудована з термів визначених терм-множин для кожної лінгвістичної змінної, які з'єднані бінарними операціями «AND», «OR». Лінгвістична змінна може приймати значення у вигляді слова або словосполучення спеціалізованої мови експертів або мови повсякденного спілкування. Лінгвістична змінна приймає значення з терм-множини, елементами якої є терми, що задаються нечіткою множиною з наперед визначеною функцією належності [6].

Вихідною змінною B продукційних правил є лінійна функція $\omega_i = a_{i,0} + \sum_{k=1}^n a_{i,k} x_k$ від вхідних змінних $x_k, k = \overline{1, n}$, де ω_i - чітке значення вихідної змінної, $a_{i,0}, a_{i,k}$ - числові

константи, i - номер продукційного правила. На етапі фазифікації оцінюється ступінь відповідності значення вхідних змінних до кожного з термів лінгвістичної змінної. На етапі агрегації по часткових висновках визначається істинність лінгвістичного правила за допомогою нечіткої логічної операції «AND» $\mu(A \cap B) = \min\{\mu(A); \mu(B)\}$. Активізація здійснюється за два етапи. На першому етапі знаходять значення ступенів істинності $c_i, i = \overline{1, n}$ всіх часткових висновків нечітких продукційних правил методом міні-активізації $\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}$, де $\mu(x)$ і c - відповідно функції приналежності термів лінгвістичних змінних і ступені істинності нечітких висловлювань, що утворюють відповідні висновки нечітких продукційних правил. На другому етапі для кожного з продукційних правил знаходиться чітке значення вихідної змінної ω_i . Таким чином, кожному продукційному правилу (i) ставиться у відповідність пара (c_i, ω_i) , де c_i - ступінь істинності продукційного правила, ω_i - чітке значення вихідної змінної, визначеної в підвисновку продукційного правила (i). При дефазифікації для кожної лінгвістичної змінної здійснюється перехід від дискретної множини чітких значень $\omega_i, i = \overline{1, n}$ до єдиного чіткого значення,

наприклад, за формулою центроїду $y = \frac{\sum_{i=1}^n c_i * \omega_i}{\sum_{i=1}^n c_i}$, де n -

кількість продукційних правил в базі.

Для побудови моделі системи підтримки прийняття судових рішень згідно ч. 1 ст. 185 КК України про крадіжку [6] як нечіткої продукційної системи авторами було обрано алгоритм Sugeno. Для реалізації обрано середовище Fuzzy Logic Toolbox MatLab.

III. РЕЗУЛЬТАТИ

Відповідно до ст. 65 Кримінального кодексу України, суд призначає покарання у межах, установлених у санкції статті Особливої частини КК, що передбачає відповідальність за вчинений злочин, відповідно до положень Загальної частини КК, враховуючи: 1) ступінь тяжкості вчиненого злочину; 2) особу винного; 3) обставини, що пом'якшують та 4) обтяжують покарання [6]. Законодавча санкція статті враховує як кількісні показники відповідних обставин, так і якісні. Наприклад, згідно ст. 185 КК України про крадіжку [6] у частині першій «Таємне викрадення чужого майна» передбачено п'ять видів покарання: штраф від 50 до 100 нмдг та громадські роботи на строк від 80 до 240 годин для нанесеної шкоди від 0,2 неоподаткованого мінімуму доходів громадян (нмдг), та виправні роботи на строк від 6 до 24 місяців, арешт на строк від 1 до 6 місяців, позбавлення волі від 1 до 3 років для нанесеної шкоди до 100 нмдг.

Прийнята така загальна модель СППР у суді:

(**Fine, PW, CW, Arrest, Years**) = **SUGENO(Severity, Lawyer, Burden, Mitigation, Personality, LB, LM)**,

де **SUGENO** –алгоритм нечіткого виведення.

Визначимо всі вхідні та вихідні змінні як лінгвістичні.

Лінгвістична змінна **Severity**, що характеризує рівень завданної шкоди, приймає значення з терм-множини, яка містить шість термів {[34,200],[200,2000],[2000 – 5000], [5000 – 10000],[10000,12000],[12000,17000]} .

Лінгвістична змінна **Personality** характеризує особу винного та приймає значення з терм-множини {негативна, нейтральна, позитивна}. Вона дозволяє враховувати, наприклад, працевлаштування, наявність суспільно корисної діяльності, характеристику за місцем мешкання, тощо.

При побудові алгоритму призначення покарання було обрано зазначені в ст. 66 Кримінального кодексу України обставини, які пом'якшують покарання. Таких обставин визначено одинадцять. Необхідно зазначити, що відповідно до ч. 3 ст. 66 Кримінального кодексу України, якщо будь-яка з обставин, що пом'якшує покарання, передбачена в статті Особливої частини КК як ознака злочину, що впливає на його кваліфікацію, суд не може ще раз враховувати її при призначенні покарання як таку, що його пом'якшує [6]. Для оцінки обставин, що пом'якшують покарання, було обрано дві лінгвістичні змінні. Лінгвістична змінна **Mitigation** дає оцінку можливості урахування суддею визначеної кількості реалізованих обставин. Лінгвістична змінна **LM** оцінює рівень пом'якшення покарання обставинами, які реалізувалися.

Також при побудові алгоритму призначення покарання було взято зазначені в ст. 67 Кримінального кодексу України обставини, які обтяжують покарання. Таких обставин визначено чотирнадцять. При призначенні покарання суд не може визнати такими, що його обтяжують, інші обставини. Якщо будь-яка з обставин, що обтяжує покарання, передбачена в статті Особливої частини КК як ознака злочину, що впливає на його кваліфікацію, суд не може ще раз враховувати її при призначенні покарання як таку, що його обтяжує [6]. Вхідними змінними для оцінки обставин, що обтяжують покарання, є **Burden** та **LB** . Лінгвістична змінна **Burden** дає оцінку можливості урахування визначеної кількості реалізованих обставин. Лінгвістична змінна **LB** оцінює рівень обтяження покарання обставинами, які реалізувалися. Терм-множини містять по три терми, які характеризують рівень реалізації {невисокий, середній, високий}.

Лінгвістична змінна **Lawyer** характеризує рівень нейтральності судді та приймає значення з терм –множини {лояльний, нейтральний, суворий}. Будемо вважати, що справедливим є суддя за рівнем «нейтральний».

Суд може призначити міру покарання, складовими частинами якої є певні види покарання.

Для більшої визначеності функції належності термів вхідних лінгвістичних змінних та вихідні функції сформульовано на матеріалах вироків за кримінальними справами стосовно ч.1 ст. 185 КК України.

Вихідна функція **Fine** визначає розмір штрафу від 50 до 100 нмдг.

Вихідна функція **PW** (Public Works) громадські роботи на строк від 80 до 240 годин.

Вихідна функція **CW** (Correctional Work) виправні роботи на строк від 6 до 24 місяців.

Вихідна функція **Arrest** визначає арешт на строк від 1 до 6 місяців.

Вихідна функція **Years** визначає кількість років позбавлення волі від 1 до 3 років.

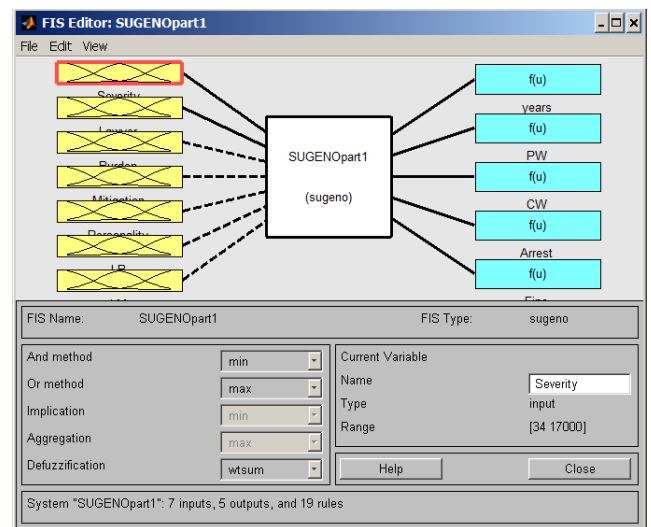


Рис. 1. Структурна схема СППР у суді ч.1 ст. 185 КК України.

На рис.1 показана структурна схема та параметри алгоритму СППР у суді ч.1 ст. 185 КК України.

Було розроблено базу з 19 нечітких продукційних правил такого типу (рис.2):

«ЯКЩО **Lawyer** = «нейтральний» та **Severity** = d_1 ТО **Fine** = y_1 »,

«ЯКЩО **Lawyer** = «лояльний» та **Severity** = d_1 ТО **Fine** = y_2 »,

«ЯКЩО **Lawyer** = «суворий» та **Severity** = d_1 ТО **Fine** = y_3 ».

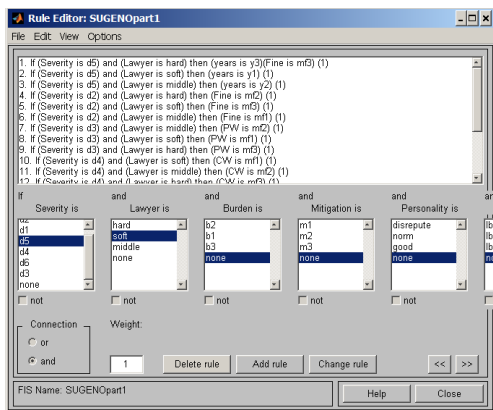


Рис. 2. Фрагмент системи продукційних правил СППР у суді ч.1 ст. 185 КК України.

Для розрахунків міри покарання для кожної складової було обрано лінійні функції, які залежать від входів системи. Функції виходу **Fine**, **PW**, **CW**, **Arrest**, **Years** представлені трьома лінійними функціями кожна. Коефіцієнти обиралися з огляду на вже відомі міри покарання [6]. Розглядаючи певну множину справ, можна отримати дані, які стануть вузлами для багатомірної інтерполяції, що дозволить отримати коефіцієнти вихідних лінійних функцій.

Для проведення експерименту були обрані вироки суду за частиною 1 ст. 185 КК України про крадіжку за реєстром всіх судових рішень в Україні [7].

Наприклад, за кримінальною справою 644/49/18 винесено вирок на 850 грн штрафу, при відсутності обставин, що обтяжують покарання, та наявності обставин, що пом'якшують покарання, як щире каяття у вчиненні злочину і повне відшкодування заподіяної злочинном матеріальної шкоди, при позитивній характеристиці винної.

За рядом аналогічних справ було визначено такі коефіцієнти трьох функцій штрафу **Fine** для [0.508-885-50][0.608-885-50][1010-9105-52].

Вихідна функція «громадські роботи» **PW** має такі коефіцієнти:
 [0.0500.3-0.650.50.3-0.40][0.0500.3-0.650.50.3-0.40]
 [0.2500.5-0.60.50.3-0.30].

Коефіцієнтами вихідної функції «виправні роботи» **CW** визначено такі:

[0.00100.1-0.10.20.1-0.10][0.000100.1-0.10.20.1-0.10]
 [1e-00500.1-0.10.20.1-0.10].

Вихідна функція, що визначає термін арешту, **Arrest**:
 [0.000100-0.10.10-0.10][0.000100.1-0.10.10.1-0.10]
 [0.000100.6-0.10.50.1-0.10].

Вихідна функція, що визначає термін років позбавлення волі, **Years**:

[4e-00500.11-0.030.20.1-0.0150.2]
 [5e-00500.11-0.030.20.1-0.010.4]
 [5e-00500.11-0.0330.20.1-0.030.5].

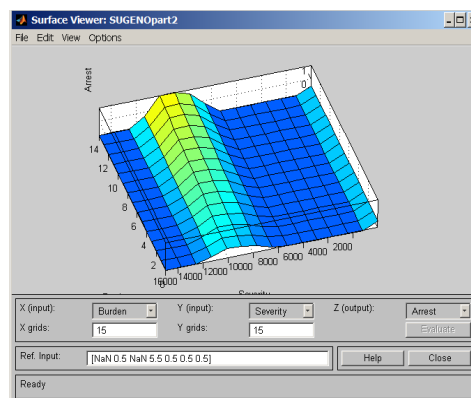


Рис. 3. Поверхня відгуку вихідної функції **Arrest**.

На рис. 3 показана поверхня відгуку вихідної функції **Arrest** побудованої СППР в координатах **Burden**, **Severity**.

Проведений експеримент продемонстрував необхідність розробки уніфікованих правил ініціалізації вхідних змінних для налаштування нечітких продукційних моделей отримання справедливого вироку.

ВИСНОВКИ

Впровадження у судову практику систем підтримки прийняття судових рішень є актуальним напрямом розвитку автоматизації рутинних моментів судової практики. Застосування методів нечіткого логічного виведення є потенційно продуктивним для підтримки прийняття справедливих судових рішень. Системи підтримки прийняття судових рішень у вигляді нечітких продукційних систем нададуть можливість фахівцям «спілкуватися» з системою на мові професійної діяльності, зменшать потік документів, підвищать якість прийняття рішень, знизять їх суб'єктивність, скоротять терміни винесення вироків.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/995_004.
- [2] Ладиченко В. Інституціалізація справедливості в процесі державотворення / В. Ладиченко // Юрид. Україна. – 2006. – № 6. – С. 4–9.
- [3] Дядькин, Д. С. Теоретические основы назначения уголовного наказания : алгоритмический подход / Д. С. Дядькин. - Санкт-Петербург : Изд-во Р. Асланова "Юридический центр пресс", 2006. - 508 с.
- [4] Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Штовба. — М: Горячая линия-Телеком, 2007. — 288 с.
- [5] Зайченко Ю. П. Сравнительный анализ эффективности нечетких нейронных сетей в задачах прогнозирования в экономике и финансовой сфере / Ю. П. Зайченко, Ф. Севаев, Ю. В. Келестин // Систем. дослідж. та інформ. технології. — 2006. — № 1. — С. 56–70.
- [6] Кримінальний кодекс <http://zakon2.rada.gov.ua>
- [7] <http://www.revestr.court.gov.ua/Page/1> (реєстр всіх судових рішень в Україні)

Ідентифікація Людини за її ЕКГ з Допомогою Зростаючої Пірамідальної Мережі

Лілія Кізуб

Інститут проблем математичних машин і систем
НАН України
Київ, Україна
lilimmsp@gmail.com

Віталій Величко

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова
НАН України
Київ, Україна
velychko@aduis.com

Human Identification Based on Electrocardiogram Using Growing Pyramidal Network

Liliia Kizub

Institute of Mathematical Machines and
Systems of NASU
Kyiv, Ukraine
lilimmsp@gmail.com

Vitalii Velychko

V.M. Glushkov Institute of
Cybernetics of NASU
Kyiv, Ukraine
velychko@aduis.com

Анотація—У статті розглядається вирішення задачі ідентифікації людини за її електрокардіограмою, з допомогою класифікатора, що базується на використанні зростаючих пірамідальних мереж. При наявності відповідних ознак електрокардіограми (ЕКГ) – координат точок канонічного сплайну, що апроксимує тривимірну криву QRS - комплексу, може бути проведена класифікація ЕКГ. Представлені результати проведених експериментів.

Abstract—The paper deals with the solution of the problem of identifying a human by its electrocardiogram, using a classifier based on the use of growing pyramidal networks. In the presence of the corresponding features of the electrocardiogram (ECG) - the coordinates of the points of the canonical spline, which approximates the three-dimensional curve of the QRS complex, an ECG classification can be performed. The results of conducted experiments are presented.

Ключові слова—електрокардіограма (ЕКГ); зростаюча пірамідальна мережа; QRS-комплекс, характерні ознаки ЕКГ, ідентифікація, автентифікація

Keywords—electrocardiogram (ECG); growing pyramidal network; human identification; QRS-complex; characteristic

Робота підтримана грантом НАН України «Розвиток сервісів ВО «МедГрід» для підтримки мобільних діагностичних платформ та персоналізованої діагностики на базі електрокардіографії та спірометрії. Другий рік виконання» за цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Грід-інфраструктура і грід-технології для наукових і науково-прикладних застосувань».

Державний реєстраційний номер роботи 0117U002721

features of ECG; identification; authentication

I. ВСТУП

Як відомо, використання ЕКГ для ідентифікації пацієнта відноситься до біометричних методів ідентифікації. Протягом багатьох років ЕКГ вивчалися і використовувалися в клінічній діагностиці. Але порівняно недавно було запропоновано використовувати ЕКГ в якості біометричної інформації для ідентифікації людей [1-5]. У біометричному підході нам потрібно знайти схожість в ЕКГ - сигналах, що належать одній і тій же людині, і при цьому розпізнавати відмінності в ЕКГ - сигналах, що належать різним людям. Ідентифікація (автентифікація) людини за її електрокардіограмою в 6-ти або 12-ти стандартних відведеннях є актуальною саме зараз, на сучасному етапі розвитку мобільних медичних пристроїв, для ефективної організації телемедичних консультацій.

В роботах [6-8] нами наведені алгоритмічні рішення, які формують системи інформаційних ознак у вигляді керуючих точок параметричного сплайна, які відповідають QRS-комплексу електрокардіограми в трьох ортогональних відведеннях або перших трьох відведеннях. Наступний етап роботи з цією системою ознак має використовувати автоматичний класифікатор, що буде проводити ідентифікацію пацієнта. У даній роботі ми описуємо проведені експерименти для автентифікації і ідентифікації людини за її ЕКГ,

застосовуючи класифікатор CONFOR, що базується на використанні зростаючих пірамідальних мереж.

II. ПІРАМІДАЛЬНА МЕРЕЖА ТА СИСТЕМА CONFOR

В основу системи CONFOR [9] покладено метод індуктивного формування понять (CONcept FORmation), який базується на використанні зростаючих пірамідальних мереж. Важливою властивістю пірамідальних мереж є їх ієрархічність, що дозволяє природним чином відображати структуру складених об'єктів і родовидові зв'язки "Рис 1". Система CONFOR працює в трьох режимах: навчання, розпізнавання, екзамен. При використанні пірамідальних мереж всі пошукові операції обмежуються відносно невеликим фрагментом мережі, який включає піраміду об'єкт і вершини, безпосередньо з нею пов'язані.

За відсутністю точного рішення для об'єкта, який розпізнається, користувачеві надаються всі можливі рішення, в тому числі і рішення «не знаю». Рішення ранжуються відповідно до обчислених ступенів довіри.

Підсистема навчання здійснює виділення закономірностей (знань) які характеризують класи об'єктів [10]. Вхідними даними для підсистеми навчання служить вибірка для навчання, яка включає приклади об'єктів, що характеризуються різними класами. Кожен клас об'єктів має бути представлений деякою кількістю прикладів, достатнім для того, щоб на підставі їх аналізу була виділена закономірність, що характеризує цей клас. Приклади об'єктів задаються ознаковими описами. Ознаковий опис об'єкту повинен включати ім'я, клас, до якого об'єкт належить, і набір значень ознак, які характеризують об'єкт. Вихідні дані для підсистеми навчання – закономірності які характеризують класи об'єктів. Результатом роботи CONFOR'a в режимі навчання є узагальнена модель класів об'єктів, що включає найбільш характерні властивості цих об'єктів.

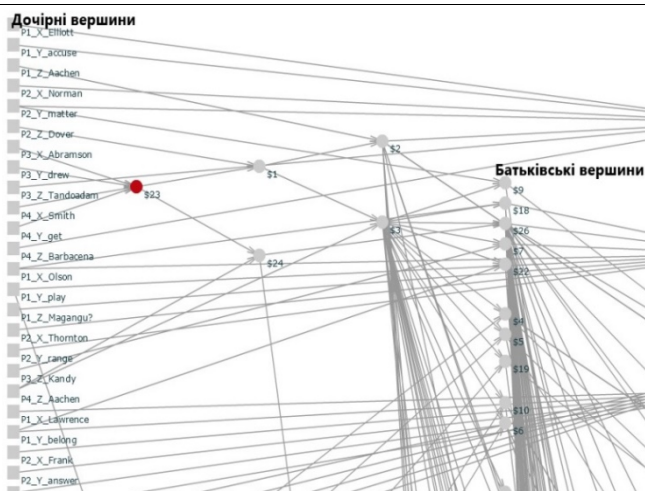


Рис. 1. Побудова мережі для ознак класу, що проходить навчання

Підсистема іспиту призначена для тестування якості навчання комплексу. Вхідними даними для підсистеми іспиту служить екзаменаційна вибірка що включає приклади об'єктів, які не увійшли до вибірки для навчання, але відносно яких відомо, до якого класу вони

належать. Вихідні дані підсистеми - її відповідь відносно класу, до якого віднесена кожен об'єкт, і статистичні дані про кількість правильних, неправильних і невизначених відповідей підсистеми.

Отримані результати зіставляються з інформацією про реальну приналежність об'єктів до відповідних класів, на основі чого можна судити про те, наскільки добре навчений комплекс.

III. ПІДГОТОВКА ДАНИХ

Стандартна електрокардіограма складається з 12 відведень, тобто 12 сигналів. За допомогою спеціальних алгоритмів здійснюється попередня обробка цих сигналів, яка включає в себе: перетворення в три ортогональних відведення, фільтрацію і розмітку - поділ на кардіоцикли і елементи циклів [11]. Тривимірну дугу, що відповідає QRS-комплексу, апроксимуємо параметричними сплайнами. При цьому отримуємо кількість точок, що характеризують форму дуги. Для апроксимації використовуємо канонічний сплайн (cardinal spline), також можна використовувати криву Безьє [6].

Керуючі точки параметричного сплайна і є нашою системою ознак. Це означає, що для проведення експерименту в системі CONFOR необхідно керуючі точки QRS-комплексу, представлені координатами x, y, z, перетворити в символічний вигляд (табл. 1).

ТАБЛИЦЯ I. КЕРУЮЧІ ТОЧКИ QRS-КОМПЛЕКСУ В СИМВОЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

	X	Y	Z
point1	0.0000	0.0000	0.0000
point2	1.0000	1.0000	1.0000
point3	0.3679	0.4030	0.5309
point4	0.1838	0.2105	0.3089

	X	Y	Z
point1	Smith	watch	Dover
point2	Abramson	drew	Baku
point3	Bryan	get	Aachen
point4	Payne	hide	Navapolatsk

Вирішити це питання вдалось, з допомогою спеціальної програми де вихідний файл подавався в додаток, в якому відбувалась робота з англійським словником, який попередньо був підготовлений для виконання задачі. Для осі X словник налічував 1000 англійських слів (імена). Для

осі Y використовували 1000 дієслів і для осі Z був підібраний словник з назвами міст різних країн. Це означає, що кожна координата має свою певну фразу і дозволяє не тільки виконати завдання подачі даних в систему, а є зручним у використанні і запам'ятовуванні слів, що належать до певної точки.

На виході всі координати для CONFOR було представлено в символічному вигляді.

IV. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Ми продовжуємо проводити серію експериментів [12-15] на більшій кількості даних. Для проведення наступних експериментів було зареєстровано ЕКГ різних людей, зокрема 18 пацієнтів, функціонально здорових, віком від 25 до 65 років чоловічої і жіночої статі, які знаходилися в різному емоційному та фізичному стані.

Сформувавши систему ознак, для вибірки в підсистему навчання було подано по 100 QRS-комплексів для кожного пацієнта. Для підсистеми іспиту було подано від 65 до 1642 QRS-комплексів, в залежності від кількості отриманих даних певного пацієнта. Потрібно зазначити, що для підсистеми навчання і підсистеми іспиту було подано різні QRS-комплекси.

Перший експеримент був побудований, як «автентифікація пацієнта». Це означає, що в режим підсистеми навчання і в режим підсистеми іспиту для розпізнавання були подані QRS-комплекси одного і того ж пацієнта. Результати автентифікації можна розглянути в таблиці 1. Бачимо, що 50% пацієнтів автентифіковано стовідсотково. Інші 50% пацієнтів з невеликими помилками (табл. 2).

Другий експеримент для 10 пацієнтів побудований, як «ідентифікація пацієнта». В режим навчання підсистеми подавалися 100 QRS-комплексів пацієнта, якого потрібно ідентифікувати.

В режим підсистеми іспиту були подані по 100 QRS-комплексів від кожного з трьох інших пацієнтів і також 100 QRS-комплексів пацієнта, якого потрібно розпізнати з суми всіх даних.

ТАБЛИЦЯ II. РЕЗУЛЬТАТИ АВТЕНТИФІКАЦІЇ ПАЦІЄНТІВ

Клас	Навчальна вибірка (QRS)	Кількість QRS-комплексів в режимі «іспит»	Автентифікація (%)	Неправильно (QRS)	Невизначено (QRS)
Пацієнт 1	100	368	99,73	0	1
Пацієнт 2	100	1455	99,45	0	8
Пацієнт 3	100	468	100	0	0
Пацієнт 4	100	257	91,44	0	22
Пацієнт 5	100	181	100	0	0
Пацієнт 6	30	65	100	0	0
Пацієнт 7	100	380	100	0	0
Пацієнт 8	100	1642	99,88	0	2
Пацієнт 9	100	1391	94,32	0	79
Пацієнт 10	30	92	100	0	0
Пацієнт 11	30	58	100	0	0
Пацієнт 12	100	1218	99,92	0	1
Пацієнт 13	20	77	100	0	0
Пацієнт 14	100	1162	99,57	0	5
Пацієнт 15	100	166	100	0	0
Пацієнт 16	100	1439	99,86	0	2
Пацієнт 17	100	890	98,76	0	11
Пацієнт 18	100	485	100	0	0

Такі процедури проводилися для 10-ти пацієнтів. В результаті ми можемо сказати, що система успішно розпізнала пацієнтів, за мету яких ми ставили розпізнати (табл. 4).

Закономірність ознак може бути представлена у вигляді логічного виразу, який є більш наочним і легко інтерпретується. Успішна ідентифікація пояснюється тим, що повністю виконуються логічні вирази в системі CONFOR, які будуються для кожного пацієнта.

Наприклад, для пацієнта 1 і пацієнта 2 в режимі підсистеми навчання, було отримано наступні кон'юнкції, що характеризують об'єкти даного класу:

Клас: пацієнт 1 – P3_X_Abramson & P3_Y_drew & P4_X_Smith & P4_Y_get.

Клас: пацієнт 2 – P3_X_Abramson & P3_Y_drew & P3_Z_Dover & P4_Y_get & P4_Z_Aachen.

Коли логічні вирази виконуються не повністю, частково, в ході експерименту було виявлено помилку ідентифікації – пацієнт ідентифікований не правильно.

Третій експеримент проводився подібно другому експерименту. В режим підсистеми навчання (табл.3) були подані по 100 QRS-комплексів від 8 пацієнтів і по 30 QRS-комплексів двох інших пацієнтів. В підсистему іспиту подано по 200 інших QRS-комплексів цих пацієнтів. Далі маємо наступні результати.

ТАБЛИЦЯ III. ІНФОРМАЦІЯ МЕРЕЖІ ПІД ЧАС РЕЖИМУ НАВЧАННЯ

Всього вузлів	4487
Об'єктів	860
Класів	10
Головних вузлів	796
Проміжних вузлів	421
Рецепторів	3225
Зв'язків вузлів	7425

Система розпізнала з точністю від 90-100% сім пацієнтів, решта пацієнтів була розпізнана з меншою

ТАБЛИЦЯ ІV. РЕЗУЛЬТАТИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАЦІЄТІВ

Клас	Навчальна вибірка (QRS)	Кількість QRS – комплексів в режимі «іспит»	Правильно ідентифіковано (QRS)	Неправильно (QRS)	Невизначено (QRS)	Класи підсистеми іспиту
Пацієнт 1	100	368	367	0	1	Пацієнт - 1, Пац- 2, Пац- 3, Пац-4
Пацієнт 2	100	300	300	0	0	Пац- 2, Пац- 1, Пац- 3, Пац-4
Пацієнт 3	100	300	300	0	0	Пац- 3, Пац- 1, Пац- 2, Пац-4
Пацієнт 4	100	250	228	0	22	Пац- 4, Пац- 2, Пац- 1, Пац-5
Пацієнт 5	100	180	180	0	0	Пац- 5, Пац- 4, Пац- 3, Пац-2
Пацієнт 6	30	65	65	0	0	Пац- 6, Пац- 4, Пац- 7, Пац-2
Пацієнт 7	100	360	360	0	0	Пац- 7, Пац- 2, Пац- 4, Пац-5
Пацієнт 8	100	1640	1638	0	2	Пац- 8, Пац- 7, Пац- 5, Пац-4
Пацієнт 9	100	1390	1311	0	79	Пац- 9, Пац- 4, Пац- 5, Пац-7
Пацієнт 10	30	90	90	0	0	Пац- 10, Пац- 4, Пац- 5, Пац-7

точністю, про що свідчать неправильно віднесені QRS-комплекси між пацієнтами. Для вирішення питання правильної ідентифікації великої кількості пацієнтів, необхідно в системі CONFOR підвищити ступінь довіри, коли формуються і виконуються логічні вирази.

ВИСНОВКИ

При використанні пірамідальної мережі з'являється реальна можливість вирішувати практичні дослідницькі завдання, пов'язані з обробкою великих обсягів даних, а саме ідентифікацію людини за її електрокардіограмою.

При наявності відповідної системи ознак, на достатній кількості даних з допомогою системи CONFOR, було проведено серію експериментів – «ідентифікація пацієнтів» і «автентифікація пацієнтів». Отримані результати вказуються на успішне застосування системи, в якості класифікатора. Ідентифікація і автентифікація досягла 100%.

Наразі ми продовжуємо експеримент на масиві електрокардіограм 130-ти пацієнтів, які накопичені у проекті «МедГрид».

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

[1] L.Fainzilberg, T. Potapova, "Computer Analysis and Recognition of Cognitive Phase Space Electrocardiographic Image", Proceeding of 6th International Conference on Computer analysis of Images and Patterns, Prague, 1995, pp 668-673.

[2] L. Biel., O. Petersson, L. Philipson, P. Wide, "ECG Analysis: a New Approach in Human Identification," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, vol 3, pp. 808-812.

[3] F. Sufi, I. Khalil, I. Habib, "Polynomial distance measurement for ECG based biometric authentication," Security and Communication Networks, 2010, vol 4, pp. 303-319.

[4] S. Yogendra Narain, "Biometrics Method for Human Identification Using Electrocardiogram," Proceedings of third International Conference, ICB. Alghero, Italy, 2009, pp. 1270-1279.

[5] F. Agrafioti, D. Hatzinakos, "Fusion of ECG sources for human identification," *Control, and Signal Processing: International Symposium on Communications*, 2008, Malta, pp. 1542-1547.

[6] V. Vishnevsky, V. Kalmykov, T. Romanenko, "Approximation of one-, two- and three-dimensional Curves Arcs by Parametric Splines," *Mathematical Machines and Systems*, 2015, No. 4, pp. 160.

[7] V. Vishnevsky, T. Romanenko, L. Kizub, "Experimental Verification of Possibility of Human Identification by the Electrocardiogram," *Proceedings of 5TH International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education*, Sofia, Bulgaria, 2015, pp. 318.

[8] V. Vishnevsky, "Grid System for Mass Storage and Processing of Digital Electrocardiograms," *Ukrainian Journal of Telemedicine and Medical Telematics*, 2013, vol. 11, No. 1, pp. 202-208.

[9] The Association of Developers and Users of Intelligent Systems [Online]. Available: <http://www.aduis.com.ua>.

[10] V. Gladun, V. Velichko, "Instrumental Complex of Decision-Making Support on the Basis of the Network Model of the Subject Object Field," *Decision Support Systems. Theory and practice*, Kiev, 2012, pp. 128.

[11] I. Tchaikovsky, "Analysis of the electrocardiogram in one, six and twelve leads with point of view of information value: electrocardiographic cascade," *Clinical Informatics and Telemedicine*, 2012, vol 2, pp. 102-106.

[12] V. Vishnevsky, T. Romanenko, L. Kizub, "Biometric Identification Using Electrocardiograms," in *Information Technologies and Computer Modelling: International Scientific and Practical Conference ITCM-2015*, Ivano-Frankivsk- Vinnytsia, 2015, pp. 130-131.

[13] V. Vishnevsky, T. Romanenko, L. Kizub, "Identifying Individuals Using Electrocardiograms and their characteristics," in *Visnyk of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 2016, vol 5, pp. 7-10.

[14] V. Vishnevsky, V. Velychko, L. Kizub, "Applications of Growing Pyramidal Network for Solving to the Problem of Human Identification with Using Electrocardiogram," in *Information Technologies and Computer Modelling: International Scientific and Practical Conference ITCM-2017*, Ivano-Frankivsk, 2017, pp. 104-107.

[15] V. Velychko, L. Kizub, "Using the Pyramidal Network in the Model Experiment of Human Identification by its ECG," in *Mathematical and Simulation Modeling Systems: International Scientific and Practical Conference - 2017*, Chernigov, 2017, pp. 79-82.

Методи Дослідження Задач Технологічного Передбачення: Короткий Огляд

О. Білоконь
ВМЗ НАН України
Київ, Україн
sasha_bilokon@ukr.net

An Overview of Methods for Foresight Problems Technological Innovation

О. Bilokon
Department of International Relations
NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
sasha_bilokon@ukr.net

Анотація—проведено аналіз переваг та недоліків методів технологічного передбачення. Запропоновано сучасний та інноваційний метод для технологічного передбачення розроблений Мелісою Шілінг.

Abstract—the analysis of advantages and disadvantages of methods of technological forecasting is conducted. Melissa Schilling proposes a modern and innovative method for technological forecasting.

Ключові слова—національна інноваційна система України; технологічне передбачення; методи технологічного передбачення; інноваційна інфраструктура.

Keywords—National Innovation System of Ukraine; technological foresight; methods of technological foresight; innovation infrastructure.

I. ВСТУП

В даний час актуалізується важливе питання стану, процесу формування та розвитку Національної інноваційної системи України. Формування сучасної національної інноваційної системи України потребує акцентувати увагу на Інноваційну інфраструктуру – співпраця науки та бізнесу. Даний процес потребує вирішення головної проблеми яка заважає процесу формування та розвитку. Проблема – відсутність інформації у науки та бізнесу щодо розвитку відповідних технологій тобто передбачення параметрів та можливостей, продуктів, які стануть визначальними для споживача. Для вирішення проблеми, що існує потрібно визначити, які напрямки розвитку технологій потрібно удосконалювати та досліджувати науковцям. Та що саме в цих технологіях стане визначальним для споживачів та цікавим для бізнесу. Дана проблема потребує створення

інформаційної системи моніторингу технологічних інновацій. Для створення даної інформаційної системи потрібно вперш за все дослідити та проаналізувати існуючі методи інноваційного передбачення. Також хочу зауважити, що інноваційне передбачення впливає в свою чергу на визначення пріоритетів для розвитку інновацій, модернізують українську систему наукових досліджень та задають напрям інтеграції у виробництво, промисловість та бізнес.

II. МЕТОДИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПЕРЕДБАЧЕННЯ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ.

Технологічне передбачення це процес прийняття рішення для складних систем з людським фактором щодо їх можливої поведінки в майбутньому [1]. Для розв'язання задач передбачено низку методів якісного та кількісного аналізу [2, с. 635]. Технологічне передбачення характеризується універсальною сукупністю засобів та підходів, має назву методологія сценарного аналізу, та складається з чотирьох етапів передбачення [2, с. 635]: Розміри сторінки матеріалів публікації повинні відповідати формату А4.

- Перший етап – вивчення проблеми;
- Другий етап – якісний аналіз проблеми;
- Третій етап – написання сценаріїв;
- Четвертий етап – аналіз і вибір сценаріїв.

Стисло розглянемо різні методи технологічного передбачення, які використовуються на різних етапах передбачення та їх переваги та недоліки.

A. Метод сканування

Використовується на першому етапі «вивчення проблеми». Даний метод складається з наступних процедур [2, с. 635]:

- Створення груп експертів – фахівці в даній області. Процес пошуку відповідних експертів;
- Генерація ідей – кожний фахівець надає анотацію концептуального характеру своєї ідеї, анонімно. Процес нагромадження думок експертів;
- Розгляд анотацій – особи що приймають рішення (представники науки або бізнесу, виробництва. Можуть належати до груп експертів), вивчають анотації, найважливіша функція даної процедури це кластеризація всіх згенерованих ідей та думок. Процес кластеризації;
- Відбір конструктивних кластерів – особи що приймають рішення відбирають конструктивні кластери для подальшого вивчення та використання на наступних етапах передбачення.

Отже, основним недоліком даного методу є людський фактор який впливає на процес реалізації даного методу, а перевагою є, при умові реалізації даного методу, велика кількість та багатогранність ідей, концепцій.

B. Метод мозкового штурму

Використовується також на першому етапі – вивчення проблеми. Призначений для глибокого та інтенсивного вивчення проблеми у вузьких напрямках ідей і підходів [2, с. 635-636]. Даний метод складається з п'яти етапів.

- Етап – формування проблеми в вузькому фокусі на основі методу сканування;
- Етап – створення групи експертів відповідно до сформульованої вузької проблеми;
- Етап – в умовах обмеженого часу й заданого переліку критеріїв експерти «генерують» множину ідей щодо даної вузької проблеми.
- Етап – генеровані ідеї поділяються на дві групи: актуальні на майбутнє і актуальні на поточний період.
- Відбір і задокументування тих ідей і підходів, які будуть використовуватися на наступних етапах передбачення. Даний відбір може здійснювати інша група фахівців відповідальна за прийняття рішень.

Отже, цій метод має такі самі переваги та недоліки, як і метод сканування.

C. Метод Делфі

Використовується на другому етапі де здійснюється якісний аналіз проблеми. Даний метод полягає в одержанні висновків групи експертів щодо поведінки в майбутньому однієї або декількох зв'язних між собою характеристик досліджуваної системи. Отримані результати використовуються для побудови можливих сценаріїв поведінки системи. Практично даний метод зводиться до виконання наступних дій:

- Підбір групи експертів;
- Формулювання цілей;
- Розробка форми опитування;
- Опитування експертів за відповідним опитувальним листом;
- Проведення статистичної обробки даних з метою синтезу нових результатів;
- Аналіз отриманих результатів
- Якщо експерти коригують результати повертаємось знову до п.5;
- Проведення додаткового аналізу задля отримання консенсусного рішення.

Отже, основним недоліками та перевагами даного методу є ті ж самі, які висвітлювались вище.

D. Метод перехресного впливу

Запропонований у [2, с. 636-637] ґрунтується на використанні експертних оцінок щодо подій, які могли б охарактеризувати майбутнє на певному відрізку часу. Метод складається з наступних процедур:

- Визначення подій які відображають сценарії майбутнього;
- Оцінювання вихідної ймовірності виникнення кожної з подій;
- Побудова матриці перехресного впливу, розмірність $N \times N$, де N – кількість вибраних подій;
- З використанням методів моделювання складних систем. Зокрема імітаційного моделювання, стохастичного моделювання та ін. проводиться оцінка ймовірності того, що певні події відбудуться;
- Та ж процедура, що і в п. 4 тільки для ймовірностей реалізації кожного можливого сценарію.

Основним недоліком цього методу є те, що він не приймає до уваги можливу розмитість значень ймовірності.

E. Метод аналізу ієрархій

Був розроблений американським математиком Томасом Л. Сааті і базується на його відомих результатах у сфері неструктурованого прийняття рішень також цей метод використовують для візуалізації майбутнього [2, с. 637]. Метод ґрунтується на «причинній» перспективі процесів, що закладаються в основу розробки сценаріїв майбутнього. При застосуванні методу використовуються ієрархічні мережі. Даний метод має переваги у формалізації і застосуванні алгоритмів.

F. Метод моделей Байєса

Запропоновано в [2, с. 638] використовується для оцінки ймовірностей подій для кожного сценарію і базується на розрахунку умовних імовірностей здійснення тієї чи іншої події:

$$P^c\left(\frac{C_j}{\Pi_1, \dots, \Pi_N}\right) = \frac{P^0(C_j)P^c\left(\frac{\Pi_1}{C_j}\right)P^c\left(\frac{\Pi_2}{C_j, \Pi_1}\right) \times \dots \times P^c\left(\frac{\Pi_N}{C_j, \Pi_1, \dots, \Pi_{N-1}}\right)}{\sum_{i=1}^{K=2^N} P^0(C_i)P^c\left(\frac{\Pi_1}{C_i}\right)P^c\left(\frac{\Pi_2}{C_i, \Pi_1}\right) \times \dots \times P^c\left(\frac{\Pi_N}{C_i, \Pi_1, \dots, \Pi_{N-1}}\right)} \quad (1)$$

де $P^c()$ умовні ймовірності виникнення сценарію C ; $P^0()$ - апріорні ймовірності виникнення кожного із сценаріїв. Даний метод застосовується наступними кроками:

Для конкретної проблеми технологічного передбачення формуються можливі сценарії C_j майбутнього розвитку на певному часовому інтервалі, $j = 1, \dots, 2^N$ шляхом застосування інших методів технологічного передбачення або вербально. Сценарії, що розглядаються повинні взаємно виключати один одного і всі сценарії повинні бути максимально повними;

Виконується оцінка апріорних ймовірностей $P^0(C_j)$ виникнення кожного із цих сценаріїв, $j=1, \dots, 2^N$. Це може бути здійснено, наприклад, шляхом застосування методу Делфі;

Визначається перелік найбільш важливих подій Π_i , $i = 1, \dots, N$, які можуть відбутися за умови здійснення сформульованих можливих сценаріїв майбутнього;

Повторна оцінка ймовірностей виникнення кожного із сформульованих сценаріїв з урахуванням у п.3 найважливіших подій. Отримані ймовірності називаються відкориговані і мають характер умовних;

Для візуалізації тенденцій, пов'язаних з кожним з можливих сценаріїв майбутнього, доцільно зображати графічно.

Отже основним недоліком даного методу є те, що даний метод потребує виконувати велику кількість розрахунків, перевагами даного методу є те, що на основі цього розрахунку можливо побудувати програмне забезпечення для розрахунків у системі моніторингу інноваційної інфраструктури.

G. Метод написання сценаріїв

Використовується на третьому етапі передбачення, застосовуючи дев'ятикрокову емпіричну процедуру побудови сценаріїв, що запропоновано Давидом Лоувірджем, запропоновано [2, с. 641].

- визначення цілі написання сценарію;
- розробка програми STEEPPV;
- введення припущень у сценарій;
- побудова альтернативної схеми подій;
- написання сценарію;
- аналіз сценарію з урахуванням розгалужень і повторних моментів;
- формулювання політики для суб'єкта сценарію;
- розробка альтернативних стратегій поведінки суб'єктів сценарію;

- оцінювання альтернативних стратегій методом імітаційного моделювання.

Отже даний метод від більш абстрактних категорій розглядає емпіричні дані. основним недоліком даного методу є те що дослідник стикається зі складністю узагальнення для розуміння загальних системних функцій. а перевагами можна вважати емпіричні процедури які націлені на практику.

III. МЕТОД ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПЕРЕДБАЧЕННЯ МЕЛІССИ ШІЛЛІНГ[]

Якщо всі вище згадані методи оперують більш абстрактними і узагальненими категоріями то метод для технологічного передбачення розроблений Меліссою Шілінг акцентує увагу на практику. Тобто методи - це не просто дослідні інструменти: вони пов'язані з тим, як, наприклад, вчені уявляють собі зв'язок між різними точками зору на природу реальності і на те як її слід виявляти [5, с. 32-35].

Взагалі вчені обґрунтовуючи спостережіаємі закономірності використовують два основних типи теорій:

- тип «теорії середнього рангу» - які працюють між гранд теоріями і емпіричними результатами;
- тип «гранд теорії» - які працюють на більш абстрактному і узагальненому рівні [5, с. 32-35].

Кожний тип теорій має свої переваги та недоліки наприклад теорії середнього рангу більш акцентують увагу на емпіричних результатах тобто безпосередньо взаємодіють з практикою, перевагами можна вважати наявність практичних прикладів, які простіше формалізувати для побудови математичних моделей для системи моніторингу інноваційної інфраструктури. Недоліками є складність узагальнення для розуміння загальних системних функцій. В гранд теоріях, які побудовані на узагальненнях та абстракціях недоліками є відсутність чіткого розуміння практики, що саме ускладнює формалізацію та побудову математичних моделей, а перевагою є те, що даний тип теорії надає більш чіткіше уявлення про загальну функціональність системи.

Тому даний метод слід розглянути детально він складається з трьох кроків:

- крок перший – визначити вектор;
- крок другий – визначити стан розвитку технології;
- крок третій – обрати мету.

Розгляд особливостей даного методу проводиться паралельно з прикладами із практики. Мелісса Шеллінг розвиток технології називає «напрямом» або «траєкторією» та стверджує що технології розвиваються різноспрямована [3, с.54-61]. На приклад комп'ютери розвивались за такими основними напрямками, як: продуктивність і компактність тобто збільшувалась продуктивність та зменшувались габаритні розміри. Вектор змін тут швидкість та розмір.

A. Крок 1. Визначити вектор

На першому кроці потрібно проаналізувати історію розвитку технології. Провести аналіз та виявити які споживчі переваги надавав продукт та, як зміни його форми або функцій змінили технологічну основу інноваційного продукту. Приклад: в історії розвитку технології звукозапису були шість векторів розвитку, а саме: десинхронізація, вартість, якість, широта вибору, портативність і персоналізація.

На даному етапі головне відшукати основні вектори розвитку технології, які в свою чергу можна розкласти на складові. Важливо побачити всю картину цілком. Приклад: якщо технологія звукозапису має можливість перезапису це являється формою персоналізації. Виділивши персоналізацію як основний вектор задаємося питанням як люди захочуть персоналізувати свою музику. Важливо виділити вектори оптимально не узагальнюючи і не звужуючи. Вибір векторів визначається знанням галузі.

B. Крок 2 Визначити на якому етапі розвитку знаходиться технологія.

Даний етап вимагає визначити стан розвитку тієї чи іншої технології і побудувати графік корисності. Для того щоб розібратися з особливостями цього етапу потрібно розглянути приклад запропонований Меллісою Шилінг з галузі автомобілебудівництва, а саме розробка технології швидкості і її корисності для споживачів. Якщо раніше автомобілі або як їх називали саморухомі повозки, яка працювала на пару були занадто повільними і не надійними щоб зацікавити споживачів. Кінний екіпаж був надійніше тобто менше виходив з ладу, слугував більше і швидкість була вища. Тому у винахідників була мета випередити кінний екіпаж і поки швидкість автомобіля знаходилася на тому ж рівні що і у кінного екіпажу вона не приносила користі споживачам. Але коли на початку ХХ ст. автомобіль зміг набирати швидкість до 25 км / год споживачі почали цікавитися цим винаходом тобто крива корисності стала рости. А коли швидкість уже в кінці ХХ ст. досягла 180-240 км / год і при цьому потрібно врахувати той факт що споживачі таку швидкість рідко розвивають то крива корисності вирівнюється що говорить про малий інтерес підвищеними швидкостями, споживачів. На сьогодні вектор розвитку технологій переходить в інший напрям розвитку технологій: витрата палива, прискорення, безпека, надійність.

C. Крок 3 Обрати мету

Даний заключний етап вимагає оцінити перспективність розвитку технологій і найголовніше цю оцінку потрібно зробити з боку важливості для споживачів різних векторів змін технологій. Дану оцінку можна зробити у вигляді матриці важливості технологічних аспектів. Даний приклад проілюструє як цю матрицю побудувати.

ТАБЛИЦЯ І. ТАБЛИЦЯ І МАТРИЦЯ ВАЖЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ

Аспект (вектор зміни технології)	Важливість для споживача від 1 до 5	Об'єм росту технології від 1 до 5	Простор вдосконалення	Всього
Витрати палива	5	1	1	7
прискорення	2	3	2	7
безпека	3	5	4	12
надійність	4	4	3	11
ціна	5	2	2	9

З цього прикладу видно що технологія безпеки важливіше для споживачів. Після, побудови матриці, потрібно зробити коригування мети. Дослідник може оцінити галузь і зрозуміти куди рухається ринок.

Отже основним недоліком даного методу є те що дослідник зтикається зі складністю узагальнення для розуміння загальних системних функцій, а перевагами можна вважати наявність практичних прикладів які простіше формалізувати для побудови математичних моделей для системи моніторингу інноваційної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз наявних методів технологічного передбачення їх переваг та недоліків. На основі проведеного аналізу можна стверджувати про відсутність абсолютної переваги окремого напрямку. Більш чіткий вибір методу має бути продиктований умовами застосування, тобто властивостями інноваційної інфраструктури та системи моніторингу. На основі інноваційного методу для технологічного передбачення, розробленого Меллісою Шилінг, маємо можливість в подальших розвідках на основі практичних прикладів апробувати проаналізовані методи для дослідження особливостей застосування у системі моніторингу для технологічного передбачення.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. System analysis: Theory and Applications. Springer. – 2007. – 475 p.
- [2] Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія / Кол. Авторів. – Київ: Наукова думка, 2010. – с. 1008.
- [3] Меліса Шиллінг Інновации: на что делать ставку Harvard Business Review, декабрь 2017. – с.54-61.
- [4] Melissa Schilling *Strategic Management of Technological Innovation* McGraw-Hill Education, 2017.
- [5] А.Браймен, Э. Белл. Методы социальных исследований. Группы, организации и бизнес / Пер. с англ. – Х.: Изд-во Гуманитарный Центр, 2012. – 776 с.

Інтелектуальна Система Оцінювання Знань під Навчання Студентів Функціональному Аналізу

Дмитро Бобилєв

кафедра математики та методики її навчання

Державний вищий навчальний заклад «Криворізький державний педагогічний університет»

Кривий Ріг, Україна

dmytrobobyliiev@gmail.com

Intelligent System for Assessing Knowledge for Training Students in Functional Analysis

Dmytro Bobyliev

department of mathematics and mathematics teaching methods

State Institution of Higher Education «Kryvyi Rih State Pedagogical University»

Kryvyi Rih, Ukraine

dmytrobobyliiev@gmail.com

Анотація—В роботі розглядається комп'ютерна підтримка евристичних методів навчання функціонального аналізу (КПЕМНФА), як активний дидактичний засіб самонавчання та діалогічної взаємодії студентів між собою і освітнім середовищем в процесі навчання функціонального аналізу.

Abstract—The paper considers computer support for heuristic methods of teaching functional analysis (KSHMTFA) as an active didactic tool for self-learning and dialogic interaction between students and the educational environment in the process of training in functional analysis.

Ключові слова—Moodle; евристичні методи навчання; евристичний діалог.

Keywords—Moodle; heuristic teaching methods; heuristic dialogue.

I. ВСТУП

Ідеал будь-якого навчального процесу – це індивідуальне навчання з викладачем. При індивідуальному навчанні викладач підлаштовується під кожного студента. На підставі початкових і поточних знань студента, його цілей та індивідуальних здібностей викладач формує оптимальну стратегію навчання. Теоретичний матеріал дає в зручному студенту ритмі, пояснюючи незрозумілі моменти. Під час лекції увага студента притупляється, і досвідчений викладач, знаючи

це, стежить за мімікою студента. Коли викладач бачить, що студент втомився, він терміново змінює вид своєї діяльності, інакше засвоєння знань буде неефективним.

Контроль знань здійснюється у формі діалогу. Викладач задає студенту крім основних питань ще й додаткові – навідні і уточнюючі. Якщо студент відповідає неправильно, викладач пояснює йому помилки і допомагає їх виправити. Також викладач надає студенту допомогу при розв'язанні практичних завдань. Все це сприяє швидкому засвоєнню і закріпленню матеріалу. З появою обчислювальної техніки стали розроблятися автоматизовані навчальні системи. Виникнення обчислювальних мереж, в тому числі глобальної мережі Інтернет, і швидкий розвиток мультимедійних технологій привели до створення систем дистанційного навчання. Їх можливості відрізняються незначно. Навчальний матеріал подається в текстовій формі з мультимедійним вмістом та інтерактивними глосаріями. Контроль знань здійснюється за допомогою тестів різного виду. Найбільш поширена форма відповідей – вибіркова: питання супроводжується кількома готовими варіантами відповіді, з яких потрібно вибрати один, іноді – декілька правильних відповідей. Другою за популярністю йде числова відповідь – це зазвичай результат розв'язання запропонованого завдання.

Ще є коротка текстова відповідь – вважається правильною, якщо повністю співпадає по символам із еталоном. Також застосовуються тести, в яких студенти

встановлюють відповідності між елементами двох списків або розставляють елементи списку в правильній послідовності. Крім власне навчання, студенти та викладачі мають ще такі можливості для здійснення комунікації: пошту, чати, форуми тощо.

У всіх рекламних матеріалах, присвячених дистанційному навчанню, стверджується, що дистанційне навчання робить освіту індивідуальним, систему контролю гнучкою відстежує рівень знань студента і створює для нього комфортні умови, а у викладача виникає безліч вільного часу, щоб зайнятися чимось ще, наприклад наукою. Однак це дуже невірно. Якщо уважно вивчити це питання, то можна помітити, що системи дистанційного навчання не реалізують жодної з вищевказаних особливостей індивідуального навчання з викладачем.

1. Автоматична адаптація стратегії навчання до індивідуальних здібностей студента в системі не проводиться.

2. Теоретичний матеріал подається всім студентам в одній і тій же формі. Якщо комусь незрозуміла якась частина матеріалу, система не зможе дати докладне пояснення.

3. Контроль знань здійснюється не на природній мові, як це відбувається при індивідуальному навчанні з викладачем, а в вигляді тестів, які підходять для оцінки знання фактів, але не дозволяють оцінити розуміння матеріалу і креативні знання студента.

4. Формулювання послідовності питань в залежності від точності відповідей студента системою не проводиться. Вона задає питання або по порядку, або випадковим чином.

5. Як результат перевірки знань видається тільки відсоток правильних відповідей без пояснення помилок.

6. Коли студент виконує практичні завдання, ці системи не надають йому допомогу.

Однак, незважаючи на перераховані недоліки, важливою позитивною рисою систем дистанційного навчання є можливість створення курсів із будь-яких предметів силами викладачів, які не володіють навичками програмування. Дана якість змушує закрити очі на вищевказані проблеми. Наведені недоліки можуть бути подолані шляхом залучення технологій штучного інтелекту. Зарубіжні розробники далеко просунулися в області електронного навчання. Про це можна судити по іноземним навчальним системам (AutoTutor [1], iSTART [3], Rimas [2], Robo-Sensei [4]) із інтелектуальними функціями.

1. Подача теоретичного матеріалу у формі діалогу на природній мові з використанням мультимедіального інтерфейсу (текстовий, мовний та візуальний канали).

2. Високоєфективний адаптивний контроль знань у формі діалогу на природній мові: система задає студенту навідині і уточнюючі питання до тих пір, поки він не викладе вивчену тему повністю. При досягненні певного

ліміту додаткових питань система вирішує, яку оцінку поставити студенту.

II. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПІДТРИМКИ ЕВРИСТИЧНОГО ДІАЛОГУ

У навчанні студентів самостійно здійснювати окремі кроки розв'язання задачі найбільш ефективним є частково-пошуковий метод. Він повинен передбачати активне включення студентів до пошуку розв'язання поставленої задачі або під керівництвом викладача, або на основі використання евристичних програм та вказівок. Процес мислення при цьому набуває продуктивного характеру, але поетапно спрямовується та контролюється або викладачем, або студентами.

Евристична бесіда як один з різновидів даного методу, передбачає цілу низку запитань, які може ставити викладач, студенти, комп'ютерна програма. При цьому важливо, щоб питання стимулювали думку, а не підказували ідею розв'язання. Крім того, у процесі постановки серії запитань необхідно поступово знижувати рівень проблемності задач, щоб вони були логічно пов'язані, стимулювали як логічні, так і інтуїтивні процедури мислення, сприяли постановці допоміжних задач, щоб кожне нове запитання приводило до нового, несподіваного погляду на задачу.

Як показує досвід, використання евристичної бесіди під час навчання функціонального аналізу спонукає студентів самостійно ставити запитання, здійснювати роздільні задачі на серію допоміжних задач, в межах кожної з яких здійснюється невеликий пошук. Таким чином, евристична бесіда активізує та стимулює самостійну діяльність студентів.

Основний принцип евристичного навчання – це співтворчість студентів між собою і викладачем у навчальному процесі. Діалогічна взаємодія є ключовою при навчанні майбутніх учителів математики. Діалогічна взаємодія – це система формування і розвитку практичних навичок співтворчості і спілкування учнів на основі відкритості та духовного взаємозбагачення. Діалогічна технологія саморозвитку формує у молоді комунікативні якості творчої особистості.

Комп'ютерна підтримка евристичних методів навчання функціонального аналізу (КПЕМНФА) – це активний дидактичний засіб самонавчання та діалогічної взаємодії студентів між собою і освітнім середовищем в процесі навчання функціонального аналізу.

В основу КПЕМНФА функціонального аналізу можуть бути покладені: 1) системні і проблемно-алгоритмічні підходи; 2) методології творчості; 3) засоби сучасних інформаційних і комунікаційних технологій; 4) методологія евристичних діалогів і ін.

На наш погляд зручним середовищем для побудови КПЕМНФА функціонального аналізу майбутніх учителів математики є середовище дистанційного навчання Moodle.

Першою базою для побудови евристичних діалогів в КПЕМНФА є процес доведення деяких теорем курсу

функціонального аналізу. Наприклад, засвоєння теорем, кожна з якої закінчується питанням – це засвоєння ознайомчого рівня, а організація форуму з даної тематики (використання елемента курсу) це вже продуктивний рівень, оскільки реалізується евристичний тип роботи.

Безумовно, що контроль знань студентів є основною частиною засвоєння умінь і навичок, і є показником формування певної професійної компетентності. Різновидом контролю є перевірочні завдання, які передбачають доведення абсолютно нових для студентів тверджень. Це є другою базою для побудови евристичних діалогів та їх реалізації в креативному навчальному процесі.

КПЕМНФА функціональному аналізу, реалізована нами в середовищі дистанційного навчання Moodle (<http://moodle.kdpu.edu.ua/course/index.php?categoryid=4>), полегшує самостійне розв'язання наукової проблеми, допомагає студенту самостійно розвивати дослідницькі вміння і навички, зміцнювати «пізнавальну цікавість», висувати гіпотези, розширює його уявлення про характер наукової проблеми, яка розв'язується та ін. За допомогою побудованої системи евристичних діалогів студент отримує можливість нестандартно розв'язувати наукову проблему. Тому студент може спробувати самостійно роботи справжні наукові відкриття вже в процесі свого навчання.

Розроблено систему лабораторно-комп'ютерних практикумів з курсу функціонального аналізу з комп'ютерною інтерактивною підтримкою, технологія проведення яких спрямовані на поетапне формування компонентів професійно-творчого потенціалу студента відповідно до рівня творчих завдань, які розв'язуються. Дана система успішно може бути використана для навчання майбутніх вчителів математики.

Евристичний діалог «Студент – КПЕМНФА» є формою опосередкованого педагогічного управління творчим саморозвитком і включає в себе наступні основні елементи: спеціально розроблений навчальний посібник з функціонального аналізу на паперових носіях (модульно-кодовий навчальний посібник), комп'ютер і Інтернет. Студент працює тільки з двома елементами: з книгою (навчальним посібником), що містить весь навчальний і довідковий матеріал, і комп'ютером за допомогою якого він отримує завдання, самостійно їх виконує, і потім надсилає розв'язок, після чого викладач перевіряє виконане завдання і, якщо воно неправильно розв'язане надсилає у відповідь варіант діалогу, який дозволяє студенту самостійно побачити помилку в своїх міркуваннях і правильно розв'язати задачу. Таким чином здійснюється евристичний діалог між студентом і «віртуальним викладачем».

Евристичні діалогові відносини – це взаємозв'язки і взаємодії суб'єктів навчально-творчої діяльності «Студент – Студент» (С – С), «Студент – Викладач» (С – В), «Студент – Творча група» (С – ТГ) за допомогою евристичних діалогів.

Таким чином, ефективність застосування багатомірною евристичного діалогу з КПЕМНФА функціональному аналізу майбутніх учителів математики досягається:

1) за рахунок активізації процесів «самості» студента: самопізнання, самоорганізації, самореалізації, самовдосконалення, самоконтролю та ін.;

2) відповідності типології та специфіки творчих професійних завдань індивідуально-типологічним особливостям студента;

3) адекватності банку евристик, евристичних прийомів і методів розв'язання завдань творчого типу та змісту даного завдання.

Розглянемо, наприклад, реалізацію запропонованого підходу при вивченні теми «Принцип стискаючих відображень».

Принцип стискаючих відображень викладено в теоремі С. Банаха. Кожен етап доведення теореми Банаха супроводжувати приписами, побудова яких описана в роботах Дж. Пойа. Створивши схему доведення теореми, викладач може запропонувати її студентам в системі Moodle. Наприклад, таку систему приписів:

1. Виділити, що відомо з умови теореми і що треба довести.

2. З чого потрібно почати доведення?

3. Чи залежить побудована послідовність від вибору початкової точки?

4. Для доведення фундаментальності послідовності скористаємось означенням. Але в означенні розглядається відстань між двома довільними точками. Яким чином можна зафіксувати дану відстань?

5. На що вказує закономірність зміни коефіцієнта метрики $\rho(x, Ax)$ і нерівність, що впливає із означення стискаючого відображення, $0 < \alpha < 1$?

6. Чи можна довести, що границя побудованої послідовності є нерухомою точкою, спираючись на алгоритм побудови послідовності $x_n = Ax_{n-1}$?

7. Яку лему необхідно для цього довести?

8. Який метод доведення використати?

9. Як, виходячи із аксіом метричного простору, довести, що дві, за припущенням різні, нерухомі точки співпадають.

Це дозволяє не тільки активізувати роботу студентів у процесі пошуку доведення, але і дозволяє їм оволодіти прийомами розумової діяльності: аналізу, синтезу, порівняння, абстрагування, узагальнення, аналогії, і підведення під поняття, через які формуються такі професійно спрямовані уміння:

1) аналізувати взаємозв'язки досліджуваного математичного об'єкта з відомими об'єктами, а математичної проблеми – з науковими фактами;

2) виділяти математичний об'єкт і визначати його суттєві властивості;

3) встановлювати протиріччя між твердженнями;

4) відбирати знання, необхідні для доведення або спростування гіпотетичного твердження;

5) аналізувати гіпотетичне твердження і у разі можливості розкласти його на простіші;

6) побудувати логічну схему доведення;

7) використовувати метод від супротивного при доведенні гіпотетичного твердження;

8) обирати раціональні методи (способи, прийоми) доведення або спростування гіпотетичного твердження.

Після доведення необхідно організувати бесіду в форумі, наприклад, поставивши питання: "Чому умову $\rho(Ax, Ay) \leq \alpha \rho(x, y)$ ($0 < \alpha < 1$) не можна замінити на більш слабку $\rho(Ax, Ay) \leq \rho(x, y)$?"

III. ПРИКЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ ЕВРИСТИЧНОГО ДІАЛОГУ В СИСТЕМІ MOODLE

Розглянемо приклад реалізації евристичного діалогу в системі Moodle при розв'язуванні такої задачі: «Як оцінити похибку між n -тим наближенням x_n розв'язку рівняння $Ax = x$ та точним значенням x ».

Схема діалогу представлена на рис. 1 – 3. На початку уточнюємо у студента, в чому проблема вказаної задачі (рис. 1).

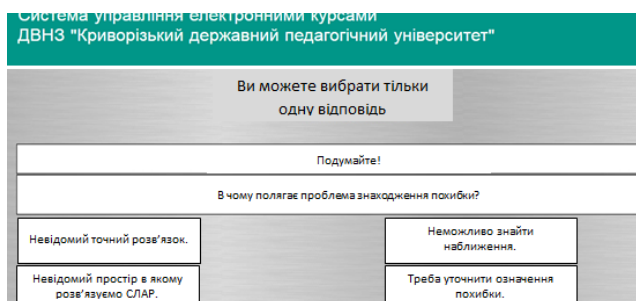


Рис. 1. Перша евристична підказка

У випадку, якщо студент вибере відповідь «Невідомий точний розв'язок», пропонуємо друге питання, показане на рис. 2.



Рис. 2. Друга евристична підказка

У випадку, якщо студент вибере відповідь «З попереднім наближеним значенням» пропонуємо третє питання показане на рис. 3.

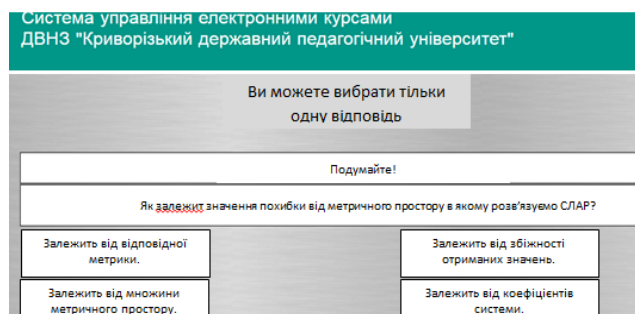


Рис. 3. Третя евристична підказка

Слід відмітити, що жодне із запропонованих питань не містить прямої підказки на план розв'язання задачі. Якщо вказаний діалог не приведе студента до ідеї розв'язання задачі, його можна продовжити в блозі, що присвячений цій задачі.

ВИСНОВОК

Запропонована система комп'ютерної підтримки евристичних методів навчання функціонального аналізу дозволяє не тільки активізувати роботу студентів у процесі пошуку доведення, але і дозволяє їм оволодівати прийомами розумової діяльності: аналізу, синтезу, порівняння, абстрагування, узагальнення, аналогії, і підведення під поняття, через які формуються професійно спрямовані уміння.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Graesser C. et al. AutoTutor: A tutor with dialogue in natural language // Behavior Research Methods, Instruments, & Computers. 2004. Т. 36. № 2. Р. 180–192.
- [2] Jordan P. et al. Eliciting student explanations during tutorial dialogue for the purpose of providing formative feedback // Proceedings of the Workshops at the 16th International Conference on Artificial Intelligence in Education AIED 2013. Memphis, USA, July 9–13, 2013. Part 8.
- [3] McNamara D.S. iSTART: Interactive strategy training for active reading and thinking // Behavior Research Methods, Instruments, & Computers. 2004. Т. 36. № 2. Р. 222–233.
- [4] Nagata N. Robo-Sensei's NLPBased Error Detection and Feedback Generation // CALICO Journal. 2009. Т. 26. № 3. Р. 562–579.

Використання Інтернет-Сервісів в Навчальному Процесі

Марія Семаньків
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
dlyamarii@gmail.com

Богдан Білусяк
Манявський навчально-виховний комплекс
Манява, Україна
Manyava_school@meta.ua

Use of Internet Services in the Educational Process

Maria Semankiv
dept. of Computer Science
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
dlyamarii@gmail.com

Bohdan Bilusak
Maniava School
Maniava, Ukraine
Manyava_school@meta.ua

Анотація—Проведено аналіз популярних інтернет-сервісів, що використовують для інтерактивного навчання. Визначено їх переваги та недоліки. Охарактеризовано основні можливості сервісу LearningApps.

Abstract— The analysis of popular Internet services used for interactive learning is conducted. Their advantages and disadvantages are determined. The main features of the LearningApps service are described.

Ключові слова—інтерактивне навчання, інтернет-сервіси, LearningApps.

Keywords— interactive training, internet services.

I. ВСТУП

Інтерактивні завдання – невід’ємна частина сучасного навчання, що дає змогу викладачам, учням та студентам отримувати певну інформацію систематизовано, мобільно та зручно, з використанням інноваційних технологій у навчанні, зокрема й у процесі вивчення різних дисциплін.

Суть інтерактивного навчання полягає в тому, що освітній процес в навчальних закладах відбувається за умови активної та постійної взаємодії всіх учасників навчального процесу, тобто і учень, і вчитель є рівноправними суб’єктами навчання. Це співнавчання та взаємонавчання (колективне, групове, навчання у співпраці). Слово «інтерактив» прийшло до нас від слова «interact», де «inter» – взаємний і «act» – діяти. Отже, інтерактивність – це здатність до взаємодії, діалогу. Інтерактивне навчання – це спеціальна форма організації пізнавальної діяльності, яка має чітку, визначену,

передбачувану мету – створити умови навчання, за яких кожен учень відчуває свою успішність, індивідуальність, інтелектуальну спроможність [1].

Одним з найважливіших стратегічних завдань на сьогоднішньому етапі модернізації освіти України є забезпечення якості підготовки спеціалістів на рівні міжнародних стандартів. Розв’язання даного завдання можливе за умови зміни педагогічних методик та впровадження інноваційних технологій навчання в освітній процес [2].

II. АНАЛІЗ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ІНТЕРАКТИВНОГО НАВЧАННЯ

Сфери і способи використання інформаційних технологій досить різноманітні, вони дозволяють [3]:

- змінювати характер розвитку, надання і розповсюдження знань, умінь та навичок;
- відкривати можливості для оновлення змісту навчання і методів викладання;
- розширити доступ до загального та професійної освіти;
- змінити роль вчителя та викладача в освітньому процесі (постійний діалог, перетворити інформацію в знання і розуміння).

На сьогоднішній день набуває популярності використання інтернет-сервісів для створення цікавих дидактичних матеріалів з будь-якої теми з використанням текстів, зображень, відео та аудіо файлів, у тому числі інтерактивних. Дані сервіси стають зручним інструментом

для створення електронного супроводу уроку, заняття або дистанційного курсу. Вони дають можливість зібрати всі необхідні ресурси для уроку чи заняття: файли, веб-сайти, google документи, вбудувати потрібні файли та он-лайніві вправи. Створені завдання можна розмістити в блозі, отримавши відповідний код, створити до уроку QR-код, який можна надіслати та розмістити в соціальних мережах.

Розглянемо декілька найпоширеніших сервісів, що використовуються при реалізації інтерактивного навчання [4].

Playbuzz – це онлайн-платформа, що дозволяє створювати інтерактивний контент: тести, опитування, слайдшоу, флеш-карти, статті-списки з анімованими картинками. Сайт на англійській мові, проте досить зрозумілий у використанні.

Bounce – це цікавий і в той же час простий у використанні сервіс для того, щоб поділитися своїми ідеями із дизайну і вмісту сайту, фотографіями, картинками, ілюстраціями, дизайнерськими рішеннями. Тут можна помітити кожен деталь і додати до нього коментар. Даний сервіс буде зручний для створення віртуальних плакатів, інструктивних матеріалів, «живих» фото тощо.

Symbaloo – сервіс візуальних закладок, за допомогою якого можна вибрати закладки, якими вчитель або викладач користується та організовує свій робочий стіл.

Ourboox – це проста повністю безкоштовна платформа для створення авторських електронних книг.

Kaizena – це система взаємодії з учнями і студентами. Швидкий сервіс, який дозволяє організувати роботу в групі учнів, студентів і взаємодіяти з ними різними способами. Сервіс дозволяє швидко створювати відгуки на студентські роботи і отримувати від них коментарі. Сервіс безкоштовний і його можна використовувати для роботи, як зі школярами, так і зі студентами.

Інтернет-сервіс Blendspace – зручний інструмент для створення електронного супроводу уроку, заняття або дистанційного курсу. Він дає можливість зібрати «в одному місці» необхідні ресурси для уроку, заняття чи дистанційного курсу, а саме: тексти, відео, зображення, веб-сайти, google документи, вбудувати потрібні файли та он-лайніві вправи, створити тестування (опитувальник у вигляді вибору правильної відповіді). Для створеного завдання можна отримати відповідний код та розмістити в блозі чи соціальних мережах. Важливо, що також організовано зворотній зв'язок з учнями. Виконуючи завдання, вони можуть писати коментарі та розміщувати посилання на виконані роботи. Вчитель та викладач може створити класну кімнату, занести туди всіх учнів і стежити за статистикою виконання завдань.

Wizer.Me увійшов в десятку найкращих сервісів для освіти в 2016 році. Сервіс дозволяє створювати інтерактивні робочі аркуші, які можна використовувати для роботи в класі на інтерактивній дошці, при дистанційному навчанні, для домашніх робіт.

Wizer.Me – це простий і швидкий інструмент для створення інтерактивних робочих аркушів із завданнями та

вправами, в тому числі і на основі відео. Можна скористатися уже створені раніше робочі листи з багатьох тем, а можна створити і свої. Вчитель може створювати робочі листи на основі відео-уроків, прикріплювати до них різні завдання та запрошувати учнів до роботи над темою. Учні реєструються в сервісі та виконують запропоновані завдання. Вчитель може переглядати відповіді учнів в особистому кабінеті. Вчитель може створювати класи і додавати до них учнів. Зареєструватися в сервісі можна в онлайн-режимі, ввівши адресу електронної пошти, а також можна використовувати обліковий запис Google+ або Edmodo.

Сервіс Loure складається з трьох онлайн-інструментів: Loure Collage – для створення колажів, Loure Card – для генерування листівок, Loure Waldo – для створення онлайн-ігри на уважність, в якій необхідно відшукати конкретне зображення на заданому колажі. Сервіс дає можливість створювати фотоколажі у вигляді різних зображень, можливість створення колекцій зображень, створення малюнків з фотографій своїх рідних, близьких та друзів, однокласників, збереження своїх робіт, публікація у блозі, соціальних мережах, розсилка по e-mail, виготовлення фотографій творчих завдань для учнів, можливість працювати на інтерактивній дошці. Всі колажі, які створюються з допомогою Loure, будуються за одним і тим же принципом: фотографії заповнюють якусь певну форму, наприклад, утворюють смайлик, серце тощо.

Сервіс LearningApps має досить зручний інтерфейс, який дозволяє легко створювати завдання на основі шаблонів. На цьому сервісі доступна велика кількість шаблонів, що сприяє різноманіттю розробки завдань. Варто наголосити, що даний сервіс є безкоштовним. Порівнюючи сайт LearningApps з іншими сервісами, стає очевидно, що він є найкращим вибором, якщо є необхідність в розробці інтерактивних завдань для учнів та студентів [5-6].

Виділимо основні плюси сервісу: велика кількість мов (серед них і українська), великий діапазон завдань за складністю, завдання практично на будь-яку тему, зручна система пошуку, можливість інтуїтивного користування сервісом, зручність інтерфейсу, безкоштовність, часте оновлення шаблонів завдань, можливість об'єднання учнів в класи та студентів в групи [7].

Проведений аналіз існуючих інтернет-сервісів дозволив визначити LearningApps як зручний інструмент для створення інтерактивного курсу з великою кількістю шаблонів різної категорії та складності, що можна безплатно використовувати для подання, закріплення, перевірки та узагальнених набутих вмінь, знань та навиків учнів та студентів.

III. ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ СЕРВІСУ LEARNINGAPPS

LearningApps.org є конструктором для розробки різноманітних завдань з різних предметних галузей на основі шаблонів, для подальшого їх використання на

уроках та заняттях як для малечі, так і для старшокласників.

Конструктор Learningapps призначений для розробки та зберігання інтерактивних завдань з різних предметів, дисциплін, за допомогою яких учні та студенти можуть перевірити і закріпити свої знання в ігровій формі, що сприяє формуванню їх пізнавального інтересу [6].

Сервіс Learningapps надає можливість отримання коду для того, щоб інтерактивні завдання були розміщені на сторінки сайтів або блогів викладачів і учнів.

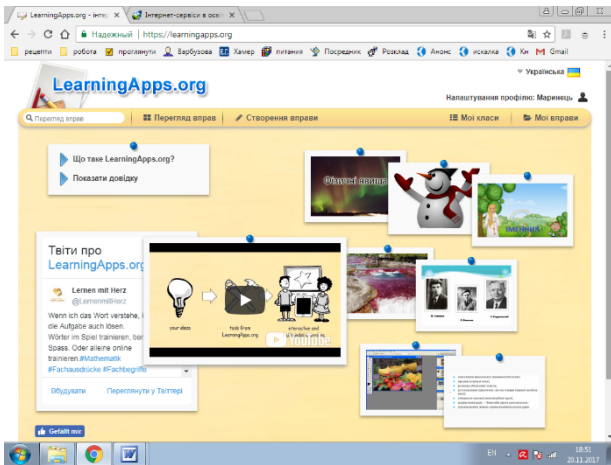


Рис. 1. Загальний вигляд веб-сторінки LearningApps

Охарактеризуємо позитивні якості роботи з сервісом LearningApps.org:

- безкоштовний сервіс;
- доброзичливий російськомовний інтерфейс (треба тільки вибрати відповідний прапорець у правому верхньому куті), при роботі з сервісом можна переключитися на різні мови, нажалі української мови не запропоновано, але створювати вправи для дітей можна і державною мовою;
- можливість обміну інтерактивними завданнями;
- завдання можна створювати і редагувати в режимі он-лайн, використовуючи різні шаблони;
- багато шаблонів підтримують роботу з картинками, звуком та відео;
- моментальна перевірка правильності виконання завдання;
- на сайті можна вибрати категорію: "Людина і навколишнє середовище", "Мистецтво", "Біологія" та інші, а також "Все категорії";
- можна отримати посилання для відправки по електронній пошті або код для вбудовування в блог або сайт, і на Вікі-сторінку.

Однією з переваг середовища LearningApps є можливість завантажити на власний комп'ютер створені вправи: у форматі SCORM – завантажити в систему

дистанційного навчання або використовувати на комп'ютері без Інтернету, iBook Author – для використання на iPad вправ без Інтернету, Developer Source – для зміни вправи на рівні мови програмування.

Було б не правильно, не розкрити негативні якості роботи сервісу, хоча їх і не так багато:

- частина шаблонів не підтримує кирилицю;
- підключення ДНЗ до Інтернету (якщо використовуються вправи студентами під час проходження педагогічної практики);
- в шаблонах зустрічаються окремі помилки, які неможливо виправити вручну;
- деякі шаблони вправ змінюються або їх вилучають з сайту.

Додаток дозволяє працювати у наступних режимах:

- Перегляд вправ
- Створення вправи
- Робота з папками у власному кабінеті
- Створення колекції вправ
- Мої класи

Кожну з розроблених на даному ресурсі вправ можна використати на своєму занятті, змінити під власні потреби, розробити схожий чи зовсім інший навчальний модуль, його можна зберігати у власному «кабінеті», створивши свій акаунт в даному онлайновому середовищі.

На сьогоднішній день сервіс пропонує близько 30 різноманітних шаблонів, що цілком достатньо для реалізації безлічі методичних задумів. Всі шаблони розділені на 5 груп: вибір, розподіл, послідовність, заповнення та онлайн-ігри.

Онлайн-ігри – остання група шаблонів навчальних програм LearningApps.org. Особливість даних шаблонів полягає в тому, що виконання завдань організовано як змагання учня з комп'ютером або з іншими користувачами. При цьому враховується не тільки правильність відповідей, а й швидкість виконання. Логіка побудови завдань може бути різною (вибір відповіді, встановлення послідовності, визначення відповідності).

Можливості сервісу LearningApps.org дозволяють вчителю зареєструвати на цьому сайті своїх учнів, після чого кожен з них заходить в особистий акаунт за паролем, щоб так чи інакше взаємодіяти в режимі реального часу з учителем і однокласниками. Це може бути реалізовано дистанційно або прямо на уроці.

Команда «Перегляд вправ» головного меню даного сервісу дозволяє зайти в бібліотеку вправ і переглянути існуючі вправи. Пункт меню «Створення вправ» надає доступ до існуючих шаблонів, на основі яких можна створити власні вправи.

Зокрема для кожної створеної вправи можна виконати наступні дії:

- Можна використати як шаблон для своєї вправи,

- Можна видалити зображення та замінити своїми графічними файлами,
- Зберегти вправу у своїй бібліотеці (зробити закладку у «Моїх вправах»),
- Розмістити посилання для поширення та копіювання вправи,
- Вбудувати вправу на свою веб-сторінку.

Усі вправи на даного сервісі поділено на категорії: «Знайти пару», «Класифікація», «Числова пряма», «Просте упорядкування», «Вільна текстова відповідь», «Фрагменти зображення», «Вікторина», «Заповнити пропуски».

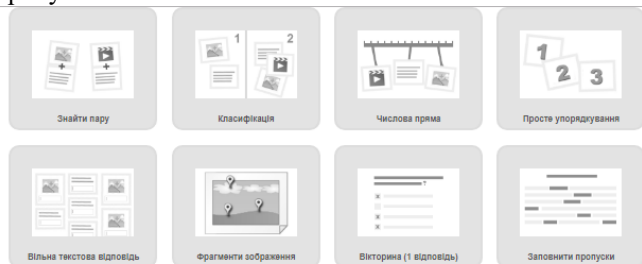


Рис. 2. Перелік доступних шаблонів на сервісі

В даному сервісі вчитель зможе створювати дидактичні матеріали для уроків, використовувати у позакласній роботі з предмету: ігри, конкурси і т.п., наповнювати власне Портфоліо (створені вправи можна розмістити на власній веб-сторінці).

В процесі підготовки інтерактивного дидактичного матеріалу для учнів в середовищі LearningApps вчителі та учні розвивають критичне та творче мислення, формують комунікативні навички, зокрема наступні вміння [8]:

- аналіз матеріалу, фактів, порівняння, співставлення фактів, явищ;
- підбір відомостей з різних джерел;
- встановлення асоціацій зі відомими фактами, явищами, встановлення асоціацій з новими якими предметів, явищ тощо;
- вміння логіку послідовності дій, що здійснюються для розв'язання проблеми, вибудовувати логіку рішення, що приймається, внутрішню логіку проблеми, що розв'язується, тощо;
- вміння розглядати об'єкт, що вивчається, проблему в цілісності;
- систематизація та узагальнення матеріалу;
- робота в колективі в процесі розв'язування завдань, взаємооцінювання;

– володіння культурою комунікації.

ВИСНОВКИ

Переваги інтерактивних дидактичних матеріалів перед традиційними полягають в їх наочності, доступності, креативності, в застосуванні комп'ютера або ноутбука замість книг, у використанні різних типів файлів (аудіо, відео, графічні і т. д.), а також різних типів вправ, що сприяє розвитку інтересу, пізнавальної активності, інформаційно-комунікативних компетентностей учнів.

Перелічені переваги сервісу LearningApps вказують на доцільність його використання в процесі підготовки інтерактивного дидактичного матеріалу для учнів та студентів, публікації та обговорення створених вправ у блогах, при цьому вчителі, викладачі, студенти та учні розвивають критичне та творче мислення, формують комунікативні навички та навички роботи з інформаційно-комунікативними технологіями.

Для даного сервісу розроблено методичні рекомендації для роботи в його середовищі та для підтримки освітніх процесів в навчальних закладах різних типів та створення інтерактивних завдань на основі запропонованих шаблонів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Дементієвська Н. П., Морзе Н. В. Комп'ютерні технології для розвитку учнів та вчителів // Інформаційні технології і засоби навчання: 36. наук. праць / За ред. В. Ю.Бикова, Ю. О.Жука. – К.: Атака, 2005. – С. 76–95.
- [2] Кузьмінська О. Забезпечення умов набуття професійної компетентності педагогів в умовах інформаційного суспільства // Нова педагогічна думка / науково- методичний журнал. – №2. – Рівне, 2010. – С. 107-111.
- [3] Морзе Н. В. Як навчати вчителів, щоб комп'ютерні технології перестали бути дивом у навчанні? // Комп'ютер у школі та сім'ї. – 2010. – №6. – С. 10–14. 5. Нанаєва Т. В. Інноваційні освітні програми корпорації INTEL // Комп'ютер у школі та сім'ї. – 2010. – №6. – С. 3–5.
- [4] Сервіси для створення дидактичних матеріалів [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://ow.ly/ZS5x9>
- [5] Learningapps: більше чем просто ігри. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.slideshare.net/shperk/learningapps-16334056?related=3>
- [6] LearningApps.org - создание мультимедийных интерактивных упражнений. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://learningapps.org/about.php>
- [7] Инструкция по работе с LearningApps. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://wiki.kamipkpk.ru/index.php/Инструкция_по_работе_с_LearningApps
- [8] Поддержка обучения и процесса преподавания с помощью интерактивных заданий (на примере learningapps.org). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://elearn.itro.ru/upload/files/personal-folders/4/LA.pdf>

Використання Методів Машинного Навчання для Ігрового Моделювання Розподілених Систем Управління

Віталій Горелов
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
vitaliy.goryelov@pnu.edu.ua

Любомир Петришин
кафедра управління
Університет AGH
Краків, Польща
petryshynL@poczta.fm

Use of Machine Learning Methods for Gaming-Based Modelling of Distributed Management Systems

Vitaliy Goryelov
dept. of Computer Science
Precarpathian National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
vitaliy.goryelov@pnu.edu.ua

Lubomyr Petryshyn
dept. of Enterprise Management
AGH University
Krakow, Poland
petryshynL@poczta.fm

Анотація—Розглянуто використання методів машинного навчання при моделюванні розподілених систем управління з використанням ігрового підходу у сучасному процесі навчання. ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника» та науково-технологічний університет Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie – учасники консорціуму проекту GameHub. Показано діяльність університетів у проекті. Проілюстровано результати проекту, що підтримується Європейською Комісією за програмою Erasmus+.

Abstract—The use of machine learning methods for gaming-based modelling of distributed management systems in the modern education process was analysed. Vasyl Stefanyk Precarpathian National University and AGH University of Science and Technology are GameHub Consortium members. Project information and results of the project supported by the European Commission under the Erasmus+ programme are illustrated.

Ключові слова—машинне навчання; штучний інтелект; кластеризація; класифікація; гейміфікація навчання; GameHub

Keywords—machine learning; artificial intelligence; classification; clusterization; gamification in education; GameHub

I. ВСТУП

Система управління – це набір взаємопов’язаних засобів, що діють з метою реалізації певної цільової функції. Система управління включає керуючу підсистему (чи суб’єкт управління) та керовану підсистему (або об’єкт управління).

Об’єктами управління можуть бути як люди, так і технічні об’єкти.

Розподілена система управління характеризується децентралізацією засобів обробки даних і системи вводу-виведення.

Реалізація методів машинного навчання у системах управління дозволяє таким системам навчатися у процесі функціонування і бути здатними до прогнозування. Програма, котра реалізує відповідні алгоритми машинного навчання, забезпечує стійкість системи.

Зазвичай виділяють такі основні типи алгоритмів машинного навчання:

- навчання з учителем — алгоритм складається із цільової (залежної) змінної, котру потрібно передбачити на основі набору незалежних змінних (предикторів). При цьому алгоритм генерує функцію, котра відображає вхідні дані на очікувані вихідні. Одне із класичних застосувань таких алгоритмів — розв’язок задачі класифікації. При

цьому очікуваний результат — це функція, що здатна поділити вектор об'єктів на декілька класів об'єктів, спираючись на ряд прикладів такого поділу. Процес тренування продовжують до досягнення заданої точності. Прикладами навчання з учителем є регресія, логістична регресія, дерево ухвалення рішень, випадковий ліс, KNN тощо;

- навчання без учителя (кластеризація) — у цьому випадкові не існує цільова (залежна) змінна, котру потрібно передбачити. Вхідну множину об'єктів поділяють на ряд підмножин (кластерів), не маючи прикладів такого поділу (правил, класифікаційного дерева, функції поділу тощо). Приклад: кластеризація за методом k -середніх;

- навчання з підкріпленням — при цьому алгоритм вивчає, які дії повинні виконувати програмні агенти для отримання максимального відгуку деякого середовища на вплив на нього. Машина навчається методом проб і помилок і використовує при цьому свій попередній досвід.

II. ІГРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У МОДЕЛЮВАННІ

Математичне моделювання є важливим інструментом у вивченні процесів та систем. Одним із варіантів способу перенесення результатів моделювання у практичну площину є гейміфікація. За допомогою гейміфікації процесу навчання можливе всебічне вивчення складних об'єктів у цікавій для тих, кого навчають, формі. При цьому внесення у навчальний процес елементів гри дозволяє втримати фокус на меті навчання і зберегти мотивацію учасників процесу.

Отже, знання та навички, потрібні у професійній діяльності, формують у процесі гри за рахунок створення елементів розваги, що формують систему засобів зацікавлення, мотивування і впливу на групу осіб, що навчаються.

Процес розваги спрямований на отримання практичного результату, певною мірою «побічного» для того, хто бере участь у грі, оскільки акцент під час гри роблять на проходженні рівня, отриманні бонусів, віртуальних елементів тощо.

Засоби штучного інтелекту стали важливою частиною моделювання ігрового середовища, починаючи ще з Pac-Man та Pong (цікаво, що тільки у 2017 р. штучний інтелект компанії Microsoft зміг пройти всі рівні гри Pac-Man).

Розглянемо приклад ігрового підходу до вивчення деякого процесу шляхом моделювання його за допомогою регресійного аналізу. У 1972 р. фірмою Atari була випущена Pong – відеогра для аркадних автоматів. Pong стала успішним комерційним проектом серед подібних і однією з таких, що започаткували індустрію відеоігор.

Pong – це простий симулятор настільного тенісу. Поле гри складається із прямокутника, що позначає стіл, та квадратики – м'ячика, що лінійно переміщається та змінює траєкторію, вдаряючись об одну з двох ракеток та межі поля гри. Кут відбивання при цьому відповідає куту падіння.

Процес гри полягає у пересуванні гравцями у вертикальному напрямі ракеток з метою відбивання м'ячика.

Засіб мотивування гравців до продовження гри – збирання очок, котрі нараховуються у випадкові, якщо партнер по грі не встигає відбити м'ячика.

У Pong грають або удвох, або проти комп'ютерного партнера.

Цікавим є варіант гри з комп'ютером. Такий варіант є безпрограшним для комп'ютера. Щодо людини – вона також може продовжувати гру доти, доки матиме бажання та буде сконцентрованою на процесові гри.

Оскільки переміщення м'ячика – лінійне, то завжди можна передбачити, куди він потрапить після відбиття. Траєкторію руху легко встановити за допомогою регресійного аналізу.

Регресію використовують для оцінки дійсних значень на основі неперервних величин. Таким чином, встановлюють зв'язок між залежною та незалежною величинами у вигляді аналітичної залежності, що оптимально описує такий зв'язок.

Регресійний аналіз – основа предиктивного аналізу. Основні застосування регресійного аналізу: визначення сили предикторів, прогнозування ефекту та прогнозування тенденції.

Основна ідея регресійного аналізу – встановлення факту реального впливу набору незалежних змінних на залежну та визначення впливових предикторів і того, як саме вони впливають на неї. Найпростіший вигляд регресійного рівняння:

$$y = a_0 + a_1x; \quad (1)$$

де a_0 – постійна складова, a_1 – коефіцієнт регресії, x – незалежна змінна, y – залежна змінна (рис. 1).

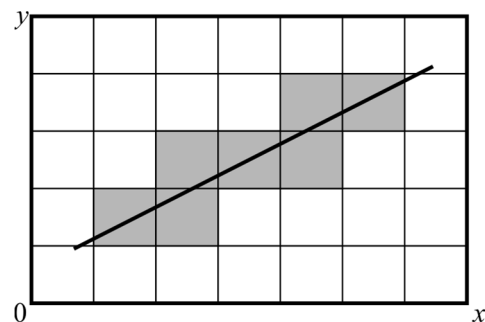


Рис. 1. Регресійна пряма – траєкторія руху тенісного м'ячика.

У даному випадкові необхідно передбачити координату падіння м'ячика. Це може бути або межа стола (одну з них захищає ракетка), або ракетка.

Завдання легко вирішити. Аналіз деякої кількості послідовних кадрів відеогра формує послідовності вхідних даних (фактично, координати x_i та y_i траєкторії

переміщення м'ячика). Побудувавши рівняння регресії та встановивши значення його коефіцієнтів, легко визначити місце зіткнення м'ячика з межею столу чи ракеткою і перемістити ракетку у потрібну позицію (рис. 2).

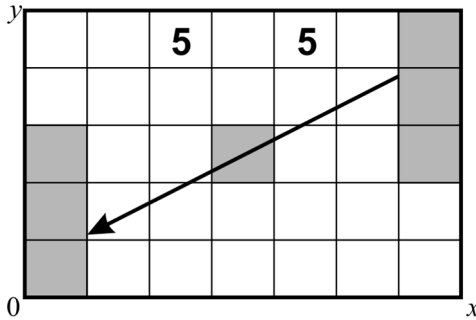


Рис. 2. Ігрові елементи гри Pong.

Таку гру можна ускладнити, ввівши для гравця поняття вартості переміщення ракетки. При цьому оптимальним вирішенням буде мінімізація переміщення ракетки на кожному кроці гри.

III. МЕТОДИ МАШИНОГО НАВЧАННЯ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Розглянемо кілька методів машинного навчання з метою аналізу можливості впровадження їх у комп'ютерних іграх, спрямованих на гейміфікацію освітніх задач.

Існує ряд типів лінійної регресії: проста лінійна регресія (1 незалежна та 1 залежна змінні); багатовимірна лінійна регресія (2+ незалежних змінних, 1 залежна змінна); логістична регресія (2+ незалежних змінних, 1 залежна); ординальна регресія (1 незалежна, 1 залежна змінні); мультиноміальна регресія (1 незалежна, 1 залежна змінні).

Логістичну регресію використовують при побудові регресійної моделі у випадковій категорійній незалежній змінній. Наприклад, бінарної, котра може набувати станів «0» та «1» («увімкнуто/вимкнуто», «виграш/програш» тощо).

Логістичну регресію використовують у машинному навчанні, медицині, суспільних науках.

Термін «логістична регресія» пов'язаний із функцією, що лежить в основі – логістичною функцією.

Логістичну функцію (її часто називають сигмоїдою) розроблено для опису властивостей росту популяції у екології. Популяція зростає швидко і досягає максимуму у відповідності із можливостями середовища забезпечувати її. Крива має S-подібну форму, що може приймати довільні дійсні значення і відображати їх на діапазон між 0 та 1 (при цьому межі ніколи не можуть бути досягнуті):

$$p_i = \frac{e^{(a_0+a_1x_i)}}{1+e^{(a_0+a_1x_i)}}; \quad (2)$$

де e — основа натурального логарифма; x_i — незалежна змінна; p_i — залежна змінна, математичне сподівання події y_i .

Оскільки шукані коефіцієнти знаходяться у ступені експоненти, вираз слід лінеаризувати таким чином, щоб p_i залежало від x_i лінійно.

Ключова відмінність логістичної регресії у порівнянні зі звичайною регресією – моделювання бінарної залежної змінної.

Логістична регресія може бути складовою алгоритму при моделюванні деякої системи у вигляді комп'ютерної гри. Наприклад, визначення статусу гравця («свій-чужий») тощо.

Широкого поширення для бінарної класифікації набула ROC-крива (receiver operating characteristic, робоча характеристика приймача), котра відображає залежність кількості вірно класифікованих об'єктів від кількості невірно класифікованих об'єктів. Такі результати класифікації називають хибнопозитивними та хибнонегативними (таб. 1).

ТАБЛИЦЯ І. КЛАСИФІКАЦІЯ ЗА ROC-КРИВОЮ

Класифікація за моделлю	Дійсна класифікація	
	Так	Ні
Так	TP	FP
Ні	FN	TN

У табл. 1: TP – true positive – вірно класифіковані як позитивні об'єкти; TN – true negative – вірно класифіковані як негативні об'єкти; FP – false positive – об'єкти, хибно класифіковані як позитивні (помилка 1 роду) та FN – false negative – об'єкти, хибно класифіковані як негативні (помилка 2 роду).

Позитивний випадок – підтвердження нульової гіпотези.

Розбиття об'єктів на класи здійснюють за допомогою cut-off параметра. Класифікацію за допомогою ROC-кривої характеризують наступні показники: чутливість (частка позитивно класифікованих об'єктів)

$$TPR = TP / P = \frac{TP}{TP + FN}; \quad (3)$$

специфічність (або частка негативно класифікованих об'єктів)

$$SPC = TN / N = \frac{TN}{TN + FP}. \quad (4)$$

ROC-криву будують як залежність TPR від FNR .

Дерево прийняття рішень – засіб, котрий часто використовують у дослідження операцій з метою визначення оптимального алгоритму для досягнення мети. Разом з тим, його часто використовують у машинному навчанні. Дерево прийняття рішень складається із 3 типів

вузлів: вузлів вибору (зазвичай представляють квадратами), ймовірнісних вузлів (представляють колами) та замикаючих вузлів (графічне представлення – трикутники).

Дерево прийняття рішень може бути лінеаризоване:

$if(\text{умова } 1) \&\& (\text{умова } 2) \&\& \dots (\text{умова } N) \{ \dots \}.$

Дерева прийняття рішень легкі для розуміння, проте – нестійкі і часом вимагають громіздких обчислень. Імплементация та візуалізація дерев прийняття рішень у комп'ютерних іграх не вимагають особливих зусиль і можуть бути ефективно використані при вирішенні задач моделювання.

Існує ряд інших методів, котрі можуть бути з успіхом використані при моделюванні розподілених систем управління у вигляді комп'ютерних ігор. Наприклад, ієрархічна кластеризація, кластеризація за методом К-середніх тощо.

IV. РЕАЛІЗАЦІЯ ОСВІТНЬОГО ПРОЕКТУ

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника» та науково-технологічний університет Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie залучені до реалізації міжнародного грантового проекту Erasmus+ KA2 CBHE №561728-EPP-1-2015-1-ES-EPPKA2-CBHE-JP «Співробітництво між університетами та підприємствами в сфері ігрової індустрії в Україні — GameHub» [1-4].

Цільова аудиторія: викладачі університету; студенти; ветерани АТО; безробітні; працівники центрів зайнятості; представники ІТ-компаній. Станом на квітень 2018 р. проектом у межах Прикарпатського університету охоплено більше 70 студентів та понад 30 осіб згаданих вище категорій.

Академічними групами університетів розроблено комплекси навчального та методичного забезпечення дисциплін, що викладаються у межах проекту, та проведено ряд тренінгів. Технічні завдання проекту у Прикарпатському університеті імені Василя Стефаника виконують на базі кафедри інформатики. За фінансової підтримки програми Еразмус+ Європейського Союзу при кафедрі створено та обладнано сучасну лабораторію з розробки ігрового програмного забезпечення GameLab. Лабораторія укомплектована РС/Мас-комп'ютерною технікою для вирішення задач програмування ігрових додатків та створення їх музичного супроводу.

Фахівцями кафедри розроблено та викладаються спеціалізовані курси для студентів напрямку підготовки "Інформатика" ("Комп'ютерні науки"): 3 курс (бак.) — дисципліни "Розробка комп'ютерних ігор" та "Технології розробки комп'ютерних ігор", 1 курс (маг.) — дисципліна "Створення звукового та музичного супроводу для комп'ютерних ігор". Виконавці проекту взяли участь у ряді тренінгів в Україні та за її межами, а також організували для студентського та викладацького складів університету наступні тренінги "Особливості

використання фреймворку SpriteKit для програмування ігор під iOS" (квітень 2017), "Розробка ігрових додатків з використанням фреймворка Cocos2d-x" (травень 2017 р.). Студенти-інформатики виступили з доповідями у контексті завдань проекту на засіданнях Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Комп'ютерні науки, інформаційні технології та системи управління" (CSYSC-2017, Івано-Франківськ, квітень 2017 р.), міжнародної студентської науково-технічної конференції Konferencja Studenckich Kół Naukowych (Краків, травень 2017 р.).

Також виконання проекту обговорювалося на засіданнях Міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання", співorganizаторами якої стали Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Вінницький національний технічний університет та Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України.

ВИСНОВКИ

Університети-члени консорціуму GameHub перебувають на завершальній стадії проекту.

За час навчання слухачами курсів та студентами ВНЗ отримано теоретичні знання та практичні навички, необхідні для розробки ігрового програмного забезпечення як індивідуально, так і у складі команди розробників. Проведені заходи для учнівської молоді та шкільних вчителів сприяють поглибленню зв'язків між університетом та школою та слугують елементом профорієнтаційної роботи.

Вивчення матеріалу, пов'язаного із розробкою ігор, заохочує до освоєння міждисциплінарних курсів, а також поглибленому вивченню курсів з аналізу даних, машинного навчання, впровадженню у студентській розробки елементів штучного інтелекту тощо.

Участь у тренінгах ветеранів АТО певною мірою слугує їхній психологічній реабілітації.

Зв'язки із провідними ІТ-компаніями дозволяють виконувати поставлені освітні задачі на сучасному рівні.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Горелов В. О. Гейміфікація навчання / Горелов В. О., Sala Dariusz. // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 23-28 травня 2017 р. – Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2017. – С.136-139.
- [2] Співробітництво між університетами та підприємствами в сфері ігрової індустрії в Україні — GameHub [Online]. Available: <http://gamehub-cbhe.eu/ua/>
- [3] Команда AGH University of Science and Technology [Online]. Available: <http://gamehub-cbhe.eu/ua/project-consortium/agh-team/>
- [4] Команда ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника» [Online]. Available: <http://gamehub-cbhe.eu/ua/project-consortium/vasyl-stefanyk-precarpathian-national-university-team/>

Інтегровані Уроки як Засіб Підвищення Якості Знань Учнів

Копильчук Віра
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
vira-100@ukr.net

Марія Семаньків
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
dlyamarii@gmail.com

Integrated Lessons as a Means of Improving the Quality of Students' Knowledge

Vira Kopylchuk
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
vira-100@ukr.net

Maria Semankiv
dept. of Computer Science
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
dlyamarii@gmail.com

Анотація—Досліджено переваги інтеграції предметів для покращення якості проведення уроку, підвищення мотивації навчання, формування пізнавального інтересу учнів.

Abstract—The advantages of integrating the subjects for improving the quality of the lesson, increasing the motivation of learning, forming the cognitive interest of students are explored.

Ключові слова—інтегровані уроки, інтеграція, міжпредметні зв'язки.

Keywords—integrated lessons, integration, interpersonal relationships.

I. ВСТУП

Інтегрований урок – це урок, метою якого є розкриття загальних закономірностей, законів, ідей, теорій, що відображені у різних науках і відповідних їм навчальних предметах. Інтеграція (від лат. integer – повний, цілий) – це об'єднання в одне ціле раніше ізольованих частин. Інтегровані уроки ставлять за мету об'єднати споріднені блоки знань із різних навчальних предметів навколо однієї теми з метою інформаційного та емоційного збагачення, сприйняття, мислення, почуттів учнів [1].

Інтегровані уроки дозволяють урізноманітнити форми й методи роботи, позбавлені шаблонів, створюють умови для виховання творчих здібностей школяра, розширюють функції вчителя, дають змогу врахувати специфіку певного матеріалу та індивідуальні особливості кожної дитини.

Використання інтегрованих уроків сприяє формуванню пізнавальних інтересів школярів, діти безпосередньо беруть участь у процесі навчання. Пізнавальна діяльність учнів переважно має колективний характер, що створює передумови для взаємодії суб'єктів навчання, дає можливість для обміну інтелектуальними цінностями, порівняння й узгодження різних точок зору про об'єкти, які вивчаються на уроці [2].

Ефективність інтегрованих уроків забезпечується за умови володіння вчителем методикою їх проведення та умілого використання таких уроків у певній системі в поєднанні з традиційними формами роботи.

Інтегровані з іншими навчальними предметами уроки інформатики відрізняються від звичайних уроків великою інформативністю і тому вимагають чіткої організації пізнавальної діяльності. Такі уроки повинні бути гранично чіткими, компактними, продуманими на всіх етапах. Інтегровані уроки знижують стомлюваність головного мозку, створюють комфортні умови для дитини як особистості, підвищують успішність навчання.

II. ВІДМІННІСТЬ МІЖ ІНТЕГРОВаниМ УРОКОМ І УРОКОМ ВИКОРИСТАННЯМ МІЖПРЕДМЕТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

Міжпредметні зв'язки розвиваються завдяки функціонуванню паралельних понять та категорій різних предметів. В педагогічному процесі вони являються необхідною умовою процесу інтеграції.

Чим відрізняються уроки інтегрованого змісту від уроків з використанням міжпредметних зв'язків?

Міжпредметні зв'язки – це така конструкція змісту навчального матеріалу, і належить двом чи більше навчальним предметам і відображає взаємозв'язки, які об'єктивно діють в природі і вивчаються сучасними науками.

Уроки з міжпредметним зв'язками та інтегровані уроки О. Савченко називає різними дидактичними поняттями, оскільки міжпредметні зв'язки передбачають включення в урок запитань і завдань з матеріалу інших предметів, що мають допоміжне значення для вивчення певної теми. На її думку, уроки з міжпредметними зв'язками – це «окремі короточасні моменти уроків, які сприяють глибшому сприйманню та осмисленню якогось конкретного поняття. Тобто міжпредметні зв'язки передбачають використання запитань і завдань із матеріалу інших предметів, що мають допоміжне значення для вивчення теми. Натомість під час інтегрованого уроку учні ознайомлюються зі змістом різних предметів, включаються у несхожі між собою види діяльності, що підпорядковані одній темі» [3].

Поняття міжпредметних зв'язків визначається також як взаємна узгодженість навчальних програм із різних дисциплін, як один із засобів розв'язання проблем комплексного підходу до навчання та виховання школярів.

Під час проведення інтегрованих уроків вчителів доводиться самостійно визначити, яка мета цього інтегрованого уроку, як він сприятиме цілісності навчання, формуванню знань на якісно новому рівні [3].

Поява інтегрованих уроків викликана гуманізацією, гуманітаризацією сучасної освіти, тенденціями переходу від предметно-змістовного принципу засвоєння знань до вивчення цілісної картини світу, розвитку системного мислення учнів. Інтегроване навчання – це умова підвищення інтересу учнів до навчання. Під час інтегрованих уроків відбувається викладення нового матеріалу блоками, використовуються різні види навчальної та творчої діяльності. На таких уроках об'єднується зміст різних дисциплін, відбирається й об'єднується навчальний матеріал різних предметів з метою систематичного, цілісного, різнобічного вивчення важливих тем. При цьому відбувається формування якісно нових знань, що характеризуються вищим рівнем осмислення, динамічністю, системністю. При такій організації навчального процесу відбувається системне викладення знань у нових зв'язках, виключається однобічність у формуванні особистості учня.

III. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНІХ УРОКІВ ІНФОРМАТИКИ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС

Виникає питання: яка роль уроку інформатики і положення його серед інших загальноосвітніх предметів у процесі інтеграції навчальних предметів у середній школі. Обговорюючи це питання можна виділити 3 основних базових сценарії – взаємодія через експансію, взаємодію через уточнення і розмежування предметних областей, взаємодія через інтеграцію [4].

Експансія – перетворити курс інформатики в наскрізний обов'язковий курс із 1 по 11 клас і підтримувати за допомогою його викладання інших навчальних предметів (включаючи, російську й іноземну мови, математику, різні дисципліни природничо-наукового циклу). Тут інформатика виступає в ролі інтегруючої дисципліни.

Розмежування – звільнити курс інформатики від невласливих йому складових, передавши всі спеціальні питання в суміжні навчальні предмети (наприклад, у технологію). Ядро, що залишилося, і буде складати зміст курсу.

Інтеграція – включитися в інтеграцію навчальних дисциплін, почати розробку модульних курсів "з інформаційними складовими", стимулювати колективну педагогічну дію, спрямована на постійне створення "гнучких навчальних планів" у школі.

Перший і другий сценарій побудовані на схемі "суперництва за ресурси" між представниками окремих навчальних предметів. Третій заснований на схемі співробітництва [3-4].

Дійсно інтеграція навчальних дисциплін можлива лише на "добровільній і взаємовигідній основі". Тут усе будеться виходячи з загальних для всіх інтересів окремого учня. На створення цього сценарію працюють і ті, хто намагається виділяти і розробляти окремі модулі по інформатиці, пробує форми спільного навчання інформатиці й іншим загальноосвітнім дисциплінам. Усі роботи з встановлення і поглиблення міжпредметних зв'язків також сприяють розвитку цього сценарію. Цьому сприяє і розширене використання комп'ютерів у ході викладання окремих дисциплін і поширення Інтернет.

Відмінність інтегрованого уроку від традиційного в тому, що:

- предметом вивчення на такому уроці виступають багатопланові об'єкти, інформація про сутність яких міститься в різних навчальних дисциплінах;
- широка палітра використання міжпредметних зв'язків при різнобічному розгляді однопланових об'єктів;
- своєрідна структура, методи, прийоми і засоби, які сприяють його організації і реалізації поставлених цілей.

Через те що інтеграція може здійснюватися в різних формах і на різних рівнях, не треба думати, що для оцінки уроку як інтегрованого необхідна участь обох (декількох) вчителів чи обов'язкове використання на одному уроці матеріалу по всіх предметах, що інтегруються.

Підставою інтеграції може служити, наприклад необхідність спільних зусиль учителів по формуванню загально навчальних навичок і умінь учнів, і неможливість ізольованого викладання предметів, спільність їхній тим, подібність досліджуваних об'єктів і явищ, єдність ведучих ідей, закладених у навчальних програмах. Припустимо, педагоги планують спільно виробити в учнів визначені

знання і підходи до досліджуваного матеріалу. Можливо, психологічна характеристика класу вказує на необхідність розвивати увагу, тренувати пам'ять учнів, розширювати коло їхніх пізнавальних чи інтересів навчати конкретним розумовим операціям, навчальним прийомам [5].

Більш комфортна для учнів і нетрадиційна ситуація спільного викладання не завжди легко дається вчителям. Великим іспитом для педагога, наприклад, може з'явитися такий тип інтегрованого уроку, коли обидва вчителі присутні в класі і відіграють активну роль у проведенні заняття. Тут потрібно і погодженість всіх етапів і епізодів уроку, і гарне взаєморозуміння педагогів. Як у будь-якій справі, де два чоловіки активно беруть участь у роботі, потрібно вдале сполучення темпераментів.

Активна робота будь-якого вчителя по розширенню і поглибленню інтеграції є одним з важливих шляхів комплексного розв'язання проблем навчання і виховання учнів, формування в них здібностей до творчих розумових операцій.

Структура інтегрованих уроків відрізняється: чіткістю, компактністю, стислістю, логічної взаємозумовленістю навчального матеріалу на кожному етапі уроку, великий інформативною смістю матеріалу.

У формі інтегрованих уроків доцільно проводити узагальнюючі уроки, на яких розкриваються проблеми, найбільш важливі для двох або декількох предметів.

IV. ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ УРОКІВ

Потреба у виникненні інтегрованих уроків пояснюється цілим рядом причин [5].

По-перше, світ, що оточує дітей, пізнається ними в своєму різноманітті і єдності, а найчастіше предмети шкільного циклу, спрямовані на вивчення окремих явищ цієї єдності, не дають уявлення про цілому явищі, дроблячи його на розрізнені фрагменти.

По-друге, інтегровані уроки розвивають потенціал самих учнів, спонукають до активного пізнання навколишньої дійсності, до осмислення і знаходженню причинно-наслідкових зв'язків. До розвитку логіки, мислення, комунікативних здібностей.

По-третє, форма проведення інтегрованих уроків нестандартна, цікава. Використання різних видів роботи протягом уроку підтримує увагу учнів на високому рівні, що дозволяє говорити про достатню ефективність уроків. Інтегровані уроки розкривають значні педагогічні можливості. Такі уроки знімають стомлюваність, перенапруження учнів за рахунок переключення на різноманітні види діяльності, різко підвищують пізнавальний інтерес, служать розвитку у школярів уваги, мислення, мови і пам'яті.

По-четверте, інтеграція в сучасному суспільстві пояснює необхідність інтеграції в освіті. Сучасному суспільству необхідні висококласні, добре підготовлені фахівці. Для задоволення цієї потреби: підготовку освічених, добре підготовлених фахівців, необхідно

починати з молодших класів, чому і сприяє інтеграція в початковій школі.

По-п'яте, інтеграція дає можливість для самореалізації, самовираження, творчості вчителя, сприяє розкриттю здібностей [5].

Переваги інтегрованих уроків полягають в тому, що вони [2,3-6]:

- сприяють підвищенню мотивації навчання, формуванню пізнавального інтересу учнів, цілісної наукової картини світу і розгляду явища з декількох сторін;
- більшою мірою, ніж звичайні уроки, сприяють розвитку мовлення, формуванню вміння учнів порівнювати, узагальнювати, робити висновки, інтенсифікації навчально-виховного процесу, знімають перенапруження перевантаження;
- не тільки поглиблюють уявлення про предмет, розширюють кругозір, але і сприяють формуванню різнобічно розвиненої, гармонійно та інтелектуально розвиненої особистості;
- інтеграція є джерелом знаходження нових зв'язків між фактами, які підтверджують або поглиблюють певні висновки спостереження учнів у різних предметах;
- створюються умови для формування цілісного образу світу і розгляду явищ з декількох сторін;
- створюються умови для самореалізації, самовираження, прояву творчості, розкриття здібностей
- навколишній світ дітей пізнається ними у різноманітті та єдності;
- розвивається потенціал, активізується пізнавальна активність;
- налагоджуються міжпредметні зв'язки, передбачені навчальними програмами;
- надається свобода вибору теми, змісту, засобів навчання;
- передбачається можливість нестандартних уроків, форм і прийомів навчальної діяльності;
- знання учнів набувають системності;
- уміння стають узагальнюючими, сприяючи комплексному застосуванню знань, їхньому синтезу, перенесенню ідей та методів з однієї галузі науки до іншої, що, по суті, покладено в основу творчого підходу до наукової діяльності людини в сучасних умовах;
- посилюються світогляд на направленість пізнавальних інтересів учнів;
- більш ефективно формуються переконання, досягається всебічний розвиток особистості;

- сприяють інтенсифікації, оптимізації навчальної і педагогічної діяльності.

З метою покращення якості проведення уроку, підвищення рівня знань учнів до проведення інтегрованих уроків висувуються такі вимоги [7]:

1. Використання нових досягнень науки, передової педагогічної практики, побудови уроку на основі закономірностей навчально-виховного процесу.
2. Інформація на уроці оптимальному співвідношенні всіх дидактичних принципів і правил.
3. Забезпечення належних умов для продуктивної пізнавальної діяльності учнів з врахуванням їх інтересів здібностей і потреб.
4. Зв'язок з раніше засвоєними знаннями і вміннями, опора на досягнутий рівень розвитку учнів.
5. Мотивація і активізація розвитку всіх сфер особистості.
6. Логічність і емоційність всіх етапів навчально-виховної діяльності.
7. Ефективність використання педагогічних засобів.
8. Зв'язок з життям, особистим досвідом учнів.
9. Формування практично необхідних знань, умінь, навичок, раціональних прийомів мислення і діяльності.
10. Формування вміння вчитися, потреби постійно поповнювати об'єм знань.
11. Ретельна діяльність, прогнозування, проектування і планування кожного уроку.

ВИСНОВКИ

Інтегровані уроки захоплюють новизною, можливістю включення в шкільний курс альтернативних ідей і нестандартних підходів. Практика доводить, що при активному використанні інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) досягаються загальні цілі освіти, легше формуються компетенції в області комунікації: вміння збирати факти, зіставляти їх, організувати роботу з інформацією, висловлювати свої думки на папері і усно, логічно міркувати, слухати і розуміти усну та письмову мову, відкривати щось нове, робити вибір і приймати рішення.

Застосування нових інформаційних технологій у навчанні дозволяє диференціювати процес навчання з урахуванням їх індивідуальних особливостей, дає

можливість творчо працюючому вчителю розширити спектр способів представлення навчальної інформації, дозволяє здійснювати гнучке управління навчальним процесом, є соціально значущим і актуальним.

Інтегровані уроки з використанням ІКТ є потужними стимуляторами розумової діяльності дитини. Ефективність таких уроків порівняно із звичайними вища, оскільки в процесі навчання учні виконують творчу, дослідницьку роботу як щодо можливостей комп'ютера та програмного забезпечення так і математичних закономірностей. А це викликає стійкий інтерес до предметів, розвиває пізнавальну активність учнів.

Кожний з учасників "інтеграційної співдружності предметів" повинний усвідомити те нове, що має бути йому: учитель не відразу може звикнути до того, що для нього тепер неможливо поодиночці розробляти свої уроки, потрібно постійно бути в курсі проблем і відкриттів іншої науки, іншого предмета. Психологічно складно, однак, не тільки звикнути до нових зобов'язань, що накладає практика інтегрованого викладання, але і до нових можливостей які вона відкриває. Не відразу педагог привчається до того комфорту, що надає постійна підтримка в освоєнні учнями нових знань і умінь. Не відразу відвикає дублювати матеріал чужого предмета, до чого привчає практика "міжпредметних" зв'язків. Застосовуючи нову технологію, педагог часом дивується тому, як учні швидко освоїли необхідну інформацію, набули необхідних навичок.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Липова Л., Ренський С. Інтеграція індивідуальної роботи з іншими формами навчальної діяльності // Рідна школа. – 2002. - №1. – С.8-10.
- [2] Нікуліна Ф. Інтегральна технологія: основні ідеї та структура // Завуч (Перше вересня). – 2000. - № 23-24. – С.10.
- [3] Кірсанова В.О. Технологія інтеграції у навчально-виховному процесі // Математика (Перше вересня). – 1999. - №11. – С.4.
- [4] Степанюк А.В., Гадюк Т.В. Інтеграція природничих дисциплін у школі // Педагогіка і психологія. – 1996. - №1. – С.18-24.
- [5] Повстин О. В. Інтеграція знань як один з дидактичних принципів сучасної освіти. [Електронне джерело] / О. О. Повстин. – Режим доступу: http://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/files/povstyn_10.pdf
- [6] Павлова О. Д. Особливості та закономірності формування інтегрованих знань у учнів. / О. Д. Павлова // Інтеграція знань з предметів природничо-математичного циклу: проблеми та шляхи їх вирішення. Збірник матеріалів інтернет-семінару. / Упорядник Замулко О. І. – Черкаси, 2012.
- [7] Борисенко В. Інтегроване навчання: тематичний і діяльнісний підхід [Електронний ресурс] / Валентина Борисенко. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://mozaikaped.blogspot.com/2017/08/integrovane-navchannja-tematichnyj-i.html?view=flipcard>.

Алгоритми Охоплення Даних для Підвищення Економічної Ефективності й Експорту Держави та її Регіонів

Василь Горбачук
Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова
Національна академія наук України
Київ, Україна
GorbachukVasyl@netscape.net

Максим Дунаєвський
Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова
Національна академія наук України
Київ, Україна
MaxDunaievskiy@gmail.com

Сеїт-Бекір Сулейманов
Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова
Національна академія наук України
Київ, Україна
SBSuleimanov@kse.org.ua

Data Envelopment Algorithms to Increase Economic Efficiency and Export of Nation and Its Regions

Vasyl Gorbachuk
V.M.Glushkov Institute of Cybernetics
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
GorbachukVasyl@netscape.net

Maxym Dunaievskiy
V.M.Glushkov Institute of Cybernetics
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
MaxDunaievskiy@gmail.com

Seit-Bekir Suleimanov
V.M.Glushkov Institute of Cybernetics
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
SBSuleimanov@kse.org.ua

Анотація—Досліджено економічну ефективність з погляду територіально-адміністративних одиниць. Запропоновано підхід динамічної переоцінки для досягнення вищого рівня випуску за рахунок кращого розміщення ресурсів виробництва кожним регіоном. Запропоновано, удосконалено та продемонстровано алгоритм динамічного розрахунку цільової структури товарного експорту. Знайдено таку структуру для України, Одещини та Закарпаття на даних 2006–2016 рр. Незважаючи на більшу диверсифікацію, ця структура для Одещини дає гірший результат, ніж для України в цілому. Більшому експорту відповідає спеціалізація на провідних групах світового експорту. Ці групи характеризуються вищими ризиками. Ці групи характеризуються вищими ризиками і кадровими вимогами. Така спеціалізована структура для Закарпаття дозволяє збільшити його експорт на понад 10%.

Abstract—The economic efficiency has been elaborated from the perspective of territorial-administrative units. The approach of dynamic reassessment for achieving higher level of output is described as a result of better allocation of production resources by each region. The algorithm of target structure dynamic computing for commodity export has been suggested, improved and demonstrated. Such a structure for Ukraine, Odeshchyna and Zakarpattya has been found on the 2006–2016 data. Despite of a wider diversification, this structure for Odeshchyna gives worse result than for Ukraine as a whole. A larger export corresponds to specialization on the leading world export groups. Those groups are characterized by higher risks and personnel requirements. Such a specialized structure for Zakarpattya allows its export growth by above 10%.

Ключові слова—оптимальна структура, товарний експорт, міжнародна торгівля, економічне зростання.

Keywords—optimal structure, commodity export, international trade, economic growth.

I. ВСТУП

Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України веде моніторинг соціально-економічного розвитку регіонів за переліком показників оцінки, наведених у додатку 1 до постанови Кабінету Міністрів України від 21.10.2015 № 856 «Про затвердження Порядку та Методики проведення моніторингу та оцінки результативності реалізації державної регіональної політики» [1]. Рейтинг соціально-економічного розвитку міст України оприлюднював неурядовий аналітичний центр «Інститут реформ» за підтримки Асоціації агенцій регіонального розвитку України. «Інститут реформ» також публікував інвестиційний рейтинг регіонів України. Рейтинг інвестиційної привабливості регіонів України публікувала громадська організація «Інститут економічних досліджень та політичних консультацій», яка оприлюднює експортні профілі областей України за підтримки Програми «Лідерство в економічному врядуванні» (ЛЕВ) Агентства США для міжнародного розвитку (United States Agency for International Development, USAID). Індекси конкурентоспроможності регіонів України публікував фонд «Ефективне управління». Рейтингове агентство «Євро-Рейтинг» оприлюднює рейтинги міст і регіонів України. Регіональний рейтинг «Ведення бізнесу» (Doing Business, започаткований Світовим банком) для України поширює Офіс ефективного регулювання (Better Regulation Delivery Office, BRDO) за підтримки ініціативи EU4Business Європейського Союзу.

Питаннями експорту України займається низка організацій [2]: Рада експортерів та інвесторів при Міністерстві закордонних справ України (rei.mfa.gov.ua), до складу якої входять десятки торговельних палат, спілок, ділових рад, бізнес-асоціацій і підприємств; Рада експортерів (www.ukrexport.gov.ua) і Рада (Офіс) з просування експорту (Export Promotion Office) (epo.org.ua) при Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України; державні підприємства «Державний інформаційно-аналітичний центр моніторингу зовнішніх товарних ринків» («Держзовнішінформ», dzi.gov.ua) та «Укрпромзовнішекспертиза» (www.expert.kiev.ua); Асоціація експортерів і імпортерів «ЗЕД» (zed.ua); Рада з питань експорту продовольства (www.ukrainian-food.org).

II. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕГІОНІВ

У ході державного проекту «Створення на базі вітчизняного суперкомп'ютера засобів аналітичної підтримки супроводження етапів бюджетного процесу», який спільно виконували Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України», Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України та ряд інших організацій, були обчислені поквартальні характеристики реального та грошового ринків для

кожного регіону України протягом періоду економічного зростання. На кризу першою відреагувала будівельна галузь України, що мотивувало дослідження виробничих функцій – функцій Кобба–Дугласа. Для регіонів України використано показники Державної служби статистики України про середньомісячну нараховану заробітну плату (wage) W в розрахунку на одного штатного працівника, капітальні (capital) інвестиції C , реалізовану промислову продукцію (виробництво промисловості, production of industry) PI , виробництво послуг (production of services) PS за перший квартал 2017 р. (2017:I) та перше півріччя 2017 р. (2017:II), а також населення (population) P .

Щоб перейти до функцій Кобба–Дугласа в розрахунку на особу (працівника), обчислимо значення праці (labor) як $L = 3W$ для 2017:I та $L = 6W$ для 2017:II, капіталу

$K = \frac{C}{P}$, виробництва промисловості та послуг $PIS = \frac{PI + PS}{P}$. Тоді для оцінювання параметрів α , β ,

γ функції Кобба–Дугласа 2017:II $PIS = \gamma K^\alpha L^\beta$ на крос-секційних (cross-section) регіональних даних за кожний квартал є всі дані, а оцінювання можна здійснювати за допомогою MS Excel, використовуючи рівносильний вираз $\ln PIS = \ln \gamma + \alpha \ln K + \beta \ln L$. Для вимірювання ефективності достатньо обмежитися значеннями похибки лінійної регресії: більше значення похибки відповідатиме вищій економічній ефективності (більшому виходу PIS та/або меншим входам K і L).

У періодах 2017:I та 2017:II лише 3 регіони – Київ, Київщина, Донеччина – мали зарплату, вищу середньої по Україні, але при цьому Донеччина не мала значення виробництва промисловості та послуг на душу населення, вищого середнього по Україні: значення виробництва промисловості та послуг на душу населення, вищі середнього по Україні, мали 6 промислових регіонів – Дніпропетровщина, Київ, Полтавщина, Запоріжчина, Харківщина, Київщина. Проте Київ і Київщина не мали значення показників економічної ефективності, вищі середнього по Україні: значення показників економічної ефективності, вищі середнього по Україні, мали 8 агропромислових регіонів [1] – Полтавщина, Дніпропетровщина, Запоріжчина, Харківщина, Донеччина, Черкащина, Сумщина, Вінниччина. Таким чином, підтверджується ефективність агропромислового виробництва товарів і послуг з високою доданою вартістю (високотехнологічного виробництва) у багатьох регіонах.

На прикладі міст і районів ряду регіонів України – Дніпропетровщини, Запоріжчини, Одещини, Полтавщини [3], Харківщини, Львівщини [4], Києва [5] – показано роль людського капіталу для економічної ефективності. Вищий рівень людського капіталу веде до вищої економічної та еколого-економічної ефективності. Крім того, належний людський капітал потрібен для розвитку інноваційних спроможностей, основаних на сучасних освіті, науці, індустріальній організації.

III. ЦІЛЬОВА СТРУКТУРА ЕКСПОРТУ

За даними Міжнародного центру торгівлі, загальний світовий експорт істотно знижується за основними групами товарів (відповідно до класифікації Гармонізованої системи), починаючи з 2014 р. У 2016 р. загальний світовий експорт став меншим рівня кризового 2008 р., що є ознакою нової світової кризи, свідченням глобалізації та ролі України [2]. Світові торгівельні потоки все більше нагадують складну динамічну павутину, що потребує відповідних засобів своєї обробки і візуалізації [6–10].

Позначимо E_t^k та U_t^k експорт світу та експорт України (млн. дол.) відповідно за групою $k = 1, \dots, 99$. Нехай значенню $U_t^k (WU_T^k)$ експорту України відповідає найбільша (за роки $t = 2006, \dots, 2016$) частка

$$WU_T^k \equiv WU_{T(k)}^k = \max_{t=2006, \dots, 2016} \frac{U_t^k}{E_t^k} \text{ експорту України від світового (world); } E_t^0 = \sum_{k=1}^{99} E_t^k.$$

Помітно знижується частка (share) $SW_t^k = \frac{E_t^k}{E_t^0}$ колись найбільшої товарної групи $k = 27$ (палива мінеральні; нафта і продукти її перегонки; бітумінозні речовини; воски мінеральні).

Перенумеруємо у порядку строгого зростання номерів $j = 1, 2, 3, \dots$ наведено значення (у відсотках) частки

$$S^k = \frac{U_t^k (WU_T^k)}{U_T^0} \text{ експорту даної групи в загальному експорті України. У сприятливому (для України) сценарії, коли для кожної такої групи експорт України дорівнює своїй рекордній частці від світового, для деякого номера } J \text{ мають місце нерівності}$$

$$\sum_{j=1}^{J-1} S^j \leq 100 \leq \sum_{j=1}^J S^j \equiv S.$$

Для впорядкованих перших груп $k = 1, \dots, 99$ обчислимо значення рівноважної (equilibrium) частки

$$ES^k = \frac{100 \times S^k}{S} \text{ (у відсотках), а також значення}$$

$$EU^k = \frac{WU_{T(k)}^k \times E_{2016}^k \times 100}{S} \text{ експорту (млн. дол.)}$$

України за 2016 р. при сприятливому сценарії. При цьому сценарії загальний експорт України $EU^0 = \sum_{j=1}^J EU^j$ на

$$\frac{45500 - 37825}{37825} = 20.29\% \text{ перевищує спостережуваний.}$$

Нехай R^k вимірює (у відсотках) відношення (ratio) експорту E_{2016}^k за 2016 р. до максимального (за роки $t = 2006, \dots, 2016$) експорту світу (у номінальних дол.) для кожної групи k товарів. Щоб побудувати сприятливий сценарій з урахуванням динаміки світових ринків, обчислимо модифіковані (modified) для 2016 р. частки $MS^j = S^j \times R^j$, $j = 1, 2, \dots, L$, такі що $\sum_{j=1}^{L-1} MS^j \leq 100 \leq \sum_{j=1}^L MS^j \equiv M$, $L \geq J$.

$$\text{Цільовій частці } TS^j = \frac{100 \times MS^j}{M} \text{ групи } j = 1, \dots, L \text{ відповідає цільове значення}$$

$$TU^j = \frac{WU_{T(j)}^j \times E_{2016}^j \times 100 \times R^j}{M} \text{ експорту (млн. дол.)}$$

України за 2016 р. при модифікованому сприятливому сценарії. При цьому сценарії цільовий загальний експорт України $TU^0 = \sum_{j=1}^L TU^j$ на $\frac{48850 - 37825}{37825} = 29.15\%$ за

$L = 62$ групами перевищує її спостережуваний у 2016 р. експорт за 99 групами. Досягнення цільового експорту України дозволило би збільшити її валовий внутрішній продукт (ВВП) на $48.850 - 37.825 = 11.025$ млрд. дол., або на $\frac{11.025}{93.263} = 11.82\%$ відносно рівня ВВП 93.263 млрд. дол. на

2016 р. за даними World Economic Outlook Міжнародного валютного фонду.

Аналогічні міркування можна провести для кожного регіону n України; $U_t^k = \sum_n U_{tn}^k$ [2]. У сприятливому для

Одещини сценарії загальний експорт Одещини на $\frac{1520 - 1411}{1520} = 7.18\%$ менший її спостережуваного у 2016 р. експорту. Це свідчить про гіршу структуру експорту Одещини порівняно з Україною і цілому.

Обчислимо частку SU_t^k (%) експорту U_t^k кожної товарної групи $k = 1, \dots, 99$ у загальному експорті U_t^0 України за роками $t = 2006, \dots, 2016$. Наближене (approximated) значення такої частки визначається як $ASU^k = \max_t SU_t^k$. Тоді сума (sum) цих наближених

часток дорівнює $S = \sum_{k=1}^{99} ASU^k$. Беручи до уваги природне

обмеження $\sum_{k=1}^{99} SU_t^k = 100$, $t = 2006, \dots, 2016$, аналогічного

обмеження слід очікувати для цільових (target) часток

товарних груп у загальному експорті України:

$$\sum_{k=1}^{99} TSU_t^k = 100 \%, \text{ або } 1.$$

Якщо ціль – максимізація загального експорту України станом на 2016 р., то при заданих значеннях SW_{2016}^k для пошуку цільових досяжних значень $TSU^k = TSU_{2016}^k$ пропонується алгоритм, який складається з таких кроків.

Крок 1. Перенумеруємо всі товарні групи $k=1, \dots, 99$ у такому порядку $j=1, \dots, 98$, що $SW_{2016}^j > SW_{2016}^{j+1}$.

Крок 2. Визначаємо $T = 100$.

Крок 3. Обираємо початкове наближення

$$TSU_{2016n}^j = ASU_n^j = \max_t SU_{in}^j, \quad j=1, \dots, 99.$$

Крок 4. Якщо $S_n = \sum_{j=1}^{99} TSU_{2016n}^j > 100$, то визначаємо

$T = T - 1$ та обчислюємо $TSU_{2016n}^T = \min_t SU_{in}^T$. Для простоти вважаємо, що індекс t , де досягається $\max_t SU_{in}^j$,

– це індекс t , де досягається $\max_t WU_{in}^j$. Аналогічно

нехай індекс t , де досягається $\min_t SU_{in}^j$, – це індекс, де

досягається $\min_t WU_{in}^j$.

Крок 5. Якщо $\Delta_n = \sum_{j=1}^{99} TSU_{2016n}^j - 100 > 0$, то переходимо на крок 4, а в іншому випадку переходимо на крок 6.

Крок 6. Визначаємо $TSU_{2016n}^T = ASU_n^T - \Delta_n$ і зупиняємося.

Досягнення цільового експорту України дозволило би збільшити її ВВП на $46.697 - 37.825 = 8.872$ млрд. дол., або на $\frac{8.872}{93.263} = 9.51\%$ відносно рівня ВВП 93.263 млрд. дол.

Отже, зростання ВВП України, зростання ВВП України з темпом 10% є реалістичним, доцільним і бажаним.

Алгоритм з кроків 1–6 знаходить величину загального спеціалізованого на товарних групах $1, \dots, T$ досяжного експорту (млн. дол.) Закарпаття

$$U_{2016n}^0 = \sum_{j=1}^{T-1} E_{2016}^j \max_t WU_{in}^j + \sum_{j=T+1}^{99} E_{2016}^j \min_t WU_{in}^j + E_{2016}^T \left(\max_t WU_{in}^T - \Delta_n \right) = \sum_{k=1}^{99} TU_n^k = 1375.805.$$

Тоді загальний цільовий експорт Закарпаття $U_n^0 = \sum_{k=1}^{99} TU_n^k$ на $\frac{1375.805 - 1211.902}{1211.902} = 11.91\%$ більший спостережуваного експорту Закарпаття у 2016 р.

ВИСНОВКИ

Для успішної децентралізації кожний з наявних 605 районів України (включаючи райони міст) має принаймні частково фінансувати певний вищий навчальний заклад (університет, академію, інститут, коледж, технікум, училище чи їхню філію), виходячи з інтересів свого соціально-економічного розвитку.

Серед 20 знайдених пріоритетних експортних груп України тільки 5 характеризуються тим, що їхня максимальна частка у загальному експорті України перевищує середньосвітову частку, – це групи 72, 73, 62, 26, 76. Отже, є потреби підготовки кадрів України, здатних успішно працювати на світових ринках. в умовах ризику й невизначеності.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] В.М.Горбачук, О.С.Макаренко, М.С.Дунаєвський, В.І.Новодережкін, С.-Б.Сулейманов, “Вимірювання економічної ефективності регіонів України за перші квартали 2017 р.”, *Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку*, К.: Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, с. 258–260, 2017.
- [2] В.М.Горбачук, М.С.Дунаєвський, С.-Б.Сулейманов, “До динамічного розрахунку цільової структури товарного експорту України та її регіонів”, *Інфраструктура ринку*, вип. 16, с. 206–215, 2018.
- [3] В.М.Горбачук, П.Г.Неботов, В.І.Новодережкін, “Питання оптимальності змін середньої заробітної плати і капітальних інвестицій районів Полтавщини у 2015–2016 рр.”, *Інформатика та системні науки*, – Полтава: Полтавський університет економіки і торгівлі, с. 57–59, 2017.
- [4] В.М.Горбачук, А.І.Пілявський, В.О.Шевчук, “Зміни середньої виробничої ефективності районів Львівщини за 2015–2016 рр.”, *Інтеграція України у європейський та світовий фінансовий простір*, Львів: Університет банківської справи, с. 21–24, 2017.
- [5] В.М.Горбачук, В.В.Кулик, А.І.Пілявський, С.-Б.Сулейманов, “Комп’ютерний аналіз ефективності виробництва товарів і послуг у районах столиці України за 2016 р.”, *Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, К.: КНУ імені Т.Шевченка, с. 26–29, 2017.
- [6] [6] В.М.Горбачук, А.А.Сирку, С.-Б.Сулейманов, “Основи аналізу охоплення даних”, *Вісник Одеського національного університету. Економіка*, т. 22, вип. 1 (54), с. 178–182, 2017.
- [7] В.М.Горбачук, А.А.Сирку, С.-Б.Сулейманов, “Ірраціональність і раціональність у прийнятті рішень”, *Економічний вісник Запорізької державної інженерної академії*, вип. 2 (08), ч. 2., с. 132–136, 2017.
- [8] В.М.Горбачук, А.А.Сирку, С.-Б.Сулейманов, “Моделі аналізу охоплення нестандартних даних”, *Комп’ютерна математика*, № 1, с. 63–72, 2017.
- [9] В.М.Горбачук, М.С.Дунаєвський, А.А.Сирку, С.-Б.Сулейманов, “Оптимізаційні питання оцінювання щільності на реальних даних”, *Штучний інтелект*, № 3-4, с. 101–110, 2017.
- [10] [10] В.М.Горбачук, О.С.Макаренко, Є.Л.Самородов, М.С.Дунаєвський, А.А.Сирку, С.-Б.Сулейманов, “До інтегрованих систем візуалізації, аналізу та застосування часово-просторових даних”, *Глушковські читання*, К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», с. 35–376 2017.

Можливості Реалізації Змістової Лінії “Підприємливість та Фінансова Грамотність” на Уроках Інформатики

Ольга Дудка, Ірина Терешкун
кафедра інформатики
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»
Івано-Франківськ, Україна
olga_dudka@comp-sc.if.ua, tereshkun_iryana@comp-sc.if.ua

Possibilities for Implementing the Content Line “Entrepreneurship and Financial Literacy” in the Informatics Studies

O. Dudka, I. Tereshkun
dept. of Computer Science
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
olga_dudka@comp-sc.if.ua, tereshkun_iryana@comp-sc.if.ua

Анотація—У статті висвітлено сутність фінансової грамотності учнів. На основі аналізу сучасних наукових праць з досліджуваної проблеми, а також навчальних програм обґрунтовано актуальність проблеми реалізації змістової лінії “Підприємливість та фінансова грамотність”, особливості її реалізації на уроках інформатики, а також наведені завдання для реалізації даної змістової лінії.

Abstract—The article outlines the essence of students' financial literacy. On the basis of the analysis of modern scientific works on the studied problem, as well as educational programs, the relevance of the problem of implementing the content line "Entrepreneurship and financial literacy", the peculiarities of its implementation at the computer science lessons, and also the tasks for the implementation of this content line have been substantiated.

Ключові слова—економічне виховання, фінансова грамотність, економічна культура, змістова лінія, економічна освіченість

Keywords—economic education, financial literacy, economic culture, content line, economic education

I. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогоднішній день актуальною є проблема формування особистості майбутнього громадянина України. Сучасні навчальні програми, які розробляються відповідно до вимог Міністерства освіти і науки України і

спрямовані на забезпечення умов всебічного розвитку та виховання, постійно змінюються, доповнюються, вдосконалюються. Міністерство освіти і науки України розпочало масштабні реформи загальної середньої освіти. Оновлення навчальних програм відбувається на основі чинного Державного стандарту базової і повної загальної середньої освіти та широкого обговорення чинних програм (<https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/derzhavni-standarti>). Водночас зміни до програм мають на меті поступовий перехід на принципи демократичного навчання, передбачені концепцією «Нової української школи». Питання економічного розвитку і фінансової грамотності є одним з найважливіших для нашої держави, адже на сучасному етапі розвитку суспільства потрібні люди, які здатні системно і конструктивно мислити, швидко знаходити потрібну інформацію, приймати адекватно рішення, бути активним творчим учасником виробничого процесу, мати сформоване економічне мислення, вміти прогнозувати наслідки своїх рішень, брати участь у різноманітних формах економічної діяльності; вміти долати економічні труднощі в кризових ситуаціях. На формування саме таких якостей і спрямована змістова лінія «Підприємливість та фінансова грамотність». Тому так важливо ще зі школи формувати в учнів економічне мислення, уміння орієнтуватись в нестандартних ситуаціях, проявляти ініціативу, бути в майбутньому господарями рідної землі.

Вітчизняні вчені активно проводять педагогічні дослідження сучасних проблем економічної грамотності молоді, формування системи економічних знань, впливу результатів економічного виховання на соціально-економічну діяльність учнів, формування нового економічного мислення і свідомості у підростаючого покоління, як основного завдання економічної освіти в умовах ринкових відносин. Багато уваги дослідженню цієї проблеми приділяють такі сучасні вітчизняні і зарубіжні вчені, як О.Аксьонова, О.Камишанченко, Я.Корнаї, Я.Кузьмін, В.Лагутін, А.Моль, В.Радаєв, О.Сухомлинська, М.Фіцула, О.Падалка, А.Нісімчук, І.Смолюк, О.Шпак. Л.С. Бляхман, М.В. Вачевський, В.В. Кулішов, С.В. Лукаш, В.В. Мадзігон.

Метою даного дослідження є обґрунтування сутності фінансової грамотності та розкриття особливості її реалізації в навчальному процесі; показати важливість економічної освіченості в сучасному суспільстві, навчити та узагальнити теоретико-методологічні засади наскрізної лінії «Підприємливість та фінансова грамотність» на уроках інформатики.

II. ПІДПРИЄМЛИВІСТЬ ТА ФІНАНСОВА ГРАМОТНІСТЬ УЧНІВ

A. Освіта для життя у суспільстві 21 століття.

Концепція реформування української школи закладає докорінно нові підходи до освітнього процесу, пропонуючи педагогам переорієнтувати увагу на формування компетентностей учнів, відійшовши від традиційних методик простого передавання знань. Проект нового Державного стандарту освіти пропонує ключові компетентності. Наскрізна змістова лінія – «Підприємливість та фінансова грамотність», готує нас до життя у суспільстві 21 століття.

Мета наскрізної лінії – «сфокусувати» увагу й зусилля вчителів-предметників, класних керівників, зрештою, усього педагогічного колективу на досягненні життєво важливої для учня й суспільства меті, увиразнити ключові компетентності (<https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi/naskrizni-zmistovi-liniji>).

Питання фінансової грамотності ще повністю не досліджене. Адже колись не зверталася увага на економічну освіченість населення, але ми зараз чудово розуміємо який це важливий чинник. Саме вони мають стати неодмінним атрибутом будь-якої свідомої діяльності, передумовою успішної роботи практично в усіх сферах життя, невід'ємною складовою культурного розвитку молоді людини, формування економічного світосприйняття молоді, допомагають їй усвідомити правильність, істинність економічної теорії, зрозуміти економічні погляди, ідеї, співвіднести теорії із реальною поведінкою, готовністю діяти відповідно до засвоєних економічних знань. У сучасних умовах посилюється ціннісно-орієнтаційна вага соціально-економічних знань, зростає значення наявності в молоді людини економічного мислення. Внаслідок цього зростає потреба суспільства у перебудові діяльності освітніх закладів, у збагаченні матеріальної основи економічної освіти і вдосконаленні методів економічної грамотності, розвиток

ініціативності, енергійності, прагнення до успіху, вміння у різноманітних ситуаціях приймати нестандартні рішення[1]. Освіта, зорієнтована на формування компетентності «Підприємливість та фінансова грамотність» вимагає докорінно нових підходів до навчання. Доступні економічні поняття повинні реалізуватись на основі здобутих раніше дітьми знань, умінь і навичок, а також досвіду творчої діяльності [2].

B. Інтегрованість змісту освіти

Формування ключових компетентностей вимагає інтегрованості змісту навчання, що сприяє усвідомленню зв'язків між усіма предметами і поєднанню знань у різних сферах (математика, читання, трудове навчання, природознавство, інформатика), оскільки шкільний вік - це період набуття базових життєвих знань, навичок і формування процесів розуміння, усвідомлення власного життєвого досвіду, належного ставлення до навколишнього світу. Як зазначається у Проекті нового Державного стандарту освіти, інтеграція змісту освіти «має на меті підвищити якість освіти та позитивно вплинути на самооцінку учня / учениці. Інтегрування – не механічне об'єднання предметів (<https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/derzhavni-standarti>), інтегрування дає змогу відображати цілісну картину світу, максимально наближену до життя, бачити його зв'язки та розмаїття, позбутися фрагментарності засвоєних знань» [2].

C. «Підприємливість та фінансова грамотність» – одна з наскрізних ліній оновлених навчальних програм.

На етапі переходу до нових освітніх стандартів, зорієнтованих на розвиток ключових компетентностей, Міністерство освіти і науки України разом із громадськістю та освітянами здійснило оновлення навчальних програм, увівши чотири наскрізні тематичні лінії, зокрема і «Підприємливість та фінансова грамотність». Наскрізні лінії допоможуть ефективно поєднувати декілька освітніх завдань у процесі викладання усіх шкільних предметів. Реалізація змістових ліній у рамках окремих предметів вимагає змін у традиційних методах роботи з учнями.

Завдання сучасного вчителя зробити так, щоб необхідні суспільству освітні цінності, зокрема і фінансова грамотність, стали надбанням кожного учня. Змістова лінія «Підприємливість і фінансова грамотність» націлена на розвиток лідерських ініціатив, здатність успішно діяти в технологічному швидкозмінному середовищі, забезпечення кращого розуміння учнями практичних аспектів фінансових питань (здійснення заощаджень, інвестування, запозичення, страхування, кредитування тощо). Ця наскрізна лінія пов'язана з розв'язуванням практичних задач щодо планування господарської діяльності та реальної оцінки власних можливостей, складання сімейного бюджету, формування економічного ставлення до природних ресурсів (<https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi>).

III. ЗМІСТОВА ЛІНІЯ «ПІДПРИЄМЛИВІСТЬ ТА ФІНАНСОВА ГРАМОТНІСТЬ» У РАМКАХ ПРЕДМЕТУ ІНФОРМАТИКА

Зміст шкільної програми “Інформатика” потребує кардинальної перебудови з орієнтацією на міжнародні стандарти [3] та на формування компетентностей, які необхідні в 21 столітті. Такий інноваційний підхід передбачає, що методи навчання мають інтегрувати завдання з фінансової грамотності в навчальні цілі предмету інформатики. На заклики міністра освіти та науки України ми долучилися до розробки методичних рекомендацій та практичних прикладів з фінансової грамотності при вивченні інформатики у загальноосвітній школі, зокрема це можна зробити при вивченні різних тем:

- *Мережеві технології та Інтернет.* Виконання завдань дозволить знайти, завантажити та зберегти дані, отримані з Всесвітньої мережі про основні платіжні засоби і форми, види грошей.
- *Опрацювання текстових даних.* Виконання завдань передбачає створювати різного роду документи - від особистих листів до офіційних документів (листи, службові записки, статті, звіти, відомості, оголошення, рекламні матеріали тощо); створювати та змінювати текстові файли; впроваджувати графіки, формули, таблиці, об'єкти; використовувати списки, колонки, стилі, шаблони, посилання, зміст, розбивка тексту на сторінки, нумерація сторінок тощо.
- *Комп'ютерні презентації.* Зміст навчання дозволить обґрунтувати доцільність використання презентацій у своїй навчальній діяльності та повсякденному житті на прикладі створення реклами власного товару, оцінити якість презентації та дотримання вимог до її оформлення. Налаштувати показ презентації з обраної теми, додати ефекти зміни слайдів, використати ефекти анімації. Планувати представлення презентації та виступати з нею перед аудиторією.
- *Алгоритми і програми.* Виконання завдань дозволить використати доступні програми кредитних калькуляторів, програмувати опрацювання подій видачі кредитів. Обґрунтувати необхідність застосування подібних програм в життєвій практиці.
- *Опрацювання табличних даних.* Виконання завдань дозволить добирати та застосовувати доцільну функцію або засіб табличного процесора для розв'язання задачі розрахунку валютних курсів. Будувати та інтерпретувати діаграми зміни курсу національної валюти протягом певного періоду. Усвідомити значення електронних таблиць як засобу для фінансових розрахунків.
- *Електронна пошта та спільна робота в Інтернеті* Виконання завдань дозволить користуватися торговими сервісами Інтернет простору. Уміти працювати в команді та організовувати спільну

роботу в онлайн-середовищах (спільний пошук необхідних школяру товарів та послуг).

- Опрацювання мультимедійних об'єктів Виконання завдань дозволить перетворювати формати аудіо-та відеофайлів. Будувати відеоряд на тему: «Фінансову культуру українського народу в різні історичні епохи». Використовувати контент з інтернет-джерел з урахуванням авторських прав. (<https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi/naskrizni-zmistovi-liniyi>).

IV. ПРИКЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ ЗМІСТОВОЇ ЛІНІЇ

Детально розкриємо розділ Опрацювання табличних даних. Діти які не вивчали інформатику з 2 класу, тему «Табличний процесор» починають вивчати з 7 класу і за навчальним планом виділено 8 годин. У 8 класі поглиблюють уже здобуті знання з 7 класу і виділено на вивчення теми «Технології опрацювання числових даних у середовищі табличного процесора» 10 годин. У 9 класі на тему «Табличні величини та алгоритми їх опрацювання» виділено 10 годин.

Для тих хто вивчає інформатику з 2 класу «Табличний процесор» починають вивчати з 7 класу і на тему «Опрацювання табличних даних» виділено 8 годин. У 8 класі дана тема не вивчається. У 9 класі на тему «Опрацювання табличних даних» виділено 10 годин.

У програмі з “Інформатики” для 10-11 класу «Табличний процесор» на рівні стандарт вивчають в 11 класі і на тему “Системи опрацювання табличних даних” виділено 11 годин; на академічному рівні в 10 класі вивчають тему “Системи опрацювання даних, розміщених у таблицях” на яку виділено 11 годин; на рівні поглибленого вивчення в 10 класі на вивчення теми «Використання табличного процесора Excel для обробки числової інформації» виділено 30 годин; на профільному рівні у 10 класі також виділено 30 годин. (<https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi>)

Тому постає важливе завдання розробки методичного комплексу завдань для реалізації наскрізної змістової лінії «Підприємливість та фінансова грамотність» на уроках інформатики в загальноосвітніх середніх навчальних закладах України.

Для досягнення поставленої мети авторами розроблено сайт “Підприємливість та фінансова грамотність”, який створено за допомогою оновленої версії Google-сайтів (рис. 1).

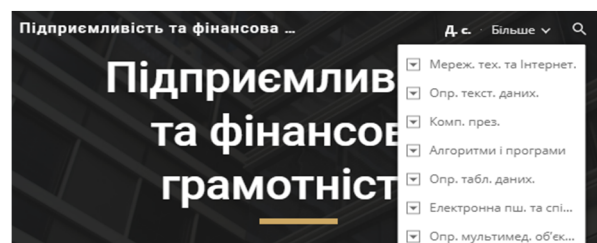


Рис. 1. Меню сайту «Підприємливість та фінансова грамотність»

На сайті висвітлюються теоретичний матеріал, підбрані завдання за допомогою яких, можна здобути економічну грамотність. На даний момент процес розробки сайту продовжується, зокрема розробляються завдання з інформатики для 10-11 класів для вивчення і реалізації даної змістової лінії.

Наведемо приклад реалізації змістової лінії «Підприємливість та фінансова грамотність» на уроці інформатики в 11 класі рівня стандарт при вивченні теми «Системи опрацювання табличних даних. Аналіз даних у середовищі табличного процесора».

Завдання. Задана таблиця з даними про прибутки підприємства за перше півріччя року. Побудувати графік прибутків за вказаний період і дати прогноз щодо цього показника на наступні місяці.

ТАБЛИЦЯ 1. ПРИБУТОК ПІДПРИЄМСТВА

Прибуток за перше півріччя							
Місяць	1	2	3	4	5	6	7
Приб., тис. грн.	584	612	760	782	905	1 147	2476

Розв'язок. Обираємо тип діаграми Графік і вид графіка – графік розвитку процесу за часом без маркерів. Далі робимо посилання на дані таблиці, додаємо заголовок діаграми. На свій розсуд виконуємо форматування графіка та одержуємо результат (рис.1)

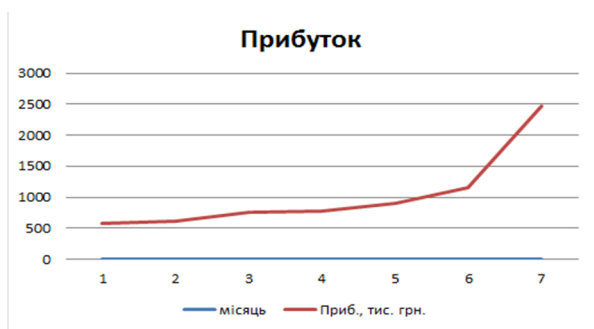


Рис. 2. Прибуток підприємства

Щоб зробити прогноз прибутків підприємства на наступний місяць, виконуємо такі дії: виділяємо лінію графіка та з контекстного меню обираємо пункт Додати лінію тренду. На вкладці «Тип» вибираємо тип лінії, яка щонайкраще апроксимує лінію графіка прибутків, наприклад, лінійну функцію.

Також для наглядності можна вивести на графіку рівняння цієї функції $y=246,11x+53,571$ (рис.2)

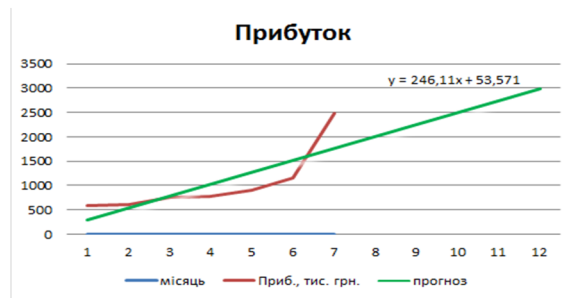


Рис. 3. Прогноз прибутку

Щоб одержати числове значення прогнозу, обчислюємо значення апроксимуючої функції при $x=8$. (рис. 3)

	H	I	J	K	L	M
	7	8	9	10	11	12
	2476	2022,45	2268,56	2514,67	2760,78	3006,89

Рис. 4. Прогноз прибутків

Таким чином, за підсумками першого півріччя в грудні очікується отримання прибутку 3006,89 тис. грн.

V. ВИСНОВКИ

Змістова лінія «Підприємливість та фінансова грамотність» спрямована не лише на засвоєння конкретних соціально-економічних знань і вмій, а й на те, щоб надавати можливість оволодівати засобами їх застосування в різноманітних ситуаціях, навчити самостійно економічно мислити і дотримуватись моральної економічної поведінки. Теми, які розкриваються при вивченні інформатики сприяють реалізації наскрізної змістової лінії «Підприємливість та фінансова грамотність», зокрема сприяють формуванню фінансової грамотності, підвищенню рівня обізнаності з можливостями та проблемами сучасного світу в контексті потреб суспільства, перспектив розвитку національної економіки та глобальних технологічних змін.

Представлене дослідження орієнтоване на надання науково-методичної підтримки вчителям для реалізації наскрізної змістової лінії «Підприємливість та фінансова грамотність» на уроках інформатики у загальноосвітніх середніх навчальних закладах України.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Кукурудза І. І. Проблеми формування економічного мислення у молоді в сучасній Україні та шляхи їх вирішення [Електронний ресурс]. Вісник економічної науки України, 2008, № 1, С. 58–61, Режим доступу до ресурсу: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/93476/15-Kukurudza.pdf?sequence=1>.
- [2] Нова школа [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://osvita.ua/doc/files/news/520/52062/new-school.pdf>.
- [3] Дудка О.М., Никорак Я.Я. Проблема реформування ІТ-освіти в Україні, Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: матеріали статей міжнар. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 23-28 травня 2016 р., Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2016, С. 65-66. <http://itcm.pnu.edu.ua/ua/modules/general/view.php?id=8>

Integrated Interactive Algorithmic Approach in Physics Education

Igor Kogoutiuk
department of Physics
Minnesota State University
Mankato, MN, USA
Igor.kogoutiuk@mnsu.edu

Pavlo Kohutiuk
department of Physics
Taras Shevchenko National University
Kyiv, Ukraine

Інтегрований Інтерактивний Алгоритмічний Підхід До Викладання Фізики

Ігор Когутюк
факультет фізики
Університет Мінесоти
Манкато, США
Igor.kogoutiuk@mnsu.edu

Павло Когутюк
Фізичний факультет
КНУ ім. Тараса Шевченка
Київ, Україна

Abstract— The various approaches to use of computer technology in educational process and especially in teaching of Physics are reviewed and analyzed. First among them is a business-centered approach which considers the computers as the means to implement the business-effective (maximum profit) model of education, by increasing the number of students and reducing the role of faculty or totally eliminating them. In the second “old-school approach” computers are considered at best as the auxiliary methods of widening the lecturer’s spectrum of teaching tools. In the third - integrated interactive algorithmic approach (I^2A^2), computer technology is integrated in the educational process, and promotes the student-centered learning model. The structure, features and components of I^2A^2 are considered in details. While the elements of I^2A^2 are partially developed for entry-level physics education, they are almost non-existent for specialized undergraduate courses and are totally missing at graduate and post-graduate levels. The authors consider the ways of developing such elements and implementing them in Physics education.

Анотація— Розглянуто та проаналізовано різні підходи до використання комп’ютерних технологій у навчально-виховному процесі та, зокрема, в навчанні фізики. Перший з них - бізнес-центрований підхід, який розглядає комп’ютери як засіб реалізації бізнес-ефективної (максимальної вигоди) моделі навчання шляхом збільшення кількості студентів та зменшення ролі та кількості викладачів аж до повного їх усунення. У другому підході властивому переважно представникам “старої школи” комп’ютери в кращому випадку розглядаються як розширення спектру навчальних засобів викладача. У третьому - інтегрований інтерактивний алгоритмічний підхід (I^2A^2), комп’ютерні технології інтегровані в навчальний процес та базовані на моделі навчання орієнтованій на потреби студента. Детально

розглянута структура, особливості та компоненти I^2A^2 . Хоча елементи I^2A^2 частково розроблені для викладання фізичних дисциплін початкового рівня, вони практично не існують для спеціалізованих курсів з бакалаврату та повністю відсутні на рівні магістратури та докторантури. Автори розглядають шляхи розробки таких елементів та їх впровадження в галузі прикладної фізики

Keywords— Education, physics, computer technology, web-based home assignment, applets, interactive approach

Ключові слова— Освіта, фізика, комп’ютерні технології, домашнє завдання на веб-сайті, аплети, інтерактивний підхід

VI. INTRODUCTION

From the early years of computers, the educators have recognized their powerful potential for improving the quality and effectiveness of teaching. Computers were pretty expensive those days and its acquirement by educational institutions often required persuasion of the state officials as well as luring donors from private business describing to them the benefits of such purchase. Sometimes such persuasions were making the impression that introduction of computers can make the educational process more financially sustainable or even more profitable. According to such anticipations, the introduction of computers could make courses remotely accessible to larger number of students, thus making savings on teacher’s salary by cutting the number of faculty. . The number of remote classrooms with network connection to base campuses were build across the US. Unfortunately the initial expectations failed pretty soon. One of the authors¹ taught at such a class in Iowa, US about 22 years ago. From about 20

initial students in each of the remote network classes at average only two completed the course. Later such centers were converted into on-line courses but there are still a lot of reservations about such system among students, faculties and future employers. First of all, from author's experience, only about 10-20% of the student population can master the material in a self-paced mode and this number didn't change significantly since the times when knowledge and skills could be extracted from books in the silence of library. The rest of the students prefer the live interaction with the instructor. There are also problems with cheating that can't be addressed effectively in a remote location. In Physics there is also a very specific problem of getting hands-on experience in Physics labs. Such experience is crucial for a student's future employment. Initial expectations of substituting lab classes with computer-simulated experiment failed in providing such experience and skills. It could be compared to learning how to ride a bicycle by playing video games. The other approach was in designing small affordable lab kits that were sent to student's homes so they can do some experimental work in their kitchens or garages. Their costs were about 1000 times less compared to the cost of real lab equipment, and as a result they were too oversimplified and didn't develop the necessary hands-on skills for students. The on-line courses still exist and are highly marketed, but the employers, if having a choice, prefer to hire graduates educated in traditional classroom setting.

VII. THE CONTENTS AND RESEARCH RESULTS

The initial failure of high expectations to computerizing the educational process led to skepticism and even opposition of some faculty to widening the use of computers in classrooms. They considered their role only as one of the teaching illustration tools with little better features than slide, video, or document camera projectors.

The situation changed quickly with the development of worldwide network. Pretty soon the solutions to almost every problem, from almost every undergraduate and graduate Physics textbook became available to students on the web through free search or as a paid-on service. The traditional role of homework as a part of the educational process and student's assessment become compromised due to widely-spread cheating. To address the situation, the instructors had to redesign the role of homework and significantly reduce its contribution to the course grade. The other choice was development of instructor's own set of problems that were modified or changed every year or two. The publishers of most popular Physics textbooks tried to solve this issue by developing the on-line algorithmic home assignment systems, such as WileyPlus, Mastering Physics and WebAssign [1-3]. In such a system the students are assigned a set of the same problems with different data values. It requires the development of algorithmic solution for each problem in order to enable the automatized computer grading. Such development of algorithms for thousands of problems is a time and money consuming process and became affordable mainly to the publishers of most popular Introductory Physics textbooks. The adoption of web based homework assignment systems resulted in some reduction of cheating (unfortunately not in its total elimination) and substantial time saving for lecturers on

grading the student's work. Pretty soon the developers and publishers started to offer more sophisticated systems so students could be given feedback based on the results of grading and reference to the textbook materials that should be re-mastered. At the same time publishers began supplementing the described system with enhanced tools for teaching, such as prepared Power Point presentations for each covered topic as well as various physics applets that visualized the solutions to the example problems with interactive animations.

The introduction of feedback for students and faculty in such systems can be considered as the beginning of the Interactive Algorithmic Method. In our opinion such approach could be extended to cover the Physics education in more systematic and structured way. In brief, it should be Integrated, multilevel, algorithmic, interactive and self-learning approach. For brevity, we will name it I^2A^2 - Integrated Interactive Algorithmic Approach. Such method can be embedded in almost all stages of the educational process:

- The first component of I^2A^2 , as mentioned before, is the development of individual data problems in student's homework. The results are automatically analyzed and graded by the algorithm that should be provided for each problem.
- The web assigned homework program could be extended to enable interactive guidance of students through retraining process in the areas where their skills in Mathematics or Physics need improvements.
- The other extension of such program could analyze data and supply faculty with a recommendation on adjusting the pace of teaching and volume of material covered. It can also identify students who need additional help before they fail the course. It could also keep track of students with disabilities who are eligible for extended examination time and remind the lecturer about the necessity of special arrangements for them.
- The very similar algorithmic set of problems can be used for testing the students during exams and quizzes. It has the potential of reducing cheating and solution copying especially in large classes (100-350 students), but the number of precaution measures should be undertaken. It should secure the access to test to only students in the particular room at a particular time through the local network, and limit the ability of students to search for help during the exam.
- The additional connected algorithmic program can address the student's preparations for lab experiments. The online interactive simulation program could be accessed by students at home to provide the necessary training before using the actual lab equipment. During the lab experiments that employ data collecting interface, students can supplement them with analysis and conclusions allowing the computer to grade their work.
- In the combined complex approach the student's success in homework, tests, labs and other components

of the course can be evaluated and graded according to the algorithm provided by faculty [4].

- On the completion of the course the algorithmic program can estimate whether the goals and outcomes for the given course that are set by faculty in the syllabus, or by educational authorities at the institutional, or even national levels as accreditation requirements are reached.
- The further development of algorithmic programming can enable institutional administration to monitor and compare faculty teaching based on the data automatically collected by the program in previously described activities. The data can also be used by state and national educational boards in order to rank the institutions. Of course the criteria for evaluating the faculty and ranking the institutions should be set very carefully in order not to promote the grade inflation, and subjective assessment.

Currently some elements, of such system (homework assignment with automatic grading, reference service) are more or less developed for Introductory Physics course of 100-200 levels [1-4]. Above such level the homework assignment system is totally absent even just for grading student's work.

There is a great need for the development of algorithmic approach for higher level Physics courses (Mechanics, Electrodynamics, Quantum Mechanics, etc.). Unfortunately, there are few substantial obstacles in such a work. First of all, the sets of problems available in traditional format for such courses are very limited and contain about 50 to 100 times less problems than for introductory physics courses. Secondary, the writing of such algorithms involves substantial amount of work and time [5, 6]. The third reason is the number of students in higher level courses (about 20-50 times less) compared to introductory ones, so creation of such web based assignments and tests doesn't bring much profit to developers. Anyway such programs can be developed through student involvement in a course or diploma thesis projects [6].

As an example, we consider in more details the above mentioned project [6]. It addresses the problem of calculating quantum-mechanical commutators of secondary quantization operators in the course of Advanced Quantum Mechanics (graduate or postgraduate level). In order to develop the algorithm of such procedure, the quantum physics operators were mapped to their computer representation by using object-oriented programming (OOP). Such approach could be considered as the form of application design and not as of feature of specific programming language. The software application may be seen as composed of a collection of individual units, which are called objects. They interact one with another through methods or events. The set of functions or procedures were combined into modules. To represent the quantum physics models and their mathematical expressions in terms of OOP the binary tree technique was used. The set of rules for commutators, combination of operators and order of evaluation were presented in the form of binary tree expressions. To evaluate a tree the C++ preorder recursive algorithm was used. Developed such a way program is flexible and could be extended by other programmers to meet not only

educational needs, but to serve also as a powerful tool in increasing the speed of research calculations in theoretical physics.

CONCLUSIONS

Summarizing, the development and implementation of the whole complex of integrated interactive algorithmic approach can result in extension of available educational tools, time saving on homework and test grading for faculty; increased availability of help and tutoring for students during work on homework problems and preparation for lab classes, class adaptive design of the courses, and generally in increased quality of computer-assisted teaching.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [4] John Wiley & Sons, Inc [Electronic resource]. Available at: <https://www.wileyplus.com>
- [5] Personalize the teaching and learning experience [Electronic resource]. Available at: <https://www.pearsonmylabandmastering.com/northamerica/masteringphysics/>
- [6] WebAssign -extensive content, instant assessment, and superior support. [Electronic resource]. Available at: <https://www.webassign.com/>
- [7] C program to calculate the Grade of Student using Percentage [Electronic resource]. Available at: <https://sillycodes.com/c-program-to-calculate-grade-of-student/>
- [8] Algorithmic Solutions Software GmbH [Electronic resource]. Available at: <http://www.algorithmic-solutions.com/leda/index.htm>
- [9] Filipovych R . *Development Of the software solution to the calculation of quantum mechanical commutators* , Master of Science Thesis, Advisor – Dr.Igor Kogoutiuk, Minnesota State University – Mankato, 2006.
- [7] Geoff Lee *Object –Oriented GUI Application Development*. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 1993 .
- [8] Ray E. Eberts *User Interface Design*. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 1994.

СЕКЦІЯ 3.

***Теорія інформації, кодування
та перетворення форми інформації***

SECTION 3.

***Information theory, coding and
transformation of information form***

Декодування Стирань в Паралельних Циклічних Кодах

Василь Семеренко, Ольга Тарасова, Сергій Луцков
кафедра обчислювальної техніки,
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
vpsemerenko@ukr.net, tarasovaolga016@gmail.com, lutskov 96@gmail.com

Decoding the Erasures in Parallel Cyclic Codes

Vasyl Semerenko, Olga Tarasova, Sergiy Lutskov
Department of Computer Technique
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine,
vpsemerenko@ukr.net, tarasovaolga016@gmail.com, lutskov 96@gmail.com

Анотація—Розглядається декодування пакетів стирань в багатоканальних системах зв'язку на основі теорії паралельних лінійних послідовнісних схем (ЛПС). Пропонується метод ітеративного декодування паралельних циклічних кодів на основі ступеневої перестановки.

Abstract—The decoding with burst of erasures in multichannel transmission systems based on the theory of parallel linear finite-state machine (LFSM) is considered. The method of iterative decoding of the parallel cyclic codes with the help of power permutation is suggested.

Ключові слова—циклічні коди; лінійна послідовнісна схема; ітеративне декодування; пакети стирань

Keywords—cyclic codes; linear finite-state machine (LFSM); iterative decoding; erasure burst errors

I. ВСТУП

Шеннонівська теорія завадостійкого кодування [1] теоретично узагальнила рівень розвитку засобів зв'язку середини 20 століття, для якого були характерні такі особливості:

- послідовне надходження даних,
- випадковий спосіб появи помилок в каналі,
- зменшення ймовірності появи помилок зі збільшенням кратності помилки,
- відсутність пам'яті в каналі зв'язку.

Сучасна передача даних може бути організована одночасно від багатьох передавачів до багатьох приймачів по різним каналам. Така ситуація типова для

комп'ютерних мереж, цифрового радіомовлення і телебачення, оптоволоконних систем зв'язку та ін.

За останні десятиріччя з'явилися нові типи зв'язку, зокрема, безпроводний і мобільний зв'язок, теоретичною моделлю яких стали канали з пам'яттю. Характерною особливістю таких каналів стали нові типи помилок (стирання, пропадання символів), які часто групуються, тобто об'єднуються в пакети.

Численні дослідження показали, що в результаті опромінення світлом і радіацією динамічної напівпровідникової пам'яті в ній виникають багаторозрядні стирання даних [2,3].

Мета цієї роботи – розробка ефективних алгоритмів декодування пакетів стирань в багатоканальних системах зв'язку на основі математичного апарату лінійних послідовнісних схем.

II. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДІВ

В сучасних багатоканальних системах передачі даних реалізована паралельна передача даних: біти одного байту або слова (2, 4, 8 байт) поступають одночасно. Кожний байт або слово можна інтерпретувати як один ρ -бітовий символ ($\rho=8,16,32,64$). Таким чином, передачу даних будемо розглядати як передачу бітів даних по ρ паралельним каналам. Такий спосіб передавання даних є символно-паралельним згідно [4]. Послідовність з m символів будемо розглядати як кодове слово циклічного коду, яке формується кодером на боці передавача та декодується декодером на боці приймача. В цьому випадку знадобляться математичні перетворення тільки в двійкових полях Галуа $GF(2)$. Такий спосіб інтерпретації даних означає, що паралельний циклічний код

складається з ρ кодових слів z_i ($i = 1 \dots \rho$), об'єднаних в кодову матрицю:

$$Z_{(\rho)} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{\rho 1} & z_{\rho 2} & \dots & z_{\rho n} \end{bmatrix}, GF(2). \quad (1)$$

Можливі два типи паралельних циклічних кодів: складені та інтегровані [5].

В подальшому будемо використовувати лише складені паралельні циклічні коди. Кожний рядок кодової матриці (1) такого коду представляє собою звичайний циклічний (n, k)-код. Тому для кодування складеного паралельного (n, k, ρ)-коду необхідно ρ традиційних кодерів циклічного (n, k)-коду, які працюють одночасно.

Як математичну модель циклічних кодів можна використати автоматну модель [6], яка базується на теорії лінійних послідовнісних схем (ЛПС). Згідно [7], ЛПС – це лінійний скінчений автомат з ρ входами, m виходами і r комірками пам'яті. Найпростішою апаратною реалізацією ЛПС є звичайний регістр зсуву з лінійним оберненням зв'язком. Таким чином, теоретичною основою паралельних циклічних кодів при декодуванні кодової матриці (1) може бути паралельна ЛПС, функціонування якої визначається функцією станів (переходів)

$$S(t+1) = A \times S(t) + B_{(\rho)} \times Z_{(\rho)}(t), GF(2) \quad (2)$$

де t – дискретний час, $A = [a_{ij}]_{r \times r}$, $B_{(\rho)} = [b_{ij}]_{r \times \rho}$ – характеристичні матриці ЛПС, $S = [s_i]_r$ – слово стану, $Z_{(\rho)} = [z_{ij}]_{n \times \rho}$ – вхідне слово.

Матриця A визначає внутрішню структуру ЛПС. Серед різних типів ЛПС найбільш розповсюдженою є рекурсивна ЛПС типу 1 (типу Галуа) з матрицею

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & g_0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & g_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & g_{r-2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & g_{r-1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Елементи останнього стовпця матриці A із (3) представляють собою коефіцієнти породжувального поліному

$$g(x) = g_0 + g_1 x + \dots + g_{r-1} x^{r-1} + x^r, GF(2). \quad (4)$$

Для декодування складеного паралельного (n, k, ρ)-

коду знадобиться один декодер (паралельний декодер), побудований на основі характеристичних матриць A і $B_{(\rho)}$ (рис.1).

Максимальна кількість каналів, яка може бути представлена з використанням математичного апарату ЛПС з функцією (2), дорівнює r , тому далі будемо розглядати складений паралельний циклічний (n, k, r)-код, кодові слова якого поступають по r входам (каналам), а його кодова матриця (1) містить r рядків ($r = \rho$). Для опису структури входів ЛПС використовується характеристична матриця $B_{(r)}$, тому у випадку r -входової паралельної ЛПС над полем $GF(2)$ має бути така одинична ($r \times r$)-матриця B :

$$B_{(r)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

III. ПРИНЦИПИ ДЕКОДУВАННЯ СТИРАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДІВ

Розряди кодової матриці (1), яка формується передавачем, можуть приймати значення з множини $M = \{0, 1\}$. Розряди кодової матриці (1), яка формується на виході демодулятора на боці приймача, можуть приймати значення з множини $M_x = \{0, 1, x, \bar{x}\}$. Символи x та \bar{x} можна використовувати для позначення стирань відповідних розрядів.

Для виконання операцій над кодовою матрицею (1) з використанням ЛПС в алфавіті значень множини M_x необхідно перейти від поля Галуа до іншої алгебраїчної структури – комутативного кільця R з відповідними операціями додавання і множення [6].

Якщо у різних рядках кодової матриці (1) може зустрічатись до m стирань, тоді необхідно розрізняти значення кожного стирання, тобто використовувати розширений алфавіт значень множини $M_{ext} = \{0, 1, x_1, x_2, \dots, x_m, \bar{x}_m\}$.

В загальному випадку, окрім випадкових стирань, можуть зустрічатись також традиційні помилки типу логічної інверсії.

В результаті декодування всіх зазначених помилок буде отримано слово помилки $S_{err}(n)$ згідно (2), яке буде містити як ненульові, так і невизначені значення x або \bar{x} . Для виявлення кожного типу помилок виконується окрема процедура, зокрема для випадкових стирань необхідно розв'язати алгебраїчну систему рівнянь методом Гауса.

Розглянемо окремо тип помилок, які ефективно декодуються за допомогою паралельних циклічних кодів – пакети стирань в кодовій матриці (1).

обмежена відомою границею Рейгера [8], згідно якої максимальна довжина виправленого пакету помилок не повинна перевищувати половині розрядності синдрому, тобто $r/2$.

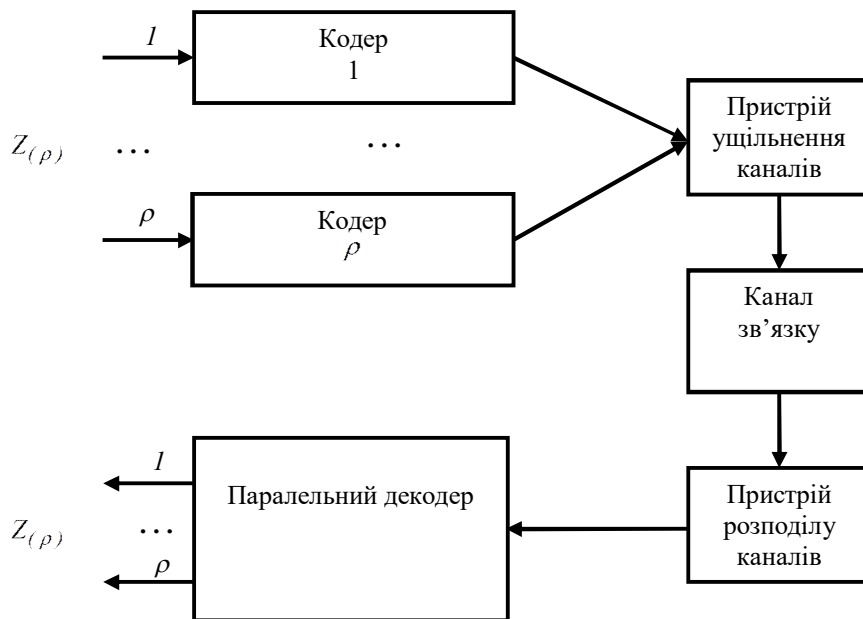


Рис. 1. Апаратна реалізація складеного паралельного циклічного коду

ОЗНАЧЕННЯ 1. Циклічним розрідженим пакетом Δ_{any}^{ers} стирань складеного паралельного циклічного (n, k, r) -коду називається такий тип помилок, коли з j -го по $(j+r-1) \bmod n$ -й розряди i -го рядка кодової матриці (1) можуть бути як стерті, так і безпомилкові символи.

ОЗНАЧЕННЯ 2. Циклічним суцільним пакетом Δ_{sol}^{ers} стирань складеного паралельного циклічного (n, k, r) -коду називається такий тип помилок, коли з j -го по $(j+r-1) \bmod n$ -й розряди i -го рядка кодової матриці (1) розташовані лише стерті символи.

Як впливає з наведених означень розглядатися пакети стирань довжини $p = r$.

Як і для одно каналного зв'язку, розріджений пакет Δ_{any}^{ers} стирань можна також розглядати як деяку сукупність стертих символів і декодувати кожний стертий символ окремо. В цьому випадку коректуюча здатність коду буде обмежена мінімальною кодовою відстанню цього коду.

Можна також декодувати розріджений пакет Δ_{any}^{ers} стирань подібно декодуванню розріджених пакетів інверсних помилок. Тоді коректуюча здатність коду буде

і лише для циклічних суцільних пакетів Δ_{sol}^{ers} стирань максимальна довжина виправленого пакету дорівнює розрядності синдрому, тобто r [9]. Тому доцільно розріджені пакети стирань переводити в суцільні пакети стирань. Саме з цих міркувань далі розглядаються лише суцільні пакети стирань (рис. 2, символом "X" позначено стерті розряди).

Для декодувань суцільних пакетів стирань зручним способом їх виявлення є заміна всіх стертих символів нулями. Це дає можливість виконувати всі математичні розрахунки в двійкових полях Галуа.

IV. ЛОКАЛІЗАЦІЯ СУЦІЛЬНИХ ПАКЕТІВ СТИРАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДІВ

Нехай в кожному каналі є суцільний пакет стирань довжиною r , причому в першому каналі пакет стирань починається в розряді j , а в кожному наступному каналі початок пакету зсувається на один розряд ($j = l \div n$).

В результаті, в i -му каналі суцільний пакет стирань Δ_{sol}^{ers} починається в розряді $(j+i-1) \bmod n$, а закінчується в розряді $(j+r+i-2) \bmod n$. Тоді має місце така теорема.

ТЕОРЕМА 1. Якщо в складеному паралельному циклічному (n, k, r) -коді суцільний пакет стирань Δ_{sol}^{ers} довжиною r починається в розряді $n-r+1$, тоді після подачі на вхід ЛПС, яка знаходиться в нульовому початковому стані $S(0)$, кодової матриці (1), значення

Для виправлення зазначених стертих розрядів достатньо записати на їх місце отриманий синдром помилки $S_{err}^{(\tau)}(n+\vartheta)$.

Основною проблемою, яка виникає при декодуванні паралельних циклічних кодів, є розрізнення помилок в

$z_{1,1}$	$z_{1,2}$	...	X	X	X	X	...	$z_{n-2,1}$	$z_{n-1,1}$	$z_{n,1}$
$z_{2,1}$	$z_{2,2}$	...	...	X	X	X	X	...	$z_{n-1,2}$	$z_{n,2}$
...	...	...	...	...	X	X	X	X	...	...
$z_{r,1}$	$z_{r,2}$	$z_{r,3}$	$z_{r,4}$	$z_{r,5}$	...	X	X	X	X	$z_{n,r}$

Рис. 2. Суцільний пакет стирань в кодовій матриці

слова стану $S(n)$ ЛПС буде дорівнювати r стертим символам в першому рядку кодової матриці (1).

Доведення. Після подачі на вхід ЛПС, яка знаходиться в нульовому початковому стані $S(0)$, кодової матриці (1) без помилок, знову отримаємо нульовий стан ЛПС: $S(n) = S(0)$. Після заміни стертих позицій r старших розрядів першого рядка кодової матриці (1) нулями отримаємо кодову матрицю (1), в якій частина зазначених розрядів буде помилковою. При наявності інверсних помилок в контрольних r розрядах кодової матриці (1) їх значення будуть міститись в розрядах слова стану $S(n)$, тобто синдрому помилки $S_{err}^{(\tau)}(n)$.

Для виправлення зазначених стертих розрядів достатньо записати на їх місце отриманий синдром інверсної помилки $S_{err}^{(\tau)}(n)$ (в транспонованому вигляді: перший розряд синдрому записується в n -й розряд першого рядка кодової матриці).

Теорему 1 можна узагальнити на випадок, коли пакет стирань може знаходитися в будь-якому місці i -го рядка кодової матриці (1).

ТЕОРЕМА 2. Якщо в складеному паралельному циклічному (n, k) -коді суцільний пакет стирань Δ_{sol}^{ers} довжиною r починається в розряді j i -го рядка кодової матриці (1), тоді після подачі на вхід ЛПС, яка знаходиться в нульовому початковому стані $S(0)$, кодової матриці (1), а потім нульового слова довжиною ϑ ($\vartheta = (j+r+i-2)$), значення слова стану $S(n+\vartheta)$ буде дорівнювати r стертим символам в i -му рядку кодової матриці (1).

різних каналах. Як показано в [5,6], сусідні помилки і пакети інверсних помилок однакової конфігурації, які розташовуються в сусідніх каналах з зсувом на один розряд, мають однаковий синдром помилок.

Схожа ситуація виникає і у випадку пакетів стирань після заміни їх нулями. Тоді такий пакет з нулями, який розташований в i -му рядку кодової матриці (1) з початком в розряді j , має однаковий синдром помилок з пакетом нулів, який розташований в $(i+1)$ -му рядку кодової матриці (1) з початком в розряді $j+1$.

Однак, у випадку стирань ми вже знаємо область пошкоджених розрядів, тому можна точно ідентифікувати номер каналу. Проблема виникає лише тоді коли мають місце діагональні стирання в одночасно в кількох каналах, причому кількість пошкоджених каналів парна (наприклад, як на рис.2). В цьому випадку внаслідок взаємної компенсації стирань можна отримати нульовий синдром.

Звичайно, точно ідентифікувати всі стерті розряди в таких каналах неможливо. Можна лише встановити факт такого великого пошкодження даних в каналах, що теж важливо.

Підвищити коректувальну здатність коду можна за допомогою ступеневої перестановки кодової матриці (1).

V. СТЕПЕНЕВА ПЕРЕСТАНОВКА В ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДАХ

Розглянутий метод локалізації пакетів стирань передбачає, що всі стерті розряди знаходяться в межах r розрядів будь-якого рядка кодової матриці (1), тобто в межах деякого r -розрядного контрольного вікна Δ . На практиці ця умова не завжди виконується.

Тому постає проблема такої перестановки кодової матриці (1), щоб всі помилкові розряди попали в межі контрольного вікна Δ . Ця проблема ефективно вирішується за допомогою операції степеневі перестановки.

Ще з робіт Прейнджа [10,11] відомо, що коли породжувальний поліном $g(x)$ циклічного коду ділить кодовий поліном $f(x)$, то він буде ділити також і поліном, символи якого переставлені у відповідності до правил:

$$i \rightarrow (2^v i) \bmod n \text{ або } i \rightarrow (i + v) \bmod n, \text{ GF}(2^m).$$

Отже, при відсутності помилок поліном $f(2^v)$ також буде кодовим. А при наявності помилок результат ділення $f(x)$ на $g(x)$ дасть одну конфігурацію помилкових розрядів кодового слова, а результат ділення полінома з перестановками на $g(x)$ – зовсім іншу конфігурацію.

$Z_{1,1}$	$Z_{1,3}$	$Z_{1,5}$	...	...	$Z_{1,n}$	$Z_{1,2}$	...	...	$Z_{1,n-3}$	$Z_{1,n-1}$
$Z_{2,1}$	$Z_{2,3}$	$Z_{2,5}$	...	...	$Z_{2,n}$	$Z_{2,2}$	...	...	$Z_{2,n-3}$	$Z_{2,n-1}$
...
$Z_{r,1}$	$Z_{r,3}$	$Z_{r,5}$	...	...	$Z_{r,n}$	$Z_{r,2}$	...	...	$Z_{r,n-3}$	$Z_{r,n-1}$

Рис.3 Степенева перестановка кодової матриці на другій ітерації

ВИСНОВКИ

Багатоканальний зв'язок знаходить все більше застосування в різних сферах: в оптоволоконних системах передачі даних, в комп'ютерних мережах тощо. Оптимальними кодами для завадостійкого кодування при багатоканальному зв'язку є паралельні циклічні коди. Теоретичною основою таких кодів може бути теорія паралельних ЛПС. Тоді можна використати синдромний принцип декодування, що зручно для представлення пакетів стираних розрядів кодової матриці.

Основною тенденцією сучасного розвитку в завадостійких кодах є використання ітеративного (багатокрокового) декодування. Пропонується метод ітеративного декодування паралельних циклічних кодів на основі степеневі перестановки. На відміну від відомих ітеративних кодів, запропоновані коди базуються лише на основі "жорстких рішень" (hard decision) при декодуванні, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність роботи та використовувати прості апаратно-програмні засоби [12].

Ця властивість традиційних циклічних кодів має місце і у випадку складених паралельних циклічних кодів. В найпростішому варіанті степенева перестановка полягає в тому, що спочатку записуються непарні стовпці кодової матриці (1), а потім – парні (можна починати і з парних стовпців). В результаті отримуємо нову ітерацію переставленої кодової матриці $Z_{(p)}^{(1)}$ (рис.3).

Аналогічним чином можна зробити наступні ітерації перестановок і знайти такий варіант, коли всі стерті розряди попадуть в межі контрольного вікна Δ хоча б одного рядка кодової матриці (1). Далі необхідно виправити стерті розряди вікна Δ і через обернені перестановки повернутись в початковий стан кодової матриці (1).

Звичайно, бажано мати велику кількість можливих перестановок, а ця задача вирішується оптимальним вибором породжувального поліному (4) паралельного циклічного коду.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] К. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М. : Изд-во иностр. лит., 1963. – 829 с.
- [2] E. Fujiwara, Code Design for Dependable Systems. Theory and Practical Applications. USA: John Wiley & Sons, Inc.,
- [3] Lylod W. Massengil, "Cosmic and Terrestrial Single Event Radian Effects in Dynamic Random Access Memories," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol 43, No 2, pp. 576-593, April 1996.
- [4] V. P. Semerenko, "The Theory of Parallel CRC Codes Based on Automaton Models," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, issue 9 (84), pp. 45–55, 2016.
- [5] В. П. Семеренко, "Паралельні циклічні коди," *Вісник ВПІ*. – № 6. – 2014. – С. 65–72.
- [6] В. П. Семеренко, Теорія циклічних кодів на основі автоматних моделей : монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 444 с.
- [7] A. Gill, Linear Sequential Circuits. Analysis, Synthesis and Application. New York, London: McGraw-Hill Book Company, 1967.
- [8] Р. Блейхут, Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М. : Мир, 1986. – 576 с.
- [9] M. Fossorier, "Universal burst error correction," in *Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory*, Seattle, WA, pp. 1969–1973, Jul. 2006.
- [10] E. Prange. Cyclic error-correcting codes in two symbols / E. Prange. – AFCRC-TN-57-103, Air Force Cambridge Research Center. Cambridge (Mass.), Sept. 1957.
- [11] Дж. Кларк мл., Дж. Кейн Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М. : Радио и связь, 1987. – 392 с.
- [12] V. P. Semerenko. Iterative hard-decision decoding of combined cyclic codes, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, issue 9 (91). P. 61–72.

Використання Пакетів Тестування для Статистичного Дослідження Генераторів Випадкових Чисел

Марія Семаньків, Іляш Юрій
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
dlyamarii@gmail.com, yurchukil@cym.org

Даріуш Сала
кафедра управління
Університет AGH
Краків, Польща
dsala@zarz.agh.edu.pl

Use of Test Packages for Statistical Research of Random Numbers Generators

Maria Semankiv, Yurii Iliash
dept. of Computer Science
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
dlyamarii@gmail.com, yurchukil@cym.org

Dariusz Sala
dept. of Enterprise Management
AGH University
Krakow, Poland
dsala@zarz.agh.edu.pl

Анотація—подано результати дослідження послідовності псевдовипадкових чисел, що сформовані методом перестановки ваги розрядів двійкового коду.

Abstract—the results of the investigation of the sequence of pseudorandom numbers, generated by the method of permutation of the bits digit bits code, are presented.

Ключові слова—генератор випадкових чисел, пакет статистичних досліджень.

Keywords—random number generator, static studies pack.

I. ВСТУП

В залежності від сфери використання (наприклад, імітаційне моделювання, системи захисту інформації, чисельні методи, комп'ютерна графіка, криптографія) до генераторів випадкових та псевдовипадкових чисел ставлять ряд вимог, які вони повинні задовольняти:

- простота апаратної або програмної реалізації;
- низька собівартість;
- максимальна швидкодія;
- максимальна наближеність послідовності, яка отримана на виході генератора, до вибраного закону розподілу (наприклад рівномірного);

- можливість роботи генератора у широкому діапазоні частот.

Якщо такий генератор буде використовуватися в системах захисту інформації (а такі генератори часто є важливою ланкою в забезпеченні інформаційної безпеки, зокрема в криптографії), то до нього ставиться ще ряд додаткових вимог, що будуть жорсткішими порівняно з вимогами до генераторів, що використовуються в інших галузях [1,2]. Виконання таких вимог дає змогу передусім виявити генератори, що наперед задовольняють вимоги конкретної прикладної задачі.

Тому виникає питання дослідження статистичних характеристик та визначення типу розподілу послідовностей випадкових і псевдовипадкових чисел для оптимального їх використання у зазначених вище сферах застосування.

II. ГРАФІЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Всі існуючі методи тестування послідовностей випадкових та псевдовипадкових чисел можна поділити на: евристичні, графічні та статистичні.



Вибір необхідного тесту проводиться в залежності від потреб подальшого прикладного застосування послідовності випадкових чисел. Для застосування генератора випадкових чисел для методу Монте-Карло першочерговим стає питання рівномірності розподілу послідовності чисел, простота технічної та програмної реалізації та собівартість самого генератора.

Проведено дослідження рівномірності на площині запропоновано в статті [3] методу генерування псевдовипадкових чисел на основі перестановки ваги розрядів двійкового коду. Високі показники рівномірності дозволили стверджувати про доцільність використання даного методу формування псевдовипадкових чисел з метою забезпечення рівномірного «заповнення» значень на обраній площині. На рис. 2 подано результати дослідження рівномірності розподілу в просторі псевдовипадкових чисел даного методу генерування, та конгруентного генератора і генератора Фібоначчі для порівняння отриманих в графічному вигляді результатів дослідження.

Рис. 1. Класифікація методів тестування послідовностей випадкових та псевдовипадкових чисел

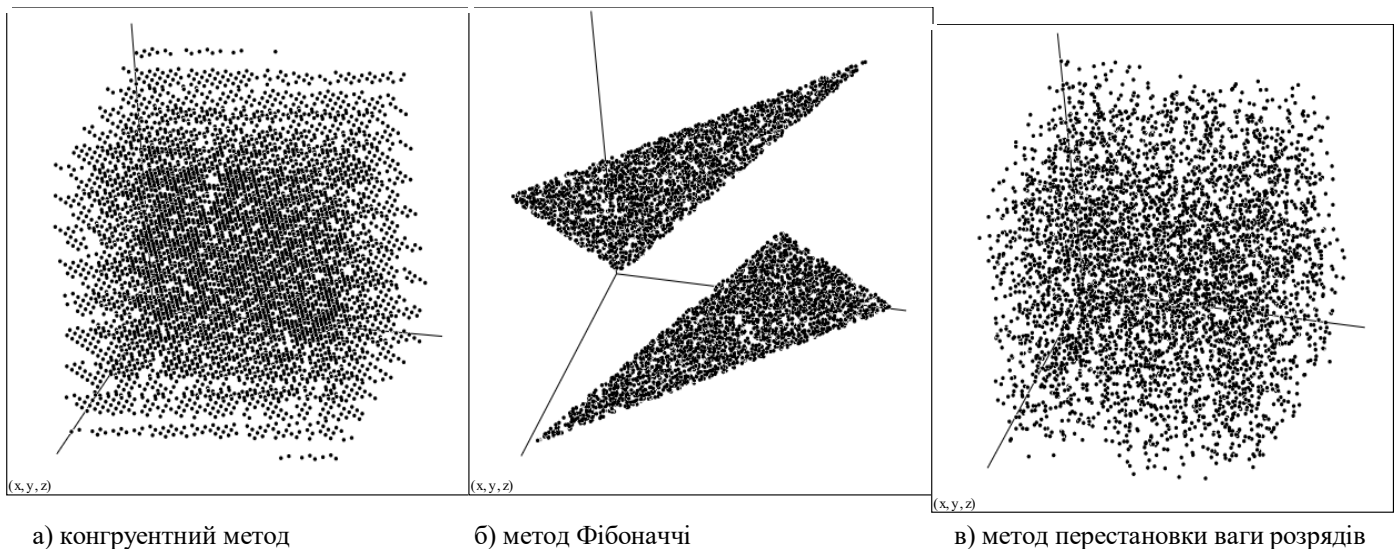


Рис. 2. Графічне подання розподілу в просторі послідовностей псевдовипадкових чисел

Зауважимо, що система трьох випадкових чисел називається рівномірно розподіленою в просторі, якщо щільність ймовірності $f(x, y, z) = const$ в середині деякої області і дорівнює нулю за її межами:

$$f(x, y, z) = \begin{cases} \frac{1}{S_{np}} = \frac{1}{(b-a)(d-c)(e-g)}, & \text{всередині обл.} \\ 0, & \text{поза нею} \end{cases}$$

простір виду $a \leq x \leq b, c \leq y \leq d, e \leq z \leq g$.

Подані на рис. 2 результати досліджень показують, що для конгруентного методу генерування послідовності псевдовипадкових чисел та методу Фібоначчі зберігається

закономірність формування елементів, які заповнюють площини і фігури в просторі. Для методу перестановки ваги розрядів графічне представлення характеризується рівномірним заповненням простору.

Графічні методи статистичного аналізу послідовностей є досить ефективними для виявленні істотних недоліків послідовності псевдовипадкових чисел і для відображення результатів дослідження на рівномірність розподілу. З їх допомогою можна швидко відкинути генератори, чий результати не задовольняють критеріям рівномірності розподілу [2]. Однак, графічні тести сприймаються людиною, що не гарантує їх однозначність. Для більш точних результатів використовуються статистичні тести,

які видають чисельну характеристику послідовності і дозволяють однозначно сказати, пройдений тест чи ні.

III. Статистичні методи долідження

Статистичні тести дають можливість виконати чисельну оцінку якості генераторів випадкових чисел. Тести зазвичай об'єднуються в пакети тестування (серед них можна виділити тести DIEHARD, тести NIST і ін.). Однією з статистичних оцінок є оцінка помилки відтворення закону розподілу дискретної випадкової величини.

ТАБЛИЦЯ I. ПАКЕТИ СТАТИСТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Тести	Переваги	Недоліки	Кількість тестів
DIEHARD	найбільш строгі з відомих тестів, найпростіші для автоматизації тестування за допомогою інтерфейсу командного рядка	немає детального опису тестів і методики трактування їх результатів, крім того більшість тестів є евристичними	13
NIST STS	велика збірка тестів	незручний для використання інтерфейс	16
RaBiGeTe	здійснюють підтримку багатопотокового тестування	Необхідність знань з статистики	24

Проведено дослідження послідовностей псевдовипадкових чисел, утворених методом перестановки ваги розрядів за допомогою пакету тестів DIEHARD.

Тести Diehard формують на виході числа р-значення, які рівномірно розподілені в інтервалі [0;1], якщо вхідний потік чисел дійсно випадковий. Після сортування отриманих р-значень, побудовано графік, що показує відхилення від $X=Y$ діагональної лінії отриманих р-значень (рис. 3).

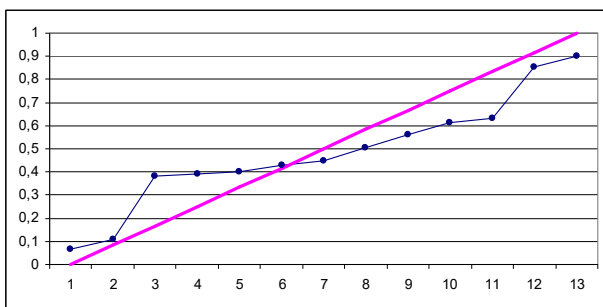


Рис. 3. Відхилення від $X=Y$ діагональної лінії отриманих р-значень

Результати проведених досліджень на визначення типу розподілу послідовності псевдовипадкових чисел, генерованих зазначеним методом, показали високу якість рівномірності розподілу та ефективність використання

даного генератора в складі аналого-цифрового перетворювача Монте-Карло [4,5].

Слід відзначити пакет статистичних тестів NIST STS, що є зручним та гнучким інструментом дослідження генератора випадкових (псевдовипадкових) чисел, що застосовуються в криптографічних додатках.

На відміну від пакета DIEHARD пакет NIST STS має більшу гнучкість, розширюваність і ефективність (з точки зору витрачається часу на здійснення тестування генератора). Крім того, пакет NIST STS має велику криптографічну спрямованість, яка досягається шляхом введення в пакет таких тестів як перевірка лінійної складності і універсального тесту Маурера. Результати застосування даного пакету тестів для дослідження характеристик методу перестановки ваги розрядів подано в статті [6].

RaBiGeTe враховуючи недоліки попередніх пакетів статистичних досліджень включила в себе основні тести вказаних пакетів. Програма включає 24 тести, в склад яких потрапили вибрані тести пакетів NIST DFT, Diehard, тести Д.Кнута, Маурера та додаткові статистичні тести. Користувач надає двійковий файл з генерованими числами та змінює параметри тестування в залежності від потреб. RaBiGeTe має зручний інтерфейс та надає можливості налаштування параметрів тестування, отримані результати подаються у чисельному та графічному вигляді. Використання даного пакету тестів підтвердило, що запропонований метод дозволяє отримати послідовності псевдовипадкових чисел з досить високою статистичною якістю розподілу р-значень за результатами тестування RaBiGeTe і може бути використаний для побудови генератора псевдовипадкових чисел з рівномірним розподілом [7].

IV. Кореляційний аналіз

Кореляційний аналіз використовується для кількісної оцінки взаємозв'язку двох наборів даних. Коефіцієнт кореляції використовується для визначення наявності взаємозв'язку між елементами. Коефіцієнт кореляції являється індексом в інтервалі від -1 до 1 включно та відображає ступінь лінійної залежності між двома множинами даних (табл.2).

ТАБЛИЦЯ II. РОЗПОДІЛ ВЕЛИЧИН КОРЕЛЯЦІЇ

Величина кореляції	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7-0,9	0,9-1,0
Характеристика сили зв'язку	Слабка	Помірна	Помітна	Висока	Дуже висока

Проведено дослідження на визначення сили взаємозв'язку між псевдовипадковими числами, що сформовані методом перестановки ваги розрядів двійкового коду, результати подано в таблиці 3.

ТАБЛИЦЯ III. КОЕФІЦІЄНТИ КОРЕЛЯЦІЇ ДЛЯ МЕТОДУ ПЕРСТАНОВКИ ВАГИ РОЗРЯДІВ

Розряд генератора	Коефіцієнт кореляції між утворюючими та генерованими числами	Коефіцієнт кореляції між частинами генерованої послідовності
8	0,010683	0,76479
10	0,007723	0,76531
12	0,002675	0,71485
14	0,007723	0,998712
16	0,004605	0,998712

Високий коефіцієнт кореляції (0,7-0,9) вказує на велику ймовірність взаємозв'язку між елементами послідовності псевдовипадкових чисел даного методу генерування, що обмежує їх практичне застосування в задачах, що вимагають «незалежності» сформованих псевдовипадкових чисел.

Це не знижує практичну цінність даного методу генерування псевдовипадкових чисел в області математичного моделювання, завдяки його високій якості рівномірності розподілу, що є вирішальним критерієм при відборі генератора для методу Монте-Карло.

Висновки

На сьогоднішній день є велике різноманіття пакетів для дослідження статистичних характеристик генераторів випадкових чисел. Незважаючи на їх велику кількість користувач стикається з проблемою не тільки незручного інтерфейсу, але і неоднозначності трактування результатів, внаслідок відсутності детальних описів тестів, що входять до обраного пакету. Незважаючи на вказаний недолік дані пакети статистичних тестів дозволяють здійснити швидке автоматизоване дослідження характеристик

послідовностей випадкових та псевдовипадкових чисел, а деякі з пакетів дозволяють здійснити багатопотокове тестування.

Подані результати дослідження методу генерування псевдовипадкових чисел внаслідок перестановки ваги розрядів двійкового коду за допомогою графічного методу та пакетів статистичних тестів визначили високу ефективність використання даного методу генерування для формування послідовностей, що задовольняють вимоги рівномірності розподілу випадкових чисел.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] М.А. Иванов, И.В. Чугунков, Теория, применение и оценка качества генераторов, М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003.
- [2] Donald Knuth The Art of Computer Programming, Seminumerical Algorithms / K. Donald // Volume 2, 3rd edition, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1998.
- [3] М. В. Лаврів, Аналіз ефективності застосування методів генерування сигналів з псевдовипадковим розподілом у системах статистичних досліджень / М.В. Лаврів, Л.Б. Петришин // Наукові вісті інституту менеджменту та економіки "Галицька академія". – Івано-Франківськ, 2007. – №2 (12). – С.61-66.
- [4] М.В. Лаврів, Генератори рівномірно розподілених псевдовипадкових величин / М.В. Лаврів, Л.Б. Петришин // Вісник Прикарпатського національного університету. Фізика. – 2007. Вип. 3. – С. 112-118.
- [5] М.В. Лаврів, Методи і засоби генерування псевдовипадкових сигналів із рівномірним розподілом та аналіз результатів дослідження їх статистичних характеристик / М.В. Лаврів, Л.Б. Петришин // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009. – №2 (15). – С. 56-62.
- [6] М.В. Семаньків, Генератори випадкових чисел в складі аналого-цифрового перетворювача Монте-Карло / М.В. Семаньків // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч.IV (18-20 травня 2016 р., М.Харків, НТУ «ХП»). – С. 173
- [7] М.В. Семаньків, Оцінка статистичних характеристик систем випадкових чисел / М.В. Семаньків // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ «ХП». – 2016. – С.109-117.

Використання Суперпікселів в Ефективному Алгоритмі Сегментації Зображень на Основі Графу

Дмитро Луп'як
кафедра автоматичної та інформаційно-вимірювальної
техніки
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
dima.lupyak@gmail.com

Роман Кветний
кафедра автоматичної та інформаційно-вимірювальної
техніки
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
rkvetny@sprava.net

Superpixels Using for Efficient Graph Based Image Segmentation Algorithm

Dmytro Lupaik
dept. of Automation and Information-Measuring
Technologies
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
dima.lupyak@gmail.com

Roman Kvyetnyy
dept. of Automation and Information-Measuring
Technologies
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
rkvetny@sprava.net

Анотація—Досліджено аспекти ефективної реалізації ефективного алгоритму сегментації зображень на основі графу. Запропоновано модифікацію алгоритму з використанням суперпікселізації, яка дозволила уникнути пересегментації зображення.

Abstract—The aspects of the efficient graph based image segmentation algorithm implementation are investigated. Modification of algorithm with superpixels using is proposed, that allowed to avoid image oversegmentation.

Ключові слова—компонент; сегментація зображень, кластеризація, теорія графів, відмінність кольорів, мінімальне кістякове дерево, комп'ютерне бачення.

Keywords—image segmentation, clustering, graph theory, color difference, minimum spanning tree, computer vision.

I. ВСТУП

В даний час простежується тенденція розширення сфери застосування систем комп'ютерного зору для вирішення прикладних задач в різних областях людської діяльності. Наприклад, задача середнього рівня, така як визначення траєкторії руху об'єкта, вимагає певну область підтримки для виконання відповідних розрахунків. Дослідження шляхів підвищення швидкодії та покращення якості сегментації зображення дозволить зменшити час прийняття рішення інтелектуальною системою.

Сегментація зображення представляє собою розбиття кадру на регіони за подібністю характеристик їх пікселів. В більшості випадків поділ на регіони проводять по яскравості для чорнобілого кадру та по кольорним характеристикам для зображення в кольорі. В деяких методах реалізована сегментація заснована на контурах. В таких методах за ознаку подібності виступає текстура, або форма.

На сьогодні існує велика кількість різних способів поділу зображення на частини з використанням різних математичних моделей. Одними напрямів в сегментації зображень, що активно розвивається є методи теорії графів.

Ідея методів даного класу є наступною. Зображення представляється у вигляді зваженого графа, пікселі зображення виступають в якості вершин. Вага ребра графа показує подібність точок по деякій властивості (відстань між точками за деякою метрикою). Поділ зображення відбувається розрізами графа.

В багатьох методах теорії графів вводиться функціонал вартості розрізу, що представляє якість вихідної сегментації. Таким чином задача поділу зображення на однорідні регіони зводиться до задачі оптимізаційної, а саме пошуку розрізу мінімальної вартості на графі. Такий підхід дає змогу крім текстури та однорідності кольору

сегментів керувати також формою сегментів, складністю меж, їх розміром, тощо.

Серед сегментації на основі представлення зображення у вигляді графу варто виділити алгоритми на основі побудови мінімального кістякового дерева. Дані алгоритми мають значно меншу обчислювальну складність, ніж перші алгоритми на основі графу в основі яких лежить операція розрізу графу.

Ефективний графовий алгоритм сегментації зображення (ЕГАСЗ) [1] відносять до групи алгоритмів, які виконують поділ зображення за допомогою побудови мінімального каркаса графа. Для знаходження меж між сегментами використовується предикат порівняння пари регіонів, а для побудови мінімального каркаса графа – алгоритм Краскала.

У роботі [2] запропоновано спосіб, як реалізувати розпаралелення обчислень для цього алгоритму та запропоновано новий предикат для виявлення меж між регіонами.

У роботі [3] запропоновано використовувати структуру даних DSD з евристиками «union by rank» і «path compression».

У роботі [4] запропоновано модифікацію з наближеним сортуванням ребер графу та представленням графу у вигляді масиву однонаправлених списків, яка є в 4 рази швидше за базову реалізацію алгоритму.

II. ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРПІКСЕЛІВ

Одною з проблем даного алгоритму є сегментація текстурованих зображень. В оригінальному алгоритмі кожен піксель зображення представляє собою окремий вузол графу та поєднується лише з сусідніми пікселями. Проте, якщо сегмент має певну текстуру і деякі перепади кольору, то вага між сусідніми пікселями одного сегменту буде велика і це приводить до пересегментації в текстурованих ділянках зображення.

Для усунення цієї проблеми пропонуться здійснювати побудову суперпікселів і вагу ребер, що входять до суперпікселя робити рівну нулю, тобто об'єднувати пікселі в межах суперпікселя в один сегмент.

Для побудови суперпікселів обрано алгоритм SLIC (Simple Linear Interactive Clustering) [5]. Основна ідея алгоритму сегментації SLIC полягає в кластеризації пікселів в обмежених областях, на які розбивається зображення. Кожна точка зображення характеризується п'ятимірним вектором (1).

$$p = (c_1, c_2, c_3, x, y)^T, \quad (1)$$

де c_1, c_2 і c_3 – координати точки зображення в вибраному кольоровому просторі;

x та y – просторові координати.

Алгоритм включає наступні кроки:

1) Зображення розбивається на K фрагментів розміру $a \times a$, котрі задають початкове приближення суперпікселів.

В якості початкових центрів суперпікселів обираються їх геометричні центри C_k .

2) Корегуються координати центрів фрагментів з умови мінімального значення кольорного градієнту в 3×3 окрузі геометричного центру.

3) Формування локальних кластерів в $2a \times 2a$ окрузі центрів C_k аналогічно методу k -середніх.

4) Визначення нових центрів суперпікселів та розрахунок зміщення центрів.

5) Повторення кроків 3 та 4 до тих пір, поки зміщення центрів між ітераціями не стане менше вказаного значення.

На рис. 1 наведено результат алгоритму SLIC.

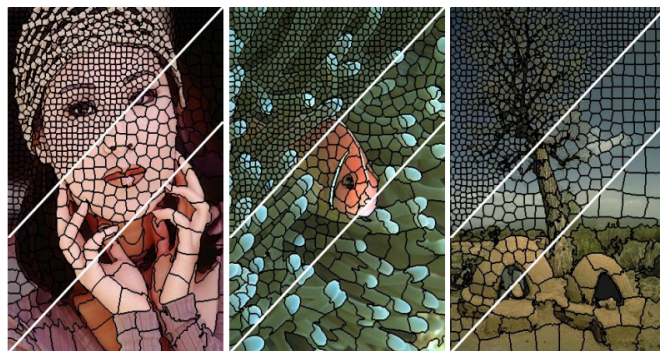


Рис. 1. Результуючі суперпікселі отримані з використанням алгоритму SLIC

На основі модифікації ефективного алгоритму сегментації на основі графів з наближеним сортуванням ребер графу та представленням графу у вигляді масиву однонаправлених списків [4] зробимо модифікацію з використанням суперпікселів.

В базовому алгоритмі кількість ребер можна знайти за формулою 2.

$$n = 2ab - (a+b), \quad (2)$$

де a, b – кількість пікселів по ширині та висоті.

В модифікації з використанням суперпікселів кількість ребер можна знайти за формулою 3

$$n = 2N - 2\sqrt{N}, \quad (3)$$

де N – кількість суперпікселів (виступає параметром алгоритму).

Нехай вхідне зображення є розміром 500×500 пікселів, кількість суперпікселів задамо 900. З використанням базового алгоритму, відповідно до рівняння (2) буде створено 499000 ребер. З використанням суперпікселів незалежно від розміру зображення, відповідно до рівняння (3) буде створено 1740 ребер. Така різниця в кількості ребер повинна значно збільшити швидкість алгоритму сегментації, але при цьому побудова суперпікселів може зайняти певний час.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження впливу різних модифікацій на оригінальний алгоритм була розроблена комп'ютерна програма, що дозволяє завантажити вхідне зображення, вибрати модифікацію алгоритму, виконати сегментацію, відобразити результат та показати час роботи кожного з етапів алгоритму.

В програмі є можливість змінювати структуру даних, що використовується для представлення графу, спосіб побудови графу, спосіб сортування ребер графу, предикат визначення меж сегменту, матрику різниці між пікселями, параметри алгоритму, кількість суперпікселів.

Інтерфейс розробленої програми для дослідження наведений на рис. 2

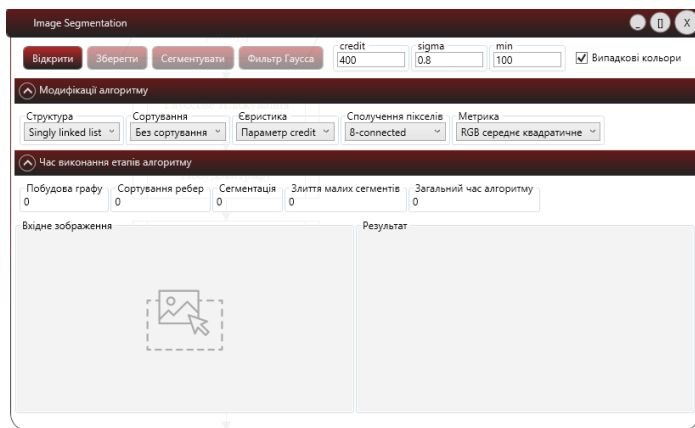


Рис. 2. Розроблена програма для дослідження впливу модифікацій на роботу алгоритму сегментації

В роботі [4] завдяки даної розробленої програми було досліджено вплив структури даних та методу сортування ребер на швидкодію алгоритму сегментації, заміряно час роботи алгоритму при різних модифікаціях для зображень різного розміру та побудовано графіки, що показують вплив модифікації на час виконання алгоритму (рис.3)

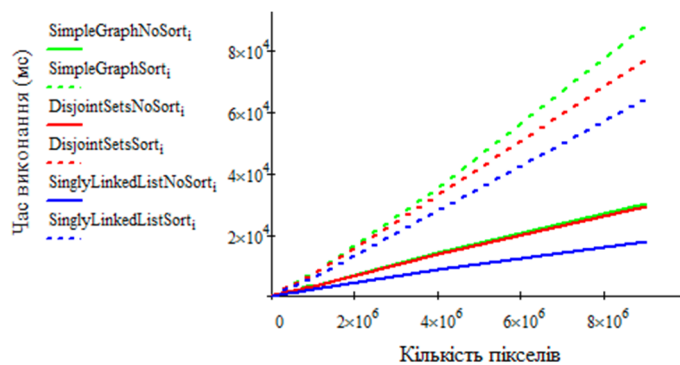


Рис. 3. Залежність часу виконання модифікації алгоритму від кількості пікселів у вхідному зображенні

З графіку видно, що використання динамічних списків найменш ефективне, використання DSD (системи неперетних множин) дає краще значення швидкодії, проте

найкращий результат був отриманий при використанні однонаправлених зв'язаних списків.

На швидкодію алгоритму сильно впливає алгоритм сортування, що є складовою частиною алгоритму Краскала. Навіть використання швидкого сортування призводить до великих затрат часу через кількість ребер в графі. Проте якщо значення ваг заокруглити до цілочисельного значення, то можна використати сортування методом підрахунку, що дозволить провести наближене сортування ребер за лінійний час.

Окрім цього на швидкодію впливає метод побудови множини ребер графу, при чотирьохпіксельному зв'язуванні швидкодія приблизно в 1.4 рази більша ніж при восьмипіксельному зв'язуванні.

Модифікація алгоритму з використанням масиву однонаправлених зв'язаних списків для представлення сегментів та наближеним сортуванням ребер графу за лінійний час збільшує швидкодію алгоритму приблизно в 4 рази при невеликій зміні якості сегментації. Для подальших досліджень, а саме впливу використання суперпікселів на роботу алгоритму, за основу була взята данна модифікація.

A. Дослідження впливу використання суперпікселів на швидкодію

Побудуємо графіки залежності швидкодії від кількості пікселів для оригінального алгоритму, модифікації без використання суперпікселів та модифікації з використанням суперпікселів (рис. 4).

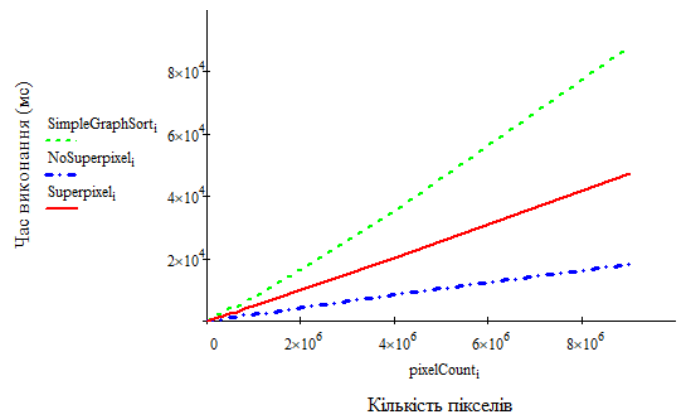


Рис. 4. Залежність часу виконання модифікації алгоритму від кількості пікселів у вхідному зображенні

З графіку видно, що побудова суперпікселів займає досить багато часу і швидкодія алгоритму менша в два рази порівняно з модифікованим алгоритмом [4] без використання суперпікселів, проте, якщо порівнювати з оригінальним алгоритмом така модифікація з використанням суперпікселів показує вдічі кращу швидкодію.

B. Дослідження впливу використання суперпікселів на якість сегментації

Результати сегментації в залежності від використання суперпікселів наведені на рисунку 5.

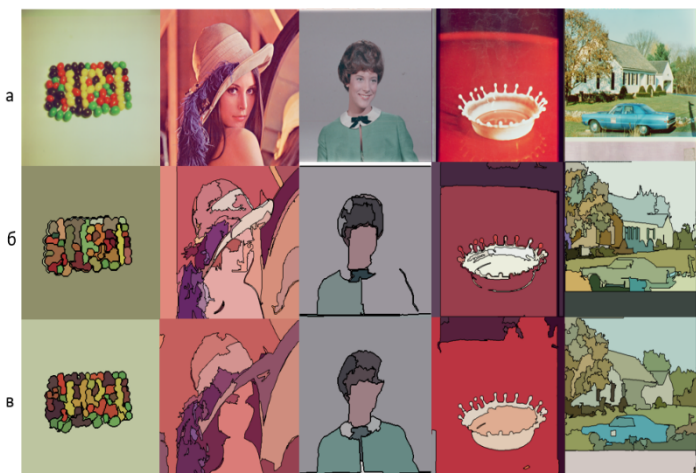


Рис. 5. Результат сегментації зображення в залежності від використання суперпікселів (а – вхідне зображення; б – сегментоване зображення без використання суперпікселів; в – сегментоване зображення з використанням суперпікселів)

Базуючись на результатах наведених на рис. 5 можна стверджувати, що використання суперпікселів покращує якість сегментації: сегменти точніше відповідають границям реальних об'єктів, краї сегментів більш чіткі, менша кількість надлишкових дрібних сегментів.

С. Дослідження впливу використання суперпікселів на якість сегментації

Для дослідження було використано стандартні тестові зображення з бази USC-SIPi від Інституту обробки сигналів і зображень Університету Південної Каліфорнії [6]. Для декількох зображень з бази виконувалась сегментація з різним значенням параметру кількості сегментів. Результати сегментації при кількості суперпікселів 10, 100, 500, 1000 та 5000 наведені на рис. 6 та рис. 7.

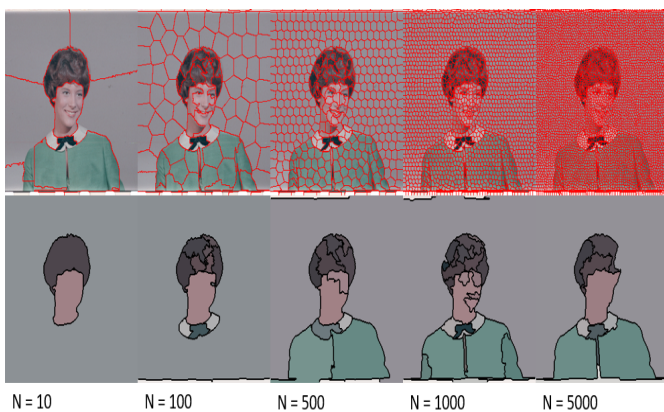


Рис. 6. Результат сегментації зображення в залежності від величини і кількості суперпікселів

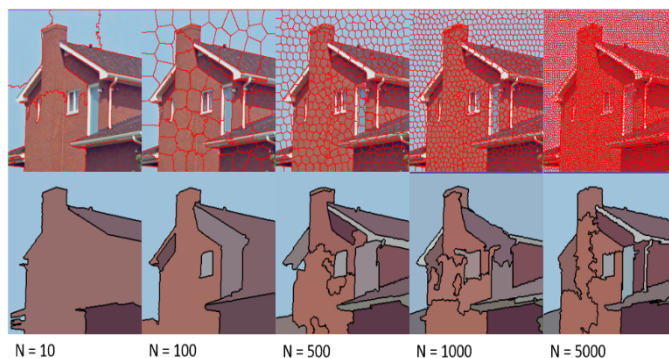


Рис. 7. Результат сегментації зображення в залежності від величини і кількості суперпікселів

Можна зробити висновок, що завдяки зміні розміру сегментів можна контролювати виділення дрібних об'єктів. При великому розмірі сегментів можна отримати межі певного об'єкту. При використанні дрібних сегментів, окрім меж об'єкту, можна отримати межі складових об'єкту.

ВИСНОВКИ

Запропонована модифікація ефективного алгоритму сегментації зображення на основі графу дозволяє уникнути пересегментації на текстурованих ділянках зображення, що досягається завдяки побудові суперпікселів і їхньому використанні в якості вузлів графу.

При комбінуванні даної модифікації з модифікацією розробленою в роботі [4] швидкодія алгоритму вдічі перевищує оригінальний алгоритм.

Оскільки кількість суперпікселів є сталою, інші параметри алгоритму є менш залежними від розміру вхідного зображення, що робить даний алгоритм більш універсальним.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Felzenszwalb P. F. Efficient graph-based image segmentation / P. F. Felzenszwalb, D. P. Huttenlocher // International Journal of Computer Vision, vol. 59, issue 2, 2004. – P. 167-181.
- [2] Wassenberg J. An Efficient Parallel Algorithm for Graph-Based Image Segmentation / J. Wassenberg, W. Middelman, P. Sanders. – Proceedings of the 13th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP'09). – Münster, Germany: September 2-4, 2009.
- [3] Ленько В. С. Застосування методів штучного інтелекту до сегментації графічного образу / В. С. Ленько, Ю. М. Щербина // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Інформаційні системи та мережі. – 2004. – с. 194-203.
- [4] Луп'як Д. Д. Модифікації методу сегментації зображення на основі теорії графів // Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці. Збірка наукових праць. / Д. Д. Луп'як, А. В. Олесько. – Харків, Х.: Технологічний Центр, 2017. – 100 с.
- [5] Achanta R., SLIC superpixels / R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua, S. Susstrunk // Lausanne: TEPFL, 2010. Technical Report
- [6] The USC-SIPi Image Database [Електронний ресурс] : S.I.P.I. of the University of Southern California. – Режим доступу: <http://sipi.usc.edu/database/>.

СЕКЦІЯ 4.

***Цифрова обробка
та ущільнення інформації***

SECTION 4.

***Digital information
processing and compression***

Принципи Побудови Нейромережі для Відбору і Первинної Обробки Інформації з Елементами Зорового Аналізатора Людини

Віталій Боюн, чл.-кор. НАН України
Відділ інтелектуальних відеосистем реального часу
Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАНУ
Київ, Україна
vboyun@gmail.com

Principles of Constructing a Neural Network for the Selection and Primary Processing of Information with Elements of the Human Visual Analyzer

Vitaliy Boyun, C.-Member of National Academy of Sciences of Ukraine
Department of Intelligent Real Time Video Systems,
V.M.Glushkov Institute of Cybernetics NASU,
Kyiv, Ukraine
vboyun@gmail.com

Анотація—Для підвищення оперативності, продуктивності й ефективності створюваних відеосистем реального часу пропонується використати як прототип принципи організації нейромережі на рівні сітківки ока людини, зокрема: принципи близькодії з кільцевою організацією “on”- і “off”-центрів, спеціалізацію шарів нейронів, зворотні зв’язки між клітинами для управління сприйняттям, адаптацію розмірів рецепторних полів (так звана пластичність нейронів).

Abstract—To improve the efficiency, productivity and efficiency of the real-time video systems being created, it is proposed to use as a prototype the principles of the organization of the neural network at the level of the human eye, in particular: the principles of short-range interaction with the ring organization “on”- and “off”-centers, specialization of layers of neurons, feedback between cells for controlling perception, adapting the size of receptor fields (the so-called plasticity of neurons).

Ключові слова—відеосистема реального часу; зоровий аналізатор людини; кільцева організація нейронів; “on”- і “off”-центри; нейромережа; базатошарова обробка

Keywords—video system of real time, human visual analyzer, ring organization of neurons, “on”- and “off”-centers, neural network, multilayer processing

I. ВСТУП

Відеосистеми реального часу відіграють значну роль у системах автоматизації виробничих процесів, візуального контролю якості продукції, робототехніці, системах

оборонного і військового призначення, системах автоматизації наукових та медико-біологічних досліджень тощо. Причому діапазон їх застосування та вимоги до них постійно розширюються. Особливо це стосується відеосистем із зворотним зв’язком, де результати обробки інформації в реальному часі використовуються для управління процесом або інших дій. Такі системи висувають підвищені вимоги не тільки до продуктивності обчислювальних засобів, але і щодо запізнювання інформації в контурі зворотного зв’язку, які не забезпечуються в рамках традиційних підходів.

Зорова система людини вдосконалювалась упродовж мільйонів років і досягла надзвичайно високого рівня організації. Узагальнена модель зорової системи людини є багатофункціональною та складається з декількох десятків, а то й сотні, локальних моделей, які описують цілий ряд структурних, фізичних, геометричних і психофізичних механізмів і процесів. Процес сприйняття візуальної інформації людиною є динамічним, з багатьма змінюваними параметрами і багатьма зворотними зв’язками. Ми не тільки бачимо, ми й реагуємо, тобто такий процес є активним. Тому феномен зору надає надзвичайно багато різнопланових елегантних рішень для систем технічного зору.

II. ОРГАНІЗАЦІЯ СІТКІВКИ ЗОРОВОЇ СИСТЕМИ ЛЮДИНИ

Значна частина попередньої обробки зорової інформації відбувається вже на рівні сітківки. Центральна ямка і периферія сітківки організовані за кільцевим

принципом. Однак у центральній ямці кожна колбочка має вихід на гангліозну клітину, а на периферійній сітківці палички об'єднуються в групи, підсумовуючи сигнали з більших ділянок рецепторного поля і забезпечуючи підвищення чутливості при недостатньому освітленні (в обмін на зменшення просторової роздільності) [1-3].

Центральна ямка спеціалізована на чіткий зір, а периферія сітківки – на високу чутливість. Горизонтальні та дифузні клітини є гальмівними на рівні сітківки. Амакринові та інтерплексіформні клітини відповідають за адаптацію розмірів рецепторних полів. Клітини центральної ямки та сітківки організовані за кільцевим принципом (“on”- і “off”-центри).

З огляду на вищезазначене набуває актуальності задача побудови неймереж високої продуктивності і ефективності для відеосистем реального часу з використанням принципів організації нейронів сітківки ока людини.

III. ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОРОВОГО АНАЛІЗАТОРА ЛЮДИНИ У ВІДЕОСИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Хоча напрямок підвищення вибіркової відеосистем реального часу [4-6] дозволяє значно підвищити їх ефективність, однак він не забезпечує можливості сприйняття і обробки відеоінформації про надшвидкісні об'єкти (наприклад, снаряд) або високодинамічні процеси. У той же час паралельний характер отримання зображення сенсорною матрицею погано узгоджується з подальшими послідовними процесами аналого-цифрового перетворення та обробки інформації, призводить до необхідності детального програмування цих процесів. Хоча при реалізації паралельної обробки має місце значна надлишковість в представленні інформації, однак за рахунок однорідної обробки інформації, зменшення пересилок та запам'ятовування, відсутності детального програмування послідовних процесів, також можливе значне підвищення продуктивності й ефективності обробки.

Неймережева організація обчислень є надзвичайно ефективною. Однак традиційні неймережеві обчислення, хоч існують вже десятки їх варіантів для розв'язання різних задач, є надзвичайно складними при апаратній реалізації і вимагають складного налаштування на задачу [7]. Як прототип пропонується використовувати методи організації сприйняття, обробки інформації та зв'язків між нейронами сітківки ока людини [1-3].

На організацію сприйняття відеоінформації значною мірою впливають рівень освітлення сцени та величина контрасту. Характеристикою рівня освітлення є середнє значення яскравості, а контраст визначається як середнє значення приростів яскравості по модулю (δ -ентропія) [4,5,8].

Ця інформація може бути використана для попереднього налаштування параметрів сприйняття відеоінформації. При високому рівні освітлення можливе детальне дослідження об'єкта за допомогою колбочок центральної ямки, організованих за кільцевим принципом. При цьому на вибір порогу впливає величина контрасту.

Високий рівень контрасту при реалізації „on”- і „off”-центрів для виділення інформативних ознак вказує на необхідність збільшення порогу бінаризації, в той час як невисокий рівень контрасту вимагає зменшення порогу бінаризації. Прикладом реалізації „on”-центру може бути маска Лапласа [9] розміром 3x3

виду 1

	-1	
-1	4	-1
	-1	

 або виду 2

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

У масці для реалізації „off”-центру знаки при коефіцієнтах змінюються на протилежні.

Зовсім малий контраст для забезпечення виділення інформативної ознаки вимагає нарощування гальмівних кілець навколо центрального збуджувального елемента і відповідного підвищення його ваги, тобто перехід від однокільцевої маски 3x3 до використання двокільцевих масок 5x5 тощо.

0	0	-1	0	0
0	-1	-2	-1	0
-1	-2	16	-2	-1
0	-1	-2	-1	0
0	0	-1	0	0

-1	-1	-1	-1	-1
-1	-2	-2	-2	0
-1	-2	32	-2	-1
-1	-2	-2	-2	-1
-1	-1	-1	-1	-1

При цьому степінь підсилення для масок Лапласа змінюється від 4, 8 до 16 та 32 відповідно.

Центральна ямка сітківки організована на колбочках, горизонтальних (HC), біполярних (BC) і гангліозних клітинах R-типу (GrC) за кільцевим принципом (“on”- і “off”-центри) (рис.1). Горизонтальні клітини є гальмівними. Зворотні зв'язки через амакринові (AC) клітини управляють сприйняттям контрасту шляхом зміни порогу або нарощування шарів нейронів навколо центрального.

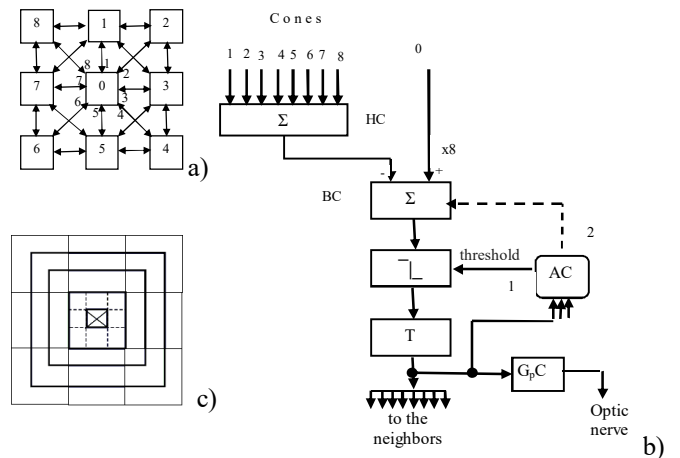


Рис. 1. Горизонтальні і біполярні клітини з нарощуванням кілець: а) кільцева організація нейронів у центральній ямці (“on”-центр): елемент “0” у центрі – збуджувальний, елементи “1–8” навколо – гальмівні; б) реалізація “on”-центру розміром 3x3; в) нарощування кілець навколо центрального елемента для підвищення чутливості до сприйняття контрасту

Така організація нейромережі добре узгоджується з напрацьованим арсеналом методів виділення різних інформативних ознак за допомогою масок Лапласа, Превіта, Робертса та ін. [9], завдяки чому можна ефективно підкреслювати контури, виділяти ознаки краю, виявляти інформативні точки, лінії, їхню орієнтацію, обчислювати градієнти тощо. Розглянута кільцева організація нейронів центральної ямки забезпечує підвищення контрасту, який збільшується з нарощуванням шарів нейронів навколо центрального елемента. Організація зв'язків між нейронами є досить універсальною і забезпечує можливість реалізації на такій структурі згорток з матрицями 3×3 , 5×5 , ... за рахунок збільшення часу обчислення. Усі обчислення на структурі виконуються паралельно. Слід також зауважити, що обчислення сум з виходів кільцевих нейронів та обчислення різниці між збуджувальним та гальмівними нейронами здійснюється послідовним кодом, що дозволяє реалізувати на такій схемі не тільки бітові коди після порогового обмеження, але і повнорозрядні коди. При цьому час обчислень збільшується практично пропорційно розрядності повнорозрядних кодів. Коефіцієнти матриць практично завжди можна прийняти числами, пропорційними степені двійки (0, 1, 2, 4, 8, ...), що виключає необхідність виконання операції множення.

Результати підсилення контрасту при використанні кільцевої організації нейронів з одним і двома кільцями навколо центрального елемента наведено на рис.2.

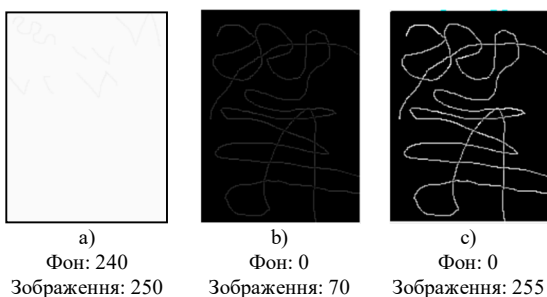


Рис. 2. Підсилення контрасту на колбочках центральної ямки за рахунок кільцевої організації нейронів: а) вхідне зображення; б) кільцева організація нейронів центральної ямки з маскою 3×3 ; в) кільцева організація нейронів центральної ямки з маскою 5×5

Корекцію параметрів сприйняття контрасту, по аналогії з функціями амакринових клітин, пропонується здійснювати шляхом оцінювання кількості колбочок (підключених до збуджувального входу біполярної клітини) на визначеній ділянці рецепторного поля, що здолали поріг дискретизації. При їх відсутності або невеликій кількості поріг знижується, поки не досягне заданого рівня, наприклад 10%, від загальної кількості колбочок цього рецепторного поля (вихід 1 на Рис. 1). Радикальніше діє вихід 2 амакринової клітини, який управляє нарощуванням кільця навколо центрального елемента.

Розглянемо деякі особливості роботи “on”- і “off”-центрів.

“On”-центри забезпечують виділення більш світлих об’єктів на темному фоні (показують внутрішню границю

об’єкта), а “off”-центри – навпаки, виділяють більш темні об’єкти на світлому фоні (показують зовнішню границю об’єкта). Результати роботи “on”- і “off”-центрів щодо світлих і темних об’єктів показано на рис.3.

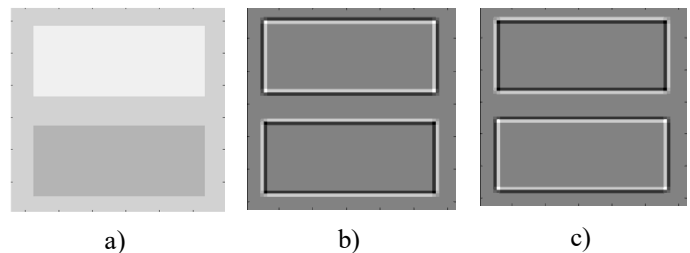


Рис. 3. Результати роботи “on”- і “off”-центрів при виділенні світлих (темних) об’єктів на темному (світлому) фоні: а) вхідні зображення; б) результат роботи “on”-центра; в) результат роботи “off”- центра. (Результати подані на шкалі ± 128 .)

Для більш точного розуміння процесів, які відбуваються при проходженні маски по зображенню, моделювання здійснюється в повнорозрядних кодах, тобто без порогового обмеження. Проведені дослідження дозволили виявити ряд цікавих і корисних особливостей обробки зображень масками. Наприклад, зазвичай для виділення контурів або виділення інформативних ознак здійснюється прохід по зображенню однією маскою, наприклад з “on”- або “off”-центром. Однак у зображеннях наявні елементи більш світлого кольору на фоні більш темного, і навпаки, а вони виділяються різними масками.

Пропонується адаптивно використовувати обидва центри. Для цього, в залежності від різниці між збуджувальним входом біполярної клітини та сумою гальмівних входів з горизонтальної клітини, використовується той або інший центр (можливо, цим процесом управляє амакринова або якась інша клітина). Якщо ця різниця додатна, то процес іде по “on”-центру, в протилежному випадку - по “off”-центру. При цьому від’ємні результати використання маски обнуляються. Результатом такого підходу є можливість відображати сцену з більш точними розмірами об’єктів незалежно від яскравостей фону і об’єктів (рис.4).

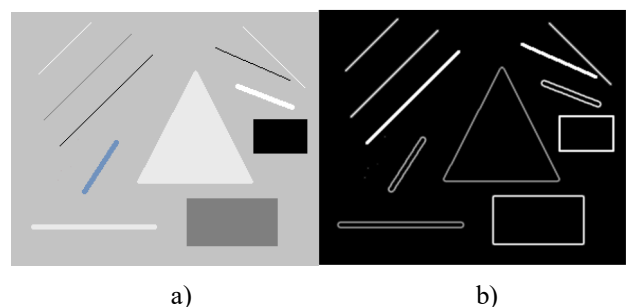


Рис. 4. Адаптивне використання “on”- і “off”-центрів: а) вхідне зображення, б) результат обробки.

Враховуючи широкі можливості адаптації нейронних зв’язків до форми, орієнтації тощо [10], розглянута організація елементів центральної ямки за рахунок зміни коефіцієнтів маски забезпечує також виявлення ліній, контурів, країв, обчислення градієнта тощо. Тобто

забезпечена можливість використовувати напрацьований арсенал масок не тільки по розмірам масок але і по функціям.

В умовах недостатнього рівня освітлення ефективно працюють палички сітківки за рахунок підсумовування сигналів з більших рецепторних полів, обмінюючи просторову роздільність на підвищення чутливості. Великий контраст у цих умовах не вимагає значного розширення рецепторних полів, тобто достатньо використання полів для підсумовування розміром 2×2 , що дає підвищення чутливості сприйняття контрасту з використанням лапласіна 3×3 у $8 \times 4 = 32$ рази. При малому контрасті необхідно збільшувати рецепторні поля для підсумовування до 3×3 , 4×4 , що забезпечує степінь підсилення у $8 \times 9 = 72$ та $8 \times 16 = 128$ разів. При цьому розміри зображення зменшуються відповідно в 4, 9 та 16 разів.

Периферія сітківки спеціалізована на високу чутливість і організована на паличках сітківки, дифузних (DC), біполярних (BC) і гангліозних клітинах М-типу (G_{MC}) також за кільцевим принципом (рис. 5). Підвищення чутливості в умовах недостатнього освітлення забезпечується завдяки сумачі сигналів зі значної кількості паличок і дії гальмівних дифузних клітин. При цьому, відповідно, зменшується роздільна здатність по простору. Зворотні зв'язки через інтерплексіформні (IPSC) клітини управляють порогами або розмірами рецепторних полів.

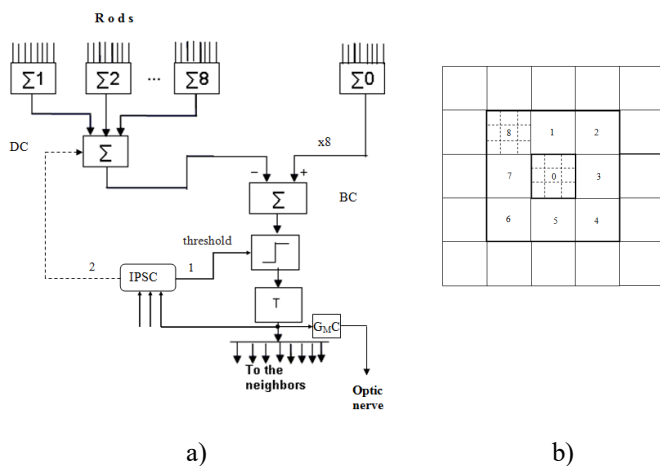


Рис. 5. Дифузні і біполярні клітини з нарощуванням кілець: а) реалізація кільцевої організації нейронів периферійної сітківки; б) нарощування кілець для підвищення чутливості в умовах недостатнього освітлення.

Результати підсилення чутливості периферійної сітківки шляхом сумачі сигналів масками 2×2 , 3×3 , 4×4 та їх кільцевої організації з маскою Лапласа 3×3 наведені на рис. 6.

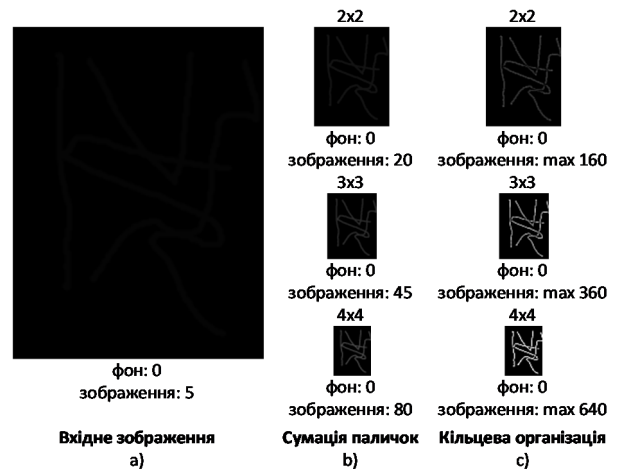


Рис. 6. Підсилення чутливості периферійної сітківки шляхом сумачі сигналів з паличок та їх кільцевої організації: а) вхідне зображення; б) результат підсилення за рахунок сумачі масками 2×2 , 3×3 , 4×4 ; в) результат підсилення за рахунок кільцевої організації з маскою Лапласа 3×3

Корекцію параметрів сприйняття зображення в умовах недостатнього освітлення, по аналогії з функціями інтерплексіформних клітин, пропонується здійснювати шляхом оцінювання кількості груп підсумованих паличок на визначеній ділянці рецепторного поля, що здолали поріг дискретизації. При їх відсутності або невеликій кількості вихід 2 інтерплексіформної клітини управляє нарощуванням кілець навколо центрального елемента.

Для реалізації зазначених вище підходів пропонується узагальнена структура нейромережі (рис.7), яка шляхом переналаштування на одному або декількох шарах нейронів, може працювати в режимі центральної ямки або периферійної сітківки.

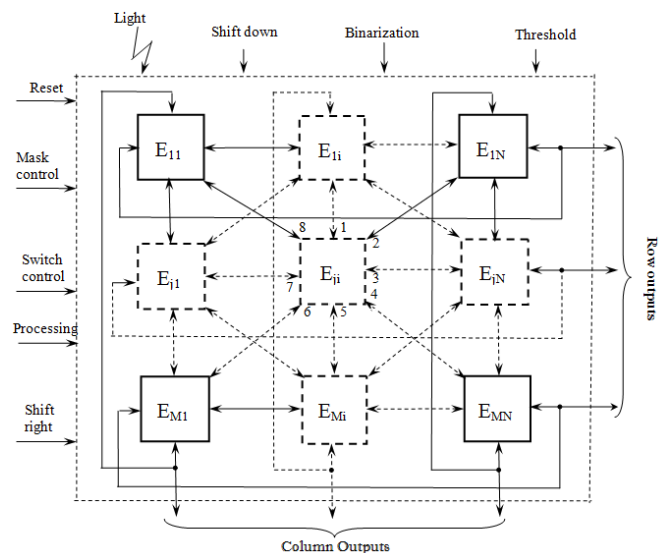


Рис. 7. Структура сенсорної матриці з обробкою зображень. Додаткові шари нейронів для обчислення моментів, визначення місцеположення об'єктів тощо.

Кожний елемент матриці має зв'язки тільки з сусідніми елементами матриці (принцип близькодії), тобто, по аналогії із зоровим аналізатором людини, може реалізувати on- і off-центри з кільцевою організацією.

Елемент матриці забезпечує сприйняття світла фотодетектором, бінарizaцію, виконання логікової обробки інформації, комутацію входів і виходів елемента матриці та кільцеві зсуви інформації вздовж рядків і стовпців матриці, а також запам'ятовування спочатку бінаризованої вхідної інформації, потім результатів логікової обробки або результатів зсуву.

Крім того, підключення на виходи рядків і стовпчиків сенсорної матриці додаткових пристроїв з мікроконтролером для управління процесами дозволяє значно розширити її функціональні можливості. Кільцеві зв'язки в рядках і стовпчиках матриці забезпечують не тільки зсув інформації в них, але й записування в матрицю проміжних результатів обчислень. Тобто це дозволяє використовувати матрицю декілька разів для послідовних процесів обчислення. При цьому може бути використаний цілий арсенал напрацьованих методів на базі масок для придушення шумів і покращення якості зображення, виділення країв, підкреслення або виділення контурів, виділення орієнтаційних ознак, обчислення градієнтів. Коефіцієнти масок задаються комплексно (тобто вказується тільки тип матриці) і відповідні процедури реалізуються без операції множення.

Середні значення яскравості й контрасту для попереднього налаштування матриці можуть бути обраховані на запропонованій матриці шляхом підключення накопичувальних суматорів на виходах рядків або стовпців. Зсуваючи зображення, наприклад вправо, і підсумовуючи значення яскравостей пікселів рядків, отримуємо середні значення по рядках, а потім, зсуваючи їх по вертикалі і накопичуючи в мікроконтролері, отримуємо середнє значення яскравості всього зображення. При розмірах зображення кратних степені 2 легко реалізується усереднення шляхом зчитування старших розрядів накопичувальних суматорів. Аналогічно може бути обраховане і середнє значення контрасту. При цьому можуть бути реалізовані підходи до адаптації налаштувань шляхом обчислення середніх значень яскравості і контрасту для окремих ділянок зображення.

З використанням зазначених методів розроблено ряд спеціалізованих технічних рішень, захищених патентами на винаходи, для суміщення процесів сприйняття відеоінформації з її обробкою безпосередньо на сенсорній матриці. Зокрема, це сенсорні матриці з паралельною бінарizaцією зображення і визначенням місцеположення

та параметрів об'єкта [11,12], з обчисленням перших і других моментів інерції бінаризованого зображення для рядків, стовпців і всього зображення [13], з морфологічною обробкою бінаризованого зображення [14], з паралельним аналого-цифровим перетворенням та можливістю нелінійного сприйняття яскравості [12].

ВИСНОВКИ

Таким чином, використання принципів організації нейронів зорового аналізатора людини на рівні сітківки дозволяє розробляти нейромережі високої продуктивності та спрощеного налаштування для відбору і первинної обробки інформації в системах реального часу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] H.R. Schiffmann, Sensation and perception. 5-th ed. Piter, SPb., Russia, 2003. 928 p. (in Russian)
- [2] D. Anderson, Cognitive psychology. 5-th ed. Piter, SPb., Russia, 2002. 496 p. (in Russian)
- [3] V. Boyun, A human visual analyzer as a prototype for construction of the set of dedicated systems of machine vision. Transactions of the International conference "Artificial intelligence. Intelligent systems. II-2010, 2010, vol. 1, pp. 21-26. (in Ukrainian)
- [4] V. Boyun, Intelligent selective perception of visual information. Informational aspects. Artificial intellect. 2011. №3. pp.16-24. (in Ukrainian)
- [5] V. Boyun, Intelligent Selective Perception of Visual Information in Vision Systems. Proceedings of the 6-th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application. (IDAACS'2011). (Czech Republic, Prague. 15-17 September 2011). -2011. - Vol.1. - P.412-416.
- [6] V. Boyun, Directions of Development of Intelligent Real Time Video Systems. Application and Theory of Computer Technology, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 48-66, apr. 2017. ISSN 2514-1694. Available at: <<http://www.archyworld.com/journals/index.php/atct/article/view/65>>. Date accessed: 26 sep. 2017. doi: <https://doi.org/10.22496/atct.v2i3.65>.
- [7] O.G. Rudenko, E.V. Bodiatsky, Artificial neural networks. The company "SMIT", Kharkov, 2005. 407 p. (in Russian)
- [8] V. Boyun, The dynamic theory of information. Fundamentals and applications. Institute of Cybernetics of NASU, Kyiv, Ukraine, 2001, 326 p. (in Russian)
- [9] R. Gonsales, R. Woods, Digital image processing. Technosphere, Moscow, Russia, 2005. 1072 p. (in Russian)
- [10] I.A. Shevelev, Neurons of visual cortex. Adaptability and dynamics of receptive fields. Nauka, Moscow, USSR, 1984. – 220 p. (in Russian)
- [11] V.P. Boyun, Device for determination and parameters of an object in an image. Ukraine Patent for an invention, № 76597, BI №6, 10.01.13. (in Ukrainian)
- [12] V.P. Boyun, Sensor device for determination of location and center of gravity of an object. Ukraine Patent for an invention, № 106292, BI №15, 11.08.14. (in Ukrainian)
- [13] V.P. Boyun, Sensor device for determination of location and moments of inertia of an object in an image. Ukraine Patent for an invention, № 106301, BI №15, 11.08.14. (in Ukrainian)
- [14] V.P. Boyun, Sensor matrix with image processing. Ukraine Patent for an invention, № 109335, BI №6, 10.08.15. (in Ukrainian)

Аналітичні Мережі як Засіб Моделювання Складних Систем

Віктор Ровінський
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
musicneutrino@gmail.com

Ольга Євчук
кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій і
систем
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу
Івано-Франківськ, Україна
olga.yevchuk@gmail.com

Analytic Networks for Complex System Modeling

Victor Rovinsky
dept. of Computer Science
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
musicneutrino@gmail.com

Olga Yevchuk
dept. of Information and Telecommunication Technologies
and Systems
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and
Gas
Ivano-Frankivsk, Ukraine
olga.yevchuk@gmail.com

Анотація—Запропонований метод синтезу цифрових моделей для складних систем за відомими їх еталонними сигналами на основі аналітичних мереж. Робота аналітичних мереж ґрунтується на використанні модифікованого генетичного алгоритму та бібліотеки блоків незмінної функціональності.

Abstract—A method based on analytical networks for the synthesis of digital models for complex systems based on their known reference signals, is proposed. The work of analytical networks is based on the use of a modified genetic algorithm and a library of blocks with fixed functionality.

Ключові слова—аналітична мережа, генетичний алгоритм, музичний синтез

Keywords—analytic network, genetic algorithm, musical synthesis

I. ВСТУП

Процес синтезу сучасних систем, в багатьох випадках, вимагає значного часу і зусиль. При цьому успіх такого процесу ґрунтується на попередньому досвіді та інтуїції розробника. В зв'язку з цим процес конструювання таких систем може частково розглядатись, як творчий, з елементами, які притаманні мистецтву і не можуть бути формалізовані. При цьому доводиться виконувати роботу складання основної бази системи із відомих за конструкцією вузлів, провадити їх налаштування, оптимізацію конструкції на предмет можливості

використання одного і того ж блока для виконання декількох функцій, тощо. Невелика частина вузлів може мати потребу вдосконалення і пошуку нових принципів функціонування, що призводить до появи інноваційної складової, і в подальшому переважно надає конкурентну перевагу розроблюваній системі.

Розроблення нових систем передбачає також вивчення досвіду попередників, на основі аналізу будови систем-прототипів. Це дозволяє прискорено пройти еволюційний шлях розвитку заданого класу систем. При цьому слід зауважити, що нові схемні рішення часто захищені патентами, що додатково накладає обмеження на їх використання у власних розробках. Тому нерідко може використовуватись аналіз системи методом «чорної скриньки», що також вимагає значних часових ресурсів. Розроблення нових вузлів також може мати значну квазівипадкову основу, коли шляхом інтуїтивного добору створюються нові рішення, або виявляються нові, невідомі до того, властивості відомих об'єктів. Пошук таких рішень також може займати дуже значну кількість часу, з наперед невідомим результатом. Тому актуальним завданням є автоматизація творчого процесу проектування систем.

Серед всього різноманіття систем можна виділити електронні, які мають свої програмні моделі, і можуть бути адекватно і швидко змодельовані за допомогою ЕОМ. Для механічних систем існуючі програмні моделі вимагають значної кількості обчислень і не можуть поки що бути

рекомендовані до числового моделювання на доступних обчислювальних засобах.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В даній роботі пропонується використати автоматизований метод проектування електронних систем за допомогою аналітичних мереж. Введемо поняття «аналітична мережа» (АМ) як мережі вузлів, які мають

набір наперед визначених функціональних блоків. Пропонується розглянути можливість функціонування АМ на прикладі ресинтезу музичного аналогового синтезатора за заданими зразками вихідного звуку. Типова структурна схема одного каналу аналогового синтезатора, придатного для відтворення однієї ноти заданого тембру, наведена на рис. 1 [1].

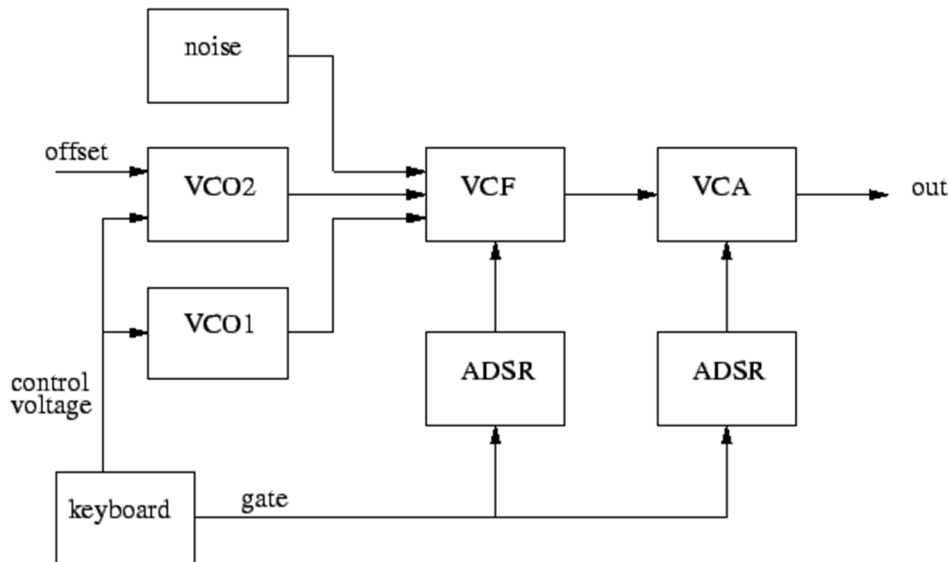


Рис. 1. Типова структурна схема одного каналу аналогового синтезатора

Синтезатор складається з клавіатури (keyboard) – єдиного механічного вузла, поведінка якого не симулюється, електрично-керованих генераторів (VCO1, VCO2) які формують коливання заданої частоти (наприклад 440Гц – нота «ля» першої октави), і заданої форми – пилоподібний, прямокутний, гармонічний, ШІМ, тощо. Кількість таких генераторів може складати від 2 до 4 і кожен забезпечує формування сигналу заданої амплітуди. Вони можуть бути частково розстроєними один відносно іншого за допомогою сигналу зміщення (offset), що надає природності звучання синтезованого звуку. До складу входить також генератор шуму (noise), який дозволяє імітувати шумові складові музичних звуків. Сумарний сигнал, одержаний від генераторів, надходить на вхід електрично-керованого фільтра (VCF), який забезпечує плавну зміну спектру по частоті. З виходу фільтра сигнал надходить на вхід електрично-керованого підсилювача (VCA), який формує обвідну сигналу. Керування фільтром та підсилювачем здійснюється за допомогою інфра-низькочастотних (ІНЧ) генераторів (ADSR), які працюють як одновібратори, формуючи напругу у відповідь на натискання клавіші на клавіатурі. Форма їх вихідного сигналу визначає час атаки, спадання, утримання та затухання після відпускання клавіші. Крім того, такі ІНЧ генератори можуть здійснювати періодичну модуляцію частоти та амплітуди сигналів, утворюючи ефекти «тремоло» та «вібрато».

Подібна задача може розв'язувалась за допомогою технологій ройових алгоритмів [3], прихованих

марківських моделей [4], неймереж [5], клітинних автоматів [6] та генетичних алгоритмів [7]. Проте наявні публікації (наприклад [2]) стосуються переважно налагоджування параметрів/коефіцієнтів існуючих апаратних засобів (у вигляді їх цифрової симуляції), без модифікації існуючої структури системи.

Генетичні (еволюційні) алгоритми можуть бути використані для вирішення такої проблеми. Завдання слід формалізувати таким чином, щоб її рішення могло бути закодовано у вигляді вектора «генів», де кожен ген може бути бітом, числом або складним об'єктом. У типових реалізаціях еволюційного алгоритму передбачається, що генотип має фіксовану довжину. Далі, певним чином створюється значна кількість генотипів початкової популяції. Вони оцінюються з використанням «функції пристосованості», в результаті чого з кожним генотипом асоціюється певне значення, яке визначає, наскільки добре фенотип, що ним описується, вирішує поставлене завдання.

З отриманої кількості рішень з урахуванням значення «пристосованості» вибираються кращі рішення, до яких застосовуються «генетичні оператори» (в більшості випадків «схрещування» - crossover і «мутація» - mutation), результатом чого є отримання нових рішень. Для них також обчислюється значення пристосованості, і потім проводиться відбір («селекція») кращих рішень в наступне покоління.

Цей набір дій повторюється ітеративно, і таким чином моделюється еволюційний процес, що триває кілька життєвих циклів, при яких продукується декілька поколінь, поки не буде виконано критерій зупинки алгоритму. Такими критеріями, як правило, можуть бути:

- знаходження оптимального, або квазі-оптимального рішення
- вичерпання числа поколінь, відпущених на еволюцію
- вичерпання часу, відпущеного на еволюцію
- вичерпання часу, на поліпшення попереднього результату

Однією з основних проблем в роботі еволюційних алгоритмів є критерій відбору. Механізм відбору повинен забезпечувати достатню швидкість, та точність селекції поколінь на основі заданих параметрів.

Використання генетичних алгоритмів в поєднанні із змішаним алгоритмом картезіанського генетичного програмування (Mixed Typed Cartesian Genetic Programming) для генерування структури графа розглядалося, наприклад, в [8], однак оскільки початкова структура графа формувалась випадковим чином, загальний час експерименту для 5000 поколінь при виконанні на розподіленому кластері склав 5 годин. Автори пропонують підвищувати швидкість шляхом ретельного налаштування параметрів алгоритму. Інший шлях, що пропонується в даній роботі, полягає у використанні інформації про типову структуру системи, де окремі блоки є фіксованими і потребують лише налаштування параметрів, а окремі підмережі є повністю варіативними, тобто для них налаштовуються типи блоків, параметри та зв'язки між ними.

III. АЛГОРИТМ РЕСИНТЕЗУ

Для автоматичного ресинтезу даного пристрою пропонуються структурні блоки АМ, які можуть містити, за потреби, в своєму складі наступні функціональні вузли:

- генератор коливань (керована пилка, керований прямокутник, синус, таблиця програмованих значень);
- генератор шуму;
- математичні операції (+, -, *, /);
- логічні операції (AND, OR, XOR, NOT);
- фільтри довільних типів на основі алгоритму швидкої згортки;
- блок пам'яті для запам'ятовування 1 сек цифрової інформації з можливістю зсуву та довільної вибірки даних;
- блок порівняння
- корелятор;
- нелінійний елемент;
- гістерезисний елемент;
- пряме і зворотне швидке косинусне перетворення;
- звукові ефекти типу хорус (фезер, флейнджер тощо).

Набір вузлів може бути розширений, враховуючи специфіку систем, що потребують ресинтезу.

Загальна схема ресинтезу системи може мати вигляд, показаний на рис.2:

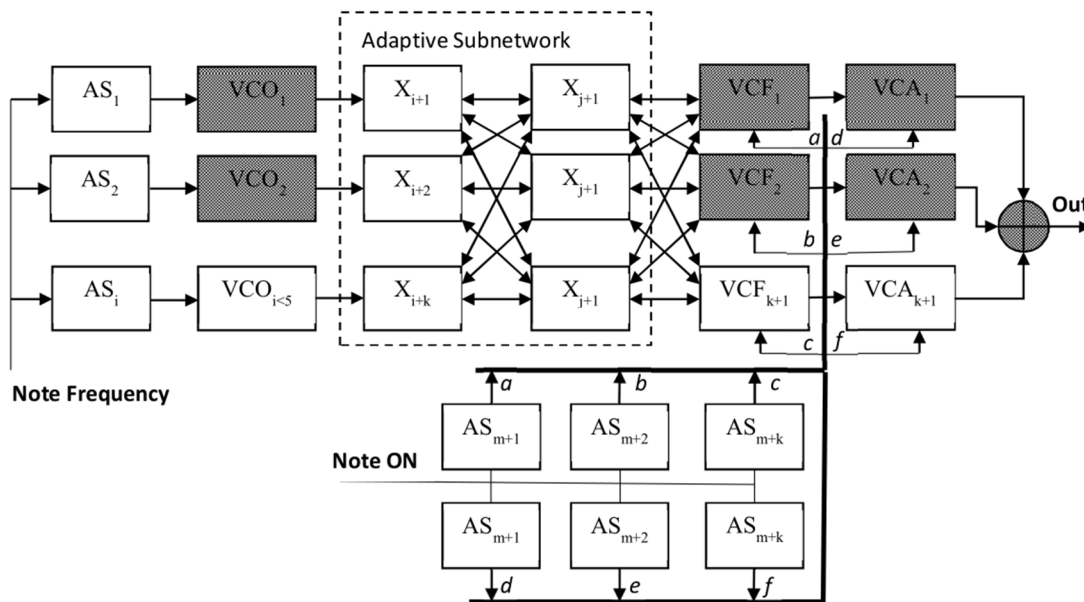


Рис. 2. Структурна схема ресинтезу синтезатора на основі аналітичної мережі, де X – довільні блоки з заданого набору, AS – адаптивна підмережа

Сірим позначені блоки, типи яких не можуть змінюватись в процесі селекції (фіксовані блоки). Для

таких блоків можуть підбиратись тільки внутрішні коефіцієнти та параметри, проте функціональне

призначення блоку не змінюється. Базова схема визначає «скелетну» будову синтезованого пристрою, навколо якого відбувається еволюційне нарощування «додаткових органів», які реалізують нюанси функціонування ресинтезованої системи, які неможливі у реалізації тільки «скелетною» схемою. Адаптивна підмережа AS_j – це, в загальному випадку, довільний набір блоків X_i, поєднаних між собою, що може мати необхідну кількість входів і виходів, а також довільну кількість каскадів та шарів. Кількість виходів і входів для неї визначається скелетною схемою, внутрішня структура AS підбирається за допомогою процесу селекції.

Процес селекції включає в себе формування структури адаптивних підмереж навколо скелетної схеми, заданої початково вручну, у випадку, коли наближено відома структура пристрою, який необхідно ресинтезувати. Процес розбивається на декілька фаз, кількість яких відповідає кількості заданих вихідних сигналів. Після додавання нового апаратного блоку X з типом, що найбільш ймовірно можуть застосовуватись поруч із скелетними блоками, проводиться повне налаштування всіх параметрів для всіх блоків системи, в прагненні досягнення максимального співпадіння вихідного сигналу із еталонним. Якщо сигнали не достатньо співпадають, змінюється тип блоку X на менш ймовірний і проводиться повторне налаштування одержаної системи. Після досягнення нижньої межі допустимої ймовірності використаних блоків, приймається рішення про додавання нового блоку в підмережу. Далі процес повторюється, аж до максимального досягнення співпадіння одержаного сигналу з еталонним. В наступній фазі – спробі синтезу наступного сигналу, спочатку змінюються всі регулятори синтезованої системи, і в разі, якщо заданими апаратними засобами неможливо відтворити заданий сигнал – починається додавання нових апаратних блоків. При цьому старі апаратні блоки фіксуються - залишаються незмінними в процесі ресинтезу.

В якості функції відбору пропонується використати двофазний алгоритм для грубої і точної оцінок одержаного результату. В першій (наближеній) фазі, продукований звуковий сигнал порівнюється з еталонним за допомогою мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (МЧКК).

У процесі обробки звуку мел-частотний кепстр (МЧК) являє собою короточасний спектр потужності звукового сигналу, базований на лінійному косинусному перетворенні логарифмічного спектру потужності, що представлений на нелінійній частотній мел-шкалі.

Мел-частотні кепстральні коефіцієнти (МЧКК) - це коефіцієнти, які разом складають МЧК. Різниця між кепстром і мел-частотним кепстром полягає в тому, що в МЧК діапазони частот однаково розташовані на мел-шкалі, яка описує особливості чутливості людської слухової системи більш повно, ніж лінійно розташовані частотні діапазони, що використовуються в нормальному кепстрі [9].

Друга фаза порівняння базована на аналізі різниці спектральних характеристик, одержаних в діапазоні 50Гц – 10кГц. Даний діапазон вибраний, як найбільш суттєвий з

точки зору різниці тембрів. Така фаза потребує більшу кількість операцій, ніж МЧКК, тому використовується тільки на етапі фінального точного підстроювання регуляторів (управляючих коефіцієнтів) системи.

Реалізація алгоритму роботи аналітичної мережі здійснюється за допомогою управляючого блоку (УБ), який здійснює вибір блоків аналітичної мережі та налаштування всіх коефіцієнтів системи. Реалізація УБ і повної системи може бути здійснена повністю програмно за допомогою комп'ютера, або за допомогою масиву цифрових сигнальних процесорів (реалізація АМ) та процесора загального призначення (реалізація УБ).

ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано використати аналітичні мережі як засіб цифрового моделювання складних систем на прикладі ресинтезу аналогового музичного синтезатора. Це дозволить більш точно відтворювати існуючі звукові моделі, оскільки під час цього процесу відбувається не тільки підбір параметрів моделі, але й динамічне вдосконалення самої моделі. За допомогою такого підходу можна також синтезувати нові електричні моделі для існуючих механіко-акустичних процесів, наприклад синтезувати структуру електро-фортепіано, на основі записаних звуків механічного фортепіано.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Kent H Lundberg. So you want to build an analog synthesizer? [Online]. Available: <http://web.mit.edu/klund/www/weblatex/node2.html>
- [2] A. Horner and J. Beauchamp and L. Haken, Machine tongues XVI: Genetic algorithms and their application to FM matching synthesis. *Computer Music Journal* 17, 4 (1993), 17–29
- [3] S. Heise, M. Hlatky, J. Lovisnach, “Automatic cloning of recorded sounds by software synthesizers.” in *Proceedings of the Audio Engineering Society Convention 127*, 2009, in press.
- [4] T. Yoshimura, K. Tokuda, T. Masuko, T. Kobayashi, T. Kitamura. “Simultaneous modeling of spectrum, pitch and duration in HMMbased speech synthesis”. in *Proceedings of the conference on Speech Communication and Technology*, 1999, [pp. 1315–1318], in press.
- [5] M. Roth, M. Yee-King. “A comparison of parametric optimization techniques for musical instrument tone matching”. in *Proceedings of the Audio Engineering Society Convention*, 2011, [pp. 972–980], in press.
- [6] J. Serquera, E. Miranda, “Evolutionary sound synthesis: rendering spectrograms from cellular automata histograms.” in *Applications of Evolutionary Computation*, 2010, [pp. 381–390], in press.
- [7] A. Horner, “Evolution in digital audio technology”. in *Evolutionary Computer Music*. Springer, 2007, [pp. 52– 78], in press.
- [8] M. Macret, P. Pasquier, “Automatic Design of Sound Synthesizers as Pure Data Patches using Coevolutionary Mixed-typed Cartesian Genetic Programming” [Online]. Available: <https://www.lri.fr/~hansen/proceedings/2014/GECCO/proceedings/p309.pdf>
- [9] G. Zheng, G. Zhang, Z. Song, “Comparison of Different Implementations of MFCC”, in *Journal of Computer Science & Technology*, vol. 16, 2001, [pp. 582–589], in press

Encoding Images with Fractal Genetic Algorithm

Olena Osharovska, Mikola Patlayenko
Television and Radiobroadcasting Department
O.S. Popov's ONAT
Odessa, Ukraine
osharovskaya@gmail.com, nick_msa@ukr.net

Кодування Зображень Фрактальним Генетичним Алгоритмом

Олена Ошаровська, Микола Патлаєнко
кафедра телебачення та радіомовлення,
ОНАЗ ім. О. С. Попова
Одеса, Україна
osharovskaya@gmail.com, nick_msa@ukr.net

Abstract—This article presents the results of applying a fractal modified genetic algorithm for encoding high-definition images. Dependences of the compression ratio on the sizes of rank blocks and the signal-to-noise ratio are obtained depending on the mean square deviation of the average brightness of the compared blocks. A structure for constructing the code and the bit depth of individual fields is proposed. The time spent on encoding and decoding the image has been calculated.

Keywords—Image, fractal, genetic algorithm, rank block, domain block, compression ratio

Анотація—У даній статті наведені результати застосування фрактального модифікованого генетичного алгоритму для кодування зображень високої чіткості. Отримано залежності коефіцієнта стиснення від розмірів рангових блоків і відносини сигналу до шуму в залежності від середньоквадратичного відхилення середньої яскравості порівнюваних блоків. Запропоновано структуру побудови коду і розрядності окремих полів. Розраховані часові витрати на кодування і декодування зображення.

Ключові слова—Зображення, фрактал, генетичний алгоритм, ранговий блок, доменний блок, коефіцієнт стиснення

I. INTRODUCTION

Fractal compression of images is based on splitting the image into blocks and searching for similar blocks. True fractals have self-similarity properties when scaling and affine transformations. The image is divided into large enough square areas, called domain blocks. Further, the first domain block is divided into smaller rank blocks. The size of the rank blocks during the encoding process can vary depending on the specified quality. The maximum size of a rank block corresponds to a domain block, and the minimum size

measured as two by two image elements. Next, a rank block is compared from the first domain block to other ranking blocks in both its domain and other domains. The desired accuracy of the similarity of blocks is set in the above parameters, K . In addition, rank blocks can undergo affine transformations of the type of rotation, reflection.

At this stage, there are high costs, both computing power, and temporary. In the proposed algorithm, the search for such rank blocks is performed in parallel in all domain blocks. Rank blocks taking similar characteristics can be called "heirs", and the block with which the comparison is made is called "parent". Therefore, the name of such algorithms is genetic [1, 2].

II. A VECTOR OF RANK BLOCK PARAMETERS

Define the parameters of image blocks, which will compare the similarity of rank blocks [3, 4, 5]. First of all, the average luminance value (chroma) ($P_{x,y}$) within the block of rank I_i ; the standard deviation of brightness (d) within each block.

Standard deviation in rank block (1):

$$d = \sqrt{\frac{\sum_I (P_{x,y} - m)^2}{N_I}}, \quad (1)$$

Asymmetry (a) in rank block (2)

$$a = \frac{\sum_I (P_{x,y} - m)^3}{N_I \cdot d^3} \quad (2)$$

Inter-pixel contrast difference (c) within rank block (3):

$$c = \frac{\sum_I |P_{x,y} - P_{x-d,y}| + |P_{x,y} - P_{x,y-d}|}{N_I} \quad (3)$$

The following conventions are used in the formulas:

- I - segment of the image;
- N_I - number of pixels in the segment I ;
- $P_{x,y}$ - pixel brightness value at the point (x, y) ;
- m - average pixel value in the segment I ;
- I_h, I_v - horizontal and vertical coordinates of a rank block in a domain block.

The above parameters, as well as others, on which you can compare and colorimetric proximity, are combined into a vector. Therefore, when comparing rank blocks, the desired accuracy of the matching of the parameters is specified. The higher the accuracy, the higher the number of rank blocks you have to split the image, and the more time it takes for fractal coding. In our models, we limited ourselves to an accuracy of 5% for the average brightness of the rank block [5, 6].

III. STRUCTURE CODE UNDER THE GENETIC ALGORITHM

The HD 1080 format has a resolution of 1920×1080 pixels [7, 8, 9]. The row number and the column number specify the address of each pixel, each of these numbers can be represented by an eleven-bit binary code, which corresponds to the common 22-bit code. The number of pixels in the image is 2073600, because of the progressive scan, if represent all the image elements as a one-dimensional array, then the number of each element can be specified by a 21-bit code.

As test images were selected as artificially created images, and natural (Fig. 1).



Fig. 1. Examples of test images

The construction of the code for the fractal genetic algorithm begins with the number and size of the domain block. In the conducted experiments, the number of domain blocks varied from 200 to 5000. Then, the address and size of the parent-ranking block and its parameter vector are recorded, followed by the addresses of the ranked child blocks. The number of the domain block is necessary, since ranked heirs from the first domain will cover not all areas. The parameter

vector does not have a constant length, for example, in the experiments carried out; affine transformations are not used to shorten the coding time. Another feature of the code generation is the permutation of the samples in the rank block in the z-scan type. For each next rank block, the addresses are repeated, that makes it possible to use efficiently statistical coding in the next step, for example, the Huffman code or the arithmetic code. We give the structure of the code and the approximate bit depth of each field (Table I).

TABLE I. THE CONSTRUCTION OF THE CODE FOR THE FRACTAL GENETIC ALGORITHM.

Parameter	Bit Depth
Domain block address	22
The size of the domain block	13
Address of rank block	11
The size of the rank block	5
Vector of the rank block parameters	32
Address of the first heir of the ranking block	33
Addresses of the following heirs	33

If a non-compressed high-definition image for storing the luminance component with a 10-bit code spends 20971529 bits, then for fractal compression with the size of rank blocks 4×4 , the number of rank blocks 1228 will require 40673 bits, which theoretically makes it possible to obtain a compression ratio of 515. However, the encoding time will be of the order of 50 seconds, with existing personal computers for mass use.

Developing code structure takes into account the fact that the domain blocks as the rank, in the proposed algorithm selects only a square shape, and in relation to said circumstance is enough to indicate the coordinates of one "corner". The presence of fields indicating the size of the blocks allows you to calculate quickly other addresses.

The coding process develops recursively, from a smaller number of rank blocks with the largest sizes to a larger number of rank blocks with smaller sizes. The larger the rank, the more difficult to find the like, and accordingly, when restoring the image will be more "rough". It is in this case that more similarity properties are considered, including affine block transformations. One can calculate the root-mean-square difference between the original and the restored image. Based on the RMS, it is possible to calculate image quality indicators consistent with human perception, for example, the structural similarity index SSIM [10, 11, 12, 13, 14]. In the case of not satisfactory quality, it is necessary to reduce the sizes of rank blocks by splitting them. Unfortunately, we have to recalculate all the components of the parameter vector and re-search for the heirs. For an extremely small size of the rank block 2×2 , the parameter vector can consist of only one value of the average brightness of the block, but the code will increase the number of addresses of the heirs. Of course, in this case, the reproducible sharpness of the image is reduced. The decoding time, on the contrary, decreases in comparison with the large sizes of rank blocks.

IV. RESULTS OF FRACTAL COMPRESSION MODELING

A model of genetic fractal image coding was implemented in MatLab on a personal computer. During the simulation, the number of domain and rank blocks was changed, the compression ratio, the peak signal-to-noise ratio, the average pixel reconstruction error, the time spent on the encoding and decoding process were calculated. Simulation was carried out for all the above images.

Let us present the results of calculating the compression ratio depending on the number of rank and domain blocks for the image "girl in a T-shirt". The subjective quality of the reconstructed image deteriorates as the size of the rank block increases (Fig. 2). When the size of the rank block is 20 pixels, the blocking of the image becomes clearly visible.



Fig. 2. The image quality at a different size of the rank block

The results of the computational experiment for the image of a girl in a T-shirt are summarized in Table II. The sharp increase in the number of domain blocks with decreasing size of rank blocks attracts attention.

TABLE II. DEPENDENCE OF THE PARAMETERS OF THE FRACTAL CODING OF THE IMAGE "GIRL IN A T-SHIRT" ON THE SIZE OF THE RANK.

PARAMETERS	Rank 20	Rank 12	Rank 8	Rank 4
Domain blocks	225	841	2977	4562
Rank blocks	1651	1504	1264	1228
Average pixel error, %	3,79	3,92	3,73	3,69
Compression ratio	4,35	4,68	5,38	5,51
Coding time, s	4,58	12,86	30,25	49,39
Decoding time, s	1,91	1,62	1,41	1,25

Analyzing the results presented in Table II, it can be concluded that reducing the size of rank blocks from 20 to 4 increases the encoding time tenfold, and the compression ratio increases by only 20%. The average pixel score decreases by only 3%. The results underscore the fact that objective characteristics do not provide an adequate idea of subjective quality.

Here also are given results depending on the compression ratio of mean-square error, which is selected by the need to continue or stop the division rank of blocks (Fig. 3).

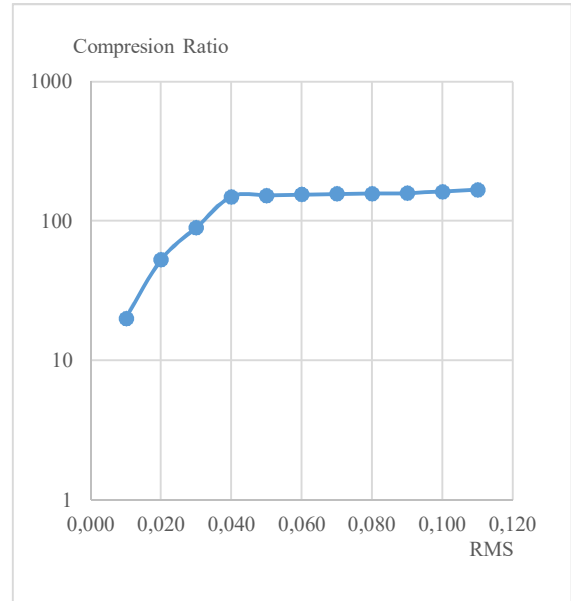


Fig. 3. Dependence of the compression ratio on the mean square deviation

The dependence of the peak signal / noise ratio on the size of the ranks is shown in Fig. 4

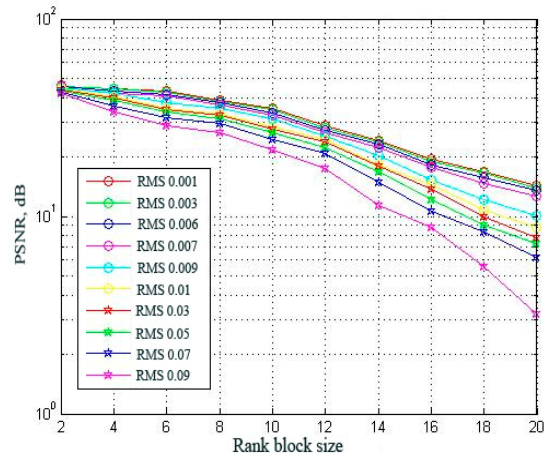


Fig. 4. The dependence of the signal / noise ratio on the size of the ranks

The graphs are plotted for several RMS values, varying from 0.001 to 0.09. With a size of rank blocks greater than 12×12 pixels, the difference in signal-to-noise ratio becomes noticeable. Moreover, for $RMS = 0.09$, the ratio of signal / noise at this block size drops to 20 dB, which confirms the subjective evaluation of the image as not satisfactory.

We also determined the dependence of compression ratio on the size of the rank block (Fig. 5). For this image in particular, an acceptable quality can be obtained with the sizes of rank blocks of no more than 8×8 pixels, which corresponds to a compression ratio of the order of 10. Analyzing the above

results, we can conclude that the image of the girl contains many small details, such as hair, the play of shadows on the face and neck, requiring a large number of rank blocks of the smallest size for a qualitative description. On the other hand, an artificially created green background can be described by rank blocks of large size.

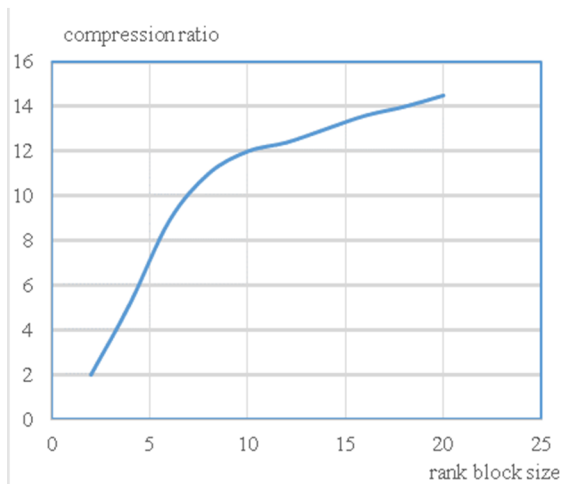


Fig. 5. A plot of the compression ratio of the rank size

V. THE SOME ASPECTS OF ASSESSING THE QUALITY OF FRACTAL CODING MODELS

Subjective image estimation not only takes a long time, but also is very expensive. The procedure is not practical in real-time applications. In addition, there may be individual factors that can affect perceived image quality. Therefore, it is necessary to evaluate the image quality objectively, taking into account the properties of the human visual system (HVS) as the basis for such an assessment. Any objective algorithm for assessing the quality of IQA images must meet the following requirements: it must have a close connection with visual perception; it must work in a wide range of types of distortion; it must be computationally simple and efficient, and it can be embedded in imaging systems or allow real-time evaluation [10, 11, 12].

As a technology for image compression based on structural similarity, fractal image compression was applied not only in image coding, but also in many important image processing algorithms. However, the two main bottlenecks restrain the development and implementation of fractal compression for a long time. First, the coding phase takes a long time. Secondly, the quality of the reconstructed images for some images that have a low structural similarity is usually unacceptable. For example, when the size of the ranking block becomes smaller, the sharpness of image recovery will vary slightly [14].

If one ranking block cannot be well approximated, the block will be divided into four smaller blocks, and the coding phase will be continued for these smaller blocks. An error

threshold must be set to judge how well the rank block is approximated.

CONCLUSION

The development of the image fractal coding is faced with the tasks of an adequate assessment of the quality of images. Rank blocks are selected as blocks to be encoded, and domain blocks serve as address code words. The process of matching between rank and domain blocks is, in fact, a search strategy in vector quantization. For each ranking block, the search is performed in all blocks of the domain. Then the question arises: if the domain image blocks cannot well approximate the rank blocks, then the quality of the restored image is difficult to satisfy the requirements. The main contribution to the deterioration of image quality is averaging over the rank block, leading to blurring of boundaries, deterioration of visual clarity, color distortion.

Further research is aimed at developing a criterion for assigning images to a particular detail group for fractal coding.

REFERENCES ЛІТЕРАТУРА

- [1] Y. Fisher, "Fractal image compression – theory and application," N.Y. "Springer," Verlag, 1994, 341 p.
- [2] S. Welstead, "Fractal and wavelet image compression techniques," SPIE. 1999, 254 p.
- [3] M. Blackledge, "Digital image processing: mathematical and computational methods," Harwood, England, 2005, 783 p.
- [4] C.S. Tong, M. Pi., "Fast fractal image encoding based on adaptive search," in IEEE Transaction on Image Processing. 2001, Vol. 10, № 9, P. 1269 – 1277.
- [5] O. Osharovska, M. Patlaenko, "Fractal coding of video sequences by genetic algorithm," in Proceedings of the O.S. Popov ONAT, No 2, 2017, c. Odessa, Ukraine. 2017, p. 131-138
- [6] Olena Osharovska, Mikola Patlayenko, "Fractal Coding of Video Sequences by Genetic Algorithm," in Fractal Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication: materials VI International Scientific and Practical Conference: Chernivtsi, Ukraine. Chernivtsi "City", 2017, p. 129-130.
- [7] Recommendation H.264 (10/16): Advanced video coding for generic audiovisual services.
- [8] ISO/IEC, JTC1/SC29/WG11, "Coding of moving pictures and audio - MPEG-4 Visual Standard, ISO / IEC FIS 14446-2, 2000.
- [9] A. Murat, Tecalp and all, "Two-dimensional mesh-based visual-object representation for interactive synthetic natural digital video", in Proceedings of the IEEE, vol 86, No 6, june 1998, pp. 1029 – 1051.
- [10] Z. Wang, "Applications of objective image quality assessment methods," in IEEE Signal Processing Magazine, 28(6), 2011, pp.137-142.
- [11] X. Gao, W. Lu, D. Tao and X. Li, "Image quality assessment and human visual system", in Visual Communications and Image Processing, International Society for Optics and Photonics, July 2010.
- [12] C. Rafael, Gonzalez and Richard E. Woods: "Digital Image Processing," 3rd edition, Pearson Education Inc., 2008.
- [13] D.M. Chandler, "Seven challenges in image quality assessment: past, present, and future research", ISRN Signal Processing, 2013.
- [14] J. Wang, Y. Liu, P. Wei, Z. Tian, Y. Li, N. Zheng, "Fractal image coding using SSIM." Proc ICIP. 2011 Sep; pp. 245–248.

Про Проблеми Відновлення Якості Зображень

Андрій Фельтов

кафедра інформаційних технологій
Національний лісотехнічний університет України
Львів, Україна

Оксана Чмир

кафедра прикладної математики і механіки
ЛДУ безпеки життєдіяльності
Львів, Україна
o_chmyr@yahoo.com

Наталія Процах

кафедра інформаційних технологій
Національний лісотехнічний університет України
Львів, Україна
protsakh@ukr.net

Андрій Мельниченко

кафедра інформаційних технологій
Національний лісотехнічний університет України
Львів, Україна

On Images Quality Restoration

Andrii Fel'tov

dept. of Information Technology
National Forestry University of Ukraine
Lviv, Ukraine

Oxana Chmyr

dept. of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of Vital Activity Safety
Lviv, Ukraine
o_chmyr@yahoo.com

Nataliia Protsakh

dept. of Information Technology
National Forestry University of Ukraine
Lviv, Ukraine
protsakh@ukr.net

Andrii Mel'nychenko

dept. of Information Technology
National Forestry University of Ukraine
Lviv, Ukraine

Анотація—У роботі засобами C# з використанням методу аналізу ієрархій, розроблено та реалізовано алгоритм відновлення якості зображень, а також здійснено короткий огляд існуючих програм, які дозволяють редагувати зображення.

Abstract—In this work with the use of C# and the method of hierarchy analysis the algorithm of restoring and improving of image quality is developed and implemented. A brief overview of existing program applications for image manipulation is also provided.

Ключові слова—графічні формати; цифрова обробка зображень; покращення якості зображення

Keywords—grafic formats; digital image processing; image quality improvement

I. ВСТУП

Із появою засобів отримання візуальної інформації стали актуальними задачі покращення якості зображення. Однією з таких задач є задача фільтрування шумів та

відновлення втрачених фрагментів зображень. Шум в цифровому зображенні може з'являтися внаслідок: недосконалості пристроїв формування цифрового зображення, забруднення середовища навколо фотографованої ділянки, або оптичних каналів передачі світла системи формування та захоплення зображень, підчас роботи з динамічними сценами, коли потрібно формувати вихідне зображення достатньо швидко і, відповідно, на процес формування яскравості кожного пікселя зображення починає впливати обмеженість та дискретність кількості фотонів, що потрапляють на світлочутливі комірки матриці, та ін.

У будь-якому випадку, завдання полягає в пошуку і усуненні шумових фрагментів зображення з метою збереження якості зображення, мінімального спотворення корисної початкової інформації.

II. ПРОГРАМИ РОБОТИ З ГРАФІЧНИМИ ФАЙЛАМИ

На сьогоднішній час відомо достатньо багато програм, які дозволяють переглядати та редагувати зображення

користувачам з різним рівнем комп'ютерних навичок. Наведемо короткий опис можливостей редагування зображень найбільш відомими з них.

- Програма *Adobe Photoshop* має різні засоби для покращення якості фотографічних зображень і усунення дефектів на них. За її допомогою можна змінити насиченість зображення, посилити контрастність і різкість, відкоригувати кольори, пом'якшити тіні і відблиски, які виникають при використанні спалаху, згладити зморшки на обличчі і усунути ефект «червоних очей», приховати подряпини і сторонні предмети, що потрапили в кадр, і виконати безліч інших операцій корекції і ретушування фотознімків. Для пом'якшення різких переходів зображень програма використовує, зокрема фільтр *Gaussian Blur* (Гаусове розмиття).
- *GIMP* може використовуватися як редактор для малювання (завдяки підтримці графічних планшетів) і як інструмент для обробки фотографій (в тому числі пакетної обробки). Має можливості розширення, малювання, анімації, виділення, перетворення, пакетної обробки зображень. Зниження рівня шумів здійснюється за допомогою фільтра "Вибіркове Гаусове розмиття".
- *Picasa* – програма від компанії Google, яка дозволяє упорядковувати колекції фотографій, автоматично змінює їх розмір; надає можливості змінювати яскравість і контрастність зображення, усунути ефект червоних очей та ін..
- *Photo! Editor* – дозволяє змінювати формат фотографій, підтримує формати .jpeg, .bmp, .png, .gif, .tiff; надає можливість корекції колірного балансу, контрастності, яскравості і насиченості, видаляти світлові та кольорові шуми на фотографіях, має новітню технологію налаштування різкості фотографій (навіть для дуже розпливчастих), деформування зображень для створення карикатур, ретушування портретних зображень, баланс освітлення для створення художніх світлових ефектів і 3D рельєфу і т.д.
- *LightBox Free Image Editor* – дозволяє редагувати зображення, має функцію видалення ефекту червоних очей з технологією виявлення обличчя, накладання тіней зі збереженням реальності зображень і т.д.

III. ПАКЕТИ В C# ДЛЯ РОБОТИ З ЗОБРАЖЕННЯМИ

До складу *.NET Framework* входить API *GDI +* для роботи з графікою. За допомогою *GDI +* можна створювати малюнки, малювати текст і управляти графічними зображеннями як об'єктами, виводити графічні зображення в формах *Windows Forms* і елементах управління. Хоча *GDI +* можна використовувати безпосередньо в веб-формах, можна виводити графічні зображення з використанням серверного веб-елемента управління *Image*.

При створенні елемента управління *Windows Forms* можна використовувати інтерфейс *GDI +* для доступу до зображення і його відновлення, для створення власних зображень незалежно від призначеного для користувача інтерфейсу додатку.

Для малювання зображення в *.NET Framework* використовують об'єкт *Graphics*. Клас *Graphics* має безліч методів для малювання і роботи з зображеннями. Наприклад, методи для малювання ліній: *DrawArc*, *DrawBezier*, *DrawEllipse*, *DrawImage*, *DrawLine*, *DrawPolygon*, *DrawRectangle* і *DrawString*; методи для заповнення фігур: *FillClosedCurve*, *FillEllipse*, *FillPath*, *FillPolygon* і *FillRectangle*; метод для очищення поверхні малювання: *Clear*; метод для створення нового об'єкта *Graphics* з зображення *FromImage* та ін.

Клас *Bitmap* інкапсулює *GDI +* точкового малюнка, який складається з даних пікселів графічного зображення, і його атрибути. А *Bitmap* - об'єкт, який використовується для роботи з зображеннями, які визначаються даними пікселів.

IV. ФОРМАТИ ТА СТРУКТУРА ГРАФІЧНИХ ФАЙЛІВ RGB

Формати та структура графічних файлів визначають спосіб зберігання інформації у файлі (растровий або векторний), а також форму зберігання інформації, тому методи їх аналізу також є різними.

Для зберігання зображень в комп'ютерній графіці використовують декілька десятків форматів файлів. За типами графічні формати можна розділити на: *растрові*, *векторні*, *метафайлові*, *сцени*, *анімації*, *мультимедійні*, *тривимірні*.

- *Формат GIF (розширення імені файлу .GIF)* є растровим форматом, який розроблявся для мереж з низькими швидкостями передачі даних, підтримується *Web*. *GIF* здатен ефективно стискати графічні дані, використовуючи алгоритм *LZW*, який полягає в стисканні ряду однакових символів в один символ, помножений на кількість повторень. Анімаційні файли *GIF* дозволяють в одному файлі зберігати декілька зображень, які відтворюються послідовно.
- *Формат JPEG (розширення імені файлу .JPG)* є растровим; дозволяє регулювати співвідношення між мірою стискання файлу і якістю зображення, стискує зображення, зберігаючи його повну чорно-білу версію і більшу частину колірної інформації; є форматом зі втратами, що проявляється у вигляді розмитого або випадкового розподілення пікселів.
- *Формат PNG (розширення імені файлу .PNG)* є растровим, призначений для публікації зображень в Інтернеті; підтримує три типи зображень – кольорові з глибиною 8 або 24 біти і чорно-білі з градацією 256 відтінків сірого. Стискання інформації здійснюється без втрат.
- *Формат TIFF (розширення імені файлу .TIF)* є растровим і призначений для збереження

зображень високої якості та великого розміру. Забезпечує зберігання чорно-білих зображень та зображень з глибиною кольору 8, 16, 24 і 32 біт. Для зменшення розміру файлу використовується вмонтований алгоритм LZW.

- *Формат Windows Bitmap (розширення імені файлу .BMP або .DIB)* є растровим, дозволяє використовувати палітри в 2, 16, 256 кольорів або повну палітру в 16 млн. кольорів.
- *Формат PCX (розширення імені файлу .PCX)* растровий, використовується редактором Paintbrush підтримує палітри в 2, 16, 256 кольорів або повну палітру в 16 млн. кольорів.
- *Формат WMF (розширення імені файлу .WMF)* підтримує векторну і растрову графіку у середовищі Windows, використовуючи палітри в 65 тис. і 16 млн. кольорів.
- *Формат CGM (розширення імені файлу .CGM)* підтримує векторну і растрову графіку з використанням повної палітри в 16 млн. кольорів та палітри зі змінною кількістю кольорів, орієнтований на складні та високохудожні зображення, створює компактні файли.
- *Формат EPS (розширення імені файлу .EPS)* описує векторні і растрові зображення на мові PostScript, одночасно може зберігати як векторну, так і растрову графіку, шрифти, параметри калібрування обладнання, профілі кольору.
- *Формат PDF (розширення імені файлу .PDF)* є апаратно незалежним і призначений для зберігання документів, однак його можливості забезпечують ефективне представлення зображень.
- *Формат PSD (розширення імені файлу .PSD)* має потужні можливості зберігання растрової графічної інформації; дозволяє запам'ятовувати параметри пластів, каналів, міри прозорості, множини масок і підтримує 48-бітове кодування кольору, розділення кольорів і різноманітні моделі кольору.
- *Растрові файли формату BMP* пов'язані з файлами зображень, такими як фотографії, кліпарті та інші графічні елементи. Кожен файл BMP складається з заголовка файлу, інформації заголовка, визначення таблиці кольорів (за винятком BMP файлів в режимі 24 бітного кольору) і набору растрових пікселів, що створюють зображення файлу. Файли формату BMP складаються з кольорових пікселів з відтінками червоного, зеленого і синього (RGB), які в сукупності створюють образ. Оскільки окремі пікселі об'єднуються, щоб сформувати файл формату BMP, користувачі можуть вносити зміни в один піксель без зміни іншої частини зображення. Крім того, формат BMP дає нестислий файл.

V. АЛГОРИТМ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАШУМЛЕНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ПІДСТАВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІСРАРХІЙ

Редагуючи зображення важливо, в першу чергу, виявити і усунути шум із зображення, оскільки зашумлене зображення має небажану візуальну якість, знижує видимість об'єктів. Існують два основні підходи до зниження зашумленості зображення: точкові методи фільтрування (нелінійні та лінійні фільтри), методи фільтрування, які передбачають перетворення зашумленої області (адаптивне і неадаптивне перетворення даних) [1-6].

Розглянемо один з алгоритмів відновлення зображення, згідно з яким аналізуються пікселі, що оточують пошкоджений, обирається колір пошкодженого пікселя серед середнього кольору восьми найближчих сусідів з урахуванням того, що і вони можуть бути пошкоджені. Так, для пікселя, який знаходиться біля пошкодженого, потрібно виявляти різкі перепади кольору. Також до уваги береться набір сусідів, які мають такий самий колір, що дозволяє виявити області суцільної заливки, а також відновлювати межі колірних областей.

Отже, розглядаємо пікселі, що оточують пошкоджений. Причому будемо аналізувати як найближчі пікселі, так і наступні за ним, як показано на таблиці 1.

TABLE I. АНАЛІЗОВАНА КАРТА ПІКСЕЛІВ

d1	d2	d3	d4	d5
d6	c1	c2	c3	d7
d8	c4	X	c5	d9
d10	c6	c7	c8	d11
d12	d13	d14	d15	d16

Колір пошкодженого пікселя X обираємо з восьми кольорів найближчих сусідів. Введемо три критерії, що характеризують найближчих сусідів c1, ..., c8, які дозволять вибрати тільки один з них:

K1 (виявляє різкі перепади кольорів) – відміну кольору даного пікселя від середнього кольору найближчих сусідів,

K2 (виявляє області суцільної заливки) – кількість сусідніх пікселів, що мають такий самий колір,

K3 (виявляє випадки, коли пошкоджений піксель знаходиться на межі двох колірних областей) – відміну кольору даного пікселя від пікселя, розташованого з іншого боку від пошкодженого пікселя.

Вважаємо, що всі критерії рівнозначні і мають однакові вагові коефіцієнти. Визначимо вагові коефіцієнти цих критеріїв.

Для критерію K1 будемо характеризувати кожен піксель c_i величиною $x_i = 1 - \frac{\Delta c_i}{m}$, де Δc_i – середнє значення кольору пікселів, що оточують c_i , m – максимальне значення кольору в палітрі. Елементи матриці парних порівнянь будуть знаходитися як $A_{ij} = \frac{x_i}{x_j}$.

З матриці парних порівнянь знаходимо вагові коефіцієнти різних рішень в рамках критерію K1:

$$u_i = \frac{x_i}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8} \quad (i = 1, \dots, 8).$$

В критерії K2 розглядаємо сім пікселів, які є сусідами з даним. Кожному пікселю с поставимо у відповідність величину y_i , яка дорівнює кількості сусідів, що мають той самий колір. Елементи матриці парних порівнянь матимуть вигляд: $B_{ij} = \frac{y_i}{y_j} \quad (i = 1, \dots, 8)$. Вагові коефіцієнти будуть мати вигляд:

$$v_i = \frac{y_i}{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8} \quad (i = 1, \dots, 8).$$

В критерії K3 будемо розглядати для кожного пікселя c_i , його відмінність від протилежного пікселя dc_i . Тоді кожен піксель буде характеризуватися величиною $z_i = 1 - \frac{dc_i}{m} \quad (i = 1, \dots, 8)$. Вагові коефіцієнти:

$$w_i = \frac{z_i}{z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7 + z_8} \quad (i = 1, \dots, 8).$$

Для кожного рішення розраховуємо величини

$$P(c_i) = v_i + w_i \quad (i = 1, \dots, 8).$$

Далі можливий один з двох підходів:

1. Пропущений піксель заповнюється кольором $c = c_i$, для якого $P(c)$ максимальна.
2. Для заповнення пропущеного пікселя замість кольору вибирається зважена сума $c = \sum_{i=1}^8 c_i P(c_i)$.

Перший підхід дозволяє чіткіше відновлювати межі колірних областей, а другий – робити плавніші переходи.

Реалізацію алгоритму здійснено засобами C#. Результатом виконаної програми є відновлене зображення на рис.3 із зашумленого зображення на рис.1.

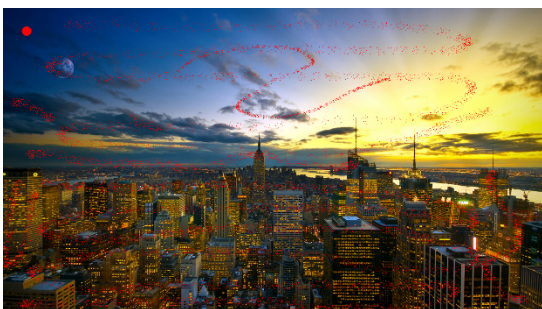


Рис. 1. Зображення з імпульсними шумами



Рис. 2. Результат функції “Прибрати імпульсні шуми”



Рис. 3. Результат функції “Відновити втрачені фрагменти”

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] J. Harikiran, B. Saichandana, B. Divakar “Impulse noise removal in digital images,” International Journal of Computer Applications (0975-8887) Vol.10, No 8, 2010.
- [2] M. Sezgin, B. Sankur “Survey on Image thresholding technique and qualitative performance evaluation,” Journal of Electronic Imaging vol. 13(1); pp 146-165, 2004.
- [3] И.Б. Ларионов “Алгоритм автоматизированного восстановления поврежденных графических файлов” Вестник Омского университета, 2011, с. 176-177.
- [4] С.В. Белим, Н.Ф. Богаченко “Применение метода анализа иерархий для оценки рисков утечки полномочий с ролевым разграничением доступа”, Информационно-управляющие системы. Москва 2013, с. 67-27.
- [5] J.N.Ahamed, V.Rajamani “Design of hybrid filter for denoising images” American Journal of Scientific Research, p. 5-14, 2009.
- [6] T.L.Saaty “Relative Measurement and its Generalization in Decision Making” Review of the Royal Spanish Academy of Sciences. p. 251-318, 2008.

Дискретне Трійкове Симетричне Вейвлет-Перетворення та Його Застосування для Цифрової Обробки Інформації у Розподілених Системах Управління

Артем Ізмайлов
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
aiartefact@gmail.com

Любомир Петришин
кафедра управління
Університет AGH
Краків, Польща
l.b.petryshyn@gmail.com

Discrete Symmetric Ternary Wavelet Transform and Its Application for Digital Information Processing in Dispersed Management Systems

Artem Izmailov
dept. of Computer Science
Precarpathian National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
aiartefact@gmail.com

Lubomyr Petryshyn
dept. of Management
AGH University
Krakow, Poland
l.b.petryshyn@gmail.com

Анотація—На основі трійкових симетричних функцій синтезовано відповідне дискретне вейвлет-перетворення. Ефективність застосування отриманого перетворення у задачах відновлення даних за частиною коефіцієнтів оцінена у порівнянні з біртогональними вейвлетами та вейвлетом Хаара.

Abstract—A discrete wavelet transform was synthesized on the basis of symmetric ternary functions. The application effectiveness of the synthesized transform was estimated for the problems of recovering data using part of the coefficients in comparison with biorthogonal and Haar wavelets.

Ключові слова—цифрова обробка інформації; дискретне вейвлет-перетворення; трійкові симетричні функції

Keywords—digital information processing; discrete wavelet-transform; symmetric ternary functions

I. ВСТУП

Цифрова обробка інформації є ключовим елементом багатьох технічних систем, які використовуються у різних галузях економіки, управління, виробництва, зв'язку та

медицини [1 – 8]. Відповідно, ефективні рішення у галузі цифрової обробки інформації призведуть до підвищення ефективності перебігу процесів, які включають цифрову обробку інформації, у прикладних галузях.

Одним із актуальних завдань цифрової обробки інформації є обробка цифрових сигналів на основі вейвлет-перетворень [1 – 3, 9, 10]. Відомо, що кожен вейвлет (та відповідне йому перетворення) пристосований для обробки лише певного класу сигналів, тобто має обмежений спектр застосування [2, 9, 10]. Звідси випливає, що актуальною є проблема синтезу нових вейвлет-функцій та відповідних їм вейвлет-перетворень, які дозволять з вищою ефективністю проводити обробку конкретних цифрових сигналів, у тому числі тих, для яких існуючі методи працюють із недостатнім рівнем ефективності.

Аналіз останніх досліджень у галузі вейвлет-перетворень вказує на те, що дослідження щодо реалізації дискретних вейвлет-перетворень на основі трійкових симетричних функцій не проводились [1 – 3, 5]. Водночас, доведена вища ефективність трійкової симетричної логіки у порівнянні із двійковою [4] та успішний синтез

дискретного ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій [8] вказують на перспективність розвідок у описаному напрямі.

Метою дослідження є синтез дискретного вейвлет-перетворення на основі трійкових симетричних функцій та оцінювання ефективності його застосування за критерієм середньоквадратичної похибки відновлення за частиною коефіцієнтів перетворення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в успішному синтезі дискретного вейвлет-перетворення на основі трійкових симетричних функцій та проведенні оцінки ефективності його застосування у порівнянні з найбільш уживаними вейвлет-перетвореннями за критерієм середньоквадратичної похибки відновлення за частиною коефіцієнтів перетворення.

II. ТРІЙКОВИЙ СИМЕТРИЧНИЙ МАТЕРИНСЬКИЙ ВЕЙВЛЕТ

В основі довільного вейвлет-перетворення лежить функція, яку називають материнським вейвлетом [2, 9]. Відповідне вейвлет перетворення синтезується на основі системи функцій, які є стисненими та зсунутими по осі абсцис (здебільшого представляє вісь часу) копіями материнського вейвлета [2, 9]. Якщо материнський вейвлет позначити, як ψ , то описана система функцій набуде вигляду (1) [9].

$$\psi_{m,n}(x) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m} x - nb_0), \quad (1)$$

де $a_0 \neq 1$ – параметр стиску, b_0 – параметр зсуву, $m, n \in \mathbb{Z}$.

У роботах [5–7] синтезовано ортогоналізовану систему добутків трійкових симетричних функцій, на основі якої успішно побудоване відповідне ортогональне перетворення [8]. У роботі [5] доведено доцільність дослідження можливості застосування функцій синтезованої системи у якості материнського вейвлета. Відправною точкою даного дослідження можуть слугувати функції з першого піднабору нульового набору синтезованої системи ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій, графіки яких представлені на рис. 1.

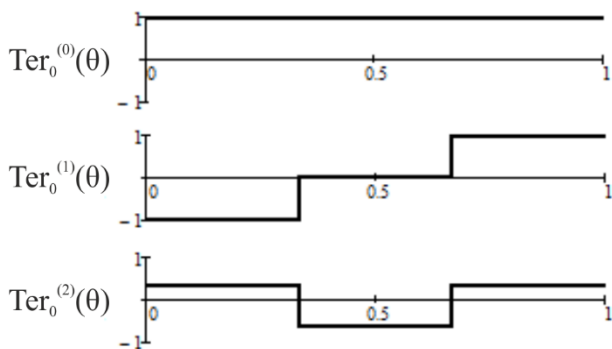


Рис. 1. Графіки функцій нульового набору системи ортогоналізованих добутків трійкових симетричних функцій

У якості материнського вейвлета доцільно обрати функцію $Ter_0^{(1)}(\theta)$, оскільки вона являє собою трійкову симетричну функцію у класичному вигляді. Дана функція не є нормалізованою (її норма у просторі L_2 не дорівнює одиниці), тому доцільно використати її нормалізовану форму, яка використовується у відповідному ортогональному перетворенні (детальна інформація про перебіг даної нормалізації може бути знайдена у [8]). Відповідно, трійковий симетричний материнський вейвлет може бути визначений у вигляді (2).

$$\psi_1(t) = \begin{cases} -\sqrt{\frac{3}{2}}, & t \in [0, \frac{1}{3}), \\ \sqrt{\frac{3}{2}}, & t \in [\frac{2}{3}, 1), \\ 0, & t \notin [0, \frac{1}{3}) \cup [\frac{2}{3}, 1). \end{cases} \quad (2)$$

Функція (2) є вейвлетом, оскільки її середнє значення рівне нулю по всій часовій області, на що вказує значення інтегралу (3).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_1(t) dt = 0. \quad (3)$$

Зі скінченності інтегралу (4) випливає, що функція (2) володіє скінченною енергією та одиничною нормою у просторі L_2 .

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi_1(t)|^2 dt = 1. \quad (4)$$

Для того, щоб функція (2) могла бути використаною у якості основи відповідного вейвлет-перетворення необхідно, щоб вона мала принаймні один нульовий момент [9]. Довільна функція $f(t) \in L_2(\mathbb{R})$ має M нульових моментів, якщо для всіх цілих значень $k=0, 1, 2, \dots, M-1$ виконується рівність (5).

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^k f(t) dt = 0. \quad (5)$$

Функція (2) має один і тільки один нульовий момент, оскільки при $k=0$ інтеграл у рівності (5) рівний нулю, а при $k=1$ – ні. Цей факт підтверджує те, що функція (2) не є гладкою функцією (вона є кусково-неперервною).

Функція (2) має компактний носій, що очевидно з її аналітичного виразу. Дана властивість вказує на можливість побудови на основі даної функції швидкого вейвлет-перетворення [9].

Функція (2) задовольняє умову допустимості (6) [9], оскільки для даної функції вираз (6) приймає значення ≈ 0.1152 . Скінченність виразу (6) є необхідною умовою існування оберненого вейвлет-перетворення на основі вейвлета $\psi(x)$ [9].

$$C_{\psi} = \int_0^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} dt < +\infty, \quad (6)$$

де $\hat{\psi}(x)$ – Фур'є-образ вейвлета $\psi(x)$.

Оскільки функція (2) задовольняє усі описані вимоги, то вона може бути використана у якості материнського вейвлета і на її основі можливий синтез відповідного вейвлет-перетворення, зокрема неперервного.

III. ДИСКРЕТНЕ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ НА ОСНОВІ ТРИЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ

У випадку неперервного вейвлет-перетворення відбувається інтегрування по параметрах зсуву та стиску у виразі (1). Неперервне вейвлет-перетворення дозволяє здійснити найточніший вейвлет-аналіз сигналу (у порівнянні з дискретним перетворенням), однак, дуже часто, це доволі громіздкий процес, який не передбачає, навіть, подальше відновлення сигналу [2, 9]. Відповідно, сферою застосування неперервного вейвлет-перетворення є спеціалізовані системи, які рідко зустрічаються у повсякденних застосунках цифрової обробки інформації. Натомість, дискретне вейвлет-перетворення забезпечує меншу, але цілком прийнятну, точність аналізу сигналів та набагато вищу швидкість обчислення (швидкі алгоритми з використанням згорткових фільтрів), що зумовило широкий спектр його застосування у системах цифрової обробки інформації.

Дискретизація неперервного вейвлет-перетворення накладає ряд обмежень на покриття спектру аналізованого сигналу спектром вейвлет-функцій, для подолання яких необхідно увести масштабну функцію φ , причому вона повинна володіти рядом властивостей. По-перше, її середнє значення повинне бути рівне одиниці, по-друге, повинні існувати залежності (7) та (8), по-третє, функції, які породжені функціями φ та ψ , повинні бути ортогональними [9].

$$\varphi(x) = \sum_n c_n \varphi(a_0 x - b_0 n), \quad (7)$$

$$\text{де } \sum_n |c_n| < \infty.$$

$$\psi(x) = \sum_n g_n \varphi(a_0 x - b_0 n), \quad (8)$$

$$\text{де } \sum_n |g_n| < \infty.$$

Сімейство функцій, породжених функцією φ утворюється згідно залежності (1), з параметрами зсуву та стиску аналогічними до обраної функції ψ . Очевидною є вимога рівності носіїв функцій φ та ψ .

У якості масштабної функції для вейвлета ψ найпростіше обрати характеристичну функцію на проміжку $[0, 1)$ (9), яка є масштабною функцією у вейвлет-перетворенні Хаара [9].

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, 1), \\ 0, & t \notin [0, 1). \end{cases} \quad (9)$$

Прийнято вважати, що у виразі (1) $a_0 > 1$, а $b_0 > 0$, хоча дані обмеження не є обов'язковими [9]. Для кожного вейвлета параметри стиску та зсуву підбираються індивідуально. При розробці багатьох систем вейвлетів параметр a_0 приймався рівним 2, а параметр $b_0 = 1$, як найпростіший можливий варіант [9]. Застосування даної практики до функцій (2) та (9) приведе до неортогональної системи функцій та неможливості формування для функцій φ та ψ виразу (8). Однак, якщо покласти параметр a_0 рівним 3, а $b_0 = 1$, то можливість формування залежності (8) стає очевидною, а система функцій породжених функцією (2) (система, яка породжена функцією (9) формується аналогічно) буде задана аналітичним виразом (10).

$$\psi_{m,n}(x) = 3^{-m/2} \varphi(3^{-m} x - n). \quad (10)$$

Водночас, як показано у [9], при стисненні функцій у 3 рази з кожною новою ітерацією перетворення, спектр, який покривається функціями φ та ψ буде теж зменшуватись утричі, тобто покриватись буде лише 2/3 спектру вхідного сигналу. Відповідно, виникає необхідність уведення ще одного материнського вейвлета і відповідної йому системи функцій (побудованої аналогічно до (10)). Враховуючи взаємну ортогональність функцій $Ter_n^{(i)}(\theta)$ та отримані у роботах [5–8] результати, у якості другого материнського вейвлета доцільно обрати нормалізовану функцію $Ter_0^{(2)}(\theta)$ у вигляді (11).

$$\psi_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & t \in [0, \frac{1}{3}) \cup [\frac{2}{3}, 1), \\ -\sqrt{2}, & t \in [\frac{1}{3}, \frac{2}{3}), \\ 0, & t \notin [0, 1). \end{cases} \quad (11)$$

Функція (11) задовольняє усі наведені вимоги для вейвлет-функцій та має 2 і тільки 2 нульових моменти, що збільшує можливості вейвлет-аналізу гладких функцій. Аналітична залежність виду (8) для функцій (9) та (11) є очевидною.

Враховуючи те, що функції (2), (9) та (11) є, за своєю суттю, нормалізованими функціями $Ter_0^{(i)}(\theta)$, $i=0, \dots, 2$, та ортогональність матриці їх значень на проміжку $[0, 1)$ [8], а також трійкову природу їх проміжків значень, можна стверджувати, що породжені ними згідно (10) функції утворюють ортогональну систему, з чого випливає можливість синтезу на основі функцій (2), (9) та (11) дискретного вейвлет-перетворення.

IV. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСКРЕТНОГО ТРІЙКОВОГО СИМЕТРИЧНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Одним із завдань вейвлет-аналізу у системах цифрової обробки інформації є відновлення сигналу за частиною вейвлет-коефіцієнтів [2, 10]. Для оцінювання ефективності функціонування вейвлет-перетворень за даним критерієм використовується критерій середньо-квадратичної похибки відновлення MSE (12) [10].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (X(i) - X_r(i))^2, \quad (12)$$

де $X(i)$ – вхідні дані, $X_r(i)$ – відновлені за частиною коефіцієнтів дані.

Згідно критерію (12) здійснено оцінку ефективності відновлення сигналів за 10%, 5%, 1% коефіцієнтів вейвлет-перетворення дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення (ST) у порівнянні з вейвлетом Хаара (Haar) та біортогональним вейвлетом з параметрами 1.3 (bior1.3). Аналіз проводився з використанням тестових сигналів freqbrk (два синусоїдальні сигнали з різними частотами), noissin (зашумлений синусоїдальний сигнал) та sumsin (сума двох синусоїдальних сигналів). Результати проведеного аналізу наведено у табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1. Значення похибок відновлення сигналів за 10%, 5%, 1% коефіцієнтів вейвлет-перетворення

Сигнал	% коефіцієнтів	ST	Haar	bior1.3
freqbrk	10%	0,0335	0,0443	0,0402
	5%	0,0917	0,1094	0,1029
	1%	0,2504	0,2731	0,3066
noissin	10%	0,0618	0,0615	0,0637
	5%	0,083	0,0811	0,0844
	1%	0,2349	0,2241	0,2615
sumsin	10%	0,6249	0,6585	0,6738
	5%	0,7873	0,8071	0,8246
	1%	1,1335	1,1343	1,2227

З табл. 1 випливає, що в узагальненому випадку за критерієм (12) дискретне трійкове симетричне вейвлет-перетворення ефективніше у порівнянні з перетворенням Хаара на 5,4%, у порівнянні з біортогональним вейвлетом з параметрами 1.3 на 8,8%. При цьому, спостерігається менша (приблизно на 1,5%) ефективність у порівнянні з перетворенням Хаара для сигналу noissin, яка пов'язана із синусоїдальним трендом даного сигналу, який ефективніше апроксимується синусоподібними функціями Хаара.

Загальна ефективність розробленого перетворення пояснюється вищою концентрацією енергії у апроксимуючих коефіцієнтах за рахунок зменшення їх кількості на кожній ітерації, у порівнянні з перетвореннями, для яких параметр стиску рівний 2.

ВИСНОВКИ

Трійкові симетричні функції задовольняють вимоги щодо материнських вейвлетів, а тому можуть слугувати основою для синтезу відповідного дискретного вейвлет-перетворення. Водночас, синтез даного перетворення вимагає принципово відмінного підходу щодо формування сімейств вейвлет-функцій, а саме використання параметру стиску a_0 рівного 3 (замість найбільш уживаного значення 2). Даний підхід вимагає уведення другого материнського вейвлета у перетворення, що спричиняє зміну співвідношення кількості апроксимуючих та деталізуючих (яких тепер удвічі більше, і які поділені на дві групи) коефіцієнтів. Дана конструктивна відмінність створює ряд потенційних переваг синтезованого перетворення, які потребують подальшого вивчення.

Подальші дослідження полягають у розширеному аналізі ефективності застосування синтезованого перетворення на основі критерію (12) для великих груп тестових сигналів та порівнянні отриманих результатів з більшою кількістю сімейств вейвлетів. Доцільним є аналіз ефективності на основі відмінних від (12) критеріїв. Окреслені дослідження дозволять чітко визначити спектр застосування синтезованого вейвлет-перетворення.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Э. Айфичер, Б. Джервис. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
- [2] P.S. Addison, The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance (Second Edition) / P.S. Addison, CRC Press, 2016, P. 446.
- [3] S. Prasad, Information Fusion in the Redundant-Wavelet-Transform Domain for Noise-Robust Hyperspectral Classification / S. Prasad, W. Li, J.E. Fowler, L.M. Bruce // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – September 2012. – Vol. 50, No. 9. – P. 3474-3486. doi: 10.1109/TGRS.2012.2185053
- [4] B. Hayes, Computing science. Third base. A reprint from American Scientist, the magazine of Sigma Xi, the Scientific Research Society, vol. 89, Nr. 6. November–December 2001, pp. 490-494
- [5] А.В. Измайлов, Аналіз властивостей систем трійкових симетричних функцій та їх застосування для цифрової обробки інформації у комп'ютеризованих системах управління / А.В. Измайлов, Л.Б. Петришин // Інформаційні технології: сучасний стан та перспективи : монографія / за заг. ред. В.С. Пономаренка. – Х. : ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. – С. 208-222.
- [6] A. Izmailov, L. Petryshyn, "Symmetric ternary functions and their application in orthogonal transforms," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, P. 836-841. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100364
- [7] А.В. Измайлов, Трійкові симетричні функції та їх застосування у цифровій обробці інформації / А. В. Измайлов, Л. Б. Петришин // Системи обробки інформації. — 2016. — № 4. — С. 41-44.
- [8] А.В. Измайлов, Застосування ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій для цифрової обробки інформації / А.В. Измайлов // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : тези доповідей Шостої Міжнародної науково-практичної конференції, м. Вінниця, 24-25 жовтня 2017 року. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – С. 93-96.
- [9] И. Добеши, Десять лекций по вейвлетам: Пер. с англ. / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
- [10] Д. Сэломон, Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон; пер. с англ. В.В. Чепыжова. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.

СЕКЦІЯ 5.
Захист інформації
в інформаційно-телекомунікаційних системах

SECTION 5.
Information security in information
and telecommunication systems

Development of a Computer System of Technical Condition for the Electric Podded Azimuth Thrusters

Vitalii Nikolskyi

dept. of Theory of automatic control and
computer technology
National University "Odessa Maritime Academy"
Odessa, Ukraine
prof.Nikolskyi@ukr.net

Sergii Khniunin

dept. of Theory of automatic control and
computer technology
National University "Odessa Maritime Academy"
Odessa, Ukraine
reg-post@ukr.net

Vitalii Budashko

dept. of Electrical Engineering and
Radio Electronics Faculty
National University "Odessa Maritime Academy"
Odessa, Ukraine
bvv@te.net.ua

Mark Nikolskyi

dept. of Automation of Vessel Gas Turbines
and Diesel Installations
National University "Odessa Maritime Academy"
Odessa, Ukraine
markdezert@ukr.net

Abstract—The results of studies of the influence of the emerging a Coandă effect when using the boundary modes of operation of the propulsion complex as part of the creation of a computer system for the technical condition of the electric podded azimuth thrusters for improving the safety of operation of marine facilities are presented.

Keywords—safety of navigation, the Coandă effect, an electric podded azimuth thrusters, propulsion complex, piezo transducers

I. INTRODUCTION

Recently, with stricter requirements for the safety of operation of marine facilities, manufacturers are using new technologies to create more sophisticated systems. In the case of using azimuthal propeller units, when the aircraft moves slowly at a given rate (when laying the cable on cable-laying vessels) and when the position is held (on scientific vessels and semi-submerged floating drilling platforms), a situation arises when the flow of water is directed under the bottom and "sticks" to it under the action of the Coanda effect (Fig. 1).

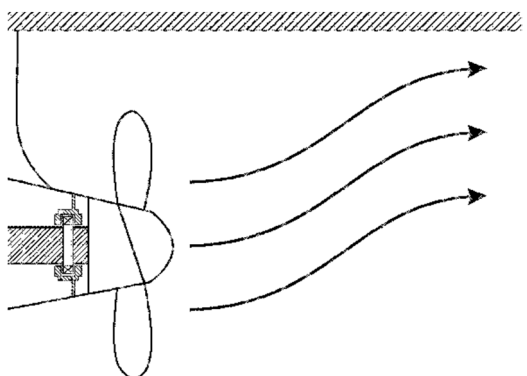


Fig. 1. Manifestation of the Coanda effect

The appearance of this effect leads to the following negative consequences:

- there is an uneven and unplanned premature wear of components of the azimuth screwdriver column, namely: deadwood, thrust and bearing bearings,
- the action of the external force results in the loss of the screw stop to 15%.

II. PURPOSE OF WORK

Creation and improvement of the theoretical and software-technical base of the ship's azimuth screwdriver column monitoring system for ensuring the safety of commercial and naval vessels.

III. CONTENTS AND RESULTS OF THE RESEARCH

This problem is known to the manufacturers of azimuth screwdriver columns [1], but at the moment the countermeasures are reduced to a mechanical counteraction to the effect of this effect by entering the mounting angle of the entire structure. This measure does not completely eliminate the effect of this effect, but only shifts the moment of its appearance to higher speeds, and also leads to a decrease in the efficiency of the entire propulsion complex due to the non-optimal direction of the water flow at an angle to the horizontal.

In order to detect this effect, we proposed and patented a ship monitoring system for the appearance of the Coanda effect [2] for monitoring the technical condition of the azimuth helical column shown in Fig. 2.

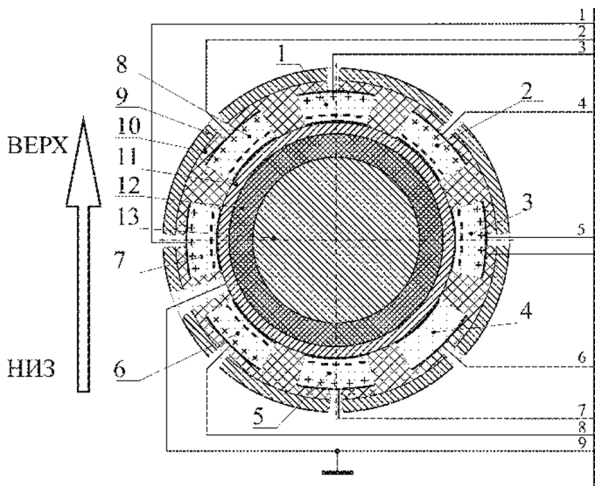


Fig. 2. Coanda effect monitoring system with sensor installation in a stern bearing

In this scheme, the following is reflected: the sensor system 1–8, 9 – the motor nacelle body, 10 - the dielectric gasket, 11 – the negative pole, 12 – the deadwood bearing, 13 – the shaft line. Piezoelectric sensors in the form of plates and disks were used as sensors. Let us analyze the properties of PE of this physical form.

Variants of piezoelectric converters in the form of plates are shown in Fig. 3.

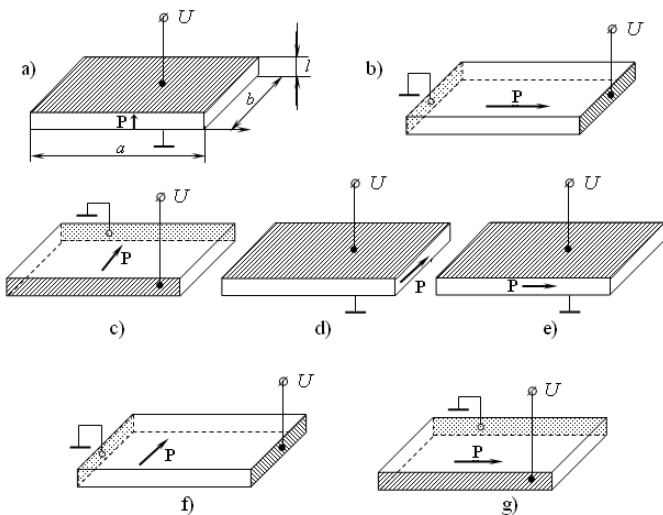


Fig. 3. Piezoceramic transducers in the form of plates: a, b, c – traditional; d, e, f, g – domain-dissipative transducers

In Fig. 3, a, b, c show the traditional piezoelectric transducers, in which the electrodes are printed on the faces perpendicular to the polarization vector P . Fig. 3, d, e, f, g show the domain-dissipative transducers [3, 4], in which the electrodes are placed on the faces parallel to the polarization vector P (the polarization vector is perpendicular to the field strength vector between the output electrodes).

Consider, for example, piezoelements in the form of a plate with linear dimensions: length – $a = 5$ cm; width – $b = 5$ cm and thickness $l \ll a, b$.

A schematic model of such a converter is shown in Fig. 4.

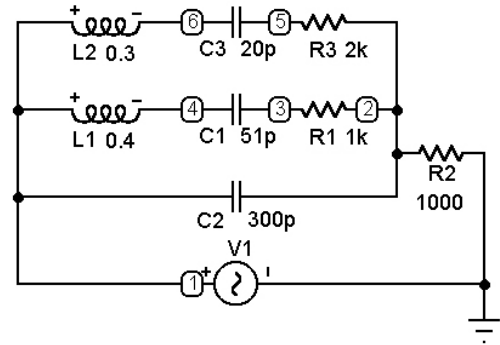


Fig. 4. Schematic model of a piezoelectric transducer in the form of a plate

A characteristic feature of such a piezoelectric element is the presence of two circuits with a series (mechanical) resonance. The resonance in each of the circuits corresponds to the mechanical resonance of the sample along the length or the width.

AFC and PFC for the circuitry of the traditional piezoelement in the form of plates (in Fig. 3, a – c) are shown in Fig. 5.

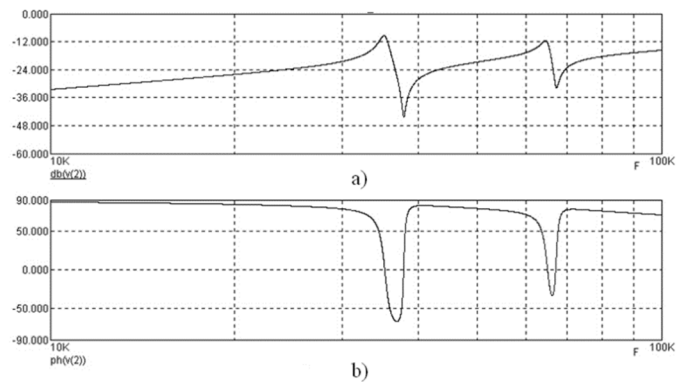


Fig. 5. AFC (a) and PFC (b) of the circuit design of the traditional PCE in the form of a plate

AFC and PFC for the schematic model of the domain-dissipative SCE in the form of plates (from Fig. 3, d - g) are shown in Fig. 6.

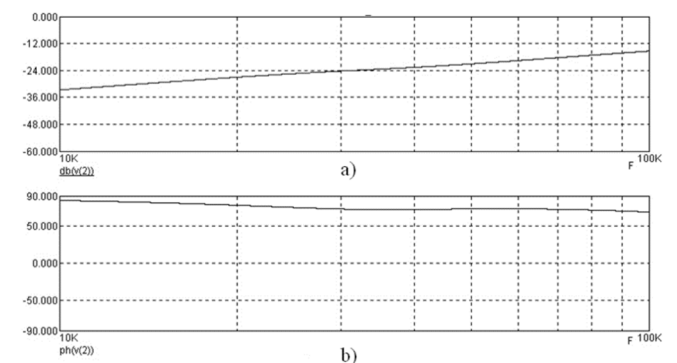


Fig. 6. AFC (a) and PFC (b) schematic model of domain-dissipative piezoelements

As can be seen from Fig. 5 and 6, for traditional PCE in the form of plates in the investigated frequency range there are two resonances. In the domain-dissipative piezoelectric cell, these resonances are suppressed, i.e. extended operating frequency range.

Transient characteristics for circuitry models of traditional piezoelements and domain-dissipative piezoelectric elements are shown in Fig. 7 and 8 respectively.

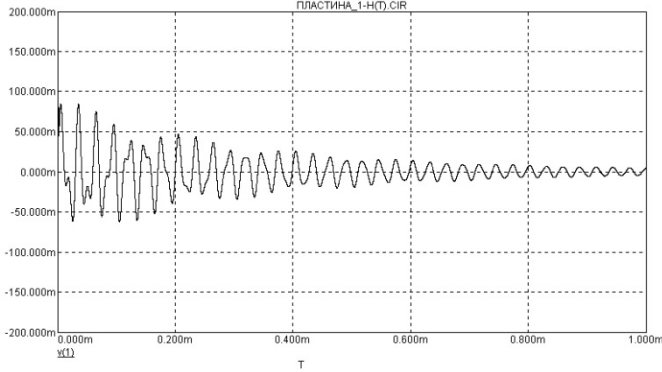


Fig. 7. The transient characteristic of the circuitry model of a traditional piezoelement in the form of a plate

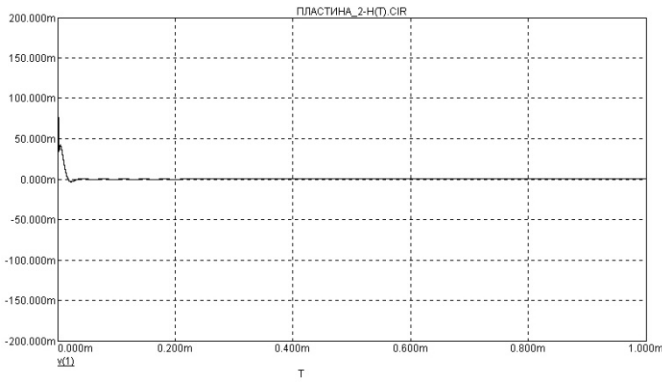


Fig. 8. Transient characteristic of the circuit-model of the domain-dissipative piezoelectric element

For cases where it is not possible to mount a sensor system in a stern bearing, we have designed and patented the Coanda Effect Monitoring System [5] shown in Fig. 9.

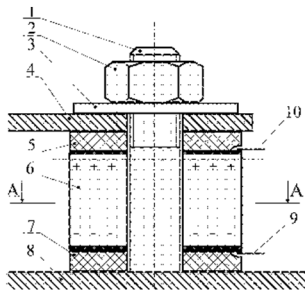


Fig. 9. Monitoring system of the Coanda effect with the sensor system in the place where the azimuth screw column

In the given scheme it is reflected: 1 - a bolt of fastening of an azimuthal screw-column column to the vessel hull, 2 - a nut, 3 - a washer, 4 - fastening of an azimuth screw-column

column, 5 and 7 - gaskets from an insulating material, 6 - a piezoelectric sensor, 8 - a ship hull, 9 and 10 - positive and negative contacts of the piezoelectric sensor.

Its difference from the proposed earlier is that the installation of this system on the ship can be made without interference in the design of the azimuth screwdriver column. During installation, piezoelectric sensors are used, installed in places most susceptible to mechanical stress when this effect occurs [6] - for bolts in the form of rings.

Let us analyze the functional properties of piezoelectric converters in the form of rings. The versions of piezoelements in the form of rings are shown in Fig. 10.

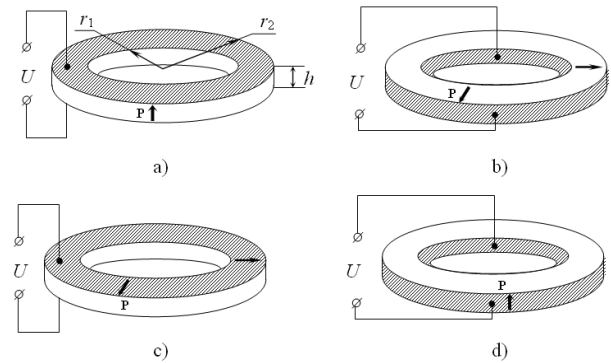


Fig. 10. Piezoceramic transducers in the form of rings: a, b - traditional; c, d - domain-dissipative

In Fig. 10, a, b shows the traditional piezoelectric elements, in which the electrodes are printed on the faces perpendicular to the polarization vector P. Fig. 10, c, d show the domain-dissipative piezoelements in which the electrodes are applied on the faces parallel to the polarization vector P (ie, the polarization vector is perpendicular to the field strength vector between the output electrodes).

Consider, for example, piezoelements in the form of rings with radii $r_2 = 4$ cm, $r_1 = 3$ cm and thickness $h \ll r_2$. A schematic model of such a converter is shown in Fig. 11.

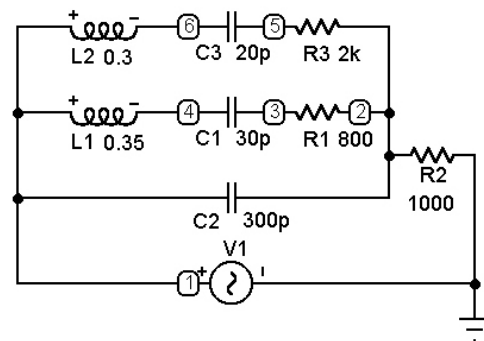


Fig. 11. Schematic model of piezoelectric transducer in the form of rings

As for piezo elements in the form of plates (Figure 3), the piezoelement model in the form of rings also has two circuits with a series (mechanical) resonance. The difference is the values of dynamic capacitances and inductances. AFC and PFC for the circuitry of the traditional piezoelement in the form of rings (according to Fig. 10, a, b) are shown in Fig. 12.

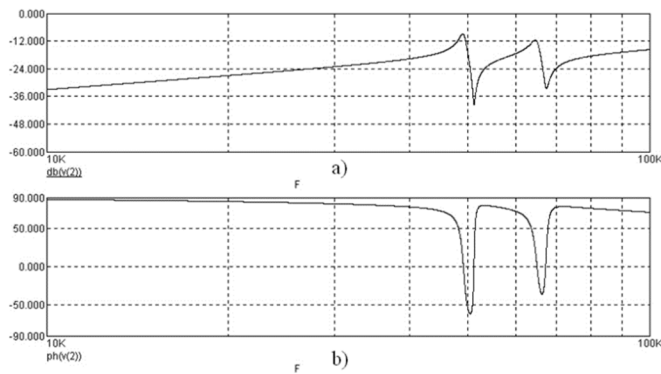


Fig. 12. AFC (a) and PFC (b) circuitry of a traditional piezoelement in the form of rings

AFC and PFC for the circuit model of the domain-dissipative piezoelectric element in the form of rings (according to Fig. 10, c, d) are linear, as in Fig. 6.

In Fig. 13 shows the frequency response and PFC of the circuit model of piezoelectric elements in the form of rings for different values of the internal radius r_1 .

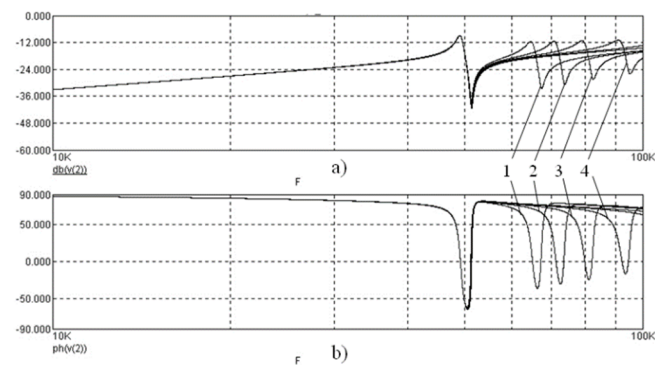


Fig. 13. AFC (a) and PFC (b) of the circuit model of piezoelements in the form of rings for different values of the internal radius r_1 : 1 - $r_1 = 3$ cm; 2 - $r_1 = 2.6$ cm; 3 - $r_1 = 2.3$ cm; 4 - $r_1 = 2$ cm

The transient response for the circuitry model of a traditional piezoelectric element in the form of rings is shown in Fig. 14.

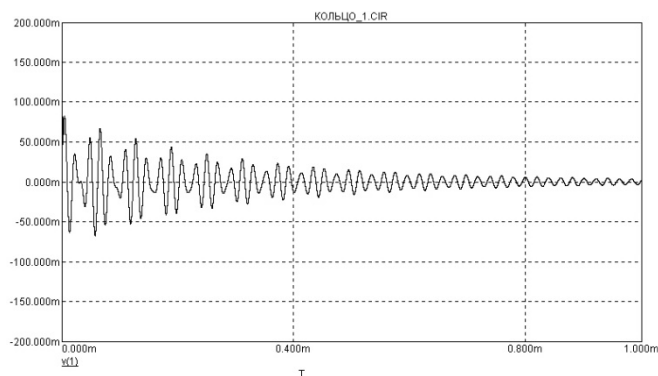


Fig. 14. The transient characteristic of the circuitry model of the traditional PCE in the form of rings

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

As a result of the studies, the following results were obtained.

For the first time, a method for determining the Coanda effect was developed on the basis of fixing the deflections of the ship shafting under the influence of external force carried out by sensors located at control points.

Models of bimorph piezo transducers have been improved, which made it possible to determine the physical parameters (characteristics) of the primary converters included in the computer system for determining the Coanda effect.

Functional and circuit simulation of piezoelectric converters was developed further by taking into account the polymorphism of the primary converter, which made it possible to select the optimal types, shapes, types and sizes of piezoelectric converters.

The created computer system for determining the appearance of the Coanda effect in the operation of the electric podded azimuth thrusters, which allows to reduce the accident rate and improve the work of the dynamic positioning system of semi-submersible floating drilling rigs. The difference between the proposed system and the existing mechanical systems lies in the possibility of abandoning cumbersome mechanical structures that reduce the efficiency of the propulsion complex and reduce the accident rate of their operation.

REFERENCES

- [1] Azipod VI project guidev5 [Electronic resource]. Available at: https://library.e.abb.com/public/f524ca488f88beb2c12576e3004a96d8/Azipod_VI_project_guide_v5.pdf (Last accessed: 05.12.2017).
- [2] Pat. 100819 Ukraine, IPC G01L 9/08, 5/12, 1/16. Marine Coanda effect monitoring and prevention system. / V. V. Budashko, V. V. Nykolskyi, S. H. Khniunin. – #u201501854; Application 02.03.2015; Publication 10.08.2015, Bulletin #15.
- [3] Sharapov V. M. Investigation of domain-dissipative piezoceramic transducers / Sharapov V. M., Minaef B. F., Musienko M. P., Gusev G. N. // Bulletin of Cherkasy State Technological University. – 2003. – № 2. – P. 17 – 22.
- [4] Sharapov V. M. Broadband domain-dissipative piezo-ceramic converters / Sharapov V. M., Musienko M. P. // Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. – 2003. – № 6. – P. 127 – 131.
- [5] Pat. 107006 Ukraine, IPC G01L 9/08, 5/12, 1/16. Marine Coanda effect monitoring and prevention system. / V. V. Budashko, V. V. Nykolskyi, S. H. Khniunin. – #u201512962; Application 28.12.2015; Publication 10.05.2016, Bulletin #9.
- [6] Nikolskyi, V. The monitoring system of the Coanda effect for the tension-leg platform's [Text] / V. Nikolskyi, V. Budashko, S. Khniunin // Proceeding Book of International conference on engine room simulators (ICERS12), 2015. – P. 45 – 49.

Дослідження Розташування Образів Сеансових Ключів на Старших Рівнях Гіперпростору Описів

Володимир Глущенко
кафедра кібернетики та комп'ютерних систем
Східноукраїнський національний університет
імені В.Дала
Северодонецьк, Україна
2847@i.ua

Михайло Петришин
кафедра інформатики
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
m.l.petryshyn@gmail.com

Investigation of the Images Session Keys Location at the Higher Levels of Hyper-Space Descriptions

Volodymyr Glushchenko
dept. of Cybernetics and Computer Systems
V. Dahl East Ukrainian National University
Severodonetsk, Ukraine
2847@i.ua

Mykhailo Petryshyn
dept. of Computer Science
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
m.l.petryshyn@gmail.com

Анотація—У статті представлені результати дослідження структури простору лінійних квазіпорядків, необхідні для формування сеансових ключів, що є одним з найбільш ефективних методів шифрування інформації в процесі її передачі

Abstract—The article presents the results of the study of the structure of the space of linear quasiorders, which are necessary for the formation of session keys, which is one of the most effective methods of encryption of information in the process of its transmission

Ключові слова—інформаційна безпека, сеансові ключі, завадостійкість, кодування, інформація.

Keywords—information security, session keys, noise immunity, encoding, information.

I. ВСТУП

Дослідження вітчизняних і зарубіжних авторів показують, що найбільш ефективних методів шифрування інформації в процесі її передачі є методи, засновані на концепції сеансових ключів. Тому проблема створення потужного математичного апарату, що дозволяє формувати різноманітні сеансові ключі і забезпечує базу для створення ефективних алгоритмів роботи з цими ключами, залишається досить актуальною. **Постановка задач дослідження.** Концепція формування сеансових ключів в структурованому просторі розглядається в роботах [1,2]. Реалізація даної концепції виникає нагальна

потреба дослідження розташування образів сеансових ключів на старших рівнях гіперпростору їх опису.

II. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даній роботі представлені результати досліджень розташування точок змішаного потенціалу на старших рівнях гіперповерхні. Всі основні поняття і визначення, що використовуються далі, наведені та описані в роботах [1,2].

Нехай точки простору QB відображають впорядковану множину $A = \{a, b, \dots\}$, $|A| = N$, $N > 4$. Вони описуються ранжуванням змішаного потенціалу і утворюють множину HQB . Позначаємо через HC множину всіх точок, розташованих на старших рівнях гіперповерхні, потенціали яких змінюються від 2 до $N - 2$, $HC \subset HQB$.

Точки, що входять в множину HC , описуються дихотомічними розбиваннями. Нехай точки старшого рівня гіперповерхні U утворюють множину $HB_u \subset HC$. Тоді потужність множини HB дорівнює

$$|HB_u| = 2 \frac{M!}{Pot_U!(N - Pot_U)} \quad (1)$$

Будемо позначати через δ потужність класу, що визначається номера рівня, на якому, розташовуються аналізовані точки. Значення δ для гіперповерхні U рівне l_{N+1} , де l_N визначається з виразу 2.

$$l_N = \begin{cases} \left[\frac{N}{2} \right] - 1 - \left(\left[\frac{N}{2} \right] - PotU \right) \\ \frac{N}{2} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

Так як $\forall R \in HBu$ описуються дихотомічними розбивками, то потужність класу, що визначає потенціал $R \in HBu$, буде дорівнює $N - \delta$. Тоді вираз (1) може бути записано у вигляді:

$$|HBu| = 2 \frac{M!}{(N - \delta)! \delta!} \quad (3)$$

Розіб'ємо множину HC на дві підмножини так, що

$$HA = \{R : R \in HC; Pot P = N/2\}, HB = HC / HA.$$

Тоді в підмножині HA увійдуть ті ж точки, які описуються розбивками, у яких потужність класів, що визначає потенціал і визначає номер рівня, рівні. У підмножину HB - точки, у яких потужності цих класів не рівні.

Розглянемо точки множини HB . Точки цієї множини описуються дихотомічними розбивками, в яких потужність класу, що визначає потенціал цих точок, завжди більше потужності класу, що визначає номер рівня на якому розміщуються ці точки.

Нехай HBu утворюють точки гіперповерхні U , $Pot U = N - \delta$ рівня, з номером l_N , де l_N визначається з виразу (2).

Розіб'ємо HBu на підмножини однотипних точок

$$NB_U^1 \subset HB_U, NB_U^2 \subset HB_U : NB_U^1 \cap NB_U^2 = 0, NB_U^1 \cup NB_U^2 = HB.$$

Виведемо вираз для знаходження відстаней між сусідніми і взаємно протилежними точками множини HBu .

Нехай точка $R \in HB$, описується дихотомічною розбивкою $R = (I^{N-\delta} I^\delta)$ і розташовуються на гіперповерхні U , $Pot U = N - \delta$. тоді $|K_S^R| = N - \delta$, $|K_U^R| = \delta$.

Розглянемо вирази, що визначають абсолютні відстані для сусідніх точок R і P , з урахуванням потужності класів K_S^R та K_U^R

Нехай для точки R справедливо $|K_S^R| - |K_U^R| = 1$. Виведемо з K_S^R елемент x і введемо його в клас K_U^R . Тоді

$$D = K_S^R / x, |D| = \delta, C = K_U^R \cup x, |c| = N - \delta.$$

Отримана при цьому точка P описується ранжуванням виду

$$P = (I^\delta I^{N-\delta}). \text{ Точка } P \in HB, Pot P = N - \delta,$$

отже вона лежить на тій же гіперповерхні, що і точка R і є сусідньою з нею.

Абсолютна відстань між R і P рівна:

$$d(R, P) = (N - \delta - 1) + \delta = N - 1 \quad (4)$$

Точки R і P описуються однотипними дихотомічними розбивками, для яких справедливо:

$$K_S^R \cap K_S^P \neq 0, |K_S^R \cap K_S^P| = 1, K_S^P \subset K_S^R : K_S^R \subset K_S^P$$

Лема 1. Відстань між сусідніми точками R і P $|K_S^R \cap K_S^P| = 1, |K_S^R| - |K_U^R| = 1$ рівно $d(R, P) = N - 1$.

Нехай для точки R справедливо $|K_S^R| - |K_U^R| = 2$ Тоді отримання з R інших точок, розташованих на тій же гіперповерхні, що і точка R можливо двома способами. розглянемо кожен з них окремо.

1. Так як $|K_S^R| - |K_U^R| = 2$, то для отримання точки $P_i, P_i \in HB, Pot P_i = Pot R$, описуваної однотипним з R дихотомічним розбиттям, виведемо з K_S^R елемент x , $D = K_S^R / x$. Із K_U^R виведемо елемент y $C = K_U^R / y, D = K_S^R / c, |D| = 2$. Поміняємо елементи x і y місцями. отримуємо

$$K_S^{P_i} = D \cup y, K_U^{P_i} = D \cup x.$$

При виконанні цієї процедури $N - \delta - 1 + \delta - 1$ відносин еквівалентності було замінено на відносини строгого порядку, $\delta - 1 + N - \delta - 1$ проте відношення строгого порядку - на відношення еквівалентності, і відношення строгого порядку між елементами x і y зміни на протилежне. Отже, абсолютна відстань між точками R і P_i рівна

$$d(R, P) = 2(N - \delta - 1 + \delta - 1) + 2 = 2N - 2 = 2(N - 1) \quad (5)$$

2. Розглянемо другий спосіб отримання точки P , що лежить на тій же гіперповерхні, що і точка R . Виведемо з K_S^R двох елементний клас еквівалентності $C, D = K_S^R / c, |D| = 2$. Об'єднаємо класи $K_S^R \cup C, |K_S^R \cup C| = N - \delta$. Отримана точка P , описується ранжуванням $P = (I^\delta I^{N-\delta})$. Вона лежить на тій же гіперповерхні, що і точка R . Абсолютна відстань між точками R і P рівна

$$d(R, P) = 2(N - \delta - 2) + 2\delta = 2(N - 2) \quad (6)$$

Порівнюючи відстані між точками R, P_i та R, P отримуємо $d(R, P) > d(R, P_i)$, отже точка P_i не є сусідньою точці R , а точка P сусідня точці R .

Сусідні точки R і P описуються однотипними дихотомічними розбиванням, для яких справедливі відношення:

$$K_S^R \cap K_S^P \neq 0, |K_S^R \cap K_S^P| = 1, K_S^P \subset K_S^R : K_S^R \subset K_S^P$$

Лема 2. Відстань між сусідніми точками R і P $|K_S^R \cap K_S^P| = 2, |K_S^R| - |K_U^R| = 2$ рівна $d(R, P) = 2(N - 2)$.

Нехай для R справедливо $|K_S^R| - |K_U^R| > 2$. Тоді для отримання з R інших точок, розташованих на тій же

гіперповерхні, що і точка R , розглянуті вже використовувати способи.

1. Так як, $|K_s^R| - |K_u^R| = n$, $n > 2$, то для отримання точки $P \in HB$, $Pot R = Pot P$ описуваної однотипним дихотомічним розбиттям з R введемо з K_s^R елемента x , а з K_u^R - елемент y і x поміняємо їх місцями. Тоді абсолютна відстань між R і P рівна:

$$d(R, P) = 2(N - 1)$$

2. Для отримання точки P_i , що описується не однотипним дихотомічним розбиттям з R з K_s^R виводимо клас K_l , $|K_l| = \delta$, $C = K_s^R / K_l$. Об'єднаймо $K_u^R \cap C = K_s^P$. При цьому відношенням еквівалентності у $(N - \delta - \delta)\delta$ пар елементів зміняться на відношення строгого порядку. Відношення строгого порядку у $(N - \delta - \delta)$ пар елементів зміняться на відношення еквівалентності. Таким чином, загальне число пар елементів, у яких змінилися відношення, так само $2\delta(N - 2\delta)$, отже, абсолютна відстань між R і P_i рівно

$$d(R, P_i) = 2\delta(N - 2\delta) \quad (7)$$

Порівнюючи відстань між R , P і R і P_i отримуємо, що $d(R, P_i) > d(R, P)$ отже, точка P_i не є сусідньою точці R , точка P - сусідня точці R .

Отримуємо точки R і P однотипними дихотомічними розбиттями, для яких справедливо:

$$K_s^R \cap K_s^P \neq \emptyset, K_u^R \cap K_u^P \neq \emptyset, |K_s^R \cap K_s^P| = 1.$$

Лема 3. Відстані між сусідніми точками R і P $|K_s^R| - |K_s^P| > 2$, $|K_s^R \cap K_s^P| = 1$ рівна $d(R, P) = 2(N - 1)$.

Теорема 1. Відстань між сусідніми точками змішаного потенціалу R і P , $R, P \in HB$, старшого рівня гіперповерхні U , $Pot U = N - \delta$ рівна:

$$d(R, P) = \begin{cases} N - 1, & \text{якщо } |K_s^R| - |K_s^P| = 1 \\ 2(N - 2), & \text{якщо } |K_s^R| - |K_s^P| = 2 \\ 2(N - 1), & \text{якщо } |K_s^R| - |K_s^P| > 2 \end{cases} \quad (8)$$

Справедливість теорема випливає з умови лем 1, 2, 3.

Теорема 2. Відстані між взаємно зворотними точками старшого рівня гіперповерхні $N - \delta$ при $N > 4$ рівна $2\delta(N - \delta)$.

Доведення. Нехай R і P два дихотомічні ранжирування елементів множини A , $N = |A|$, $N > 4$, N непарне, описує взаємно зворотні точки змішаного потенціалу $N - \delta$. Класи, що визначають потенціал даних ранжування, рівні і мають різні номери. Для отримання ранжування P з ранжуванням R , необхідно поміняти сетами класи ранжування R . При цьому відношення старого порядку у $(N - \delta)$ δ пар елементів замінюється на протилежне відношення. Отже, число незбіжних елементів у відповідних матрицях парних порівнянь дорівнює

$2(N - \delta)\delta$, тобто відстань між R і P рівна $d(R, P) = 2\delta(N - \delta - 1)$, що й треба було довести.

Розглянемо точки множини HA . Точки даної множини описуються ранжуванням, у яких потужність класу, що визначає потенціал ранжування, дорівнює потужності класу, що визначає номер рівня, на якому розташована точка, описувана цим ранжуванням. Нехай $N = |A|$ - парне. Тоді точки множини HA описуються дихотомічними ранжуваннями. Множину HA розіб'ємо на підмножини однотипних точок

$$HA^1 \subset HA, HA^2 \subset HA: HA^1 \cap HA^2 = \emptyset; HA^1 \cup HA^2 = HA.$$

Номер рівня, на якому розташовані точки множини HA дорівнює $l_N = \lfloor \frac{N}{2} \rfloor - 1$.

Лема 4. Відстань між сусідніми точками старшого рівня гіперповерхні потенціалу $N / 2$ при парному N , $N > 4$ дорівнює $2(N - 1)$.

Доведення. Нехай R і P , $R \in HA^1$, $P \in HA^2$, сусідні точки, $Pot R = Pot P = N/2$. Так як, точки R і P описуються дихотомічними розбиттями, то потужність класу R_l , що визначає номер рівня точки P , дорівнює потужності класу P_u , що визначає номер рівня точки P , при чому $|R_u| = |P_u| = N/2$.

Нехай $R_s \cap P_u = Q$; $R_u \cap P_s = b$. Тоді для отримання відношення D з R введемо елемент a R_s отримуємо сегмент $C^1 = R_s / a$. При цьому відношення еквівалентності у $(N / 2 - 1)$ пар елементів зміниться на відношення строгого порядку. З класу R_u введемо елемент b , отримуємо сегмент $C^2 = R_u / b$. При цьому відношення еквівалентності у $(N / 2 - 1)$ пар елементів зміниться на відношення строгого порядку.

Введемо елемент a в сегмент C^2 . При цьому відношення строгого порядку у $(N / 2 - 1)$ пар елементів зміниться на відношення еквівалентності. Аналогічне відбувається при введенні елемента b в сегмент C^1 . Ставлення строгого порядку між елементами a і b зміниться на протилежне. Отже, загальна кількість пар, у яких змінилися відношення дорівнює $4(N / 2 - 1) + 2 = 2(N - 1)$ що й треба було довести.

Лема 5. Відстань між сусідніми точками $\left(\frac{N-1}{2}-1\right)$ рівня гіперповерхні потенціал $\frac{N-1}{2}$ при потужності N , $N > 4$, рівно $2\left(2\left[\frac{N}{2}\right]-1\right)$

Доведення. Нехай ранжуванням R і P описуються точки, $Pot R = Pot P = \frac{N-1}{2}$: Вони містять три класи, якими є: клас, який визначає потенціал; клас, який визначає номер рівня; одноелементний клас. При цьому $|R_s| = |R_u| = |R_3| = \frac{N-1}{2}$; Так як точки R і P сусідні, то класи R_b і R_u і класи P_b і P_u , знаходяться в ранжуванні по сусідству. При цьому елементи, що містяться в одноелементних класах ранжування R і P , збігаються, а

самі класи мають один і той же номер в цих ранжуваннях. Так як відстань між точками не залежить від співпадаючих частин ранжування, що описують ці точки, то отже R і P відрізняються лише на сегментах $C_1 = (R_S, P_U)$, $C_2 = (P_U, P_S)$. Так як ці сегменти описуються дихотомічними розбивками, а кількість вхідних в них елементів парне, то з леми 2.6. отримуємо, що $d(R, P) = 2 \left(2 \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 1 \right)$, що й треба було довести.

Узагальнюючи леми 4. і 5. отримуємо $2(N-1) = 2 \left(2 \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 1 \right)$ справедливості теореми.

Теорема 3. Відстань між сусідніми точками на старшому рівні гіперповерхні і $N / 2$ при парному N і гіперповерхні $\frac{N-1}{2}$. При нечіткому N , $N > 4$ рівно $2 \left(2 \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 1 \right)$.

Узагальнюючи розглянуте вище, отримуємо справедливості твердження

Твердження 1. Для ранжування, що описують R_i і R_j сусідні на старшому рівні гіперповерхні і $N / 2$ при непарному N , $N > 4$ справедливо

$$K_S^{R_i} \cap K_S^{R_j} \neq \emptyset. \left| \overline{K_S^{R_i} \cap K_S^{R_j}} \right| = 2$$

При нечіткому N вони описуються однотипними розбивками.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження структури гіперпростору, обраного в якості простору описів, покладені в основу створення стандартних процедури опису образів сеансових ключів і дозволило уніфікувати операції їх розпізнавання. Технічна реалізація запропонованого методу представлена в роботі [4].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Глущенко В.Е., Глущенко Ю.В. Концептуальные вопросы построения интеллектуальных систем защиты от несанкционированного доступа. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2006. – № 5 [111] – с.48-53.
- [2] В.Є. Глущенко, М.Л. Петришин Формування завадостійкого коду сеансових ключів. Матеріали статей п'ятої Міжнародної науковопрактичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", - Івано-Франківськ. 2015. – с.171–174.
- [3] V. Glushchenko, M. Petryshyn. Investigation of the space structure of session keys patterns descript Матеріали статей п'ятої Міжнародної науковопрактичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", - Івано-Франківськ. 2016. – с.113–116.
- [4] В.Є. Глущенко, М.Л. Петришин Формування сеансових ключем на базі концепції прийняття рішень. Матеріали статей п'ятої Міжнародної науковопрактичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", - Івано-Франківськ. 2017. – с.252–256.

Оцінка Ваги Хеммінга Обернених Чисел Відносно Операції Додавання за Модулем Узагальнених Чисел Мерсенна

Дарія Ядуха

кафедра математичних методів захисту інформації
Фізико-технічний інститут

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Київ, Україна

dariya.yadukha@gmail.com

Hamming Weight Bound for Additive Inverse Modulo Generalized Mersenne Number

Dariya Yadukha

Department of Mathematical Methods of Information Security
Institute of Physics and Technology

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine

dariya.yadukha@gmail.com

Анотація—У даній роботі наведено співвідношення для швидкого знаходження ваги Хеммінга обернених відносно операції додавання чисел за модулем особливого виду, а саме числа Мерсенна, числа Кранделла та узагальненого числа Мерсенна.

Abstract—This paper shows relations for the fast finding of Hamming weight of additive-inverse numbers modulo a special form, namely a Mersenne number, a Crandall number and generalized Mersenne number.

Ключові слова—число Мерсенна; число Кранделла; узагальнене число Мерсенна; вага Хеммінга.

Keywords—Mersenne number; Crandall number; generalized Mersenne number; Hamming weight.

I. ВСТУП

Числа спеціальної форми часто дозволяють швидше виконувати арифметичні операції за модулем. Це широко використовується для практичних цілей і пояснює велику кількість досліджень швидкої спеціальної арифметики. У даній роботі розглянуто способи швидкого знаходження ваги Хеммінга обернених чисел за модулем числа різних спеціальних форм.

II. СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ВАГИ ХЕММІНГА ОБЕРНЕНИХ ЧИСЕЛ ЗА СПЕЦІАЛЬНИМИ ВИДАМИ МОДУЛІВ

A. Числа Мерсенна

Числа Мерсенна є одним з найбільш відомих типів простих чисел, який досліджувався математиками ще з XVII століття, адже дані числа володіють багатьма властивостями. Відомо, що числа Мерсенна $M_n=2^n-1$ дозволяють швидко реалізовувати обчислення редукції за даним модулем, оскільки трудомісткі операції (множення, ділення) за модулем числа Мерсенна можливо замінити на звичайне додавання [2]. Наприклад, нехай x - деяке число, в такому випадку для знаходження $x \bmod M_n$ достатньо представити число x у виді $x=T \cdot 2^n+U$, тоді $x \equiv T+U \pmod{M_n}$. Це впливає з властивостей чисел Мерсенна, а саме з факту, що множення на степінь двійки за модулем числа Мерсенна є циклічним зсувом [1].

Вагою Хеммінга n -бітового числа s називається кількість одиниць у двійковому записі числа і позначається $Ham(s)$. Відомо наступне співвідношення для ваги Хеммінга оберненого за модулем числа Мерсенна [1]:

Лема 1. Для довільного числа $A \in \{0,1\}^n$, $A \neq 0^n$ та модуля $M_n=2^n-1$ виконується:

$$Ham(-A \pmod{M_n}) = n - Ham(A),$$

де $-A$ - обернене за операцією додавання число до A за модулем числа Мерсенна.

Співвідношення для ваги Хеммінга для обернених чисел за деяким модулем спрощують обчислення, уникаючи необхідність знаходження самого оберненого, отже, пришвидшуючи виконання операцій. Представлена у лемі 1 рівність використовується при розшифруванні повідомлення у криптосистемі AJPS [1], яка є кандидатом у постквантові криптографічні алгоритми з відкритим ключем у рамках конкурсу NIST [6].

Числа Мерсенна мають багато переваг для застосування у криптографії та інших прикладних областях з використанням операцій у кільці лишків. Часто у практичних цілях використовуються прості числа, а серед чисел Мерсенна на даний момент відомо лише 50 простих чисел, з них лише для перших 46-ти встановлено точні порядкові номери. Саме тому є мотивація досліджувати різні види узагальнень даних чисел та шукати схожі властивості для них.

В. Узагальнені числа Мерсенна

Узагальненим числом Мерсенна називається число виду $p=f(2^n)$, $n \in \mathbb{N}$, де f - нескладний поліном. Наприклад, нехай $f(t)=t^3-t+1$, тоді узагальнене число Мерсенна буде мати вигляд $p=2^{3n}-2^n+1$, $n \in \mathbb{N}$, а результатом редукції цілого числа за модулем p будуть $3n$ -бітові цілі числа [3]. Оскільки даний тип чисел є узагальненням над числами Мерсенна, то, очевидно, що він є значно більшим та містить більше простих чисел.

Для узагальнених чисел Мерсенна також існує спосіб швидкої редукції за модулем [3]. Даний спосіб має лінійну складність. Крім того, при спеціально підібраних параметрах редукцію за модулем узагальненого числа Мерсенна можна зробити ще більш ефективною, але у такому випадку кількість простих чисел такого виду менша. Також існує метод швидкого множення за модулем даного класу чисел, що працює вдвічі швидше, ніж множення за модулем звичайного числа [5]. Ще однією перевагою узагальнення є те, що операції редукції та множення можна легко розпаралелювати, що робить арифметику за даним модулем простішою для апаратної реалізації.

Співвідношення для ваги Хеммінга оберненого за модулем узагальненого числа Мерсенна наводиться у наступній теоремі.

Теорема 1. Нехай $GM_{n,m}$ - узагальнене число Мерсенна виду 2^n-2^m-1 та A - n -бітове число, тобто $A=a_{n-1}a_{n-2}\dots a_1a_0$, $a_i \in \{0,1\}$, $i = \overline{0, n-1}$. Тоді виконується:

- 1) Якщо біт $a_m=0$, то виконується співвідношення:

$$Ham(-A \bmod GM_{n,m}) = n - 1 - Ham(A).$$
- 2) У випадку $a_m=1$ потрібно представити число A у вигляді $A = h_1 \parallel h_2 \parallel h_3$, де:
 - $|h_3|=m$, тобто $h_3=a_{m-1}a_{m-2}\dots a_1a_0 - h_3$ включає молодші m бітів числа A ;

- $h_2 = a_k a_{k-1} \dots a_{m-1} a_m$, де
 $k = \min\{a_i = 0 \mid a_j = 1, m \leq j < i\}$, тобто h_2 включає у себе біти починаючи з a_m та до першого нуля, який зустріється після a_m , включно;
- $h_1 = a_{n-1} a_{n-2} \dots a_k$, де k - індекс з минулого пункту. Позначимо $|h_1|=l$, тобто h_1 містить l бітів.

Тоді співвідношення для оберненого буде наступним:

$$Ham(-A \bmod GM_{n,m}) = \\ = l - Ham(h_1) + Ham(h_2) + m - Ham(h_3)$$

Доведення: Відзначимо, що модуль 2^n-2^m-1 має наступний вигляд у двійковому записі: $11\dots1011\dots1$, причому саме m -й біт дорівнює 0. Потрібно, маючи число A , знайти таке число $B \in \{0,1\}^n$, що $A+B=0 \bmod GM_{n,m}$, тоді B якраз і буде оберненим до A , тобто $B=-A \bmod GM_{n,m}$. Слід зауважити, що потрібно шукати таке B , що $A+B=GM_{n,m}$, оскільки за умовою $A \in \{0,1\}^n$, тобто випадок $A+B=c \cdot GM_{n,m}$, де $c > 1$ - деяка константа, отримати неможливо. Введемо наступні позначення:

$$A = a_{n-1}a_{n-2}\dots a_m \dots a_1a_0 \\ B = b_{n-1}b_{n-2}\dots b_m \dots b_1b_0 \\ GM_{n,m} = g_{n-1}g_{n-2}\dots g_m \dots g_1g_0,$$

де $a_i, b_i, g_i \in \{0,1\}$, $i = \overline{0, n-1}$. Відомо, що $g_m=0$, а інші біти - 1, тобто $GM_{n,m} = 11\dots101\dots11$. Потрібно знайти b_i по відомим значенням $a_i, i = \overline{0, n-1}$, тоді можна буде побачити залежність ваги Хеммінга оберненого числа від ваги самого A .

1) Якщо $a_m=0$, то значення b_i будуть наступні:

$$\begin{cases} b_m = 0 \\ b_i = 1 - a_i, \quad \forall i \neq m \end{cases}$$

Щоб перевірити правильність даного твердження, помітимо, що для того, щоб $B = -A \bmod GM_{n,m}$ необхідно виконання рівності:

$$\begin{array}{cccccccc} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_{m+1} & a_m & a_{m-1} & \dots & a_1 & a_0 \\ + \frac{b_{n-1}}{1} & \frac{b_{n-2}}{1} & \dots & \frac{b_{m+1}}{1} & \frac{b_m}{0} & \frac{b_{m-1}}{1} & \dots & \frac{b_1}{1} & \frac{b_0}{1} \end{array}$$

Підставляючи значення b_i бачимо, що це дійсно виконується:

$$\begin{array}{cccccccc} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_{m+1} & 0 & a_{m-1} & \dots & a_1 & a_0 \\ + \frac{1-a_{n-1}}{1} & \frac{1-a_{n-2}}{1} & \dots & \frac{1-a_{m+1}}{1} & \frac{0}{0} & \frac{1-a_{m-1}}{1} & \dots & \frac{1-a_1}{1} & \frac{1-a_0}{1} \end{array}$$

Таким чином, у даному випадку для знаходження оберненого потрібно усі біти, окрім m -го, замінити на протилежні, а m -й біт залишити без змін. Тоді вага Хеммінга оберненого, тобто $Ham(-A \bmod GM_{n,m})$ буде рівна $n-Ham(A)-1$, де n відповідає максимально можливій вазі n -бітового вектору, а віднімаючи 1 враховується незмінний m -й біт.

2) У випадку $a_m = 1$ різниця з попереднім випадком у тому, що для отримання $g_m = 0$ потрібно щоб $b_m = 1$, а це утворює біт переносу на старші біти. Це і обумовлює розділення двійкового запису числа на три частини, тобто $A = h_1 || h_2 || h_3$. Тоді вагу Хеммінга A можна представити як суму $Ham(h_1) + Ham(h_2) + Ham(h_3)$. Позначимо $B = -A \bmod GM_{n,m} = h_1^* || h_2^* || h_3^*$. Тоді h_3^* буде знаходитись аналогічно пункту 1), замінюючи всі біти h_3 на протилежні. Очевидно, що $Ham(h_3^*) = m - Ham(h_3)$. Наймолодший біт числа h_2 , тобто $a_m = 1$, і, як було сказано раніше, $b_m = 1$, а отже біт переносу переходить на старший біт a_{m+1} . Можливі два випадки:

- $a_{m+1} = 0$, тоді, оскільки $g_{m+1} = 1$, $b_{m+1} = 0$;
- $a_{m+1} = 1$ - у такому випадку, враховуючи, що $g_{m+1} = 1$, маємо $b_{m+1} = 1$ і знову отримуємо біт переносу, тобто виконуємо аналогічні дії для a_{m+2} .

Бачимо, що біт переносу буде з'являтися на кожному кроці, аж поки у послідовності біт не зустрінеться 0 . Саме тому частина h_2 включає в себе біти від a_m до першого нуля, який зустрінеться у послідовності. Слід зазначити, що 0 точно буде, оскільки розглядаються числа менші за модуль $GM_{n,m}$. Бачимо, що при знаходженні h_2^* біти h_2 не змінювались (якщо $a_{m+c} = 0$, то $b_{m+c} = 0$, і якщо $a_{m+c} = 1$, то і $b_{m+c} = 1$, де $c \in \mathbb{N}$ - деяка константа), а отже $Ham(h_2^*) = Ham(h_2)$.

Частина h_1^* повинна бути такою, щоб результат суми за модулем 2 з h_1 був $11\dots 1$. Аналогічно до попередніх результатів, h_1^* отримується шляхом заміни бітів h_1 на протилежні. У такому випадку, якщо $|h_1| = l$, то $Ham(h_1^*) = l - Ham(h_1)$.

Узагальнюючи отримані результати, маємо:

$$\begin{aligned} Ham(-A \bmod GM_{n,m}) &= \\ &= Ham(B) = Ham(h_1^*) + Ham(h_2^*) + Ham(h_3^*) = \\ &= l - Ham(h_1) + Ham(h_2) + m - Ham(h_3), \end{aligned}$$

що і треба було довести.

С. Числа Кренделла

Ще одним узагальненням чисел Мерсенна є числа Кренделла виду $CR_n = 2^n - c$, де $c \in \mathbb{N}$. Очевидно, що при $c = 1$ отримуємо класичні числа Мерсенна [4]. Редукція за модулем цього класу чисел є також набагато швидшою, і обчислюється наступним чином [5]:

$$x \equiv (x \bmod 2^n) - c \left\lfloor \frac{x}{2^n} \right\rfloor \pmod{CR_n}$$

Наступна теорема демонструє спосіб знаходження ваги Хеммінга оберненого за модулем числа Кренделла.

Теорема 2. Нехай CR_n - число Кренделла, тобто число виду $2^n - c$, де $c \in \mathbb{N}$ - деяка константа, та A - n -бітове число, тобто $A = a_{n-1}a_{n-2}\dots a_1a_0$, $a_i \in \{0,1\}, i = \overline{0, n-1}$. Позначимо модуль як $CR_n = r_{n-1}r_{n-2}\dots r_1r_0$ та $B = -A \bmod CR_n = b_{n-1}b_{n-2}\dots b_1b_0$ - обернене до A число, де $r_i, b_i \in \{0,1\}, i = \overline{0, n-1}$. Тоді вага Хеммінга оберненого до A за модулем CR_n (тобто вага B) буде обчислюватись наступним чином:

1) Якщо число $a_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots a_1 a_0$ менше за число $r_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots r_1 r_0$, то:

$Ham(-A \bmod CR_n) = n - \lceil \log_2 c \rceil - Ham(h_1) + Ham(h_2^*)$, де $A = h_1 || h_2$, причому h_2 - молодші $\lceil \log_2 c \rceil$ бітів числа A ; $B = -A \bmod CR_n = h_1^* || h_2^*$, аналогічно h_2^* - це молодші $\lceil \log_2 c \rceil$ бітів числа B .

2) Якщо ж число $a_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots a_1 a_0$ є більшим за число $r_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots r_1 r_0$, то:

$Ham(-A \bmod CR_n) =$
 $= n - \lceil \log_2 c \rceil - |h_2| - Ham(h_1) + Ham(h_2) + Ham(h_3^*)$, де $A = h_1 || h_2 || h_3$, причому h_3 - молодші $\lceil \log_2 c \rceil$ бітів числа A ; h_2 включає у себе біти числа A починаючи з $\lceil \log_2 c \rceil$ біту та до першого нуля, який зустрінеться після $a_{\lceil \log_2 c \rceil - 1}$; h_1 - старші біти, що залишились, тобто $h_1 = a_{n-1}a_{n-2}\dots a_w$, де a_{w-1} - старший біт h_2 ; $|h_2|$ - кількість бітів у числі h_2 .

Доведення: Слід зауважити, що модуль CR_n має вигляд $111\dots 111\dots *$, де під символом $*$ розуміється або 0 , або 1 в залежності від значення константи c . Кількість таких неоднозначно визначених бітів можна обмежити значенням $\lceil \log_2 c \rceil$. Для того, щоб B був оберненим до A за модулем CR_n необхідно щоб виконувалось наступне. Оскільки значення $r_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots r_1 r_0$ не фіксовані, причому від них прямо залежать значення $b_{\lceil \log_2 c \rceil - 1}, b_{\lceil \log_2 c \rceil - 2}, \dots, b_1, b_0$, то вага Хеммінга числа B буде залежати від $Ham(h_2^*)$, для обчислення якого потрібно вирахувати значення $b_{\lceil \log_2 c \rceil - 1}, b_{\lceil \log_2 c \rceil - 2}, \dots, b_1, b_0$ та знайти кількість одиниць серед них. Значення $b_{\lceil \log_2 c \rceil - 1}, b_{\lceil \log_2 c \rceil - 2}, \dots, b_1, b_0$ обчислюються наступним чином:

$$\begin{cases} b_0 = (r_0 + a_0) \bmod 2 \\ b_i = (r_i + a_i + x_i) \bmod 2, & x_i = \begin{cases} 1, & a_{i-1} + b_{i-1} + x_{i-1} > 1 \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \end{cases}$$

$$i = \overline{1, \lceil \log_2 c \rceil - 1}, \quad x_0 = 0.$$

Тоді можна знайти кількість одиниць серед $\lceil \log_2 c \rceil$ молодших бітів числа B , позначимо це значення як z .

1) Очевидно, що якщо $B = -A \bmod CR_n = h_1^* \parallel h_2^*$, то $Ham(B) = Ham(h_1^*) + Ham(h_2^*)$. У даному випадку $Ham(h_2^*) = z$. Важливою умовою є те, що число $a_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots a_1 a_0$ менше за число $r_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots r_1 r_0$ - у такому випадку при додаванні старших бітів h_2^* та h_2 не виникає біту переносу, який би мав враховуватись при додаванні молодших бітів h_1^* та h_1 , а отже значення h_1^* мало би змінитись для виконання умови $A+B=0 \bmod CR_n$. Оскільки біту переносу немає, то маємо $h_1 + h_1^* = 11 \dots 1$, тоді $Ham(h_1^*) = |h_1| - Ham(h_1)$. Оскільки A - n -бітове число, а $|h_2| = \lceil \log_2 c \rceil$, то $|h_1| = n - \lceil \log_2 c \rceil$. Тоді маємо:

$$Ham(-A \bmod CR_n) = Ham(B) = Ham(h_1^*) + Ham(h_2^*) = n - \lceil \log_2 c \rceil - Ham(h_1) + Ham(h_2^*)$$

2) Аналогічно, якщо $B = -A \bmod CR_n = h_1^* \parallel h_2^* \parallel h_3^*$, то

$$Ham(B) = Ham(h_1^*) + Ham(h_2^*) + Ham(h_3^*)$$

У даному випадку $Ham(h_3^*) = z$. Оскільки $a_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots a_1 a_0$ є більшим за $r_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots r_1 r_0$, то при додаванні старших бітів h_3 та h_3^* з'являється біт переносу. Враховуючи те, що $r_{n-1} r_n \dots r_{\lceil \log_2 c \rceil} = 11 \dots 1$, біт переносу буде з'являтися на кожному кроці до того моменту, як у A зустрінеться 0 - таким чином утворюється частина h_2 . Зрозуміло, що на позиціях i , де $a_i = 1$, буде $b_i = 1$, а при першій зустрічі нуля, позначимо його $a_i = 0$, буде $b_i = 0$. Маємо рівність $h_2 = h_2^*$. Отже, вага Хеммінга не змінюється: $Ham(h_2^*) = Ham(h_2)$. $Ham(h_1^*)$ отримується аналогічно як у доведенні пункту 1), тобто: $Ham(h_1) = |h_1| - Ham(h_1) = n - t - 1 - Ham(h_1)$.

Підсумовуючи отримане, маємо:

$$\begin{aligned} Ham(-A \bmod CR_n) &= Ham(B) = \\ &= Ham(h_1^*) + Ham(h_2^*) + Ham(h_3^*) = \\ &= |h_1| - Ham(h_1) + Ham(h_2) + Ham(h_3^*) = \\ &= n - \lceil \log_2 c \rceil - |h_2| - Ham(h_1) + Ham(h_2) + Ham(h_3^*), \end{aligned}$$

що і потрібно було довести.

Бажано, щоб для знаходження ваги Хеммінга оберненого не потрібно було знаходити саме його значення, це значно пришвидшить обчислення на практиці, що можна помітити на прикладі реалізації криптосистеми AJPS, де використовується рівність для ваги Хеммінга оберненого числа за модулем числа Мерсенна. Оскільки в теоремі 2 для обчислення ваги Хеммінга $Ham(-A \bmod CR_n)$ потрібно знайти значення молодших $\lceil \log_2 n \rceil$ бітів числа $-A \bmod CR_n$, то спробуємо оцінити вагу Хеммінга так, щоб уникнути обчислення оберненого.

Теорема 3. Нехай CR_n - число Кренделла, A - n -бітове число, $B = -A \bmod CR_n$ - обернене до A число. Тоді для ваги

Хеммінга оберненого числа до A за модулем CR_n виконується наступне:

- 1) Якщо число $a_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots a_1 a_0$ менше за $r_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots r_1 r_0$, то: $n - \lceil \log_2 c \rceil - Ham(h_1) \leq Ham(-A \bmod CR_n) \leq n - Ham(h_1)$, де $A = h_1 \parallel h_2$, причому h_2 - молодші $\lceil \log_2 c \rceil$ бітів числа A .
- 2) Якщо ж $a_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots a_1 a_0$ більше числа $r_{\lceil \log_2 c \rceil - 1} \dots r_1 r_0$, то:

$$\begin{aligned} |h_1| - Ham(h_1) + Ham(h_2) &\leq Ham(-A \bmod CR_n) \leq \\ &\leq n - |h_2| - Ham(h_1) + Ham(h_2), \end{aligned}$$

де $A = h_1 \parallel h_2 \parallel h_3$, причому h_3 - молодші $\lceil \log_2 c \rceil$ бітів числа A ; h_2 включає у себе біти числа A починаючи з $\lceil \log_2 c \rceil$ біту та до першого нуля, який зустрінеться після $a_{\lceil \log_2 c \rceil - 1}$; h_1 - старші біти, що залишились, тобто $h_1 = a_{n-1} a_{n-2} \dots a_w$, де a_{w-1} - старший біт h_2 .

Нерівності отримуються очевидно, враховуючи, що h_2^* (аналогічно h_3^* у 2)) може мати мінімально можливу вагу Хеммінга рівну 0, коли $h_2^* = 00 \dots 0$, та максимальну можливу у випадку $h_2^* = 11 \dots 1$, а саме $\lceil \log_2 c \rceil$.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було описано співвідношення для знаходження ваги Хеммінга обернених чисел відносно операції додавання за модулем чисел, які є узагальненнями чисел Мерсенна, а саме модулем числа Кренделла та узагальненого числа Мерсенна. Отримані результати можна використовувати для спрощення обчислень за модулями цих класів чисел у криптографії або інших практичних реалізаціях, зокрема для узагальнення побудови криптосистеми AJPS з метою розширення класу модулів, що використовуються.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Divesh Aggarwal, Antoine Joux, Anupam Prakash, Miklos Santha, "A New Public-Key Cryptosystem via Mersenne Numbers" [Online]. Available: <https://eprint.iacr.org/2017/481>.
- [2] Joppe W. Bos, Thorsten Kleinjung, Arjen K. Lenstra, "Efficient SIMD arithmetic modulo a Mersenne number" [Online]. Available: <https://eprint.iacr.org/2010/338>.
- [3] Jerome A. Solinas, "Generalized Mersenne Numbers", Technical Report CORR Centre for Applied Cryptographic Research, University of Waterloo, 1999.
- [4] Richard E. Crandall, "Method and apparatus for public key exchange in a cryptographic system" (oct. 27, 1992). U.S. Patent 5,159,632.
- [5] Greg Zaverucha, "Generalized Mersenne Numbers in Pairing-Based Cryptography", 2006, unpublished.
- [6] Post-Quantum cryptography standardization NIST [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>.

Перспективи Розвитку та Вдосконалення Розподіленої Системи Моніторингу Державних Інформаційних Ресурсів

Надія Казакова, Олексій Фразе-Фразенко
кафедра комп'ютерних та
інформаційно-вимірювальних технологій
Одеська державна академія технічного
регулювання і якості
Одеса, Україна
kaz2003@ukr.net

Іван Копиченко
Фонд Східна Європа
Одеса, Україна
ikopychenko@egap.in.ua

Perspectives of Development and Improvement of Distributed Monitoring System of the State Information Resources

Nadiia Kazakova, Oleksii Frazhe-Frazenko
dept. of computer, information
and measurement technologies
Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality
Odesa, Ukraine
kaz2003@ukr.net

Ivan Kopychenko
Eastern Europe Foundation
Odesa, Ukraine
ikopychenko@egap.in.ua

Анотація—У межах вирішення проблеми підвищення ефективності розгалужених систем електронного урядування розглянуті питання впровадження систем централізованого моніторингу ресурсів та активів інформаційної інфраструктури. Окреслені ключові заходи щодо розвитку національної системи електронного документообігу, наведено аналіз особливостей та пропозиції впровадження сучасних систем моніторингу для підвищення рівня захищеності систем електронного урядування. З метою запобігання зміні структурованих даних подій, що містяться в базі даних системи моніторингу, запропоновано використовувати технологію Blockchain. Показано актуальність використання наведених технологій для підвищення ефективності функціонування систем електронної взаємодії органів виконавчої влади.

Abstract—Within a solution of the problem of increase in efficiency of branched electronic control systems questions of the information infrastructure resources and assets centralized monitoring systems implementation of are considered. The main priority directions and perspectives of electronic control and electronic democracy development in Ukraine are given. Key

actions for development of national electronic document management system are specified, the analysis of features and the sentence of modern monitoring systems implementation for increase in level of systems of electronic control security is provided. It is noted that efficiency of response to any events found by a monitoring system including incidents of information security, now more depends on quality of expert evaluation that allows to speak about need of further automation and adaptation to events which has to simplify acceptance process the decision by the administrator. For the purpose of structured data change prevention of the incidents which are contained in the monitoring system database it is offered to use Blockchain technology. Relevance of the specified technologies use for increase in efficiency of executive authorities interaction electronic systems functioning is shown.

Ключові слова—інформація; електронний документообіг; моніторинг, автоматизація; державний інформаційний ресурс, інформаційна безпека

Keywords—information; electronic document flow; monitoring; automation; state information resource; information security, executive authorities; blockchain; electronic democracy.

I. ВСТУП

Одним із головних питань підвищення ефективності державного управління в Україні є удосконалення впроваджених у цей процес сучасних інформаційних систем, що забезпечують електронну взаємодію органів виконавчої влади та моніторинг коректності функцій управління підпорядкованими об'єктами.

Враховуючи складність програмно-апаратного забезпечення систем електронної взаємодії ієрархічних компонентів системи управління, автоматизовані системи повинні забезпечувати централізований моніторинг параметрів, що впливають на виникнення неприпустимих помилок у процесі обміну даними між керуючими суб'єктами.

Виходячи зі сказаного, метою досліджень, пов'язаних із підвищенням ефективності державного управління в Україні є пошук шляхів удосконалення сучасних автоматизованих систем на основі впровадження до їх архітектури нових функцій моніторингу параметрів, на основі яких оцінюється коректність виконання функцій управління.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

В 2016-2017 роках урядом України в якості пріоритету розвитку держави як сучасної Європейської країни був обраний розвиток електронного урядування та електронної демократії. Серед них можна виділити наступні напрямки:

- модернізація публічних послуг (впровадження нових та оптимізація вже існуючих електронних адміністративних послуг, інструменти електронної ідентифікації, залучення громадян та розвиток відкритих даних);
- управління розвитком е-урядування (базова IT-інфраструктура, ефективне управління);
- модернізація публічного управління (електронна взаємодія реєстрів, електронний документообіг, е-урядування базовими галузями).

За минулий рік Україна зробила великий прорив у питаннях розвитку правових засад стосовно інструментів електронного урядування та їх використання. Протягом 2017 року активно розвивалось підґрунтя для вирішення проблеми електронної взаємодії державних реєстрів, а саме було:

- проведено аудит державних електронних інформаційних ресурсів;
- розроблено дорожню карту інтероперабельності даних до 2020 року;
- впроваджено систему електронної взаємодії державних електронних інформаційних ресурсів (Трембіта), створеної на базі естонської системи X-Road;

- розроблено порядок організації електронної взаємодії державних електронних інформаційних ресурсів.

Наступною, але не менш значимою подією для України став розвиток та модернізація національної системи електронного документообігу, основна мета якої полягає в оптимізації міжурядової взаємодії та зменшити час на обробку документів держслужбовцями.

Серед ключових заходів, щодо розвитку національної системи електронного документообігу можна виділити наступні:

- запровадження електронного документообігу в системі центральних органів виконавчої влади, обласних державних адміністрацій, деяких районних державних адміністрацій та державних підприємств стратегічного значення;
- прийняття постанови Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 №608 «Деякі питання підготовки проектів актів законодавства в електронній формі»;
- розроблено інструкцію щодо документування управлінської інформації в електронній формі та організації роботи з електронними документами;
- модернізовано системи електронного документообігу в пілотних центральних органах виконавчої влади в рамках реформи державного управління.

Відповідно до даних, наведених у Звіті Голови Державного агентства з питань електронного урядування за 2017 рік, бюджет, виділений на розвиток системи електронної взаємодії державних інформаційних ресурсів в 2018 році виріс в 2 рази, порівняно із минулим роком, а бюджет на систему електронної взаємодії органів виконавчої влади – майже в 6 разів.

Все це говорить про те, що на сьогодні в Україні актуальним є підвищення якості інструментів інформаційних систем для використання у роботі державних органів та приватних підприємств. З цієї причини великого значення набувають теоретичні та прикладні розробки в напрямку вдосконалення Системи електронної взаємодії органів виконавчої влади, зокрема, створення та оптимізація роботи підсистеми моніторингу шляхом впровадження відповідних технологій у якості додаткового функціоналу.

Далі слід розглянути особливості та пропозиції впровадження сучасних систем моніторингу для підвищення рівня захищеності систем електронного урядування.

Одним з головних питань в цьому процесі є організація процесу моніторингу компонентів, що використовуються під час роботи систем електронної взаємодії з метою підвищення ефективності їх роботи[1].

Враховуючи складність використовуваного програмно-апаратного забезпечення систем електронної взаємодії імовірність виникнення непоміченої критичної помилки є

великою. Саме тому в системі має бути реалізований центральний моніторинг, який має представляти комплексне рішення, яке поєднує у собі легку масштабованість, продуктивність та зручність використання [2].

До основних задач, які покладаються на систему централізованого моніторингу системи електронної взаємодії належать [1]:

- моніторинг мережі і додатків;
- виявлення проблем із віртуалізацією та операційними системами;
- аналіз мережевих проблем;
- аналіз захоплених даних додатків і потоків;
- пошук кореневої причини інциденту або проблеми.

Для ефективною реалізації викладених вище задач програмне забезпечення, яке реалізує функціонал системи центрального моніторингу, повинно надавати інструменти: збирання даних; сповіщення про події; зберігання даних; візуалізації.

Збирання даних може бути реалізовано за допомогою протоколу SNMP (SimpleNetworkManagementProtocol, простий протокол мережевого управління), агентів моніторингу та інтелектуального інтерфейсу IPMI.

За допомогою протоколу SNMP також можна стежити за станом апаратних засобів, включаючи блоки живлення, вентилятори, використання пам'яті тощо. Моніторинг за протоколом SNMP не потребує встановлення на об'єкті, який підлягає контролю, додаткового програмного забезпечення. Для моніторингу достатньо щоб пристрій підтримував протокол SNMP.

Метод використання агентів моніторингу дозволяє збирати більш розширене коло відомостей. Однак цей метод вимагає встановлення спеціального програмного забезпечення, яке реалізує функціонал агента.

IPMI (IntelligentPlatformManagementInterface) – це інтелектуальний інтерфейс управління платформою, який призначений для автономного моніторингу та управління функціями, вбудованими безпосередньо в апаратне і вбудоване програмне забезпечення серверних платформ.

Система моніторингу повинна здійснювати сповіщення адміністратору про події. Зберігання даних призначено для накопичення відомостей про події з метою їх подальшого аналізу.

Візуалізація потрібна для зручної обробки даних моніторингу адміністратором та передбачає наявність графічного інтерфейсу.

На сьогодні у світі наявна велика кількість платних та безкоштовних систем моніторингу. До найбільш відомих відносяться: Cacti, GFI Webmonitor, Nagios, Naumen Network Manager, Zabbix. У [3, 4] наведено порівняння особливостей використання деяких з цих систем. З урахуванням визначених технологій та методів, доцільним

буде розглянути передумови використання саме системи Zabbix для вирішення завдань, поставлених за мету даного дослідження.

Zabbix надає широкую множину функцій для здійснення якісного моніторингу, зокрема:

- централізований та простий у використанні веб-інтерфейс;
- система працює на більшості UNIX-подібних операційних системах, включаючи Linux, AIX, FreeBSD, OpenBSD та Solaris;
- агенти Zabbix здатні працювати під керуванням більшості UNIX-подібних операційних систем та систем родини Microsoft Windows;
- контроль пристроїв за SNMP (SNMPv1, SNMPv2c, SNMPv3) та IPMI;
- відстеження програм Java за допомогою розширень Java Management (JMX);
- контроль за віртуальними системами vCenter або vSphere за допомогою VMware API;
- вбудований графічний та інші можливості візуалізації;
- сповіщення, що дозволяють легко інтегруватися з іншими системами;
- гнучка конфігурація, включаючи шаблони.

Архітектура Zabbix представлена на рис. 1.

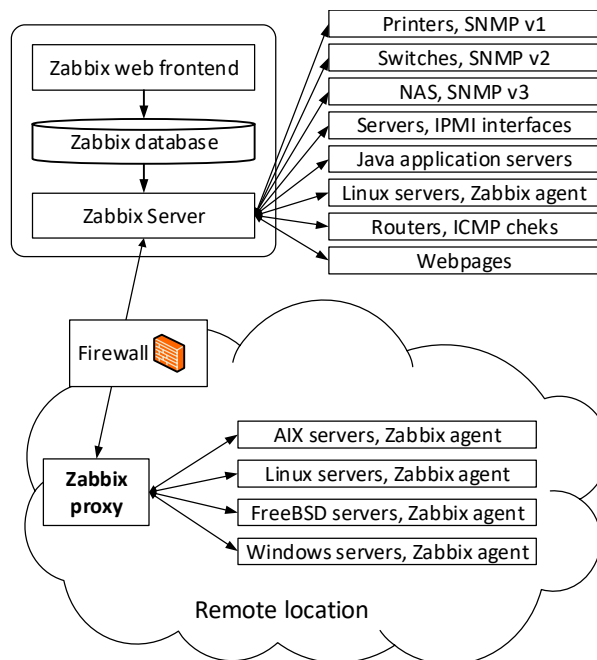


Рис. 1. Архітектура системи моніторингу Zabbix

Сервер Zabbix може контролювати одночасно велику кількість пристроїв. При цьому є можливість контролювати віддалені пристрої шляхом встановлення

Zabbix Proху, який має бути відділений від основного серверу брандмауером. Усі компоненти Zabbix написані мовою програмування С.

III. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СТВОРЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ

З метою здійснення моніторингу всіх програмних та апаратних (в тому числі віртуальних) компонентів системи електронної взаємодії у доповіді запропоновано створити підсистему централізованого моніторингу, яка повинна включати:

- сервер моніторингу, який періодично отримує і обробляє дані від агентів системи моніторингу та/або SNMP-подій обладнання/серверів, аналізує їх і сповіщає адміністраторів у випадку позаштатних ситуацій;
- агент системи моніторингу, що повинен запускатись на всіх серверах системи електронної взаємодії, та може працювати в двох режимах роботи: в активному режимі (запитує список необхідних параметрів і посилає їх сам до серверу моніторингу) і пасивному режимі (чекає запитів від сервера моніторингу);
- система керування базами даних для зберігання зібраних даних, конфігурації, подій тощо;
- HTTP сервер (Apache і PHP), що забезпечує веб-доступ адміністраторів для здійснення моніторингу та адміністрування.

Підсистема повинна інформувати відповідних адміністраторів про позаштатні ситуації виявлені в процесі моніторингу компонентів, шляхом передачі відповідних сповіщень.

Компоненти підсистеми централізованого моніторингу побудованого на Zabbix дозволяють реалізацію:

1. Створення карти мережі із візуальним відображенням стану серверів майданчику, маршрутів проходження, зв'язків серверів та їх стану, стану дзеркал серверів системи та можливістю перегляду всіх тригерів, що спрацювали на вузлах.

2. Забезпечення відображення вільного місця на всіх дисках із відображенням інформації про загальне/зайняте/вільне місце.

3. Покращення візуального сприйняття процесів у системі, особливо, що стосується критичних процесів. Додавання на комплексних екранах таких елементів моніторингу: графік відображення мережевого навантаження на сервери системи, індикатори статусу операцій на майданчику серверів, індикатори статусу дзеркала серверів, індикація об'єму дисків із журналами серверів, графік індикації навантаження процесорів та кількості процесів, індикація кількості клієнтських підключень у вигляді графіку та ін.

4. Забезпечення моніторингу стану серверів та мережевих зв'язків, а також стан мережевих адаптерів.

5. Моніторинг Крипто-серверу (стан мережевого підключення, вільне місце на диску С та стан системної служби тощо)

6. Виведення інформації по будь-яким параметрам для всіх вузлів мережі продуктивного майданчику (ZabbixGrapher).

7. Створення відображення простою системи.

Приклад реалізації системи моніторингу на базі Zabbix наведено на рисунку 2.

Спираючись на сучасні практики з модернізації електронних державних систем, впроваджених в Україні, та з метою запобігання зміни структурованих даних подій, що містяться в базі даних системи моніторингу, пропонується також використовувати технологію Blockchain.

Blockchain – (англ. ланцюжок блоків) технологія збереження даних у вигляді послідовних записів (блоків), де кожний наступний запис містить посилання на попередній.

Ключовими особливостями даної технології є:

- Незмінність даних – не можливе внесення змін у запис бази даних після моменту його внесення;
- Децентралізація – забезпечення розподілу, збереження та синхронізації даних між ланками ланцюга;
- Розумні контракти – можливість програмування умов проведення транзакцій та автоматичний контроль цих умов.

Blockchain є сучасною технологією розподільних даних, ідея якої полягає у функціонуванні без централізованого керівництва. Використання Blockchain забезпечує можливість функціонування систем без посередників, що дозволяє підвищити швидкість транзакцій, суттєво зменшити витрати та запобігти корупції. Захист даних здійснюється за допомогою потужних криптографічних алгоритмів.

В якості прикладів використання технології Blockchain в національних державних системах можна привести СЕТАМ (Система електронних торгів арештованим майном міністерства Юстиції України) та систему обробки та зберігання відомостей Державного земельного кадастру.

В першому випадку дана технологія була запроваджена за підтримкою Державного агентства з питань електронного урядування та використовується для збереження відомостей про ставки (можливість перевірити що ставку не було змінено або додано «заднім числом»)

У випадку з Державним земельним кадастром технологію Blockchain було запроваджено загальними зусиллями Міністерства агрополітики України, Державним агенством з питань електронного урядування та Transparency International Україна з метою збереження даних про виписки з реєстру.

ВИСНОВКИ

Наведено основні пріоритетні напрямки та перспективи розвитку електронного урядування та електронної демократії в Україні. Розглянути особливості та пропозиції впровадження сучасних систем моніторингу для підвищення рівня захищеності систем електронного урядування.

Беручи до уваги всі вищенаведені особливості та переваги впровадження системи централізованого моніторингу із використанням системи Zabbix, можна відзначити безумовну перспективність його використання. Однак, слід зазначити, що рішення по реагуванню на будь-які події, в тому числі інциденти інформаційної безпеки, в системі приймає Адміністратор на підставі власного досвіду та отриманих знань. Це дає змогу говорити про необхідність подальшої автоматизації та адаптації до подій [5-7], яка повинна спростити процес прийняття рішення по адекватному реагуванню на змінення стану системи.

Відповідно до проведеного аналізу стану модернізації електронних державних систем, впроваджених в Україні також виявлено необхідність реалізації технології Blockchain для запобігання зміні структурованих даних подій, що містяться у базі даних системи моніторингу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Послуги по модернізації системи електронної взаємодії органів виконавчої влади (створення та впровадження підсистеми моніторингу, звітності, білінгу електронних документів Системи електронної взаємодії органів виконавчої влади) [Звіт про НДР] (заключн.) / В. В. Корчинський, Н. Ф. Казакова, О. О. Фразе-Фразенко, М. М. Светіков, І. В. Твердохліб, Д. С. Парфьонов, Ю. В. Копитін // ТОВ «Едванс Дейта Інтегрейшн»; кер. В. В. Корчинський. — 0117u005475. — Київ: 2017. — 51 с.
- [2] Гузій, М. М., Станіславова, О. В., & Кадет, М. В. (2009). Аналіз технологій моніторингу комп'ютерних мереж. Науковий журнал, 1(1), 46-50.
- [3] Порівняння систем моніторингу Zabbix і PRTG network monitor [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://it-ua.info/news/2014/09/02/porvnyannya-sistem-montoringu-zabbix--prtg-network-monitor.html>
- [4] Моніторинг подій інформаційної безпеки за допомогою ZABBIX [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://it-ua.info/news/2014/03/12/montoring-pody-nformacyno-bezpeki-za-dopomogoyu-zabbix.html>
- [5] Казакова, Н. Ф. Автоматизація процесу адаптації інформаційних систем до інцидентів інформаційної безпеки [Текст] / Н. Ф. Казакова, Є. В. Вавілов // Інформаційна безпека. — Луганськ: СНУ ім. В. Даля. — 2013. — №4(12). — С. 49-56. — ISSN 2224-9613.
- [6] Волков, С. Л. Модель експертного оцінювання якісного стану технічної системи [Текст] / С. Л. Волков, Н. Ф. Казакова, С. Д. Асабашвілі // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Механіко-технологічні системи та комплекси. — Х.: НТУ «ХПІ». — 2017. — № 44. — С. 157-161.
- [7] Щербина, Ю.В. Определение параметров угроз информационным объектам [Текст] / Ю. В. Щербина, Н. Ф. Казакова // V Міжнародн. наук.-практ. конф. «Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості», 8-9 жовтня 2015 р., Одеса, ОДАТРЯ, 2015: матер. конф. — С. 133-137.

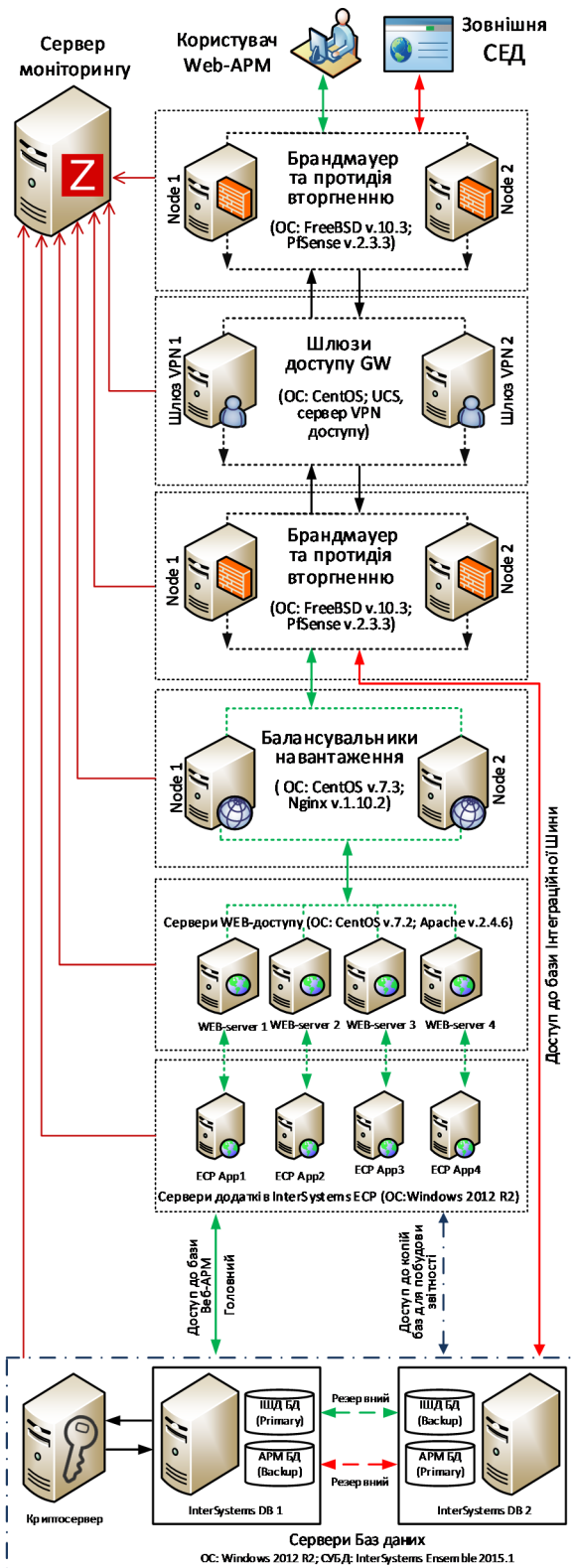


Рис. 2. Приклад реалізації системи моніторингу на базі Zabbix

Hardware Tools for Pseudonondeterministic Block Ciphering

Yurii Baryshev
dept. of Information Protection
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
yuriy.baryshev@gmail.com

Апаратні Засоби для Псевдонедетермінованого Блокового Шифрування

Юрій Барішев
кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
yuriy.baryshev@gmail.com

Abstract—Analysis of known approaches of block ciphering designing is presented at this paper. Implementation of the pseudonondeterministic cryptography was proposed to avoid determined drawbacks of known block cipher designing approaches. The automata model was shown to formalize the pseudonondeterministic block ciphering process. The method based on the model was developed. Both method and model allowed to design the structure of specialized processor for pseudonondeterministic ciphering. The structure's blocks were adapted for FPGA implementation.

Анотація—В даній роботі представлено аналіз відомих підходів до проектування блочного шифрування. Запропоновано реалізацію псевдонедетермінованої криптографії для усунення виявлених недоліків відомих підходів до проектування блочних шифрів. Наведено модель автомата, яка формалізує процес псевдонедетермінованого блокового шифрування. Розроблено метод, заснований на моделі. Як метод, так і модель дозволили спроектувати структуру спеціалізованого процесора для псевдонедетермінованого шифрування. Представлено блоки, що входять до даної структури, адаптовані для реалізації за допомогою ПЛІС.

Keywords—*cipher; encryption; pseudonondeterministic; automaton; specialised processor.*

Ключові слова—*шифр; зашифрування; псевдонедетермінований; автомат; спеціалізований процесор.*

I. INTRODUCTION

There are known two main approaches of cipher designing according to the algorithm openness to the public: proprietary and open ones. History shows that latter ones are more attractive for the implementations. The obviousness of this was

noticed even at XIX century [1], when basic principal of modern cryptography was postulated: the cryptography transformation infeasibility should be gained by keeping in secret key information, but not algorithms, which implements the transformation. Moreover recent cryptography transformation development methodology discourages researches of the proprietary approach. For instance, modern proprietary algorithms are to be considered inadequate for most application because of both the reasons described in [1] and lack of scientific resources amount needed for such algorithms proper development and analyses [2, 3].

Despite these concerns, there are a lot of drawbacks caused by the cryptographic transformation algorithms openness too. And ciphers are among the most vulnerable ones. For instance, the DES algorithm openness makes it to become object of both differential cryptanalysis [4] and reduced rounds ciphers analysis [5]. It should be pointed out, that the latter attack is direct consequence from the algorithm openness. Thus, open ciphers designing approach despite many positive peculiarities possesses drawbacks. Therefore, known approaches development shouldn't be considered as complete.

There is known pseudonondeterministic approach of cryptographic transformations development, which can aid in further development of ciphers designing methodology [6-8]. In particular, approach of pseudonondeterministic hashing implementation was presented in [7, 8], which allow to gain infeasibility increasing against generic attacks. So the similar effect is to be gained through the implementation of the approach for the block ciphers.

However a lot of tasks are to be solved to implement the approach. The similarity between block ciphering and hashing

from the point of view presented in work [6] encourages further research at this direction. That's why performing pseudonondeterministic block ciphers development is important.

The goal of this research is to improve block ciphers infeasibility against cryptanalysis based on knowledge of ciphering algorithm using hardware tools development for the pseudonondeterministic approach implementation.

The following tasks are to be solved to reach the goal:

- formalization of a pseudonondeterministic ciphering approach;
- ciphering method development according to the approach;
- pseudonondeterministic automaton structure development.

II. PSEUDONONDETERMINISTIC BLOCK CIPHERING

Consider automata theory to formalize pseudonondeterministic approach. It is known, that the automaton is a subject, which receives symbols of the subset $A^* \subseteq A$, where A is a finite alphabet [3, 9, 10]. For such finite alphabet an automaton is formalized as the following set of five [9]:

$$\text{Automaton} \# (A, S, s_0, T, F), \quad (1)$$

where S – a set of automaton states; s_0 – automaton's initial state ($s_0 \in S$); T – a set of allowed final states; F – a transition rule.

It is known that automata are divided into deterministic and nondeterministic ones depending on the transition rule [3, 9, 10]. The next state of deterministic one is easy-to-anticipate; while the transition rule of the nondeterministic is obscured. The principal idea behind the pseudonondeterministic cryptography is that the transformations should look like ones performed by nondeterministic automaton for the intruder, while they remain being deterministic for a person, who knows a secret (a key) [6, 8]. Such conception allowed to improve hash functions infeasibility [7, 8], consequently the similar result is expected for the block ciphering. The automaton for pseudonondeterministic ciphering was proposed in work [6]:

$$PNDC = \{ \{m_i\}, \{ \varepsilon_{k_i v_i}(m_i) \}, k, \varepsilon_{k_i v_i}(m_i), E, V \}, \quad (2)$$

where $\{m_i\}$ – a set of possible plain texts; $\{ \varepsilon_{k_i v_i}(m_i) \}$ – set of possible ciphertexts; k – a key; E – a set of possible encryption algorithms $\varepsilon_{k_i v_i}(\cdot)$; V – a set of control vectors v_i .

The main difficulty of model (2) implementation is transformation development. The following one is proposed to be used for the cause:

$$x \oplus_{a,b,c} y = ax + by + c \pmod{n}, \quad (3)$$

where (a, b, c) is a part of control vector v_i and $a \neq 0$, $b \neq 0$, $a < n$, $b < n$, $c < n$.

The method of pseudonondeterministic block ciphering *PNDC* (2) based on the operation (3) could be performed by the following steps:

- the message M is split into the l blocks of q bit length. In the case, when the message length cannot be divided without a remainder by q it is to be padded by random number of this remainder's length;
- the key is divided into two parts for initialising key and control vector scheduling procedures respectively;
- i th message block m_i ($i = \overline{1, l}$) is processed iteratively;
- after the last l th message block m_l is processed the ciphering process stops.

Each i th message block m_i ($i = \overline{1, l}$) should be processed iteratively in the following way

- the i th control vector is computed v_i ;
- the i th subkey is yielded k_i ;
- ciphering transformation $\varepsilon_{k_i v_i}(\cdot)$ is chosen;
- the ciphertext e_i is yielded:

$$e_i = \varepsilon_{k_i v_i}(m_i); \quad (4)$$

- after finishing of i th message block m_i processing the yielded ciphertext e_i is chained with the next $(i+1)$ th iteration accordingly with the block cipher mode of operation, which is determined by terms of a particular task, that is solved by ciphering.

The ciphering transformation $\varepsilon_{k_i v_i}(\cdot)$ at (4) is proposed to perform by at least $t = q / \log_2 n$ rounds based on the operation (3). For instance, consider the following round transformation:

- the i th subkey k_i and the i th message block m_i are split into t parts $k_i = k_{i1} || k_{i2} || \dots || k_{it}$, $m_i = m_{i1} || m_{i2} || \dots || m_{it}$;
- according to control vector v_i value the parameters a_i , b_i and c_i are chosen;
- the following operation is performed:

$$m_{ij} = m_{ij} \oplus_{a_i, b_i, c_i} k_{ij}; \quad (5)$$

- the permutation of bits within m_i is performed (for instance, cyclic shift leftwards for $\log_2 n$ positions) to

achieve impact of each subkey bit for resulting ciphertext value.

The value of m_i yielded after the last round is the i th part of the ciphertext e_i .

III. SPECIALISED PROCESSOR STRUCTURE

The most efficient implementation from the performance point of view of any computational method is hardware one. The automata model (2) provide the ability to obtain the hardware implementation using synthesis method [3, 10]. Therefore the structure of specialized processor, which implements pseudonondeterministic ciphering is proposed to apply ideas described above (fig.1).

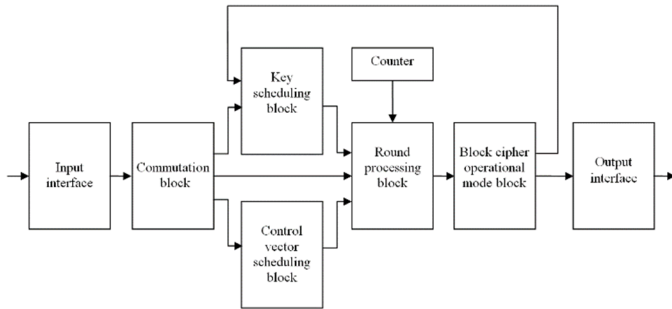


Fig. 1. Structure of pseudonondeterministic ciphering processor

The processor presented on the fig. 1 performs its task in the following way:

- initializing ciphering parameters by transferring key data to the key and control vectors scheduling blocks via input interface and commutation block;
- each time a data block is processed the counter is set accordingly with the round number and the number is decreased after completion of each round computation;
- each time the message block is transferred to the input interface it is further transferred to the round processing block, where the transformation (3) and permutation are performed;
- yielded result of round transformation would remain at the round processing block until the counter value differs from zero;
- after ciphering iteration is completed the ciphertext e_i is chained according with the user defined block cipher operational mode, which might draw to change of $(i+1)$ th subkey value;
- yielded ciphertext e_i is transferred to the user by output interface.

The principal element of the processor structure (fig. 1) is the round processing block. The instance of this block internal structure is presented on fig. 2.

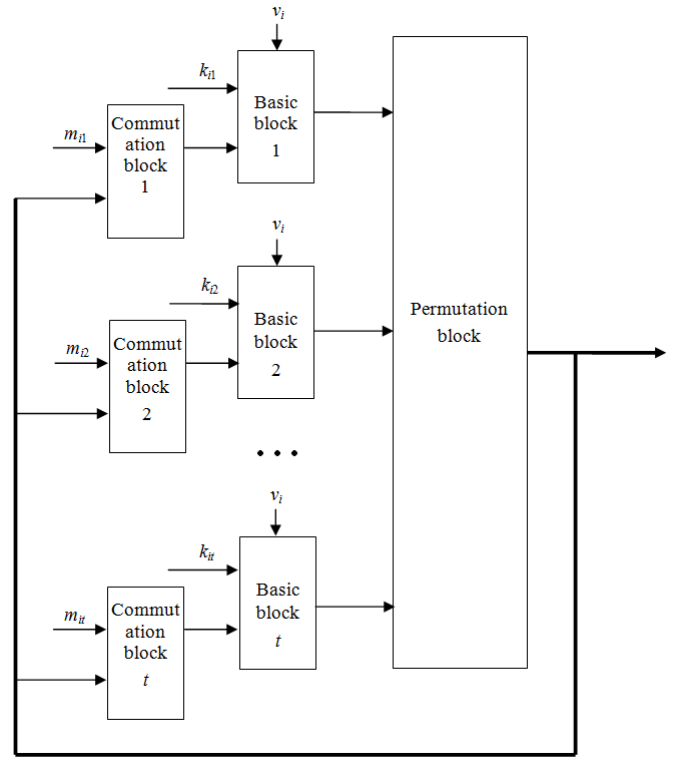


Fig. 2. Structure of the round processing block

Commutation blocks of the structure shown on fig. 2 provide i th message block m_i inputting to respective basic block at the implementation of the first round performance at the iteration. A basic block is one, which performs operation $\oplus_{a,b,c}$ for any allowed set of three (a, b, c) values. Outputs of basic blocks are sent to the permutation block, which can be implemented by a cyclic shift register. The permutation block output is divided into t parts, which are used as basic blocks input at the next round. After all rounds were performed the i th part of the ciphertext e_i is yielded.

The basic block structure can be implemented is several ways. One of them is received by the operation $\oplus_{a,b,c}$ performing. The implementation is presented on fig. 3.

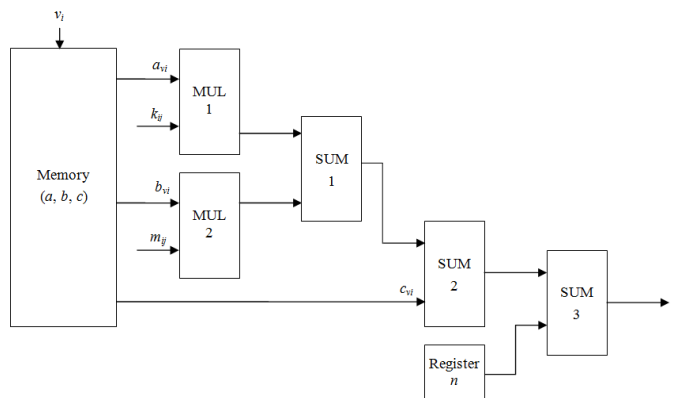


Fig. 3. The basic block implementation based on arithmetic computations

It is obvious, that hardware implementation of the transformation (3) is presented on fig. 3. The block performs in the following way:

- on the basis of control vector v_i value the three (a, b, c) , which are to be used at the iteration, is determined;
- the series of the multiplications and additions are performed by blocks MUL 1, MUL 2, SUM 1 and SUM 2;
- determination of the remainder modulo n is performed by the block SUM 3.

Another implementation of the basic block is based on Cayley's tables. In this case principal element of the structure is memory organized as according table operation device's architecture, when operands are interpreted as memory cells addresses. Such elements within basic block architecture presented on fig. 3 are called "Block (a_z, b_z, c_z) ", where $z = \overline{1, \eta}$ (η – the number of threes (a, b, c)).

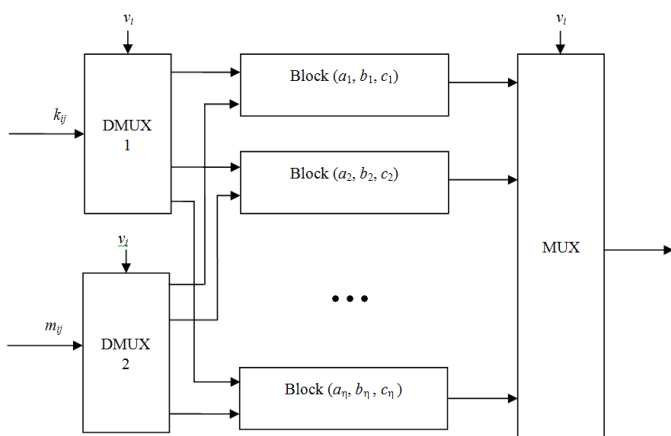


Fig. 4. The basic block implementation based on Cayley's tables

Either of basic block implementations could be used for the pseudonondeterministic ciphering processor. The decision, which of them should be used for the particular task solving, is to be drawn bearing in mind the memory cell implementation of the particular solution. Therefore if there is no restriction for the used memory and its output yielding rapid enough the one presented on fig. 4 should be used. In the case of hardware complexity minimization necessity the one shown on the fig. 3 seems to be more preferable for implementing. Still the threshold is heavily depends on used production technologies.

The structure of these blocks were developed considering both pure hardware implementation and one using VHDL language for the programming FPGA. Presented blocks consist of the basic digital components of computer systems, which aids pure hardware implementation. At the time structure of blocks is based on repetitive using of the similar objects, those could be described by the VHDL means. At the research the

latter implementation was chosen to perform, because it provides more flexibility into future development of the presented designs and allows to perform experimenting for its features studying and optimization using alterations of its structure elements.

CONCLUSIONS

Performed analysis of the modern cryptography transformation designing showed the necessity of their further development, because all of them contain drawbacks, which are used by intruders for cracking the transformations. It was shown how this results in block ciphers development.

The usage of pseudonondeterministic approach was proposed for block ciphers infeasibility improving. The automata model based on such approach was presented, which allowed its hardware implementation using synthesis method. The proposed structure of specialized processor provides ability of its optimization for the performance or used memory parameters. This processor structure was designed considering its implementation both using FPGA and pure hardware.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] A. Kerckhoffs. "Military cryptography", *Journal of Military Sciences*, 9(1): 5–38, 1883. (in French) Available: http://www.petitcolas.net/kerckhoffs/crypto_militaire_1.pdf
- [2] A. Kerckhoffs. "La cryptographie militaire" *Journal des Sciences Militaires*, 9(1):5–38, 1883. Available: http://www.petitcolas.net/kerckhoffs/crypto_militaire_1.pdf
- [3] R. Verdult. "The (in)security of proprietary cryptography." PhD thesis. KU Leuven, Radboud Universiteit Nijmegen, 2015, 274 p.
- [4] V. V. Skobelev, V. G. Skobelev "Ciphersystems Analyses" Donetsk, IAMM NAS of Ukraine, 2009, 479 p. (in Russian)
- [5] В. В. Скобелев, В. Г. Скобелев "Анализ шифросистем", Донецк, ИПИМ НАН України, 2009, 479 с.
- [6] Biham E., Shamir A. "Differential Cryptanalysis of the Data Encryption Standard", 2009 Available: <http://www.cs.technion.ac.il/~biham/Reports/differential-cryptanalysis-of-the-data-encryption-standard-biham-shamir-authors-latex-version.pdf>
- [7] O. Dunkelman, G. Sekar, B. Preneel "Improved Meet-in-the-Middle Attacks on Reduced-Round DES", *Indocrypt 2007*, 15 p. Available: <https://www.esat.kuleuven.be/cosic/publications/article-953.pdf>
- [8] Y. Baryshev "Models of pseudonondeterministic cryptography transformations" *Information technologies and computer engineering*, Proceedings of the fifth international scientific-practical conference, Ivano-Frankivsk, 2015, pp. 189-191. (in Ukrainian)
- [9] V. Luzhetskyi, Y. Baryshev "Data-driven pseudonondeterministic hashing constructions" *3rd International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PICS and T 2016*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7905352/>
- [10] V. Luzhetskyi, Y. Baryshev "Pseudonondeterministic Hashing Conception" *Systems of Control, Navigation and Communication*, 3, 2010, pp. 94-98. (in Ukrainian)
- [11] J. A Anderson. "Discrete mathematics with combinatorics", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2004, 960 p.
- [12] V. Glushkov "Digital automata synthesis", Moscow, Fizmathlit, 1962, 476 p. (in Russian)

Розгортання Ключа для Блокових Шифрів з Псевдонедетермінованою Послідовністю Криптопримітивів

Аліна Остапенко-Боженова
кафедра захисту інформації
ВНТУ
Вінниця, Україна
asja87@gmail.com

Валентина Каплун
кафедра захисту інформації
ВНТУ
Вінниця, Україна
Chair.information.protection.vntu@gmail.com

Key expansion of pseudo non-determined block ciphers

Alina Ostapenko-Bozhenova
dept. of chair Information Protection
Vinnitsa National Technical University,
Vinnitsa, Ukraine
asja87@gmail.com

Valentyna Kaplun
dept. of chair Information Protection
Vinnitsa National Technical University,
Vinnitsa, Ukraine
Chair.information.protection.vntu@gmail.com

Анотація—Робота присвячена створенню методу та програмного засобу для реалізації процедури розгортання ключової інформації для блокових шифрів, що використовують псевдонедетерміновані послідовності криптопримітивів та розбиття вхідного повідомлення на блоки змінної довжини.

Abstract—This work is devoted to the creation of a method and a software for procedure for key expansion for pseudo non-determined block ciphers which use breaking the input message into blocks of variable length

Ключові слова—криптографія; блокові шифри; секретний ключ;

Keywords— cryptography; block ciphers; secret key.

I. Вступ

Одним із сучасних напрямів розробки симетричних блокових шифрів (СБШ) підвищеної швидкості є створення недетермінованих шифрів де формування алгоритмів шифрування відбувається під керуванням секретного ключа [1, 2]. Але запропоновані підходи до побудови таких СБШ мають недоліки з точки зору складності процедур передобчислень.

При розробці нових підходів до побудови СБШ для покращення їх основних характеристик проводяться дослідження процедури розгортання ключа, режимів

блокового шифрування та операцій, що використовуються у функціях раундового перетворення [1, 2]. При цьому, для збільшення або підтримання заданого рівня криптостійкості СБШ практикується використання складних математичних рішень, що в свою чергу можуть збільшувати вимогу шифру до ресурсів комп'ютерної системи та зменшувати швидкість шифрування.

Змінити залежність криптографічної стійкості від складності обчислень або кількості ітерацій можливо шляхом застосування гнучких структур СБШ. Властивості яких, за використання простих та швидких операцій перетворення, дозволяють будувати блокові шифри підвищеної швидкості, що підтримують заданий світовими стандартами рівень криптографічної стійкості.

Тому у роботі [3] було запропонована модель блокових шифрів, що дозволить вносити ефект недетермінованості в складові криптографічного перетворення СБШ.

Одним з головних етапів формування криптографічного перетворення для блокових шифрів з псевдонедетермінованою послідовністю крипто примітивів (ПНБШ) є формування ознак з ключової інформації [4].

II. ОСНОВНІ СКЛАДОВІ КРИПТОГРАФІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ БЛОКОВИХ ШИФРІВ

Базовим для всіх видів СБШ є підхід до шифрування блоку даних: вхідна інформація розбивається на блоки деякої розрядності які в свою чергу оброблюються функцією раунду перетворення за допомогою раундового ключа шифрування певну кількість ітерацій. Розглядаючи процес шифрування СБШ в цілому можна виділити кілька його етапів:

1. Розгортання секретного ключа.
2. Забілювання ключовою інформацією.
3. Розбиття вхідної інформації на блоки.
4. Раундові перетворення блоку даних.

Набір операцій для обробки інформації різної складності та структури утворюють функцію раундового перетворення (ФРП) СБШ. При цьому функція раунду має забезпечувати розсіювання та перемішування даних (підстановки та перестановки) згідно Шеннону [5].

Для впровадження ефекту недетермінованості в процес конструювання СБШ доцільно розглянути основні складові елементи блокового шифру. Основними з них є: оброблювана інформація, набір операцій для обробки інформації, ключ шифрування.

Тому, будь який блоковий шифр можна охарактеризувати :

- ознакою структури блоку.
- ознакою функції раунду перетворення.

Структура блоку характеризується кількістю підблоків на які розбивається блок і розрядністю цих підблоків.

Центральним поняттям для процесу перетворення інформації є блок. Вхідна інформація представлена у вигляді блоку розбивається на певну кількість частин (підблоків).

Для СБШ, раундові перетворення яких побудовані на основі мереж Фейстеля блок складається із двох або із чотирьох підблоків (мережі на дві та чотири гілки), для SP-мереж розбиття на підблоки не є очевидним, але при перетворенні (S та P блоки) блок також оброблюється частинами – підблоками, для байт-орієнтованих структур основні операції виконуються над базовими елементами – байт, рядок або стовпчик байт, для СБШ що використовують операції за модулем може бути використано розбиття блоку на підблоки, або ж блок є одним підблоком.

Виходячи з цього можна казати, що поняття блоку не є основним поняттям процесу перетворення інформації, він скоріш є інтервалом певної розмірності для зчитування інформації який вже під час основних перетворень розбивається на базові елементи СБШ – підблоки.

Отже, блок в СБШ – це набір базових елементів (підблоків) певної розмірності.

Позначимо q – кількість підблоків розрядності l . Тоді розрядність блоку M :

$$M = q \times l.$$

Наприклад:

$$M \text{ (мережа Фейстеля)} = 2 \times 32 = 64 \text{ (біт);}$$

$$M \text{ (мережа Фейстеля)} = 2 \times 64 = 128 \text{ (біт);}$$

$$M \text{ (розширена мережа Фейстеля)} = 4 \times 32 = 128 \text{ (біт).}$$

ФРП характеризується послідовністю застосувань деяких операцій із набору базових операцій. Структура блоку та ФРП можуть бути постійними або змінними в процесі шифрування.

Набір операцій, що формують ФРП СБШ загалом позначимо як Q_{vp} – вид раундового перетворення. Представляючи ФРП у вигляді набору операцій недетермінованість можливо застосовувати і до її наповнення.

Ключова інформація для перетворень поточного раунду отримується з процедури розгортання секретного ключа.

Усі етапи обробки блоку даних для конкретного СБШ є строго визначеними та задаються при конструюванні, що вносить певні обмеження до його використання для комп'ютерних систем з різними параметрами ресурсів (об'ємами енергонезалежної пам'яті, обчислювальними можливостями). Таким чином бачимо, що існує кілька базових ознак побудови СБШ, деякі з них є змінними, а деякі не змінюються. Це означає, що не повною мірою використовує потенційні можливості ідей блокового шифрування для забезпечення характеристик швидкості та криптостійкості.

Базовим для всіх видів СБШ є підхід до шифрування блоку даних: вхідна інформація розбивається на блоки деякої розрядності які в свою чергу оброблюються функцією раунда перетворення за допомогою ключа відповідного раунду певну кількість ітерацій.

III. ЕТАП ФОРМУВАННЯ КЛЮЧОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Одним з головних етапів формування криптографічного перетворення для блокових шифрів з псевдондетермінованою послідовністю крипто примітивів (ПНБШ) є формування ознак з ключової інформації [4] Рис.1.

Як інструмент для процесу розгортання секретного ключа K у ПНБШ використовуються генератори псевдовипадкових послідовностей побудовані на основі регістра зсуву з лінійними зворотними зв'язками [5]. Секретний ключ K визначає не лише початковий стан регістру зсуву, а і його структуру, задаючи твірний поліном.

Формування криптографічного перетворення для раунду ПНБШ передбачає використання трьох видів ознак [3]:

- кількість підблоків Q_{pb} ;
- розрядність підблоку Q_{rb} (біт);
- вид структури перетворення Q_{vp} ,

набір конкретних значень яких характеризує вигляд раундового перетворення.

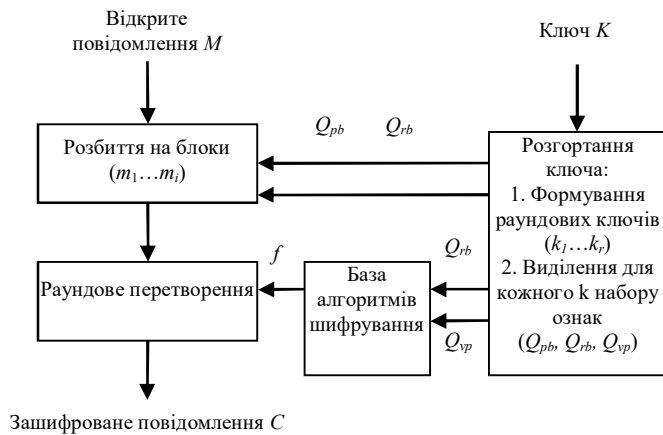


Рис. 1. Схема криптографічного перетворення ПНБШ.

Отже, можна казати що раунд перетворення блоку даних блокового шифру може бути однозначно заданий сукупністю розглянутих показників:

$$P = \{k, Q_{pb}, Q_{rb}, Q_{vp}\}.$$

Виділення ознак на кожному етапі відбувається з використанням ключа k відповідного раунду, що був сформований як поточний стан регістру зсуву побудованого на основі K .

Наприклад, для ключа $k = 128$ біт ця процедура може бути представлена послідовністю дій:

1. Раундовий ключ k розбивається на підблоки по 8 біт ($K1...K16$). Код ознаки виду перетворення Q_{vp} обраховується шляхом використання так званої «процедури згортки»:

$$Q_{vp} = (K1 + K2 + \dots + K16) \bmod 256.$$

В результаті, значення отриманого блоку (8 біт) визначає номер ($0 \div 255$) алгоритму шифрування із бази, що містить перелік алгоритмів, відповідних до кількості підблоків Q_{pb} формованого блоку.

2. Блок Q_{vp} в свою чергу розбивається на підблоки по 2 біта ($Q1...Q4$). Використовуючи вищеописану методику, визначається код ознаки кількості підблоків Q_{pb} :

$$Q_{pb} = (Q1 + \dots + Q4) \bmod 4.$$

Визначення кількості підблоків відповідно до отриманого коду ознаки Q_{pb} наведено в табл.1.

ТАБЛИЦЯ 1. Відповідність кількості підблоків коду ознаки кількості підблоків

Код ознаки Q_{pb}	00	01	10	11
Кількість під блоків (шт)	2	3	4	5

3. Шляхом циклічного зсуву на 1 біт вліво отриманого у п.п. 1 блоку Q_{vp} утворюється блок $\overrightarrow{Q_{vp}}$, що додається до Q_{vp} за mod 2 в результаті чого формується Q^* :

$$Q^* = Q_{vp} \oplus \overrightarrow{Q_{vp}}.$$

4. Отриманий блок Q^* розбивається на підблоки по 2 біта ($Q^*1...Q^*4$) та визначається код ознаки розрядності підблоку Q_{rb} :

$$Q_{rb} = (Q^*1 + \dots + Q^*4) \bmod 4.$$

Значення розрядності підблоку відповідно до коду ознаки Q_{rb} наведено у табл.2.

ТАБЛИЦЯ 2. Відповідність розрядності підблоку коду ознаки розрядності підблоку

Код ознаки Q_{rb}	00	01	10	11
Розрядність підблоку (біт)	8	16	32	64

Можливі значення ознаки Q_{pb} та Q_{rb} є рівноймовірними і забезпечують формування блоків різної довжини для різних раундів шифрування.

Діапазон значення ознак дозволяють представити 16 можливих комбінацій структур блоку. Так мінімальне значення розрядності блоку m_{bmin} , при структурі із 2 підблоків розрядністю 8 біт:

$$m_{bmin} = 2 \times 8 = 16 \text{ (біт)},$$

а максимальне значення розрядності блоку m_{bmax} , структура 5 підблоків розрядністю по 64 біта:

$$m_{bmax} = 5 \times 64 = 320 \text{ (біт)}.$$

Враховуючи діапазон значень ознаки виду криптографічного перетворення Q_{vp} ПНБШ, для одного раунду може бути побудовано 4096 різних модифікацій алгоритмів шифрування.

В результаті виконання розглянутого етапу криптографічного перетворення було отримано набір ознак для формування раунду ПНБШ.

IV. ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ КЛЮЧОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Метою створення програмного засобу є практична реалізація одного з етапів криптографічного перетворення

запропонованої моделі ПНБШ [3], проведення тестування з формуванням ознак для ключової інформації різного розміру.

Таким чином проєктований програмний засіб має розв'язувати такі задачі:

- генерування вхідних даних (секретний ключ різної довжини 64-1024 біт);
- формування генератора псевдовипадкових послідовностей на основі K ;
- формування множини раундових ключів k ;
- виділення набору ознак для побудови перетворення раунду ПНБШ;
- побудова криптоперетворення блокового шифру (візуалізація результату).
- тестування отриманих результатів.

Вихідними результатами роботи програми є:

- « k » – набір раундових ключів;
- «Набір ознак Q_{pb} , Q_{rb} , Q_{vp} » – визначені ключові параметри для відповідного перетворення;
- «Вигляд перетворення ПНБШ» та «Мнемонічний опис перетворення ПНБШ» – відповідне графічне та мнемонічне представлення опису раунду перетворення.

Висновки

Було розглянуто формування ключових ознак раунду перетворення блокових шифрів для впровадження ефекту

недетермінованості в процес конструювання нового виду СБШ, модель яких представлена у роботі [3].

Алгоритм шифрування таких блокових шифрів складається з відомих операцій, але порядок їх застосування та структура оброблюваних ним блоків визначається секретним ключем.

В той же час можливість створення ПНБШ великої кількості модифікацій алгоритмів шифрування для кожного раунду криптоперетворення, теоретично робить неможливим попередні статистичні дослідження.

На основі отриманих теоретичних результатів розроблено програмний засіб для генерування ключової формації, що може бути використано як базовий модуль програмної реалізації запропонованого методу блокового шифрування (ПНБШ).

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] B.Schneier. Applied Cryptography.- John Wiley & Sons Inc., N.Y. 1996.-757 p.
- [2] Молдовян Н.А. Скоростные блочные шифры.- СПб, СПбГУ, 1998.- 212 с.
- [3] Лужецкий В. А. Блочный шифр на основе псевдондетерминированных последовательностей криптопримитивов / В .А. Лужецкий, А. В. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – № 4 (2010). – Режим доступу до статті: <http://www.nbu.gov.ua>
- [4] Остапенко А. В. Криптографічне перетворення ПНБШ Тези доповідей П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» м. Івано-Франківськ, 27-29 травня 2015 року. – Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2015. – С. 187-188.
- [5] Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. – М., 1963. – 829 с.
- [6] Иванов М.А. Теория, применение и оценка качества генераторов / М.А. Иванов, И.В. Чугунков – М.:КУДИЦ-ПРЕСС, 2003. – 240 с.

Метод Захисту Баз Даних Шляхом Багатошарового Користувацького Доступу

Олеся Войтович

кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
voytovych.olesya@vntu.edu.ua

Іван Микитюк

кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
mikityukchanel@gmail.com

Database Protection by Multilayer User Access

Olesia Voitovych

dept. of Cybersecurity
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
voytovych.olesya@vntu.edu.ua

Ivan Mikityuk

dept. of Cybersecurity
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
mikityukchanel@gmail.com

Анотація—У статті запропоновано підхід та метод захисту інформації, що зберігається у базах даних шляхом створення багатошарової структури користувацького доступу до функцій СКБД. На основі запропонованого підходу та використання аналізу захищеності сучасних СКБД розроблено модульну систему захисту інформації у базах даних.

Abstract—The analysis of modern DBMS and developing new method of databases security is described in the article. The analysis allows highlighting the main shortcomings of modern DBMS - poor protection against loss of user access data and the use of discretionary access control mechanism to the management function. Based on analyzing, multilayer approach to the user's access to the functions of the DBMS as the main stage of protection is proposed. The proposed approach help to design the modular system of data base protection. The modular system of information protection divides in 3 layers. Every layer uses crypto-algorithms and hash-functions, which can help creator of database to protect his DB from unpredictable access and make system more flexible and secure. First layer is getting access to the user rights which can give user simple access to read DB information. Second layer is getting access to the redactor rights. This layer requires the input of user information and selection correct hash algorithm. Third layer is getting personal administrator access to the all rights in database. It can be creator access or simple administrator or moderator access. This layer requires availability of personal flash-card or any user-selected authentication data which can checked by a DBMS when user make a request to get personal access to all DBMS functions. Additional mechanism is blockchain database validation, which help user to protect integrity of his information. The developed modular database protection system allows users to pay attention to the state of the modern authentication algorithm and adds a contribution to the development of protection of modern DBMS in general.

Ключові слова—база даних; захист баз даних; багатошаровий захист; шифрування; геування; blockchain.

Keywords—database; database protection; multilayer protection; cryptographic algorithms; hash; blockchain.

I. ВСТУП

Бази даних – найпопулярніший спосіб збереження та маніпулювання користувацькою інформацією. Використання систем керування базами даних набуло широкого використання у сучасному, швидкому суспільстві і з розвитком інформаційних технологій механізми захисту СКБД втрачають свою потужність та актуальність і відповідно потребують доопрацювань [1]. Серед сучасних засобів керування базами даних важко зустріти представника, який би надавав користувачу додатковий, специфічний захист його інформації. В додаток до розвитку інформаційних технологій та потреб користувачів йде розвиток методів та технологій, які використовуються зловмисником, і спричиняють зростання ризиків втрати автентифікаційних даних користувачів у СКБД.

У ході дослідження стану сучасних СКБД [2-4], було виявлено, що в більшості з них використовується дискреційна модель надання доступу користувачам та адміністраторам, що збільшує ризик компрометації автентифікаційних даних (підглядування чи підбір паролю).

У зв'язку з цим постає задача – реалізувати підхід захисту баз даних, який має додатковий механізм, що дозволяє розділяти доступ до функцій СКБД на різних функціональних рівнях.

II. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЗАХИЩЕНОСТІ СУЧАСНИХ СКБД

Сучасні СКБД можуть бути охарактеризовані, як програмні засоби з високим ступенем захищеності інформації, яка зберігається в базах даних під їх управлінням, проте під час їх аналізу було виявлено один з недоліків [6], а саме використання одного бар'єру (дискреційної, рольової, моделі доступу).

При аналізі проблеми було виявлено, що на сьогодні СКБД надають користувачам певні ролі, які мають свій набір привілеїв [6], основні з них зображені у таблиці 1 [7].

ТАБЛИЦЯ 1. РОЛІ КОРИСТУВАЧІВ У СУЧАСНИХ СКБД

Роль	Можливості	Загрози
Власник	Усі дії по налаштуванню та обслуговуванню БД та видалення	Втрата даних у зв'язку з некомпетентністю чи халатністю,
Адміністратор	Адміністрування бази даних, надання привілеїв.	Цілісність даних, неавтоматичне надання прав іншим користувачам.
Редактор	Редагування та видалення даних у таблицях	Цілісність та конфіденційність даних
Читач	Зчитування даних	Конфіденційність даних
Користувач без прав	Не може виконувати дії з БД	-

Для аналізу та висування пропозицій слід перелічити деякі з реалізацій загроз, наведених у таблиці 1.

Загрози отримання зловмисником автентифікаційних даних відповідної ролі такі:

- читач бази даних дасть змогу зловмиснику вкрати інформацію;
- редактор дасть змогу відредагувати інформацію у БД;
- адміністратор дасть змогу приховано надати права користувачам, що не мають відповідного рангу;
- власник ставить під загрозу існування бази даних в цілому.

Проаналізувавши загрози (табл. 1) було виявлено ті, що можуть бути реалізовані відповідними користувачами. Сучасні СКБД надають права щодо користування базою даних після автентифікації користувача з необхідним рівнем доступу, тобто зловмиснику стає доступним рівень доступу користувача, в якого він міг отримати автентифікаційні дані. Даних підхід, як і будь-яка дискреційна (рольова) модель доступу, відкриває багато можливостей для несанкціонованого доступу до даних через перехоплення автентифікаційних даних та зловживання повноваженнями. З цього можна зробити висновок, що однорівневий захист є проблемою, яку необхідно вирішити.

В реальних умовах при роботі з СКБД створюється достатня кількість проблем з точки зору безпеки, які зв'язані з користувацькою авторизацією. Це можуть бути, як проблеми звичайного підглядання паролю з боку працівників, що сидять поруч, так і проблеми крадіжок

необхідних даних шляхом використання власних користувацьких автентифікаційних даних з невідповідною високою користувацькою роллю. З цього можна зробити висновок, що сучасні СКБД, які мають слабкий парольний захист, чи потребують більшого рівня захисту [8], потребують покращення системи авторизації.

Після проведення досліджень можна зробити висновок, що досліджені СКБД мають низку переваг у вигляді можливості дуже гнучко налаштувати власний функціонал. Проте з аналізу можна виділити основні недоліки сучасних СКБД – слабкий захист від втрати користувацького доступу та використання слабких моделей розмежування користувацького доступу до функцій з управління.

Відповідно до переваг відомих СКБД запропоновано використовувати криптографічні функції, зокрема гешування [9] та шифрування [10], використовуючи сучасні та стійкі криптоалгоритми, проте на прикладі поточної розробки вони будуть використовуватись дещо іншим способом. Отже до процесу отримання та аналізу інформації про сучасні СКБД було виділено два модулі, які необхідно реалізувати: гешування та шифрування.

III. ПОБУДОВА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ БАГАТОШАРОВОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Для покращення ситуації запропоновано розширення доступу до різних функціональних рівнів СКБД шляхом ускладнення доступу користувачів до функцій СКБД залежно від привілеїв, що їм надаються (рис. 1).

Для забезпечення належного захисту інформації необхідно комбінувати найкращі існуючі напрацювання та розбивати їх використання на «рівні захисту». Це дасть деякі переваги: користувач, який не володіє необхідним набором автентифікаційних даних отримає доступ тільки до відповідного рівня взаємодії з базою даних .

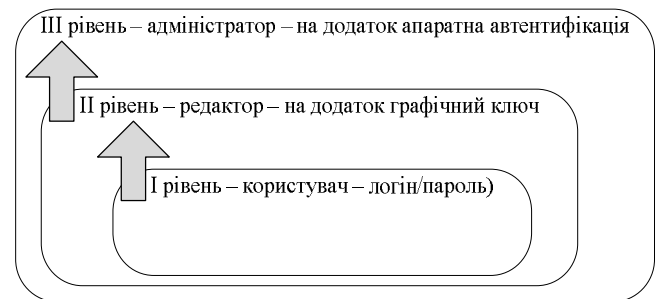


Рис. 1. Схема користувацького доступу до функцій СКБД у відповідності до рівнів захисту

Для того щоб реалізувати відповідні функції шарів отримання доступу до функцій СКБД передбачено реалізацію геш-функцій та основних криптографічних алгоритмів, які будуть використовуватись для гешування атрибутів та шифрування інформації, проте ці функції будуть реалізовані на різних «шарах» проходження користувацької автентифікації.

Першим і початковим рівнем є автентифікація користувача, яка дозволяє зловмиснику отримати *перший*

рівень доступу до інформації у БД, прикладом якого може бути реалізація алгоритму авторизації за допомогою введення комбінації логіну та пароллю.

Отримавши перший рівень користувач, який хоче відредагувати інформацію має підтвердити свої права редактора для отримання доступу до функцій, які знаходяться на *другому рівні доступу*.

Прикладом реалізації автентифікації при отриманні прав другого рівня (функціонального рівня редактора) може бути сутність, яка використовує алгоритми гешування і зберігає геш-значення з таблицею, до якої хоче отримати доступ, особа з правами користувача. Для переходу на другий рівень користувачеві пропонується ввести графічний пароль, та вибрати геш-функцію, яка повинна до нього примінитись. Після введення, автентифікаційні дані зіставляються з даними, які прив'язані до БД, і, після підтвердження, надається доступ.

Третій рівень доступу реалізується підтвердженням доступу з другого рівня (рівня редактора), наприклад шляхом наявності флешки-ключа. При запиті на отримання найвищих прав користувачеві виводиться повідомлення, яке пропонує йому вставити флешку з файлом, який містить необхідне для підтвердження прав геш-значення, яке було згенероване під час створення БД і відвантажене на флешку. При наявності необхідного файлу його дані скануються та зіставляються з наявними даними у БД. Також можлива реалізація з використанням технології одноразових паролів, що генеруються на основі отриманого геш-значення.

Узагальнена схема отримання доступу відповідно до рівнів захисту показана на рис.2.

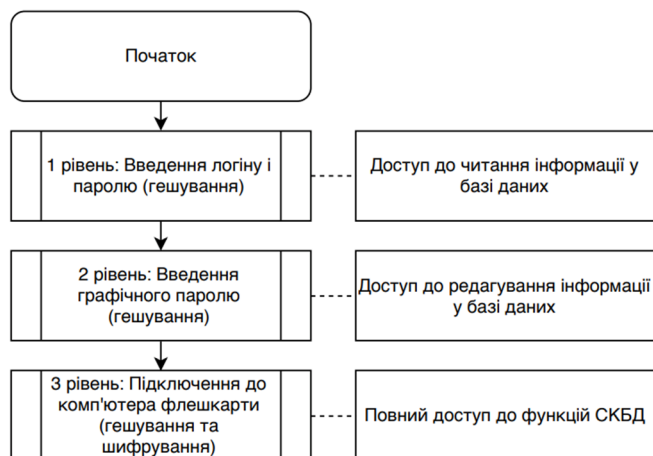


Рис. 2. Вигляд рівнів захисту з криптографічними функціями, які на них використовуються

У зв'язку з цим час, витрачений на процес отримання необхідних користувачеві привілеїв збільшиться, але дозволить відслідковувати та керувати доступом користувачів і захищати цілісність та конфіденційність бази даних. Крім того, доступ з правами третього рівня потрібен тільки у виключних ситуаціях, і затримка не сильно впливає на нормальну роботу з базою даних.

Такі три шари захисту дозволяють обмежити можливість зловмиснику, який хоче, наприклад, видалити БД. Зламавши пароль він зупиниться на шарі захисту, який пропонує вибір геш-функції та введення графічного пароллю, до якого вона буде застосовуватись. Після цього, зловмиснику необхідно подолати наступний шар – наявність носія з електронним-ключем, і наприкінці співставлення отриманих автентифікаційних даних зі списком ролей та відповідним йому списком користувачів. Таким чином, зловмисник, який отримав автентифікаційні дані одного користувача, графічний пароль та геш-функцію другого користувача, а носій в третього користувача, не зможе отримати доступ.

В доповнення до багат шарової моделі доступу до користувацької інформації у базі даних, використано порівняно нову технологію, а саме blockchain [11]. Дана технологія дозволить базі даних мати додатковий рівень захисту інформації щодо забезпечення цілісності інформації, яка у ній зберігається та структури бази даних в цілому. Дана технологія дозволить зв'язати усю важливу інформацію в один ланцюг даних, які залежатимуть один від одного, і, при несправній зміні інформації зловмисником, відразу ж буде відображення помилки та мутації при використанні БД іншими користувачами, і, цим самим, дозволить користувачам розпізнати можливі ситуації, коли базу було змінено без відома інших.

IV. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ БАГАТОШАРОВОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Для проведення експериментальних дослідження та перевірки моделі багат шарової системи захисту інформації з розділення користувацького доступу на необхідні адміністратору БД рівні було прийнято рішення реалізувати запропоновану систему у вигляді програмного засобу. Загальна схема запропонованих для реалізації механізмів захисту показана на рис.3.

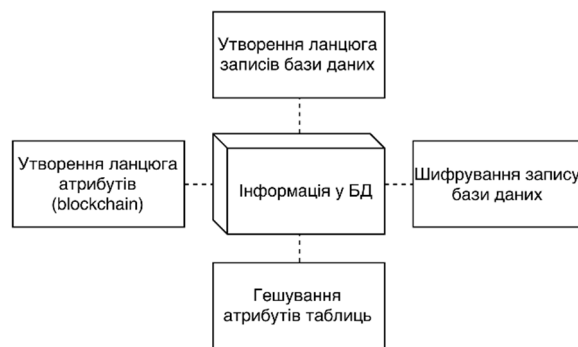


Рис. 3. Загальна схема запропонованих механізмів захисту бази даних

Відповідно до рівнів та використання криптографічних функцій було виділено два шляхи:

- використання криптографічних функцій для захисту користувацької автентифікаційної інформації
- використання криптографічних функцій для безпосереднього захисту інформації у базах даних.

Алгоритм ґешування користувацької інформації передбачає збереження будь-яких автентифікаційних даних у загешованому вигляді, що захищає їх від зламу таким чином, що зловмисник, отримавши до них доступ, не може їх використати у своїх цілях при подальшому зламі СКБД. Кожен користувач на етапі автентифікації на одному з рівнів вводить автентифікаційні дані, після чого вони ґеруються, і, в загешованому вигляді, порівнюються з даними, які відповідають цьому користувачеві на даному рівні захисту.

Для забезпечення цілісності інформації, яка зберігається у базі даних, застосовується технологія blockchain, яка є аналогом ланцюга, дані в якому накопичуються і формують постійно зростаючу базу даних [11]. Однією з головних особливостей даної технології є те, що дані, які зберігаються у ланцюгу неможливо видалити чи здійснити заміну/заміщення блока. Нові блоки завжди додаються виключно в кінець ланцюжка і кожен наступний блок залежить від попереднього. Дана технологія у повній мірі може бути використана при збереженні інформації у таблицях бази даних та перелікові атрибутів у таблиці, що допоможе забезпечити цілісність користувацької інформації, та незмінність атрибутів у БД.

Вигляд вікна тестового програмного засобу з використанням технології blockchain показано на рис. 4.

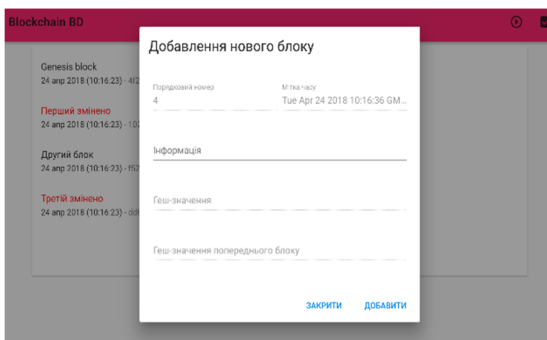


Рис. 4. Вигляд вікна тестового програмного засобу з використанням технології blockchain

Перший рівень захисту інформації у БД включає шифрування, яке забезпечить цілісність, доступність та конфіденційність інформації, яка у ній знаходиться. Отримавши прямий доступ до БД шляхом зламу СКБД, зловмисник зможе зчитати тільки зашифровану інформацію, а для отримання даних у відкритому вигляді йому необхідно пройти принаймні один рівень автентифікації, для отримання функцій першого рівня.

Другий рівень захисту інформації базується на технології blockchain, яка спрямована на забезпечення цілісності даних у таблицях та цілісності самих атрибутів таблиць.

У ході аналізу сучасних СКБД було виявлено один з недоліків вбудованих в них засобів захисту, а саме використання дискреційної (рольової) моделі доступу до функцій з адміністрування СКБД групами користувачів.

Пропонується підхід, який передбачає включення багатошарового захисту, який полягає у тому, що при переході на наступний функціональний рівень керування СКБД використовується додатковий механізм автентифікації користувачів (наприклад, логін-пароль графічний пароль, та наявність апаратного ключа).

Наведено метод багатошарового захисту баз даних з використанням ґеш-функцій криптографічних алгоритмів та технології blockchain, які надаватимуть комплексний підхід до забезпечення цілісності та конфіденційності даних, що збережені у БД.

Для проведення експериментальних досліджень, реалізовано програмний засіб, що показує можливість реалізації методу захисту бази даних.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Микитюк І.С., Войтович О.П. Захист баз даних шляхом фрагментування користувацького доступу // Матеріали XLVII Науково-технічної конференції факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії (2018).
- [2] Зрюмов, Е. А. Базы данных для инженеров: навчальный посібник / Е. А. Зрюмов, А. Г. Зрюмова; Алт. держ. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Видав-во АлтГТУ, 2010. – 131 с.
- [3] Kupershtein L. M. The database-oriented approach to data protection in Android operation system / Kupershtein L. M., Voytovych O. P., Proscoruk S.O., Kaplun V.A. // Вісник ХНУ : серія Технічні науки. - №1. -2018. - С. 18-22
- [4] Барішев Ю. В., Каплун В. А., Неуйміна К. В. Дискреційна модель та метод розмежування прав доступу до розподілених інформаційних ресурсів // Наукові паці ВНТУ. – 2017. – №2. – 8 с.
- [5] Шайтанова Н. Ж., Туленґалиева М.Г. Защита информации в базах данных [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL : http://www.rusnauka.com/m/10_DN_2014/Informatica/3_165120.doc.htm – Назва з екрану.
- [6] Микитюк І.С., Барішев Ю.В. Підхід до захисту баз даних: тези на наукову конференцію // Матеріали XLVII Науково-технічної конференції факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії (2017).
- [7] Microsoft Docs. Роли уровня баз данных. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/sql/relational-databases/security/authentication-access/database-level-roles> - Назва з екрану.
- [8] Полтавцева М. А., Хабаров А. Р. Безопасность баз данных: проблемы и перспективы //Программные продукты и системы. – 2016. – №. 3 (115).
- [9] Сучасні криптографічні системи: Навч. посібник. – Одеса: ВЦ ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2007. – 152 стор.
- [10] Євсєєв С.П. Ґешування даних в інформаційних системах : монографія / С.П.Євсєєв, О.Ю.Йохов, О.Г.Король – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 312с.
- [11] Щербань Е. Что такое блокчейн, и как он работает [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL : <https://revolverlab.com/how-its-works-blockchain-6d0355c43bfc> – Назва з екрану.

Метод Виявлення Тролінгу як Інформаційно-Психологічної Операції в Кіберпросторі

Вероніка Островська
кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
nika.ostrovsk21@gmail.com

Олеся Войтович, Леонід Куперштейн
кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
voytovych.op@gmail.com, kupershtein.lm@gmail.com

Method of Detecting Trolling as Informational and Psychological Operation in Cyberspace

Veronika Ostrovska
dept. of Information Protection
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
nika.ostrovsk21@gmail.com

Olesia Voitovych, Leonid Kupershtein
dept. of Information Protection
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
voytovych.op@gmail.com, kupershtein.lm@gmail.com

Анотація—У статті наведено основні види тролів. Запропоновано метод виявлення інформаційно-психологічної операції – тролінгу – у текстовому контенті на основі сучасних методів інтелектуального аналізу: контент-аналізу та методів машинного навчання. Особливістю розробленого методу є те, що вона націлена на контент з негативною тональністю. Це дозволило підвищити ефективність розпізнавання тролінгу.

Abstract—The main types of trolls are presented at the article. It was determined that professional trolls are the greatest danger. The method of detecting information-psychological operation – trolling – in text content on the basis of modern intellectual analysis methods: content analysis methods and methods of machine learning is proposed. The method of trolling detection is to determine the sentiment analysis of the text content of social networks; obtaining indicators that characterize the presence of trolling signs in the text, and computing information entropy of text content for these indicators. The formalization of the task for determining the sentiment analysis of text content is given. In order to determine the text emotion analysis, the signs of the questionable statements in the published facts and sensationality in the detected negative text content, the formulas for calculating relative indices of partial features were proposed. The decision on the presence of trolling signs in the text content of social networks is based on the calculated value of information entropy, which provides automation of decision-making procedures, increasing the efficiency and speed of cyberspace monitoring processes. The peculiarity of the developed method is the focus on content with a negative sentiment analysis. It has allowed to increase the efficiency of trolling recognition.

Ключові слова—троль; тролінг; інформаційно-психологічні впливи; соціальні мережі; машинне навчання; контент-аналіз

Keywords—troll; trolling; informational and psychological influences; social networks; machine learning; content analysis

I. ВСТУП

У ході проведення інформаційних воєн сучасні спеціалісти стали активно використовувати мережу Інтернет, зокрема, технології соціальних мереж та інших соціальних Інтернет-сервісів [1-2].

Кожен із користувачів соціальних мереж стає не тільки об'єктом для здійснення інформаційно-психологічного впливу, але також сприяє його подальшому поширенню. Дослідження свідчать, що соціальні мережі можуть виступати як інструмент маніпулювання суспільною свідомістю та є сприятливим середовищем для формування громадської думки [3].

Одним із найпоширеніших у соціальних мережах різновидів інформаційно-психологічних операцій є тролінг (англ. trolling – «виспівувати»), що застосовується для формування суспільної думки з актуальних питань та активного обговорення другорядних подій. Результати аналізу текстового контенту, поширюваного троями, свідчать, що він містить дезінформацію з елементами маніпулювання [4].

Метою роботи є розробка методики для виявлення тролінгу в соціальних мережах для підвищення ефективності його розпізнавання.

II. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Кожна людина стикається з когнітивними обмеженнями від упереджень та ефектів обмеження рамками. Когнітивне упередження – це структура відхилення у судженні, коли висновки про інших людей і ситуації можуть бути зроблені нелогічно [5].

Упередження, що досліджені шляхом проведення психологічних експериментів, свідчать про те, що люди часто не виконують усі вимоги на шляху до раціональності їхніх дій. І роблять це систематично та в певному напрямку, який можливо спрогнозувати. Когнітивні упередження також змушують громадськість бути відкритою до сприйняття інформаційно-психологічних впливів. Знаючи особливості когнітивних упереджень людини, тролі створюють спеціально підготовлену інформацію – меми – з елементами маніпулятивного впливу.

В соціальних Інтернет-сервісах тролі як засоби агресивного впливу поділяються на: природних, професійних та ботів. Під природними тролями будемо розуміти користувача, який, як правило, спеціально тролінгом не займається. Професійні тролі є найманими особами, які залишають коментарі в соціальних мережах за завданням урядових структур. Такі тролі за гроші залишають коментарі, призначені для здійснення пропаганди або розміщення політичної реклами під новинами на форумах, блогах або на інших соціальних ресурсах в мережі. Бот – це шкідлива програма, яка імітує діяльність людини через користувацькі інтерфейси [6].

Оскільки професійні тролі становлять найбільшу небезпеку, їх розпізнавання є найбільш актуальною задачею на сьогодні з точки зору кібербезпеки. Тому для виявлення тролінгу в соціальних мережах необхідно виокремлювати в публікаціях такі важливі ознаки його застосування: тональність повідомлень, емоційність повідомлень, сумнівність наведених фактів, сенсаційність повідомлення, повідомлення у великій кількості та дублювати повідомлень [7].

Методика виявлення тролінгу ґрунтується на методах машинного навчання і контент-аналізу та полягає в наступному.

Перший етап – це визначення тональності публікацій F на основі сучасних методів машинного навчання з учителем, без учителя, використанням правил або словників. Задача визначення тональності публікацій розв'язується за допомогою методів машинного навчання. Аналіз сучасних підходів показав, що для вирішення задач визначення тональності контенту соціальних мереж з метою виявлення інформаційно-психологічних операцій одним із найкращих інструментів є нейронні мережі [8-10].

Для аналізу тональності текстових даних доцільно застосовувати глибоке навчання рекурентних нейронних мереж, яке не викликає складнощів із перенавчанням, на

відмінну від згорткових та повнозв'язних нейронних мереж. Етап полягає у віднесенні тональності повідомлення d_j , $j = \overline{1, n}$ до задалегідь визначеного класу c_i , $i = \overline{1, m}$ – негативний або позитивний [8]

$$(d_j, c_i) \in D \times C, \quad (1)$$

де D – колекція документів; C – множина класів тональності повідомлень.

У формалізованому вигляді завданням визначення тональності текстового контенту публікації є класифікація i -го документу D_i при аналізі вектора ознак тональності X_i . При цьому виконується синтез ієрархічної структури документів (бінарне дерево рішень S_D), в кожній вершині якого застосовується вирішальне правило, яке реалізує метод послідовного аналізу при визначенні тональності текстових документів між класами D_{pos} та D_{neg} . На кожному i -му етапі вирішального правила аналізується чергова ознака тональності X_i і обчислюється відношення правдоподібності

$$\Theta = \prod_i \frac{P(x_{ik} / D_{neg})}{P(x_{ik} / D_{pos})}, \quad (2)$$

яке порівнюється з порогоми $\Theta > A$, $\Theta < B$.

При виконанні однієї з умов приймається рішення про D_{pos} та D_{neg} відповідно і виконується перехід на більш низький рівень ієрархії S_D з метою уточнення тональності. При виконанні обох нерівностей додається $i + 1$ ознака і процедура повторюється.

У результаті виконання першого етапу отримаємо визначений клас тональності публікації і нормоване числове значення відповідно до шкали, що поділяється на чотири інтервали: виражено позитивна (1.00 – 0.76), помірно позитивна (1.75 – 0.51), помірно негативна (0.50 – 0.26), виражено негативна (0.25 – 0.00) [11].

Оскільки повідомлення тролів містять критику, самовпевнені висловлювання, нецензурну лексику та інші негативні засоби впливу, доцільно звернути увагу на контент саме з негативною тональністю. Тому на наступних етапах буде досліджуватися контент з негативною тональністю, що був відібраний на цьому етапі.

Другий етап полягає в визначенні емоційного забарвлення негативного контенту F_i соціальних мереж. На цьому етапі відбувається визначення наявності у повідомленні проявів емоцій чи почуттів автора стосовно досліджуваних об'єктів або подій і полягає у встановленні кількості окличних речень, вигуків, прислівників, вживання лексем емоційного характеру.

Окличні речення F_{11} – відношення числа окличних речень S_{dec} до всієї кількості речень S в текстовому контенті

$$F_{11} = \frac{S_{dec}}{S}. \quad (3)$$

Вигуки F_{12} – показник вживання у публікації вигуків (наприклад, ага, ну-ну, овва, от тобі і на тощо)

$$F_{12} = \frac{W_{int}}{W}, \quad (4)$$

де W_{int} – кількість знайдених вигуків у публікації; W – загальна кількість слів.

Прислівники F_{13} – кількість прислівників W_{adv} у текстовому контенті, що застосовуються для порівняння та зосередження читача публікації на його емоціях (наприклад, немов, більше, сором, на жаль, на щастя, назавжди тощо)

$$F_{13} = \frac{W_{adv}}{W}. \quad (5)$$

Лексеми емоційного характеру F_{14} – показник вживання у коментарях лексем емоційного характеру W_{emot} (наприклад, посміховисько, жертва, жахливий тощо)

$$F_{14} = \frac{W_{emot}}{W}. \quad (6)$$

Третій етап полягає у виявленні ознак сумнівності викладених у негативному контенті соціальних мереж фактів F_3 , який зводиться до розрахунку частки, що показує ступінь відсутності аргументації, частки запитальних речень та частки сумнівних висловлювань.

Відсутність аргументації F_{21} – показник використання слів, які відкидають необхідність обґрунтування та підтвердження правдивості контенту (наприклад, явно, незаперечний факт, поза сумнівом, вочевидь, певна річ, само собою зрозуміло тощо)

$$F_{21} = \frac{W_{unarg}}{W}. \quad (7)$$

де W_{unarg} – кількість слів із запереченням необхідності підтвердження контенту.

Наявність запитальних речень F_{22} – показник наявності запитальних речень S_q у текстовому контенті:

$$F_{22} = \frac{S_q}{S}. \quad (8)$$

Сумнівні висловлювання F_{23} – показник вживання слів, які можуть трактуватися по-різному (наприклад, можливо, ймовірно, постійно):

$$F_{23} = \frac{W_{amb}}{W}, \quad (9)$$

де W_{amb} – кількість неоднозначних висловлювань.

Четвертий етап – встановлення сенсаційності негативного контенту F_3 внаслідок підвищення уваги користувачів соціальних мереж, оперативності контенту в результаті використання слів для створення атмосфери скороминущості й першочерговості явищ. Етап зводиться до виявлення наступних ознак.

Підвищення уваги F_{31} – показник використання слів, що здатні привернути увагу читача, зумовлюють зростання тривоги (наприклад, напад, жах, небезпека)

$$F_{31} = \frac{W_{atten}}{W}, \quad (10)$$

де W_{atten} – кількість виявлених слів, що підвищують увагу.

Оперативність F_{32} – показник вживання слів, які створюють атмосферу скороминущості й першочерговості явищ (наприклад, відразу, терміново, раптово)

$$F_{32} = \frac{W_{effic}}{W}, \quad (11)$$

де W_{effic} – кількість знайдених слів для демонстрації оперативності.

П'ятий етап – визначення кількості повідомлень від одного користувача та дублікатів повідомлень F_4 . У соціальних Інтернет-сервісах користувачі звертають увагу на контент з великою кількістю репостів, коментарів та «лайків» [12]. Публікуючи багато коментарів, тролі спричиняють соціалізацію цього контенту та створюють видимість активного обговорення, їх важливості та критичності [13].

Сутність алгоритму визначення дублікатів повідомлень полягає у знаходженні повторень конструкцій слів у контенті, що аналізується, та наведена нижче.

Крок 1 полягає в приведенні тексту повідомлень до канонічного вигляду. Для цього необхідно видалити смайли, хештеги, HTML-теги, гіперпосилання, розділові знаки, прийменники, сполучники й інші компоненти, які не несуть змістовного навантаження контенту. В деяких випадках необхідно здійснювати нормалізацію іменників до однини називного відмінка.

На *Кроці 2* здійснюється розбиття нормалізованого тексту на фрагменти. Вибір значення довжини текстового фрагменту залежить від довжини самого тексту і лежить в інтервалі 5-10. Зростання довжини вихідного тексту вимагає збільшення цього показника.

На *Кроці 3* обчислюється хеш-сума фрагменту тексту, яка порівнюється, з використанням функцій (SHA1, SHA2, SHA3, MD5 тощо) і записується в двовимірний масив даних. Після цього випадково обирають значення хешів зі збережених для порівняння між собою.

Крок 4 зводиться до розрахунку показника відповідності порівнюваного текстового контенту як співвідношення кількості хешів фрагментів з однаковими значеннями до їх загальної кількості.

В загальному вигляді зв'язок між ознаками застосування тролінгу в соціальних мережах, що розглянуті на попередніх етапах, зображено у вигляді ієрархії на Рис. 1.

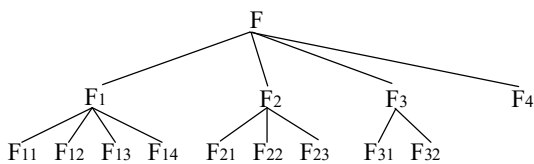


Рис. 1. Ієрархія ознак застосування тролінгу в соціальних мережах.

Шостий етап – розрахунок інформаційної ентропії застосування засобів тролінгу в соціальних мережах, використовуючи показники, що отримані на попередніх етапах. Суть полягає у встановленні рівня невизначеності щодо наявності у негативному контенті прихованого впливу на користувачів соціальних мереж. Числове значення порівнюється із шкалою оцінки для прийняття рішення про рівень загрози. Шкала оцінки застосування засобів тролінгу в соціальних мережах поділяється на п'ять інтервальних значень ентропії: дуже висока – 0.00-0.20, висока – 0.21-0.49, звичайна – 0.50-0.74, низька – 0.75-0.90, дуже низька – 0.91-1.00 [11].

Таким чином, зміст методу виявлення тролінгу зводиться до визначення тональності текстового контенту соціальних мереж; отримання показників, які характеризують наявність ознак тролінгу в тексті; обчислення для цих показників інформаційної ентропії текстового контенту та порівняння її числового значення із допустимим граничним. Інформаційна ентропія зменшується при зростанні частот появи ознак тролінгу у текстовому контенті соціальних мереж. У випадку малих частот прояву ознак інформаційна невизначеність зростає [14].

Висновки

Запропонований метод виявлення ознак застосування тролінгу ґрунтується на методах інтелектуального аналізу текстового контенту. Рішення про наявність ознак тролінгу у текстовому контенті соціальних мереж приймається на основі обчисленого значення інформаційної ентропії, що

забезпечує автоматизацію процедур прийняття рішень, підвищення ефективності та швидкодії процесів моніторингу кіберпростору.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Китов П. Совершенствование способов и средств ведения психологических операций вооружённых сил США / П. Китов // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – № 3 (792). – С. 19–22.
- [2] Александр Ольшанский: как Украине победить в информационной войне с РФ и чем опасны Google, Twitter и Facebook [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ain.ua/2015/04/21/576406>.
- [3] Пенченко В. М. Інформаційна безпека особи в умовах соціалізації Інтернет-сервісів / В. М. Пенченко // Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави : зб. матер. наук.-практ. конф., 20 березня 2012 року. – Київ : Наук.-вид. відділ НА СБ України, 2012. – С. 81–83.
- [4] Чернишук С. В. Методика виявлення кібернетичних загроз у природномовних текстах / С. В. Чернишук // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2013. – Вип. 8. – С. 112–121.
- [5] Haselton M. G. The evolution of cognitive bias / M. G. Haselton, D. Nettle, P. W. Andrews ; D. M. Buss (Ed.) // The Handbook of Evolutionary Psychology. – Hoboken, NJ, US : John Wiley & Sons Inc., 2005. – P. 724–746.
- [6] Войтович О.П., Дудатьев А.В., Головенько В.О. Модель та засіб для виявлення фейкових облікових записів у соціальних мережах // Вчені записки таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Частина 1 – 2018. – № 1 Том 29 (68). – С. 112 – 119.
- [7] Островська В. М. Тролінг як засіб інформаційної війни / В. М. Островська, О. П. Войтович [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2018/paper/view/4071/4535>. – Назва з екрану.
- [8] Faraz A. A comparison of text Categorization methods / A. Faraz // International Journal on Natural Language Computing. – 2016. – № 5(1). – P. 31–44.
- [9] Волосюк Ю. В. Методи класифікації текстових документів в задачах Text Mining / Ю. В. Волосюк // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – № 6(34). – С. 76–81.
- [10] Fernandez-Martinez F. Text categorization methods for automatic estimation of verbal intelligence / F. FernandezMartinez, K. Zablotskaya, W. Minker // Expert Systems with Applications. – 2012. – № 9 (10). – P. 9807–9820.
- [11] Гришук Р. В. Метод оптимізації розмірності потоку вхідних даних для систем захисту інформації / Р. В. Гришук, В. М. Мамарев // Інформаційна безпека. – 2012. – № 2 (8). – С. 27–34.
- [12] Voitovych O. Badania sieci społecznych jako źródła informacji w czasie wojny [Електронний ресурс] / Voitovych O., Holovenko V. // Inżynier XXI wieku projectujemy przyszłość : monografia / [pod red. : Jacek Rysiński] [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/17254/2688.pdf?sequence=3>. – Назва з екрану.
- [13] Молодецька К. В. Підхід до виявлення організаційних ознак інформаційних операцій у соціальних інтернет-сервісах / К. В. Молодецька // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО : зб. матер. ІХ наук.-практ. конф., 25 листоп. 2016 р. – Київ : ВІТІ, 2016. – С. 130–131.
- [14] Молодецька-Гринчук К. В. Методика виявлення маніпуляцій суспільною думкою у соціальних інтернет-сервісах / К. В. Молодецька-Гринчук // Інформаційна безпека. – 2016. – № 4(24). – С. 80–92

Виявлення Фейкових Облікових Записів у Соціальній Мережі «Facebook»

Олеся Войтович, Андрій Дудатьєв
кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
voytovych.olesya@vntu.edu.ua, dudatyev.av@gmail.com

Віталій Головенько
кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
torvald124@gmail.com

Fake Accounts Detection in Social Network «Facebook»

Olesia Voitovych, Andrii Dudatyev
dept. of Cybersecurity
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
voytovych.olesya@vntu.edu.ua, dudatyev.av@gmail.com

Vitalii Holovenko
dept. of Cybersecurity
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
torvald124@gmail.com

Анотація—У статті запропоновано ознаки фейкових облікових записів у соціальній мережі «Facebook». На основі запропонованих ознак та використанні рейтингових оцінок розроблено систему підтримку прийняття рішень при виявленні фейкових облікових записів.

Abstract—The fake accounts' attributes in social network «Facebook» are proposed in the article. The proposed attributes as well as rating scores are used for decision support system for fake accounts detection developing.

Ключові слова—фейкові облікові записи; соціальні мережі; кібербезпека; інформаційна війна; рейтингові оцінки

Keywords—fake accounts; social networks; cyber security; information warfare; rating scores

I. INTRODUCTION

Social networks are specific places for doing special information operations especially informational psychological operations targeted on society [1, 2]. Hundred millions of people around the world use social networks for communication, reading news and so on. However, great amount of people use social networks as a tool for manipulation of individual and sociable mind by using informational throws-in (mems) [3]. For manipulation people use fake accounts in which there is no information about them or there is false information on their profile. Using of fake accounts is usually targeted at changing sociable mind in one form or another and it doesn't matter the aims of people who create fake accounts. [4].

II. DISTINGUISHING OF FAKE ACCOUNTS ATTRIBUTES

The research [5-11] showed that the basic categories of fake account attributes such as likes, personal information, statuses and posts, friends, photos can be distinguished (fig. 1).

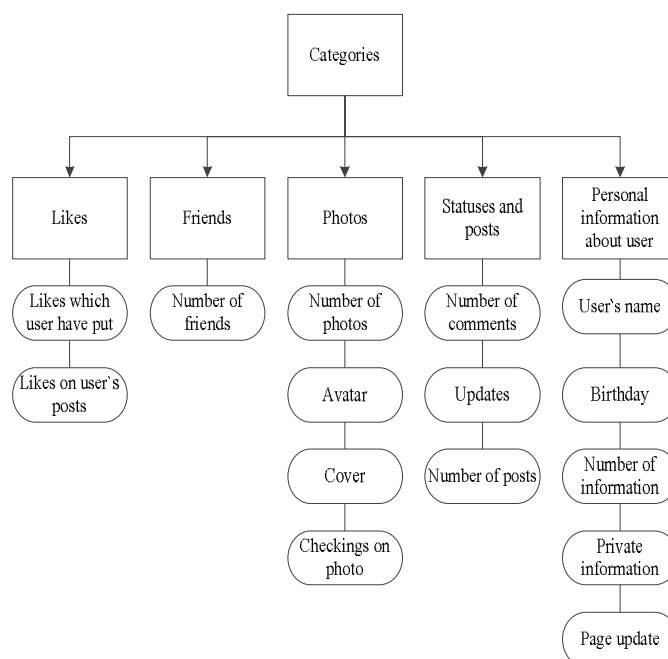


Fig. 1. Scheme of categories of fake account attributes

Likes [8] can be distinguished by the attributes of their quantity and people who leaved likes on a page. Likes can be leaved by friends or strangers. Quantity of likes also has meaning for indicating fakes. If a user has more likes on a post than quantity his/her friends, it could mean that user has got that likes illegally. Lack of likes on a page also shows the user's isolation and as a result – fake.

Parameters of the fake attributes model in a category "Likes" are written in a form of tuples:

LIKES = {FROM; QUANTITY}

Personal information on a page [8-9] can show a lot about fake or real status of user. Personal information can be shared on user's name, birthday, quantity of information about user, contradictory information and private information for future analysis.

Birthday has attributes that show fakeness of account. Fake users often don't mind about detailed filling of their pages and leave birthday as default (usually the 1st of January). There is a possible situation when user's age is doubtful or doesn't match with other dates on the page. For example, user is fifteen but other information on the page says that user leaved a university ten years ago.

User's name is difficult to analyze because a lot of people with the same name and surname exist. But user's name should be checked if it matches with a names of celebrities. Also it should be checked if user's name is typical for user's country.

Lack or minor amount of personal information on user's profile proves that a user doesn't want him/her to be identified by other users. So it's a prove of fake account.

Contradictory information on a page is one of the authentic attributes of fakes but it needs difficult analyzing. For example, post information does not correspond to profile information or user's groups do not correspond to user's interests.

E-mail and mobile phone number also concerns to personal information about user. Users seldom put such private information in open access except of fake accounts or special advertising accounts.

Parameters of fake attributes model in category "Personal information about user" are written in a form of tuples:

PERSONAL INFORMATION ABOUT USER = {DATE OF BIRTH; USER NAME; NUMBER OF INFORMATION; CONTRADICTIONARY INFORMATION; PRIVATE INFORMATION}

Statuses and posts on a page should be analyzed as one because their difference is only in their location on the page. They can be analyzed by such attributes: update/create frequency and comments. Statuses and posts are usually used for advertisement [10].

Posts and statuses update/create frequency indicates a user's activity. If posts or statuses are created seldom or too often, it's one of the fake signs. If a user added a post/status a long time ago and doesn't update it during long period of time, there is a probability that the account is fake.

Quantity of comments also shows a profile's activity. Lack or great amount of comments is usually belonged to fake

accounts. Comments can be leaved by user's friends or strangers.

Parameters of fake attributes model in a category "Statuses and posts" are written in a form of tuples:

STATUSES AND POSTS ON PAGE = {ADVERTISING; UPDATES; COMMENTS}

User's friends' analyzing is very important for fake detection because it shows the profile activity in a social network and user's interests [11].

It's difficult to analyze fakeness dependence of user's friends because it's necessary to analyze friends themselves to make right conclusion about fakeness of a profile. For example, if a user has friends that are fakes, there is a possibility that the user is a fake. If a user doesn't have friends, there is a great possibility that his/her profile is used for purposes other than communication with people. Big amount of friends got for short period of time after profile creation cause suspicions, so that profile is probably fake.

Parameters of fake attributes model in a category "Friends" are written in a form of tuples:

FRIENDS = {NUMBER OF FRIENDS; INFORMATION ABOUT FRIENDS}

User's photos' analyzing is also very important and at the same time the most difficult part of the fake accounts analysis. Firstly, lack of photos on avatar and in albums means that this profile is a fake. Secondly, if there are photos on a page, they should be analyzed anyway. Those photos can match with other pictures in the Internet or with other users' photos. A user can upload photos of celebrities, animals, other objects instead of his/her real photos. Quantity of photos is also an important attribute because if there is large or small number of photos, it means that the account is a fake, or that the user is not active appropriately.

Parameters of fake attributes model in a category "Photos" are written in a form of tuples:

PHOTO = {PHOTOES ON PROFILE; AVATAR; COVER}

Of course, separately these criteria cannot point on the fakeness of a profile clearly because system of criteria analysis only can question the certainty of account.

For a more trustworthy definition of profile status it's necessary to use the analysis with as large as possible number of criteria [12-13].

In this article other important parameters of accounts aren't considered such as page creation time, speed of friends adding and connections with each other. These and other parameters will be considered in a future research.

III. RATING DECISION SUPPORT SYSTEM

For decision system about fakeness of account the rating scores method was proposed that allows taking into account the weight coefficients of parameters' significance and evaluate information that is divided into categories [7].

Let the system evaluates by n parameters, x_i – values of i parameter. The representation of the rating system is a linear convolution, the mathematical model of which is written in the form below (1) [14]:

$$F = \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i, \quad (1)$$

where λ_i is a weight of x_i parameter, which is determined by an expert.

Based on the rating approach and multivariate analysis, a group of rating assessments of indicators is developed and a link between them is established. The application of the rating approach implies that rankings are assigned to all groups of factors.

Let the system of evaluated attributes be described on the basis of a given set of indicators, such as $X = (x_1, \dots, x_b, \dots, x_n)$. Indicators may be heterogeneous: numeric, logical, lexical, vector, etc. To operate heterogeneous indicators for each of them a normalized function is introduced, which any value of x_i values translates into a set of real values on the segment $[0; 1]$, then $0 \leq x_i \leq 1$. Rationing can lead to overestimation or underestimation of the actual indicator, but this negative effect is neutralized by inputting a weighting factor for each indicator, which is determined by the empirical method (expert estimation method). If some dependence of the indicators among themselves exists, it is necessary to take into account the mixed constructions, where coefficients are the coefficients of correlation of the corresponding pair.

If weighing ratios are selected under normalization, then the target function will act as a ranking on the appropriate level of the system hierarchy. In order that the process of rating approach has the maximum effect, the indicators of all factors must be involved. This condition is automatically executed when the rating score for each level of the hierarchy coincides with the target function. Integral ranking reflects the priorities of the indicators. The formation of these indicators, and hence the formation of a ranking, in this paper is carried out by experts.

IV. EXPERIMENTAL STUDIES

To work with the social networking data in Facebook, the Python programming language and the Facebook-SDK library were selected [15]. In order to gain access to user information on the Facebook social network, one must obtain an authentication token that specifies the rights of the developer to access the data in Facebook. Fig. 2 shows the process of getting data about user from social network «Facebook» using Facebook-SDK library.

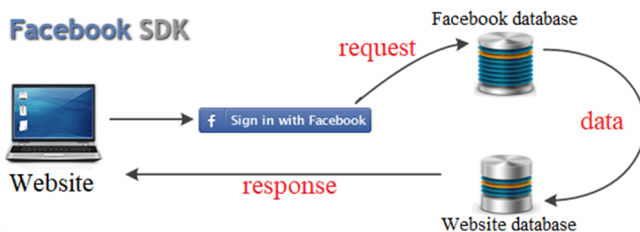


Fig. 2. Algorithm of getting data for research from social network «Facebook»

The designed software consists of modules that read the user information and analyze it. Modules were developed to

allow reading and processing information about user's friends, profile photos, photo tags, background photos, number of posts, user's birthday, personal information, page updates, user name, likes on posts and likes, that the user has placed (fig. 1).

As an indicator, a system of scores is selected, indicating that the user account is a fake one [6-7]. Each of the parameters in the analysis receives a certain number of points from 1 to 5. So, 100 points shows that the account is a fake, and 0 points shows that it is a real one. Different weight coefficients from 1 to 3 were chosen for different categories, based on expert knowledge. If the result of the research is from 10 to 45 points, then the system decides that the account is real, from 55 to 100 points - the account is a fake. However, if the result is in the range of 45 to 55 points - further studies should be conducted. As a result, the output and detailed information about the criteria that influenced the outcome are displayed on the screen. Fig.3 shows the application window indicating that the account is a fake. Fakeness is indicated by the lack of information about user, the lack of likes and photo tags, as well as the absence of likes on the very few user posts.

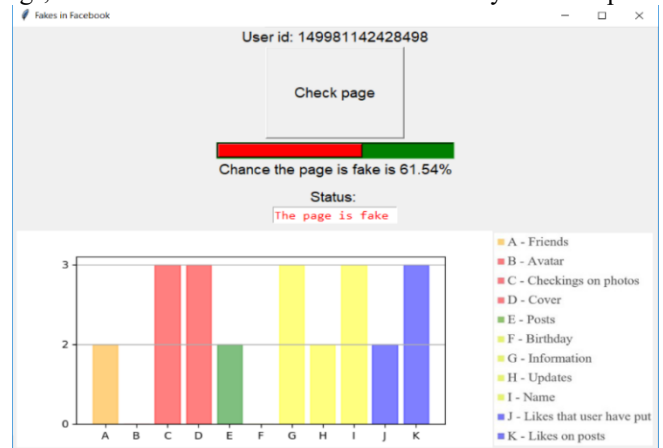


Fig. 3. Look of program window with detected fake account

Fig. 4 shows the application window indicating that the user turned out to be real. Indicators of fakeness in this case are incompletely filled account profile and a little number of likes, which is quite normal for real users, that is why the significant criteria of fakeness did not affect the result.

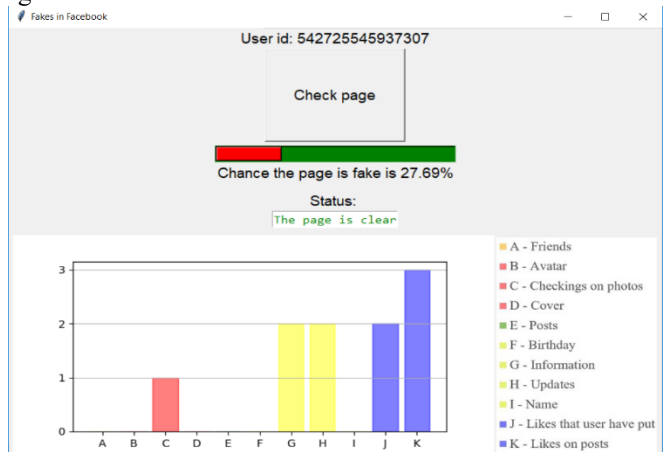


Fig. 4. Look of program window with detected real account

For objective testing of the software, various user accounts were checked on the Facebook social network, which included both fake and real accounts. The results of analysis of 21 accounts are shown in the table 1.

TABLE I. THE RESULTS OF ANALYSIS OF 21 ACCOUNTS

User	Account status	Program result, points	Program conclusion
Vitalii Holovenko	Real	37,8	Real
Татьяна Головенько	Real	45,9	Not defined
OleksandrTopchii	Fake	67,5	Fake
IvanVorobyov	Real	19,8	Real
Alex Rudyk	Fake	90,0	Fake
Ольга Гнатюк	Real	21,6	Real
Петро Петрович	Fake	96,3	Fake
Andrii Beatle	Fake	62,1	Fake
Жека Олейник	Real	34,2	Real
Владислав Круговой	Real	54,0	Not defined
Олеся Войтович	Real	48,6	Not defined
Talii Santie	Fake	77,4	Fake
Jenny Rahl	Fake	70,2	Fake
Sergey Hubchakevych	Real	28,8	Real
Георгий Выфв	Fake	87,3	Fake
Alice Black	Fake	66,6	Fake
Liliana Vess	Fake	69,3	Fake
Konrad Von H.	Fake	67,5	Fake
Сергей Таракта	Real	24,3	Real
Иван Петров	Fake	44,8	Real
Fin Age	Fake	65,7	Fake

Taking into account the results obtained, we can conclude the reliability of the results obtained by the software is 81%.

CONCLUSION

Main attributes of accounts in social network «Facebook» that allows to detect fake accounts were considered and analyzed. Each of attributes by their possible parameters and influence on account status were analyzed. Each of attributes is divided into categories and appropriate tuples were formed.

Attribute model for detection fake accounts that includes categories such as likes, personal information, statuses and posts, friends, photos was proposed.

Rating decision support system for fake accounts detection in social network «Facebook» is developed. Experimental research shows the decision support system certainty is 0,8.

To improve certainty of decision support system it's planned to analyze more social network's parameters and reduce the dimensionality of the feature space.

REFERENCES

- [1] Voitovych O., Holovenko V. Research of social networks as a source of information in warfare. Inżynier XXI wieku projectujemy przyszłość: monografia / pod red: Jacek Rysiński. Bielsko-Biala, 2016. С. 111-119.
- [2] Дудатьев А. В., Войтович О. П. Інформаційна безпека соціотехнічних систем: Модель інформаційного впливу. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2017. С.16-21.
- [3] Коршунов А., Белобородов И., Бузун Н. Анализ социальных сетей: методы и приложения. Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26. № 1. С. 439-456.
- [4] Дудатьев А. В. Комплексна інформаційна безпека СТС: моделі впливу та захисту : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2017. 128 с.
- [5] Нежданов И. Ю. Технологии информационных войн в Интернете URL: <http://bash.rosnu.ru/activity/attach/events/1283/01.pdf> (дата звернення: 10.01.2017)
- [6] Войтович О. П., Буда А. Г., Головенько В. О. Дослідження методів аналізу соціальних мереж як середовища інформаційних війн / Войтович О. П. //Тези доповідей Шостої Міжнародної науково-практичної конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації» м. Вінниця, 24-25 жовтня 2017 року. – Вінниця: ВНТУ, С. 67-70 - 2017.
- [7] Войтович О. П., Дудатьев А. В., Головенько В. О. Модель та засіб для виявлення фейкових облікових записів у соціальних мережах // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Частина 1 - 2018. - № 1 Том 29 (68). – с. 112 – 119.
- [8] Губанов Д. А., Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит, 2010. 228 с.
- [9] Michal Kosinski, Sandra C. Matz, Samuel D. Gosling, Vesselin Popov, David Stillwe. Facebook as a Research Tool for the Social Sciences. Opportunities, Challenges, Ethical Considerations, and Practical Guidelines. American Psychologist. 2015. Vol. 70. No. 6. 543-556 pp.
- [10] Aaron Aguis. 10 Metrics to Track for Social Media Success. URL: <https://www.socialmediaexaminer.com/10-metrics-to-track-for-social-media-success/> (дата звернення: 10.01.2017)
- [11] Батура Т. В., Копылова Н. С., Мурзин Ф. А., Проскураков А. В. Методы анализа данных из социальных сетей. Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11. Вып. 3. С. 5-21.
- [12] Берни Хоган. Анализ социальных сетей в интернете, 2013. URL: <https://postnauka.ru/longreads/20259> (дата звернення: 10.01.2017)
- [13] Горчинская О., Ривкин А. Анализ данных социальных сетей. Открытые системы. СУБД. 2015. №3. С. 22-23.
- [14] Худяков Ю. Г., Николайкин Н. И., Андрусов В. Э. Управление опасностями производственной среды: Монография. М.: ООО «Проспект», 2017. 122 с.
- [15] API Reference URL: <https://facebook-sdk.readthedocs.io/en/latest/api.html> (дата звернення: 10.01.2018)

Побудова Оцінок Стійкості SP-мереж Спеціального Виду до Диференціального Криптоаналізу

Олексій Якимчук, Сергій Яковлєв
кафедра математичних методів захисту інформації
Фізико-технічний інститут
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
salol1d2323@gmail.com, yasv@rl.kiev.ua

Security Evaluation of Special Type SP-networks Against Differential Cryptanalysis

Oleksii Yakymchuk, Serhii Yakovliev
Department of Mathematical Methods of Information Security
Institute of Physics and Technology
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
salol1d2323@gmail.com, yasv@rl.kiev.ua

Анотація—У роботі розглядаються SP-мережі, які використовують додавання за модулем у ключовому суматорі. Наводяться аналітичні верхні межі для імовірностей диференціальних характеристик таких SP-мереж за операціями побітового, поблокового та модульного додавання. Одержані оцінки обчислюються через певні специфічні параметри S-блоків шифру.

Abstract—We consider SP-networks with modular key addition in this work. We present analytic upper bounds for the probabilities of differential characteristics of such SP-networks with respect to bit-wise (XOR), block-wise and modular additions. Obtained bounds are expressed through specific parameters of cipher's S-boxes.

Ключові слова—диференціальний криптоаналіз, розподіли диференціалів, диференціальні характеристики, SP-мережа

Keywords—differential cryptanalysis, distributions of differentials, differential characteristics, SP-network

I. ВСТУП

Диференціальний криптоаналіз є одним з найпотужніших методів криптоаналізу блокових шифрів. Стійкість до диференціального криптоаналізу наразі є необхідною вимогою до усіх нових алгоритмів шифрування. В наш час існує добре розвинена формальна теорія диференціального криптоаналізу, яка дозволяє оцінювати складність проведення диференціальної атаки для широких класів різних схем блокового шифрування.

Найбільш детально досліджені так звані марковські шифри (відносно операції побітового додавання). Для різних схем шифрування побудовано оцінки практичної та доказової стійкості до диференціального аналізу. [2-4]

Додавання за модулем 2^n є дуже привабливою операцією з точки зору криптографії. З одного боку, вона доступна майже в усіх сучасних обчислювальних архітектурах на рівні інструкцій процесору, тобто її реалізація є швидкою та ефективною. З іншого боку, модульне додавання має аналітичний опис як булева функція високого степеня нелінійності – і, таким чином, використання модульного додавання робить залежності між бітами шифротексту, відкритого тексту та ключа дуже складними для криптографічного аналізу.

Однак використання додавання за модулем разом із іншими алгебраїчними операціями перетворює більшу частину шифрів у немарковські. Відповідно, наявна формальна теорія диференціального криптоаналізу не застосовна для проведення оцінювання стійкості. Таким чином, разом із очевидним підвищенням складності аналізу використання модульного додавання парадоксально унеможливує гарантованість такої складності – в першу чергу через відсутність методів побудови оцінок стійкості.

Вперше деякі оцінки практичної стійкості до диференціального криптоаналізу для схем Фейстеля із модульним додаванням у ключовому суматорі були

одержані в [1]; в цій роботі розглядались для диференціальні характеристики відносно побітового додавання, що зумовлено структурою схеми Фейстеля. У даній роботі розглядається інший широко вживаний клас блокових шифрів, SP-мережі, із модульним додаванням у ключовому суматорі. Для шифрів даного виду побудовано аналітичні верхні межі для диференціальних характеристик відносно трьох різних алгебраїчних операцій та показано, через які параметри S-блоків шифру обчислюються такі оцінки.

II. НЕОБХІДНІ ТЕРМІНИ ТА ПОЗНАЧЕННЯ

Нехай V_n – простір n -бітових векторів, і бінарні операції \otimes, \bullet визначають на V_n структури абелевих груп.

(\circ, \bullet) -диференціалом булевої функції $f: V_n \rightarrow V_n$ називається пара векторів $(\alpha, \beta) \in V_n^2$. Імовірністю диференціалу (α, β) називається величина:

$$DP_{\circ, \bullet}^f(\alpha, \beta) = \sum_x [f(x \circ \alpha) = f(x) \bullet \beta],$$

де $\sum_x = \frac{1}{2^n} \sum_x$ – середня сума, $[P]$ – дужки Айверсона,

які визначаються так: $[P] = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P \text{ – істинне;} \\ 0, & \text{якщо } P \text{ – хибне.} \end{cases}$

Якщо функція $f_k: V_n \times K \rightarrow V_n$ – булева функція, параметризована певними ключами, то імовірність диференціалу такої функції в точці x визначається як

$$DP_{\circ, \bullet}^{f_k}(x, \alpha, \beta) = \sum_k [f_k(x \circ \alpha) = f_k(x) \bullet \beta].$$

r -раундовою SP-мережею називається перетворення $E: V_n \times K^r \rightarrow V_n$, що є композицією r раундових шифруючих перетворень виду $F_k(x) = L(S_k(x))$ (див. рис. 1), де L – лінійне відносно визначеної операції перетворення. Далі усюди вважається, що ключі раундів обираються незалежно та рівномірно з множини ключів K . У даній роботі розглядається спеціальний клас SP-мереж виду $F_k(x) = L(S(x+k))$, де $+$ – додавання за модулем 2^n , S – нелінійне перетворення (S-блоки), L – лінійне перетворення.

Диференціальною характеристикою називається послідовність ненульових векторів $\Omega = (\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_r)$, $\omega_i \in V_n, \omega_i \neq 0, i = 1, \dots, r$. Ця послідовність розглядається як набір різниць між проміжними шифротекстами раундових перетворень.

Імовірністю диференціальної характеристики називається величина:

$$DCP_{\circ}^E(\Omega, x_0) = \sum_{k_1} \sum_{k_2} \dots \sum_{k_r} \prod_{i=1}^r [F_{k_i}(x_{i-1} \circ \omega_{i-1}) = F_{k_i}(x_{i-1}) \circ \omega_i].$$

Нехай $n = m \cdot u$ та $V_n = (V_u)^m$. Далі будемо розглядати різниці відносно трьох операцій над даною множиною векторів:

- $+$: операція додавання за модулем 2^n , враховується біт переносу: $x, k \in V_n$:
 $x + k = (x_1 + k_1, x_2 + k_2 + \mu_2, \dots, x_m + k_m + \mu_m)$,
де $\mu_{i+1} = \left\lfloor \frac{x_i + k_i + \mu_i}{2^u} \right\rfloor$, $\mu_1 = 0$, $i = \overline{1, r-1}$,
 $\mu_i, x_i, k_i \in V_u, i = \overline{1, r}$.
- \oplus : операція побітового додавання, без біту переносу.
- $[+]$: додавання за модулем 2^u , $x, k \in V_n$:
 $x + k = (x_1 + k_1, x_2 + k_2, \dots, x_m + k_m)$, $x_i, k_i \in V_u$,
 $i = \overline{1, r}$ (покоординатне додавання).

III. ОЦІНКИ ІМОВІРНОСТЕЙ ДИФЕРЕНЦІАЛІВ ШИФРУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ СПЕЦІАЛЬНОГО ВИГЛЯДУ

Розглянемо шифруюче перетворення $F_k = S(x+k)$, де ключ додається за модулем 2^n , а функція S – композиція m незалежних s -блоків $s_1(x_1), s_2(x_2), \dots, s_m(x_m)$, (див. рис. 1). Знайдемо аналітичні оцінки імовірностей диференціалів даного перетворення відносно наведених трьох операцій.

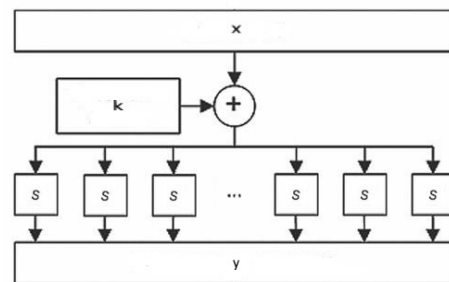


Рис. 1. Шифруюче перетворення F .

A. Дослідження $DP_{+,+}^{F_k}(x, \alpha, \beta)$

З означення імовірності диференціалу випливає

$$DP_{+,+}^{F_k}(x, \alpha, \beta) = \sum_k [F_k(x + \alpha) = F_k(x) + \beta] = \sum_k [S((x + \alpha) + k) = S(x + k) + \beta].$$

Для переходу до покоординатних додавань u -бітових слів введемо змінні для бітів переносу, які виникають під час виконання обчислень:

$$\hat{\mu}_{i+1} = \left\lfloor \frac{x_i + \alpha_i + k_i + \mu_i}{2^u} \right\rfloor, \quad \mu_{i+1} = \left\lfloor \frac{x_i + k_i + \mu_i}{2^u} \right\rfloor,$$

$$\varepsilon_{i+1} = \left\lfloor \frac{s_i(x_i + k_i + \mu_i) + \beta_i + \varepsilon_i}{2^u} \right\rfloor,$$

де $\hat{\mu}_0 = 0$, $\mu_0 = 0$, $\varepsilon_0 = 0$, $x_i, k_i, \alpha_i, \beta_i \in V_u$, $i = \overline{0, m-1}$.
Відповідно, можемо записати:

$$\begin{aligned} & \sum_k [S((x + \alpha) + k) = S(x + k) + \beta] = \\ & = \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(x_i + \alpha_i + k_i + \hat{\mu}_i) = s_i(x_i + k_i + \mu_i) + \beta_i + \varepsilon_i], \end{aligned}$$

оскільки всі s -блоки незалежні між собою. Виконавши заміну $u_i = x_i + k_i + \mu_i$, $i = 1, \dots, m$, одержимо таку рівність:

$$\prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(x_i + \alpha_i + k_i + \hat{\mu}_i) = s_i(x_i + k_i + \mu_i) + \beta_i + \varepsilon_i] = \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(u_i + \alpha_i + \hat{\mu}_i - \mu_i) = s_i(u_i) + \beta_i + \varepsilon_i]. \quad (1)$$

Із визначення бітів переносу випливає, що $\hat{\mu}_i \geq \mu_i$.
Неважко також показати, що $\hat{\mu}_i = 2$ лише у випадку, коли $\mu_i = 1$. Відповідно, значення різниці $\hat{\mu}_i - \mu_i \in \{0, 1\}$.

Для наочності розглянемо останній множник з отриманого добутку (1):

$$\begin{aligned} & \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(u_i + \alpha_i + \hat{\mu}_i - \mu_i) = s_i(u_i) + \beta_i + \varepsilon_i] = \\ & = \prod_{i=1}^{m-1} \sum_{k_i} [s_i(u_i + \alpha_i + \hat{\mu}_i - \mu_i) = s_i(u_i) + \beta_i + \varepsilon_i] \times \\ & \times \sum_{k_m} [s_m(u_m + \alpha_m + \hat{\mu}_m - \mu_m) = s_m(u_m) + \beta_m + \varepsilon_m]. \end{aligned}$$

Зауважимо, що u_m є функцією від k_m та, коли k_m пробігає усі можливі значення, u_m також пробігає усі можливі значення. Отже, останній множник за визначенням дорівнює $DP_{+,+}^{s_m}(\alpha_m + \hat{\mu}_m - \mu_m, \beta_m + \varepsilon_m)$. Однак $\hat{\mu}_m, \mu_m, \varepsilon_m$ є функціями від усіх попередніх частин ключа, тому уся сума не розпадається на добуток незалежних сум по кожній частині ключа. Втім, можна замінити точне значення диференціальної імовірності на оцінку:

$$\begin{aligned} & \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(u_i + \alpha_i + \hat{\mu}_i - \mu_i) = s_i(u_i) + \beta_i + \varepsilon_i] \leq \\ & \leq \prod_{i=1}^{m-1} \sum_{k_i} [s_i(u_i + \alpha_i + \hat{\mu}_i - \mu_i) = s_i(u_i) + \beta_i + \varepsilon_i] \times \\ & \times \max_{\alpha, \varepsilon \in \{0, 1\}} DP_{+,+}^{s_m}(\alpha_m + \mu, \beta_m + \varepsilon). \end{aligned}$$

Аналогічним чином можна оцінювати множник за множником від m -того до першого та за індукцією побудувати загальну оцінку добутку (1) зверху:

$$\begin{aligned} & \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(u_i + \alpha_i + \hat{\mu}_i - \mu_i) = s_i(u_i) + \beta_i + \varepsilon_i] \leq \\ & \leq \prod_{i=1}^m \max_{\alpha, \varepsilon \in \{0, 1\}} DP_{+,+}^{s_i}(\alpha_i + \mu, \beta_i + \varepsilon). \end{aligned}$$

Отже, маємо

$$DP_{+,+}^{F_k}(x, \alpha, \beta) \leq \prod_{i=1}^m \max_{\mu, \varepsilon \in \{0, 1\}} DP_{+,+}^{s_i}(\alpha_i + \mu, \beta_i + \varepsilon).$$

B. Дослідження $DP_{\oplus, \oplus}^{F_k}(x, \alpha, \beta)$

З означення імовірності диференціалу випливає

$$\begin{aligned} DP_{\oplus, \oplus}^{F_k}(x, \alpha, \beta) &= \sum_k [F_k(x \oplus \alpha) = F_k(x) \oplus \beta] = \\ &= \sum_k [S((x \oplus \alpha) + k) = S(x + k) \oplus \beta]. \end{aligned}$$

У даному випадку для переходу до по координатних додавань необхідно ввести такі змінні для бітів переносу:

$$\mu_{i+1} = \left\lfloor \frac{(x_i \oplus \alpha_i) + k_i + \mu_i}{2^u} \right\rfloor, \quad \eta_{i+1} = \left\lfloor \frac{x_i + k_i + \eta_i}{2^u} \right\rfloor,$$

де так само $\mu_0 = 0$, $\eta_0 = 0$, $x_i, k_i, \alpha_i, \beta_i \in V_u$, $i = \overline{0, m-1}$.
Відповідно, одержимо

$$\begin{aligned} & \sum_k [S((x \oplus \alpha) + k) = S(x + k) \oplus \beta] = \\ &= \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(x_i \oplus \alpha_i + k_i + \mu_i) = s_i(x_i + k_i + \eta_i) \oplus \beta_i]. \end{aligned}$$

Введемо нові змінні $\hat{\alpha}_i$ такі, що $x_i + \hat{\alpha}_i = x_i \oplus \alpha_i$ для кожного $i = \overline{1, m}$. Також виконаємо заміну: $u_i = x_i + k_i + \eta_i$. Одержимо:

$$\begin{aligned} & \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(x_i \oplus \alpha_i + k_i + \mu_i) = s_i(x_i + k_i + \eta_i) \oplus \beta_i] = \\ &= \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(u_i + \hat{\alpha}_i + \mu_i - \eta_i) = s_i(u_i) \oplus \beta_i]. \end{aligned}$$

В цьому випадку $\mu_i, \eta_i \in \{0, 1\}$ і певної залежності між їх значеннями нема, тому $\mu_i - \eta_i \in \{-1, 0, 1\}$. Звідси перетвореннями, які є аналогічними наведеним у попередньому випадку, одержуємо нерівність

$$DP_{\oplus, \oplus}^{F_k}(x, \alpha, \beta) \leq \prod_{i=1}^m \max_{\mu \in \{-1, 0, 1\}} DP_{+, \oplus}^{s_i}(\hat{\alpha}_i + \mu, \beta_i).$$

Треба зауважити, що в цьому випадку $\hat{\alpha} = \hat{\alpha}(x, \alpha)$.

C. Дослідження $DP_{[+], [+]}^{F_k}(x, \alpha, \beta)$

З означення імовірності диференціалу випливає

$$\begin{aligned} DP_{[+], [+]}^{F_k}(x, \alpha, \beta) &= \sum_k [F_k(x [+] \alpha) = F_k(x) [+] \beta] = \\ &= \sum_k [S((x [+] \alpha) + k) = S(x + k) [+] \beta]. \end{aligned}$$

Для переходу до по координатних додавань вводимо нові змінні для бітів переносу:

$$\mu_{i+1} = \left\lfloor \frac{x_i + \alpha_i + k_i + \mu_i}{2^u} \right\rfloor, \quad \eta_{i+1} = \left\lfloor \frac{x_i + k_i + \eta_i}{2^u} \right\rfloor,$$

де знову $\mu_0 = 0$, $\eta_0 = 0$, $x_i, k_i, \alpha_i, \beta_i \in V_u$, $i = \overline{0, m-1}$.
Відповідно, врахувавши, що на рівні u -бітових слів

операція $[+]$ перетворюється у звичайне додавання за модулем 2^u , одержуємо

$$\begin{aligned} & \sum_k [S((x[+] \alpha) + k) = S(x + k)[+] \beta] = \\ & = \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(x_i + \alpha_i + k_i + \mu_i) = s_i(x_i + k_i + \eta_i) + \beta_i] . \end{aligned}$$

Виконавши стандартну заміну $u_i = x_i + k_i + \eta_i$, отримаємо

$$\begin{aligned} & \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(x_i + \alpha_i + k_i + \mu_i) = s_i(x_i + k_i + \eta_i) + \beta_i] = \\ & = \prod_{i=1}^m \sum_{k_i} [s_i(u_i + \alpha_i + \mu_i - \eta_i) = s_i(u_i) + \beta_i] . \end{aligned}$$

Так як і в пункті А: $\mu_i \geq \eta_i$, тому $\mu_i - \eta_i \in \{0, 1\}$. Звідси перетвореннями, аналогічними до попередніх, одержуємо оцінку

$$DP_{[+], [L]}^{F_k}(x, \alpha, \beta) \leq \prod_{i=1}^m \max_{\mu \in \{0, 1\}} DP_{+, +}^{s_i}(\alpha_i + \mu, \beta_i) .$$

IV. ОЦІНКИ ІМОВІРНОСТЕЙ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК SP-МЕРЕЖ СПЕЦІАЛЬНОГО ВИГЛЯДУ

Розглянемо блоковий шифр із структурою SP-мережі та раундовим перетворенням виду $F_k(x) = L(S(x + k))$ (див. рис. 2).

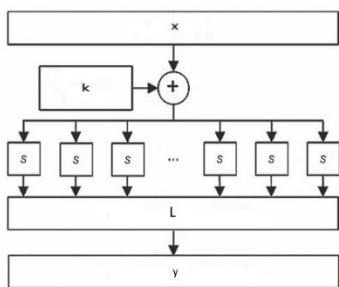


Рис. 2. Один раунд SP-мережі.

При розгляданні різниць відносно операцій \oplus та $[+]$ даний шифр буде немарковським, а при розгляданні різниць відносно операції $+$ імовірності диференціалів не обчислюються явним чином через параметри S-блоків. Однак у [1] доведено оцінку для імовірностей диференціальних характеристик, яка застосовна до будь-якого ітеративного шифру: $\forall x_0 \in V_n, \forall \Omega$:

$$DCP_{\circ, \oplus}^E(\Omega, x_0) \leq \prod_{i=1}^r \max_z DP_{\circ, \oplus}^F(z, \omega_{i-1}, \omega_i) . \quad (2)$$

Застосувавши нерівність (2) до SP-мереж описаного типу, можна одержати аналітичні оцінки імовірностей диференціальних характеристик через параметри S-блоків, які розглядались у попередньому розділі.

Так, за означенням маємо

$$\begin{aligned} & DCP_{+, +}^E(\Omega, x_0) = \\ & = \sum_{k_1} \sum_{k_2} \dots \sum_{k_r} \prod_{i=1}^r [F_{k_i}(x_{i-1} + \omega_{i-1}) = F_{k_i}(x_{i-1}) + \omega_i] , \end{aligned}$$

де r – кількість раундових перетворень в SP-мережі.

За нерівністю (2) маємо

$$\begin{aligned} & DCP_{+, +}^E(\Omega, x_0) \leq \prod_{i=1}^r \max_x DP_{+, +}^F(x, \omega_{i-1}, \omega_i) = \\ & = \prod_{i=1}^r \max_x DP_{+, +}^{s_k}(x_i, \omega_{i-1}, L^{-1}(\omega_i)), \hat{\omega}_i = L^{-1}(\omega_i) \end{aligned}$$

Для вектору $\forall \omega_i \in \Omega: \forall i = 1, \dots, r$, позначимо його координати $\omega_i = (\omega_i^{(1)}, \omega_i^{(2)}, \dots, \omega_i^{(m)})$. Враховуючи оцінки, одержані у попередньому розділі, остаточно маємо для усіх характеристик Ω та початкових точок x_0 :

$$DCP_{+, +}^E(\Omega, x_0) \leq \prod_{i=1}^r \prod_{j=1}^m \max_{\mu, \varepsilon \in \{0, 1\}} DP_{+, +}^{s_j^{(i)}}(\omega_j^{(i-1)} + \mu, \omega_i^{(j)} + \varepsilon) .$$

Аналогічно одержимо нерівності й для диференціальних характеристик відносно інших операцій:

$$DCP_{\oplus, \oplus}^E(\Omega, x_0) \leq \prod_{i=1}^r \prod_{j=1}^m \max_{\mu, \varepsilon \in \{-1, 0, 1\}} DP_{+, \oplus}^{s_j^{(i)}}(\omega_j^{(i-1)} + \mu, \omega_i^{(j)} + \varepsilon) ,$$

$$DCP_{[+], [L]}^E(\Omega, x_0) \leq \prod_{i=1}^r \prod_{j=1}^m \max_{\mu, \varepsilon \in \{0, 1\}} DP_{+, +}^{s_j^{(i)}}(\omega_j^{(i-1)} + \mu, \omega_i^{(j)} + \varepsilon) .$$

ВИСНОВКИ

У даній роботі розглянуто SP-мережі із додаванням за модулем у ключовому суматорі. Для таких блокових шифрів побудовано аналітичні верхні межі для імовірностей диференціальних характеристик відносно побітового, поблокового та модульного додавання. Одержані оцінки використовують специфічні параметри S-блоків та можуть застосовуватись для чисельного визначення імовірностей характеристик, які визначають практичну стійкість блокових шифрів до диференціального криптоаналізу.

Результати даної роботи є першими кроками до побудови загальної формальної теорії диференціального криптоаналізу блокових шифрів із ключовими суматорами неблокової структури.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] A. N. Alekseychuk, L. V. Kovalchuk. "Towards a Theory of Security Evaluation for GOST-like Ciphers against Differential and Linear Cryptanalysis" [Online]. – Available at: <https://eprint.iacr.org/2011/489>
- [2] Kanda M. "Practical security evaluation against differential and linear cryptanalyses for Feistel ciphers with SPN round function" // Proceedings of Selected Areas in Cryptography (SAC 2000). – Springer Verlag, 2001. – P. 324 – 338.
- [3] K. Nyberg, L.R. Knudsen. "Provable Security Against a Differential Attack". – Journal of Cryptology. – Vol.8. – No.1. – 1995.
- [4] S. Park et al. "On the security of Rijndael-like structures against differential and linear cryptanalysis" // Advances in Cryptology (ASIACRYPT 2002). – LNCS, vol. 2501. – 2002. – pp. 176-191.

Індекси Розгалуження Матриць над Кільцями Лишків

Олег Курінний, Сергій Яковлєв
кафедра математичних методів захисту інформації
Фізико-технічний інститут
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
ol.kurinnoy@gmail.com, yasv@rl.kiev.ua

The Branch Number of Matrices over Residue Rings

Oleh Kurinnyi, Serhii Yakovliev
Department of Mathematical Methods of Information Security
Institute of Physics and Technology
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
ol.kurinnoy@gmail.com, yasv@rl.kiev.ua

Анотація—Доведено, що індекс розгалуження матриці над кільцем лишків за модулем 2^n зберігається при гомоморфному відображенні у $(0, 1)$ -матрицю над двійковим лінійним простором. Грунтуючись на цьому, були запропоновані шляхи підсилення криптографічної стійкості таких блокових шифрів, як ARIA та Midori, за рахунок переходу до операцій у кільці лишків під час шифрування.

Abstract—We prove that branch number of a matrix over residue ring modulo 2^n is an invariant under homomorphic mapping to $(0, 1)$ -matrix over binary linear space. With this result we propose some ways to increase cryptographic security of ciphers like ARIA or Midori at the expense of modular operations usage within encryption.

Ключові слова—індекс розгалуження, матриці над кільцями лишків, $(0,1)$ -матриці, шифр ARIA, шифр Midori.

Keywords—branch number, matrices over residue rings, $(0,1)$ -matrices, ARIA cipher, Midori cipher.

I. ВСТУП

Стратегія широкого шляху, запропонована Йоном Деменом у 1998 році [7], постулює, що стійкість симетричних шифрів до відомих методів криптоаналізу визначається не лише і не тільки якістю нелінійних перетворень (S-блоків), але й властивостями лінійних перемішуючих перетворень шифрів – зокрема, максимально можливих лавинних ефектів. У рамках даної стратегії для побудови шифрів SQUARE та Rijndael (пізніше стандартизованого як AES) використовувались спеціальні конструкції, так звані *MDS-матриці* над

скінченними полями, які мають максимальний індекс розгалуження. Саме завдяки цій властивості вдалось довести як практичну [8], так і теоретичну [9] стійкість AES до диференціального та лінійного криптоаналізу.

У сучасних блокових шифрах лінійні перетворення можуть визначатись матрицями над довільними алгебраїчними структурами, які надають ті чи інші переваги з точки зору криптостійкості або ефективності реалізації. У даній роботі розглядаються матричні перетворення над кільцями лишків за модулем 2^n . Подібні структури зазвичай забезпечують високу швидкість при реалізації та певний рівень стійкості від різних криптоаналітичних атак.

На відміну від матриць над скінченними полями, для матриць над кільцями лишків не було опубліковано аналітичних оцінок на значення індексу розгалуження. У даній роботі буде показано, що матричні перетворення над кільцями лишків мають властивості, подібні до $(0,1)$ -матриць над полем F_2 і, таким чином, для оцінки їх індексу розгалуження можна застосувати відомі результати, одержані для двійкових матриць [1]. Як наслідок, запропоновано простий спосіб підвищення стійкості SP-мереж типу ARIA або Midori до диференціального та лінійного криптоаналізу за рахунок переходу на інші алгебраїчні операції у лінійному шарі.

II. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Більшість існуючих блокових шифрів зі структурою SP-мережі використовуює в якості лінійного шару матричне

перетворення. Як правило, матриці розглядаються над однією з трьох таких алгебраїчних структур:

1) скінченне поле $GF(2^n)$ із відповідними операціями додавання та множення у полі;

2) кільце лишків Z_2^n із операціями додавання та множення за модулем 2^n ;

3) лінійний векторний простір $V_n = \{0, 1\}^n$ із операцією побітового додавання та множенням на скалярі 0 та 1.

Останній випадок описує використання $(0, 1)$ -матриць. Відмова від (можливої) операції множення координат вхідних векторів направлена на підвищення швидкості виконання обчислень, що є важливим для алгоритмів легкої криптографії, призначених для реалізації у малопотужних пристроях.

Для деякого вектору x вага вектору $wt(x)$ дорівнює кількості ненульових координат у векторі. Для двійкових векторів введена таким чином вага співпадає із більш звичною вагою Хеммінга.

Індексом розгалуження квадратної матриці розміру $m \times m$ називається величина

$$BN(A) = \min_{x \neq 0} \{wt(x) + wt(Ax)\}.$$

Аналітичні оцінки стійкості SP-мереж до диференціального та лінійного криптоаналізу обчислюються через значення індексу розгалуження лінійних перетворень, які використовуються: чим більший індекс, тим стійкіший шифр.

Для невироджених матриць індекс розгалуження змінюється в діапазоні $2 \leq BN(A) \leq m + 1$. Матриця зветься *MDS-матрицею*, якщо її індекс розгалуження сягає максимального значення $m + 1$. Для MDS-матриць існує простий критерій [9].

Твердження. Матриця є MDS-матрицею тоді і тільки тоді, коли всі її квадратні підматриці є невиродженими.

Для отримання MDS-матриць над скінченними полями існує ряд таких конструкцій, як матриця Вандермонда або матриця Коші, але на кільця лишків ці структури з тих чи інших причин не переносяться [4]. Також для скінченних полів одержано ряд результатів щодо побудови MDS-матриць з додатковими властивостями (інволютивність, циркулянтність тощо), що дозволяє оптимізувати ресурси, необхідні для побудови криптосистеми, а також ряд результатів, які дозволяють з MDS-матриць отримувати MDS-матриці більшого розміру [6]. Для кілець лишків такі конструкції також не переносяться, тому проблема побудови матриць з високим індексом розгалуження та іншими криптографічними властивостями є актуальною.

$(0, 1)$ -матриці є популярною конструкцією для побудови блокових шифрів через дуже просту реалізацію з використанням елементів комп'ютерної низькорівневої архітектури (обчислення зводиться до деякої кількості побітових додавань координат вхідного вектору). Так, у шифрі E2 використовується $(0, 1)$ -матриця розміру 8 на 8 з індексом розгалуження 5 [10], у шифрі ARIA – матриця

розміру 16 на 16 з індексом розгалуження 8 [2], у шифрі Midori – матриця розміру 4 на 4 з індексом розгалуження 3 [3]. Втім, доведено, що $(0, 1)$ -матриці не можуть бути MDS; більш того, має місце така оцінка.

Теорема 1 ([1]). Для квадратної $(0, 1)$ -матриці A розміру $m \times m$ виконується нерівність

$$BN(A) \leq \frac{2m + 4}{3}.$$

З теореми 1 випливає, що при $m=2, 3$ або 4 можуть існувати $(0, 1)$ -матриці із майже максимальним значенням індексу розгалуження $BN(A) = m$; при більших розмірах максимально можливе значення індексу розгалуження відносно зменшується.

Матриці над кільцями лишків використовуються через просту реалізацію, доступну на рівні інструкцій процесору, та різке ускладнення деяких криптоаналітичних атак (зокрема, лінійного криптоаналізу та його модифікацій). Наприклад, у сімействі шифрів SAFER використовуються матриці розміру 16 на 16 над кільцем лишків Z_{256} (тобто, над байтами) [5]. Для матриць над кільцями лишків не опубліковано оцінок для індексу розгалуження, але показано, що такі матриці не можуть бути MDS-матрицями [11].

III. ОЦІНКИ ІНДЕКСУ РОЗГАЛУЖЕННЯ МАТРИЦЬ НАД КІЛЬЦЯМИ ЛИШКІВ

Між кільцями лишків Z_2^n та $\{0, 1\}$ існує «природний» гомоморфізм $\varphi_0(x) = x \bmod 2$. В коректності цього гомоморфізму нескладно переконавшись стандартною перевіркою. Аналогічним чином можна визначити гомоморфізм над множинами матриць. Нехай $M_m(Z_2^n)$ – множина квадратних матриць розміру m над кільцем лишків Z_2^n , тоді відображення $\varphi: M_m(Z_2^n) \rightarrow M_m(\{0, 1\})$ таке, що $\varphi(A) = A \bmod 2$, де $A \bmod 2$ – це матриця, отримана застосуванням гомоморфізму φ_0 до кожного елементу матриці A (для вектору розміру m гомоморфізм φ визначається аналогічним чином, тому не будемо вводити додаткове позначення). Переконаємось у правильності цього факту. Нехай A, B – це матриці над Z_2^n , тоді елемент добутку цих двох матриць з індексом i та j буде знаходитись за формулою:

$$(AB)_{ij} = \sum_{k=1}^m A_{ik} B_{kj}$$

Тепер знайдемо образ цього елементу після застосування відображення φ_0 :

$$\varphi_0((AB)_{ij}) = \varphi_0\left(\sum_{k=1}^m A_{ik} B_{kj}\right) = \sum_{k=1}^m \varphi_0(A_{ik}) \varphi_0(B_{kj})$$

Оскільки це співвідношення виконується для кожної пари індексів i та j , то для відображення φ воно теж виконується:

$$\varphi(AB) = \varphi(A)\varphi(B)$$

Аналогічним чином перевіряється, що, застосувавши відображення до суми матриць, отримаємо суму відображень відповідних матриць:

$$\varphi(A_{ij} + B_{ij}) = \varphi(A_{ij}) + \varphi(B_{ij})$$

Отже, запропоноване відображення матриць φ є гомоморфізмом.

Сформулюємо і доведемо теорему, яке пов'язує індекс розгалуження $(0, I)$ -матриць з індексом розгалуження матриць над кільцем лишків.

Теорема 2. Для довільної матриці A над кільцем лишків \mathbb{Z}_2^n виконується рівність:

$$BN(A) = BN(\varphi(A))$$

де φ – описаний вище «природний» гомоморфізм.

Доведення. Покажемо спочатку, що $BN(A) \geq BN(\varphi(A))$.

Розглянемо деякий вектор x довжини m над \mathbb{Z}_2^n і будемо для нього досліджувати вираз виду $wt(x) + wt(Ax)$.

Очевидно, що $wt(x) \geq wt(\varphi(x))$. Дійсно, при застосуванні гомоморфізму до вектору x його вага не може збільшитись: всі непарні елементи вектору x стануть одиницями, а всі парні стануть нулями, тобто кількість нулів може збільшитись, але ніяк не може зменшитись.

Покажемо тепер, що $wt(Ax) \geq wt(\varphi(Ax))$. Нехай $Ax=y$, де $y=(y_1, \dots, y_m)$ та $y_i = \sum_{j=1}^m a_{ij}x_j$, де $i = \overline{1, m}$. Після застосування гомоморфізму до вектору y отримуємо вектор $\varphi(y) = \varphi(Ax)$. Для того, щоб довести нерівність $wt(y) \geq wt(\varphi(y))$, необхідно показати, що $y_i \geq \varphi_0(y_i)$, $i = \overline{1, m}$, тобто не може виникнути ситуації, коли $y_i=0$, а $\varphi_0(y_i)=1$ для деякого i . Іншими словами, треба показати, що з $y_i=0$ випливає $\varphi_0(y_i)=0$. Нехай $y_i=0$, тоді $\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j = 0 \pmod{2^n}$, що, за властивостями конгруенцій, еквівалентно рівності $\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j = k2^n$. Застосуємо до цього виразу гомоморфізм і отримуємо $\varphi_0(\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j) = \varphi_0(k2^n) = 0$. Тому виконується $wt(Ax) \geq wt(\varphi(Ax))$.

Отже, було доведено, що для деякого вектора x виконується: $wt(x) + wt(Ax) \geq wt(\varphi(x)) + wt(\varphi(Ax))$. Тоді

$$\begin{aligned} wt(x) + wt(Ax) &\geq wt(\varphi(x)) + wt(\varphi(Ax)) \geq \\ &\geq \min_{y \neq 0} \{ wt(\varphi(y)) + wt(\varphi(Ay)) \} \geq BN(\varphi(A)) \end{aligned}$$

Оскільки в цій нерівності x – довільний вектор над \mathbb{Z}_2^n , то й для вектору, на якому досягається мінімальне значення ліворуч, дана нерівність буде справедливою. Таким чином, $BN(A) \geq BN(\varphi(A))$.

Покажемо тепер, що $BN(A) \leq BN(\varphi(A))$. Нехай матриця B є елементом $M_m(\{0, 1\})$, а z – деякий вектор над $\{0, 1\}$

довжини m . Розглянемо повний прообраз цієї матриці відносно гомоморфізму φ , тобто множину

$$\varphi^{-1}(B) = \{ C \in M_m(\mathbb{Z}_2^n) : \varphi(C) = B \}$$

Очевидно, що ця множина є не пустою, оскільки φ – сюр'ективне відображення. Виберемо з цієї множини довільну матрицю A . Довільному двійковому вектору $z=(z_1, \dots, z_m)$ поставимо у відповідність вектор $x=(x_1, \dots, x_m)$ над \mathbb{Z}_2^n за таким правилом:

$$x_i = \begin{cases} 2^{n-l}, & \text{якщо } z_i = 1 \\ 0, & \text{якщо } z_i = 0 \end{cases}$$

Очевидно, що $\varphi(x)=z$ та $wt(x)=wt(z)=wt(\varphi(x))$. Нескладно також показати, що в силу гомоморфізму виконується рівність $\varphi(A) \cdot z = \varphi(A)\varphi(x) = \varphi(Ax)$.

Покажемо, що $wt(Ax) \leq wt(\varphi(Ax))$. Ця нерівність буде виконуватись лише тоді, коли кількість ненульових елементів у векторі $Ax=y$ менша, ніж у векторі $\varphi(Ax)=\varphi(y)$, тобто коли неможлива така ситуація: $y_i \neq 0$, але $\varphi_0(y_i)=0$. Таким чином, потрібно довести, що з твердження $\varphi_0(y_i)=0$ випливає $y_i=0$. Зрозуміло, що $\varphi_0(y_i)=0$ еквівалентно

рівності $\sum_{j=1}^m \varphi_0(a_{ij})\varphi_0(x_j) = 0 \pmod{2}$. Ця сума складається з

доданків або $\varphi_0(a_{ij})\varphi_0(x_j)=1$, або $\varphi_0(a_{ij})\varphi_0(x_j)=0$. Очевидно, що кількість доданків, які дорівнюють одиниці, парна, інакше би значення суми за модулем 2 не дорівнювало б нулю. Але ситуація, коли $\varphi_0(a_{ij})\varphi_0(x_j)=0$, розпадається ще на три випадки в залежності від значень координат вектору x .

Розглянемо всі випадки детальніше.

1. Якщо $\varphi_0(a_{ij})$ – довільне та $\varphi_0(x_j)=0$, то в силу побудованого гомоморфізму φ і конструкції вектору x маємо, що $x_j=0$. Тоді $a_{ij}x_j = a_{ij} \cdot 0 = 0 \pmod{2^n}$, і нульовий доданок в суму $\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j$ нічого не вносить.

2. Якщо $\varphi_0(a_{ij})=0$ та $\varphi_0(x_j)=1$, то $a_{ij}=2k \pmod{2^n}$ і $x_j=2^{n-l}$. Тоді $a_{ij}x_j = (2k) \cdot 2^{n-l} = 2^n \cdot k = 0 \pmod{2^n}$, і нульовий доданок в суму $\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j$ нічого не вносить.

3. Якщо $\varphi_0(a_{ij})=1$ та $\varphi_0(x_j)=1$, то $a_{ij}=(2k+1) \pmod{2^n}$ і $x_j=2^{n-l}$. Тоді $\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j = 2^{n-l} \sum_{j=1}^m a_{ij}$; але сума парної кількості

непарних чисел є парним числом, тому $\sum_{j=1}^m a_{ij} = 2l$ та

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j = 2^{n-l} \sum_{j=1}^m a_{ij} = 2^{n-l} \cdot 2l = 2^n l = 0 \pmod{2^n}$$

Отже, $\sum_{j=1}^m a_{ij}x_j = 0 \pmod{2^n}$, а тому з рівності $\varphi_0(y_i)=0$ випливає $y_i=0$. Таким чином, $wt(Ax) \leq wt(\varphi(Ax))$.

Отже, $wt(x)+wt(Ax) \leq wt(\varphi(x))+wt(\varphi(Ax))$ і використовуючи міркування, аналогічні попередньому випадку, отримуємо, що $BN(A) \leq BN(\varphi(A))$.

З обох доведених нерівностей одержуємо рівність $BN(A)=BN(\varphi(A))$, яку й треба було довести.

З теореми 2 та відомих результатів для $(0,1)$ -матриць впливають такі наслідки.

Наслідок 1. Над кільцем лишків Z_2^n не існує MDS-матриць.

Наслідок 2. Для довільної матриці A розміру $m \times m$ над Z_2^n виконується наступна нерівність:

$$BN(A) \leq \frac{2m+4}{3}$$

IV. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРЕМИ ПРО ЗБЕРЕЖЕННЯ ІНДЕКСУ РОЗГАЛУЖЕННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ МАТРИЦЬ НАД КІЛЬЦЯМИ ЛИШКІВ

Одним із застосувань доведеної теореми про гомоморфізм є побудова матриць над кільцями лишків на основі $(0,1)$ -матриць. Мотивація такої побудови полягає в тому, що диференціальний та лінійний криптоаналіз блокових шифрів суттєво ускладнюються із переходом на кільце лишків, де операції виконуються за модулем 2^n , через складний характер впливу різних алгебраїчних операцій на різниці та лінійні відносно побітового додавання апроксимації.

Наприклад, у шифрі ARIA, як було зазначено, використовується $(0,1)$ -матриця розміру 16 на 16 з індексом розгалуження 8 [2]. Із доведення теореми 2 випливає, що можна замінити цю матрицю на її довільний прообраз відносно гомоморфізму φ і перейти в обчислення над кільцями лишків. При такій досить «природній» заміні індекс розгалуження матриці зберігається, але загалом підвищується криптостійкість. Вибір елементів прообразу може диктуватись іншими міркуваннями; скажімо, коефіцієнти матриці не повинні бути великими (наприклад, $1, 2, 3$ та 4) для збереження ефективності обчислення, але не повинні співпадати для запобігання інтегральному криптоаналізу.

У специфікації шифру Midori розглядається в якості лінійного перетворення три матриці на вибір, дві з яких задовільняють властивості інволютивності [3]. Також дві з них – це матриці над Z_2^n , а третя – $(0,1)$ -матриця, яка одержана з однієї з попередніх застосуванням описаного гомоморфізму. Відповідно, ці матриці мають однаковий індекс розгалуження, що дозволяє будувати оцінки стійкості до відомих методів криптоаналізу уніфікованим чином. Втім, розробники віддали перевагу $(0,1)$ -матриці через властивості інволютивності та орієнтацію на реалізації у малопотужних архітектурах.

Два наведених приклада демонструють, що можна запропонувати шлях модифікації шифру, а саме його лінійного перетворення, для підвищення криптографічної стійкості. Для цього достатньо замінити $(0,1)$ -матриці, які

використовуються, на певні матриці-прообрази над кільцями лишків. При такій заміні індекс розгалуження зберігається, тому шифр зазвичай не втрачає свою стійкість до диференціального та лінійного криптоаналізу, а ретельний підбір відповідної матриці може підвищити стійкість до алгебраїчних атак. Зауважимо, що через перехід до інших алгебраїчних операцій все одно слід проводити оцінювання стійкості модифікованого шифру; однак форма та порядок оцінок в багатьох випадках зберігаються.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було доведено, що індекси розгалуження матриць над кільцями лишків за модулем 2^n зберігаються при гомоморфному відображенні у $(0,1)$ -матриці над двійковими лінійними просторами. Це дало змогу застосувати для оцінки значень індексу розгалуження матриць над кільцями лишків результати, відомі для $(0,1)$ -матриць. Грунтуючись на одержаних результатах, було запропоновано деякі шляхи пошуку криптографічно сильних матриць над кільцями лишків та підсилення криптографічної стійкості таких шифрів, як ARIA та Midori, шляхом заміни їх лінійних перетворень на перетворення над кільцями лишків.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] J. Chloy, K. Khoo, “New Applications of Differential Bounds of the SDS Structure” [Online]. Available: <https://eprint.iacr.org/2008/395.pdf>
- [2] D. Kwon, J. Kim, S. Park and others, “New Block Cipher: ARIA” [Online]. Available: <http://www.math.snu.ac.kr/~jinhong/04Aria.pdf>
- [3] S. Banik, A. Bogdanov, T. Isobe and others, “Midori: A Block Cipher for Low Energy” [Online]. Available: <https://eprint.iacr.org/2015/1142.pdf>
- [4] Дідан В.В., Методи побудови MDS-матриць над скінченними полями та кільцями // Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» (26-28 травня 2016 р., Київ). – К.: Видавництво «Політехніка», 2016. – стор. 89-90.
- [5] J. Massey, “On the Optimality of SAFER+ Diffusion” [Online]. Available: http://mpcs.sci.am/filesimages/volumes/volume_44/14.pdf
- [6] T. Kranz, G. Leander, K. Stoffelen, F. Wiemer, “Shorter Linear Straight-Line Programs for MDS Matrices” [Online]. Available: <https://eprint.iacr.org/2017/1151.pdf>
- [7] J. Daemen, V. Rijmen, “The Wide Trail Design Strategy” [Online]. Available: http://jda.noekeon.org/JDA_VRI_Wide_2001.pdf
- [8] J. Daemen and V. Rijmen, “The Rijndael Block Cipher,” AES Proposal, 1998.
- [9] Ju-Sung Kang et al, “Practical and Provable Security against Differential and Linear Cryptanalysis for Substitution-Permutation Networks”, ETRI Journal, Vol.23, No.4, Dec. 2001.
- [10] M. Kanda et al. “A New 128-bit Block Cipher E2” Technical Report of IEICE. ISEC98-12
- [11] С.В. Яковлев, В.В. Дідан, «Про неіснування матриць максимального індексу розгалуження над кільцем лишків за модулем» // Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп’ютерне моделювання 2016» (23-28 травня 2016 р., Івано-Франківськ – Яремче). – Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2016. – стор. 116-117.

Імовірності Диференціалів Шифруючих Перетворень із Частковим Забілюванням Ключами

Володимир Полулях, Сергій Яковлев
кафедра математичних методів захисту інформації
Фізико-технічний інститут
НТУУ “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”
Київ, Україна
manutdvova@gmail.com, yasv@rl.kiev.ua

The Differential Probabilities of the Encryption Mappings with Partial Key Whitening

Volodymyr Poluliakh, Serhii Yakovliev
Dept. of Mathematical Methods of Information Security
Institute of Physics and Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine
manutdvova@gmail.com, yasv@rl.kiev.ua

Анотація—Розробники легкого шифру GIFT запропонували використовувати часткове забілювання даних із раундовими ключами. У даній роботі розглядається вплив такої модифікації на стійкість шифруючих перетворень до диференціального криптоаналізу.

Abstract—Developers of GIFT lightweight cipher proposed to use a partial key whitening of input data within encryption process. We study the effect of such modification on the security of encryption mappings against differential cryptanalysis.

Ключові слова—блокові шифри; S-блоки; диференціальний криптоаналіз.

Keywords—block ciphers; S-boxes; differential cryptanalysis.

I. ВСТУП

Диференціальний криптоаналіз [1] є одним з найпотужніших методів аналізу симетричних блокових шифрів. Сучасні методи аналітичного доведення стійкості алгоритмів шифрування до диференціального криптоаналізу оцінюють складність проведення атаки через значення певних обчислювальних параметрів раундових перетворень та їх окремих компонент, таких як S-блоки та лінійні перетворення. Зазвичай для підвищення стійкості до даного методу аналізу у блокових шифрах обираються біективні S-блоки (тобто підстановки на

бітових векторах) із мінімально можливими імовірностями диференціалів.

Надзвичайне поширення обчислювальних пристроїв та гаджетів (зокрема, у межах розвитку «Інтернету речей») призвело до бурхливого розвитку так званої «легкої» криптографії – окремого напрямку криптології, яких розглядає питання аналізу та синтезу криптографічних перетворень, оптимізованих під виконання на малопотужних обчислювальних архітектурах. Задля економії обчислень мінімізується кількість вентилів у схемах реалізації нелінійних перетворень; зменшується кількість та розміри S-блоків; суттєво спрощуються лінійні перетворення. Розробники блокового шифру GIFT [2] пропонують на кожному раунді забілювати з ключем тільки половину кожного входу на S-блок, що призводить до суттєвої економії ключового матеріалу та прискорення обчислень.

Однак використання часткового забілювання із раундовими ключами може помітно змінити значення криптографічних параметрів структурних елементів шифру та, відповідно, його оцінок стійкості до відомих методів криптоаналізу. Це питання не досліджувалось у опублікованих джерелах. У даній роботі ми проведемо аналіз поведінки криптографічних параметрів ключезалежних S-блоків (зокрема, розподілів імовірностей

диференціалів та їх максимумів) при накладанні певних обмежень на ключовий простір.

II. НЕОБХІДНІ ТЕРМІНИ ТА ПОЗНАЧЕННЯ

Нехай V_n – простір n -бітових векторів, і бінарні операції \otimes та \circ визначають на V_n структуру абелевих груп $\langle V_n, \otimes \rangle$ та $\langle V_n, \circ \rangle$. Для зручності будемо вважати нульовий вектор нейтральним елементом в обох зазначених групах. В якості \otimes та \circ ми будемо розглядати, зокрема, операції \oplus (побітове додавання) та $+$ (додавання за модулем 2^n); в останньому випадку бітові вектори трактуються як цілі невід’ємні числа у двійковому записі.

Тоді (\circ, \otimes) -диференціалом або змішаним диференціалом функції f називається довільна пара бітових векторів $(\alpha, \beta) \in V_n^2$, для якої існує подія $\alpha \rightarrow_f \beta$ (α переходить у β під дією функції f), що для випадкового значення x – входу функції f виконується рівність $f(x \circ \alpha) = f(x) \otimes \beta$. Іншими словами, β є різницею між виходами функції, якщо на вхід подати два значення із різницею α .

Імовірністю диференціала $DP^f_{\circ\otimes}(\alpha, \beta)$ відносно операцій \otimes та \circ називається усереднена за усіма можливими значеннями x сума

$$DP^f_{\circ\otimes}(\alpha, \beta) = \frac{1}{2^n} \sum_{x \in V_n} [f(x \circ \alpha) = f(x) \otimes \beta].$$

Тут і далі ми використовуємо символ [...] (так звані дужки Айверсона) як позначення індикатора події, записаної в дужках: 1, якщо подія істинна, та 0, якщо хибна.

Максимумом диференціальної імовірності функції f є величина $MDP_{\circ\otimes}(f) = \max_{\alpha \neq 0, \beta} DP^f_{\circ\otimes}(\alpha, \beta)$.

Шифруючим перетворенням f_k з ключем k називається відображення $f_k : V_n \times K \rightarrow V_n$, K – простір ключів. При фіксованому ключі k шифруючому перетворенню відповідає деяка булева функція. Отже для нього справедливим є означення імовірності диференціалу

$$DP^f_{\circ\otimes}[k](\alpha, \beta) = \frac{1}{2^n} \sum_{x \in V_n} [f_k(x \circ \alpha) = f_k(x) \otimes \beta].$$

Для того, щоб провести атаку, нам потрібно знайти імовірності диференціалів та обрати диференціали з високою імовірністю. Але, оскільки ці імовірності залежать від ключа, потрібно знати ключ, щоб знайти диференціали з високою імовірністю, аби побудувати атаку, що знаходить цей ключ. Щоб розірвати дану логічну петлю, ми користуємося гіпотезою про стохастичну еквівалентність ключів – вважаємо, що розподіли при різних значеннях ключа приблизно однакові. Тому для оцінки складності проведення диференціальної атаки будемо використовувати середню імовірність диференціалу

$$EDP^f_{\circ\otimes}(\alpha, \beta) = \frac{1}{2^{2n}} \sum_{x \in V_n} \sum_{k \in K} [f(x \otimes \beta) = f(x) \otimes \beta],$$

у якості основного параметру. Відповідно, гарантована складність проведення атаки визначається максимумом середньої імовірності диференціалу

$$MEDP_{\circ\otimes}(f_k) = \max_{\alpha \neq 0, \beta} EDP^f_{\circ\otimes}(\alpha, \beta),$$

і саме цей параметр є основною чисельною характеристикою, що визначає стійкість шифру до диференціального криптоаналізу, оскільки мінімальна складність атаки буде обернено пропорційна до неї.

Для побудови оцінок значення $MEDP$ зручно виявилось поняття середньою за ключами імовірності диференціалу у точці x , запропоноване Л.В.Ковальчук [3]:

$$DP^f_{\circ\otimes}(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{2^n} \sum_{k \in K} [f_k(x \circ \alpha) = f_k(x) \otimes \beta].$$

Максимум середньої за ключами імовірності диференціалу у точці x – це величина

$$MDP_{\circ\otimes}(f_k) = \max_{\alpha \neq 0, \beta, x} DP^f_{\circ\otimes}(x, \alpha, \beta).$$

Через очевидне співвідношення $MDP \geq MEDP$ можна використовувати верхні оцінки для MDP (які зазвичай простіше обчислювати) для оцінювання гарантованої складності проведення диференціального криптоаналізу.

У 1993 р. С. Лай, Дж. Мессі та Ш. Мерфі розробили першу формальну теорію стійкості до диференціального криптоаналізу яка ґрунтувалася на концепції марковського шифру [4]. Шифруюче перетворення f_k називається марковським відносно операцій \circ, \otimes , якщо

$$\begin{aligned} \forall x \forall \alpha \forall \beta : DP^f_{\circ\otimes}(x, \alpha, \beta) &= DP^f_{\circ\otimes}(0, \alpha, \beta) \\ \Rightarrow DP^f_{\circ\otimes}(x, \alpha, \beta) &= EDP^f_{\circ\otimes}(\alpha, \beta). \end{aligned}$$

Таким чином, для марковських перетворень значення імовірностей диференціалів у довільній точці рівні між собою; відповідно, імовірності диференціалів раундових перетворень марковських блокових шифрів не залежать від того, що відбулось на попередніх раундах.

Сформулюємо декілька властивостей шифруючих перетворень спеціального виду [3-4].

Лема 1. Нехай $f_k(x) = S(x \circ k)$, де $S : V_n \rightarrow V_n$ – S-блок. Тоді f_k – марковське відносно \circ, \otimes та

$$\forall x : DP^f_{\circ\otimes}(x, \alpha, \beta) = DP^S_{\circ\otimes}(\alpha, \beta).$$

Лема 2. Нехай $f_k(x) = S(x \otimes k)$. Тоді f_k – не марковське відносно \circ, \otimes , але

$$\begin{aligned} \forall x : DP^f_{\circ\otimes}(x, \alpha, \beta) &= DP^S_{\circ\otimes}(\alpha'_x, \beta), \\ \text{де } \alpha'_x &= (x \circ \alpha) \otimes x^{-1}. \end{aligned}$$

III. АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ЗМІН СЕРЕДНІХ ЗА КЛЮЧАМИ ЙМОВІРНОСТЕЙ ДИФЕРЕНЦІАЛІВ З ОБМЕЖЕННЯМИ НА КЛЮЧОВИЙ ПРОСТІР

Розглянемо (\otimes, \otimes) -диференціал параметризованої функції f_k . Введемо обмеження на ключовий простір: будемо вважати, що ключі обираються з деякої множини $K \subset K'$. Потрібно з'ясувати як зміняться значення математичного очікування імовірності диференціалу f_k .

Нехай EDP' – середня за ключами імовірність (\otimes, \otimes) -диференціалу перетворення зі зменшеним ключовим простором.

Лема 3. Нехай $f_k(x) = S(x \otimes k)$, $x \in V_n$, $k \in K'$, $K' \subset V_n$. Тоді

$$EDP'^{f_k}_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta) = DP^S_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta).$$

Доведення: за визначенням маємо

$$\begin{aligned} EDP'^{f_k}_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta) &= \\ &= \frac{1}{2^n} \sum_{x \in V_n} \frac{1}{|K'|} \sum_{k \in K'} [f_k(x \otimes \alpha) = f_k(x) \otimes \beta] = \\ &= \frac{1}{2^n} \sum_{x \in V_n} \frac{1}{|K'|} \sum_{k \in K'} [S(x \otimes \alpha \otimes k) = S(x \otimes k) \otimes \beta] \end{aligned}$$

Оскільки операція \otimes утворює абелеву групу та k пробігає всі можливі значення, то й $x \otimes k$ також пробігає всі можливі значення. Отже можемо зробити заміну $x \otimes k = u$ Звідси:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2^n} \sum_{x \in V_n} \frac{1}{|K'|} \sum_{k \in K'} [S(x \otimes \alpha \otimes k) = S(x \otimes k) \otimes \beta] = \\ &= \frac{1}{2^n} \sum_{x \in V_n} \frac{1}{|K'|} \sum_{k \in K'} [S(u \otimes \alpha) = S(u) \otimes \beta] = \\ &= \frac{1}{|K'|} \sum_{k \in K'} \frac{1}{2^n} \sum_{u \in V_n} [S(u \otimes \alpha) = S(u) \otimes \beta] = \\ &\frac{1}{|K'|} \sum_{k \in K'} DP^S_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta) = DP^S_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta), \end{aligned}$$

за означенням.

Отже, навіть з обмеженнями на ключовий простір шифр зберігає деякі властивості маркових шифруючих перетворень. Однак, як буде показано далі, значення імовірностей диференціалів у точках в загальному випадку не зберігається – тобто, при обмеженнях на ключовий простір шифри можуть втратити властивість марковості. Для шифрів, які є немарковськими, в окремих випадках (для деяких диференціалів) значення середньої імовірності може зберегтись – однак більш ніж для половини диференціалів імовірності змінюються.

IV. АНАЛІЗ РОЗПОДІЛІВ ЙМОВІРНОСТЕЙ ДИФЕРЕНЦІАЛІВ У ТОЧКАХ ДЛЯ ДЕЯКИХ НЕЛІНІЙНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Розглянемо два типи раундових перетворень: $F_k = S(x \oplus k)$, $G_k = S(x + k)$. Слід зазначити, що в роботі

розглядаються тільки $(+, +)$ - та (\oplus, \oplus) -диференціали, але операції в диференціалах та операція забілювання з ключем різні.

Для експериментальних обчислень було обрано 8-бітні бієктивні S-блоки: S-блок американського стандарту шифрування AES [5] та чотири S-блоки національного стандарту шифрування України ДСТУ 7624:2014 (шифр «Калина») [6]. Усі обчислення були проведені у спеціальному обчислювальному середовищі, написаному мовою C++.

Обмеження на ключовий простір накладається шляхом скорочення довжини ключа до 4-х біт. Таким чином потужність $|K| = 2^8$, для обмеженої множини $|K'| = 2^4$. Розподіли середніх за ключами ймовірностей диференціалів із забілюванням ключами довжини 8 бітів порівнюється з розподілами середніх за ключами ймовірностей диференціалів у випадках, коли з ключем замішуються тільки старші або молодші 4 біти (порядок бітів – big-endian).

Ще однією статистичною характеристикою, яка оцінювалася у ході експерименту, було *середньоквадратичне відхилення* середніх імовірностей диференціалів

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2^8} \sum_{\alpha \neq \beta} (EDP'^{f_k}_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta) - EDP'^{f_k}_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta))^2},$$

де \otimes – операція $+$ або \oplus .

Для аналізу змін у розподілах додатково розглянемо такі множини, які показують випадки, коли середня імовірність диференціалів збільшилась або зменшилась:

$$\Delta^+ = \{(\alpha, \beta) | EDP'^{f_k}_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta) > EDP'^{f_k}_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta)\},$$

$$\Delta^- = \{(\alpha, \beta) | EDP'^{f_k}_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta) < EDP'^{f_k}_{\otimes\otimes}(\alpha, \beta)\}.$$

Статистичні характеристики розподілів $DP'^{F_k}_{++}$ для перетворень, які побудовані на основі S-блоку шифру AES та матриць підстановок шифру «Калина», наведено у таблиці I. У таблиці II наведено аналогічні статистичні дані про розподіли.

Максимуми $DP'^{F_k}_{++}$ зросли рівно у 8 разів для S-блоку AES та підстановок π_0 та π_1 шифру «Калина»; для підстановок π_2 , π_3 шифру «Калина» збільшення склало 6,86 разів. Майже у всіх випадках збільшилися $MEDP'^{F_k}_{++}$ (окрім забілювання з молодшими бітами AES). Приблизно для половини диференціалів значення EDP' збільшилось, а для інших диференціалів залишилось незмінним.

ТАБЛИЦЯ I. СТАТИСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ $DP'^{F_k}_{++}$

Забілені Біти	$MDP'^{F_k}_{++}$	$MEDP'^{F_k}_{++}$	$|\Delta^+|$	σ
AES				
Всі	0.0234375	0.0195312	–	–

Старші	0.1875	0.0214844	28258	0.0021117
Молодші	0.1875	0.0195312	30488	0.001666
π_0				
Всі	0.0234375	0.015625	—	—
Старші	0.1875	0.0214844	28400	0.002079
Молодші	0.1875	0.03125	30154	0.001675
π_1				
Всі	0.0234375	0.0136719	—	—
Старші	0.1875	0.0205078	28324	0.0021032
Молодші	0.1875	0.0195312	30286	0.0016819
π_2				
Всі	0.0273438	0.015625	—	—
Старші	0.1875	0.0239258	28270	0.002112
Молодші	0.1875	0.0273438	30160	0.0016698
π_3				
Всі	0.0234375	0.0234375	—	—
Старші	0.1875	0.0234375	25381	0.0021032
Молодші	0.25	0.0292969	23870	0.0016819

ТАБЛИЦЯ II. СТАТИСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ $DP_{\oplus\oplus}^{G_k}$

Забілені Біти	$MDP_{\oplus\oplus}^{G_k}$	$MEDP_{\oplus\oplus}^{G_k}$	$|\Delta^+|$	σ
AES				
Всі	0.0273438	0.0195312	—	—
Старші	0.1875	0.015625	26132	0.002336
Молодші	0.25	0.0205078	24045	0.001842
π_0				
Всі	0.0234375	0.0234375	—	—
Старші	0.25	0.03125	25440	0.0026496
Молодші	0.1875	0.0249023	23905	0.0019236
π_1				
Всі	0.0234375	0.0234375	—	—
Старші	0.1875	0.0234375	25381	0.0021032
Молодші	0.25	0.0292969	23870	0.0016819
π_2				
Всі	0.0273438	0.0234375	—	—
Старші	0.25	0.03125	25439	0.002676
Молодші	0.25	0.0361328	23953	0.0019321
π_3				
Всі	0.0273438	0.0234375	—	—
Старші	0.25	0.0234375	25405	0.0026727
Молодші	0.1875	0.0297852	24082	0.001917

Зауважимо, що множина Δ^- виявилась порожньою: середнє значення імовірностей диференціалів у точках із забілюванням половини бітів виявилось завжди не менше за середнє значення із забілюванням по всій довжині входу. Цікаво, що серед імовірностей, які збереглися, були як нульові, так і ненульові.

Абсолютні значення $MDP_{\oplus\oplus}^{G_k}$ та $MEDP_{\oplus\oplus}^{G_k}$ для усіх S-блоків, які розглядались, більші за відповідні значення $MDP_{++}^{F_k}$ та $MEDP_{++}^{F_k}$; але відносна поведінка при звуженні ключового простору практично така сама: відбувається збільшення значень диференціальних імовірностей більш ніж для половини диференціалів, а також суттєве збільшення максимальних значень.

Відповідно, можна констатувати, що загалом стійкість шифруючих перетворень, які розглядались, до

диференціального криптоаналізу при частковому забілюванні ключами понизилась у порівнянні із повним забілюванням. Таким чином, при використанні даного підходу при синтезі блокових шифрів необхідно після побудови щонайменше проводити окреме незалежне оцінювання стійкості до статистичних методів криптоаналізу.

ВИСНОВКИ

У даній роботі розглянуто новий підхід для побудови алгоритмів шифрування легкої криптографії, в якому запропоновано використовувати часткове забілювання вхідних даних із ключами. Такий підхід дозволяє зменшити витрати на генерування раундових ключів та відповідні вимоги до генераторів випадкових бітів. У роботі проаналізовано стійкість шифруючих перетворень із частковим забілюванням до диференціального криптоаналізу. Показано, що для марковських шифруючих перетворень зменшення ключового простору зберігає значення середніх імовірностей диференціалів, однак може не зберігати імовірності диференціалів у окремих точках. Для немарковських шифруючих перетворень імовірності диференціалів суттєво підвищуються, тобто загальна стійкість до диференціального криптоаналізу падає. Таким чином, при застосуванні даного підходу необхідно проводити окремий додатковий аналіз стійкості до відомих методів криптоаналізу.

Одержані результати можуть бути використані для подальшої модифікації існуючих шифрів та при розробці нових алгоритмів легкої криптографії.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Biham, E., Shamir, A., "Differential Cryptanalysis of DES-like Cryptosystems", in. *Journal of Cryptology*. – 1991. – V. 4. – № 1. – P. 3 – 72.
- [2] Subhadeep Banik, Sumit Kumar Pandey, Thomas Peyrin, Yu Sasaki, Siang Meng Sim, and Yosuke Todo "GIFT: A Small Present" [Online] // LASEC, Switzerland, 2017. – <https://eprint.iacr.org/2017/622.pdf>.
- [3] Ковальчук Л.В. «Обобщенные марковские шифры: построение оценки практической стойкости относительно дифференциального криптоанализа» // Математика и безопасность информационных технологий. Материалы конференции (25 – 27 октября 2006 г.) – М.: МЦНМО, 2007. – С. 595 – 599.
- [4] Lai X. Markov ciphers and differential cryptanalysis / X. Lai, J.L. Massey, S. Murphy. // *Advances in Cryptology – EUROCRYPT'91, Proceedings*. – Springer Verlag, 1991. – pp. 17-38.
- [5] Advanced Encryption Standard. [електронний ресурс] . – Режим доступу : <http://csrc.nist.gov/archive/aes>
- [6] Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Алгоритм симетричного блокового перетворення: ДСТУ 7624:2014. – К.: Держспоживстандарт України, 2015. – 238 с.

Analysis of the Implementation and Computational Costs for the Cryptosystems on Suzuki Group

Gennady Khalimov
Information Security Department
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
gennadykhalimov@gmail.com

Yevgen Kotukh
Information Security Department
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
yevgenkotukh@gmail.com

Аналіз Реалізації та Обчислювальні Витрати для Криптосистем на Suzuki Group

Геннадій Халімов
Факультет інформаційної безпеки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
gennadykhalimov@gmail.com

Євген Котух
Факультет інформаційної безпеки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
yevgenkotukh@gmail.com

Abstract—The paper considers the main implementations of cryptosystems in groups and an analysis of the estimation of complexity of calculations. The analysis of the cryptosystems implementation based on Suzuki group is presented. The design and implementation peculiarities of the Suzuki 2-group based MST3 cryptosystem are analyzed. The comparative results of encryption and decryption computation costs for the finite field of 128 bits, 256 bits, as well as implementation for the RSA algorithm are obtained. It follows from the evaluation that, for example, the encryption and decryption time of the RSA algorithm is 10 times bigger than the MST3 cryptosystem, but it much more cost effective in terms of the size of private and public keys.

Анотація—В роботі розглядаються основні реалізації криптосистем у групах та аналіз оцінки складності розрахунків. Представлений аналіз впровадження

криптосистем на групі Suzuki. Проаналізовано особливості розробки та реалізації криптосистеми MST3 на базі 2-х груп Suzuki. Отримані порівняльні результати розрахунку шифрування та дешифрування для кінцевого поля 128 біт, 256 біт, а також реалізація алгоритму RSA. З оцінки випливає, що, наприклад, час шифрування та дешифрування алгоритму RSA в 10 разів перевищує криптосистему MST3, але набагато більш економічно ефективний з точки зору розміру приватних та відкритих ключів. функціонування систем електронної взаємодії органів виконавчої влади.

Keywords—Suzuki 2-group, logarithmic signature, Computational, MST₃

Ключові слова—Сузукі 2-груп, логарифмічний підпис, обчислення, MST₃

I. INTRODUCTION

In the early 80's, the use of group theoretical problems for cryptography was proposed by Wagner and Magyarik [1], Wagner [2], Magliveras [3]. Magliveras et al were made the proposals for cryptographic schemes based on special expanded finite groups (so-called logarithmic signatures) [3]. Logarithmic signatures and their cryptographic application were studied by Gonz alez Vasco, Steinwandt, Birget, Bohliet, and others authors. These decompositions are interesting by themselves like mathematical objects. For example, Hajors work on Minkowski's hypothesis shows that this type of decomposition for abelian groups arises in the study of multidimensional coverings (see [4]).

MST_1 , MST_2 and MST_3 are examples of public key cryptosystems. The construction of short logarithmic signatures is the actual issue of their implementation. Logarithmic signatures are the special type of group decomposition are presented as the main components of some cryptographic keys. In this connection, scientific interest corresponds to the search of the logarithmic signatures in the finite groups (such decompositions exist for solvable, symmetric and alternate groups) and assessment of their practical feasibility and secrecy. The basic definitions of logarithmic signatures, coverings for finite groups and their mapping generations, as well as the structure of the given cryptosystems are presented in [4].

II. DESING AND IMPLEMENTATION PECULIARITIES OF MST_3 CRYPTOSYSTEM ON SUZUKI 2-GROUP

Suzuki 2-group with order of q^2 is proposed in the generic implementation of MST_3 cryptosystem. Using the notation of Higman [5], Suzuki 2-group with order of q^2 is noted as $A(m, \theta)$. Let $q = 2^m$ $3 \leq m \in \mathbb{N}$ is such, that F_q field has nontrivial automorphism θ of unpaired order. Here it means that m is not degree of 2. Than groups of $A(m, \theta)$ are exist.

In fact, if we determine $\zeta := \{S(a, b) \mid a, b \in F_q\}$,

where $S(a, b) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a & 1 & 0 \\ b & a^\theta & 1 \end{pmatrix}$ is the matrix 3×3 over

the field F_q , it shows that group ζ is isomorphic to $A(m, \theta)$. So, ζ has the order of q^2 and we have

$$Z := \mathbf{Z}(\zeta) = \Phi(\zeta) = \zeta' = \Omega_1(\zeta) = \{S(0, b) \mid b \in F_q\}$$

Since the center $\mathbf{Z}(\zeta)$ is an elementary Abelian group of the order q , it can be identified with the additive group of field F_q . Besides, factor-group $\zeta / \Phi(\zeta)$ is elementary Abelian group of order q . Then it's easy to check that the multiplication of the two elements in ζ is carried out in accordance with the rule

$$S(a_1, b_1)S(a_2, b_2) = S(a_1 + a_2, b_1 + b_2 + a_1^\theta a_2).$$

Finding the inverse element is performed by the formula

$$S(a, b)^{-1} = S(a, b + a^{\theta+1}).$$

The algorithm of the system for encryption has the following stages [6].

A. Generate of the key data

1. Choose the big group $G = A(m, \theta)$, $q = 2^m$.
2. Generate factorizable logarithmic signature $\beta = [B_1, \dots, B_s] = (b_{i,j}) = (S(0, b_{i,j} \cdot b))$ of (r_1, \dots, r_s) type, where $b_{i,j} \cdot b \in F_q$.
3. Generate random covering $\alpha = [A_1, \dots, A_s] = (a_{i,j}) = (S(a_{i,j} \cdot a, a_{i,j} \cdot b))$ of the same type of β , where $a_{i,j} \cdot a \in F_q / \{0\}$, $a_{i,j} \cdot b \in F_q$.
4. Generate random values $t_0, t_1, \dots, t_s \in G$, matrix of random bits $\sigma = [q \times q]$.
5. Construct homomorphism $f: G \rightarrow Z$, defined as $f(S(a, b)) = S(0, g(a))$ (in this implementation, the multiplication by a random bit matrix $f(a) = a^\sigma$ was used).
6. Compute $\gamma = [H_1, \dots, H_s] = (h_{i,j}) = (S(h_{i,j} \cdot a, h_{i,j} \cdot b))$, where $h_{i,j} = t_{i-1}^{-1} * a_{i,j} * t_i * b_{i,j} * f(a_{i,j})$.

7. Public key - $[\alpha, \gamma]$, private key - can be restored by the formula $y_{2,a} = y_{1,a} \oplus t_{0,a} \oplus t_{s,a}$
 $[\beta, (t_0, t_1, \dots, t_s), f]$ and additional data which is needed for the factorization of β .

B. Encryption of the message m

1. Generate element $\chi = S(0, m) \in G$
2. Generate random number $R \in Z$
3. Compute the cryptogram

$$y_1 = \alpha'(R) * \chi, y_2 = \gamma'(R) * \chi.$$

Remark

To reduce the size of cipher text enough to save $(y_{1,a}, y_{1,b}, y_{2,b})$, when decrypting the component $y_{2,a}$

C. Decryption

1. Compute

$$\beta'(R) = f(y_1)^{-1} * y_1^{-1} * t_0 * y_2 * t_s^{-1}.$$

2. Factorize $R = \beta'^{-1}(R)$.

3. Compute $\alpha'(R)$.

4. Restore $m = y_{1,b} \oplus \alpha'(R)_{.b}$.

Encryption testing is performed on a computer running OS Ubuntu 16.04 with Intel® Core™ i7-4702MQ CPU @2,20 GHz processor, 12 Gb RAM. The results are presented in Tables 1,2.

TABLE I. ENCRYPTION AND DECRYPTION COMPUTATIONAL COSTS IN THE 128BITS FINITE FIELD

Partition classes	Time of the key data generation, ms	Private key size, bytes	Public key size, bytes	Encryption time for 100 KB, ms	Decryption time for 100 KB, ms
128[2] → 64[4]	56	78830	39761	4749	2711
64[4] → 32[16]	59	111726	75217	2388	1487
32[16] → 16[256]	169	671918	590609	1205	888

TABLE II. ENCRYPTION AND DECRYPTION COMPUTATIONAL COSTS IN THE 256BITS FINITE FIELD

Partition classes	Time of the key data generation, ms	Private key size, bytes	Public key size, bytes	Encryption time for 100 KB, ms	Decryption time for 100 KB, ms
256[2] → 128[4]	57	249630	128593	14811	7911
128[4] → 64[16]	106	361502	248657	7540	4196
64[16] → 32[256]	798	2193054	1967569	3782	2318

In the Table. III a comparison with RSA encryption algorithm is presented.

TABLE III. ENCRYPTION AND DECRYPTION COMPUTATIONAL COSTS FOR RSA

Bitness of key parameters, bit	Time of the key data generation, ms	Private key size, bytes	Public key size, bytes	Encryption time for 100 KB, ms	Decryption time for 100 KB, ms
512	3,368	342	92	66,987	641,277
1024	8,685	632	160	117,947	2116,400
2048	63,658	1214	292	243,887	9853,580
4096	707,645	2373	548	591,868	64250,400

CONCLUSIONS

1. It is necessary to select a partition class of the logarithmic sub-block into blocks to optimize the computational costs for the size of private and public keys, the time for encryption and decryption. Time costs can be reduced by several times. The use of the final field of 128, 256 bits is sufficient to provide the highest class of security in the cryptosystems' classification.

2. During the calculation of 2048 and 4096 bits in the finite field, the encryption and decryption time of the RSA algorithm is tens of times larger than the MST_3 cryptosystem, but it ensures significant cost savings for the size of private and public keys.

REFERENCES

- [1] N.R. Wagner and M. R. Magyarik. "A Public Key Cryptosystem Based on the Word Problem." In *Advances in Cryptology. Proceedings of CRYPTO 1984*, pp. 19—36, edited by G. R. Blakley and D. Chaum, Lecture Notes in Computer Science 196. Berlin: Springer, 1985.
- [2] N.R. Wagner. "Searching for Public-Key Cryptosystems." In *Proceedings of the 1984 Symposium on Security and Privacy (SSP '84)*, pp. 91—98. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1990.
- [3] S.S. Magliveras. "A Cryptosystem from Logarithmic Signatures of Finite Groups." In *Proceedings of the 29th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 972—975. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1986.
- [4] W. Lempken, S.S. Magliveras, Tran van Trung and W. Wei, A public key cryptosystem based on non-abelian finite groups, *J. of Cryptology*, 22(2009), 62–74.
- [5] G. Higman, Suzuki 2-groups.III. *J. Mathematic.*-1963.-V.7. -P.79–96.
- [6] Pavol Svaba. *Covers and logarithmic signatures of finite groups in cryptography*. Dissertation, Bratislava, Slowakische Republik – 2011.

СЕКЦІЯ 6.

***Архітектоніка та компоненти
комп'ютерних систем та мереж***

SECTION 6.

***Computer networks, systems
and components architectonics***

Fuzzy Logic Positioning System of Ship's Diesel Generators Actuating Mechanisms

Vitalii Nikolskyi

National University "Odessa Maritime Academy"
Odessa, Ukraine
dept. of Theory of automatic control and
computer technology
prof.nikolskyi@ukr.net

Yevgen Ozhenko

National University "Odessa Maritime Academy"
dept. of of Automation of Vessel Gas Turbines
and Diesel Installations
Odessa, Ukraine
evgeniyozhenko@gmail.com

Kyrylo Bereznyi

National University "Odessa Maritime Academy"
dept. of Theory of automatic control and
computer technology
Odessa, Ukraine
90demon777@ukr.net

Viktor Lisenko

National University "Odessa Maritime Academy"
dept. of Theory of automatic control and
computer technology
Odessa, Ukraine
Victor.Lisenko.1990@gmail.com

Abstract—Hydraulic and electromagnetic drive are used as actuating mechanisms for fuel oil and gas injection on ships equipped with electronically controlled diesel generators. It leads to weight and size increasing, high power consumption for servo oil pump driving, reducing life time and reliability of control valves. Piezoelectric drive (stack actuators, linear and rotary motors) can be used as alternative to hydraulic and electromagnetic. It lacks the drawbacks of hydraulic and electromagnetic drives, but requires to use amplifiers to create high displacements and dynamic properties correcting devices due to high internal damping of piezo drive.

Developed fuzzy logic positioning system models allow to correct the dynamic properties of the piezo drive and apply it to control the actuating mechanisms of marine diesel generators, reduce the energy consumption and expand the range of possible fuel injection curve.

Keywords—fuzzy logic control system, piezoelectric drive, common rail fuel system, dual-fuel marine diesel generator.

I. INTRODUCTION

Tighter requirements for emissions into the atmosphere by marine diesel engines motivate shipowners and shipbuilders to search for alternative fuels and develop automated control systems for its injection. Since the 2000s, large shipping companies have converted old vessels or ordered new vessels capable for operating on liquefied gas or mixtures of different types of fuel [1, 2]. Simultaneously, electronic fuel control systems replaced conventional [3], which exhausted their capabilities.

Hydraulic drive is used as an actuating mechanism to supply fuel oil on vessels equipped with electronically controlled diesel generators and electromagnetic on ships with dual-fuel diesel generators to supply gas fuels, especially

SOGAV-250. Using of hydraulic systems has led to increase mass, dimension, power consumption for the drive of servo oil pumps [4] and led to emergency situations in case of malfunctions in servo oil system [5]. And use of electromagnets led to reduce life time and reliability of the control valves [6].

An analysis of the existing types of actuating mechanisms has shown that the improvement of the electromagnetic and hydraulic drive of actuating mechanisms is already almost exhausted. Therefore, research and development of control systems with actuating mechanisms based on new physical principles are relevant. The purpose of this study is to create new types of drives and their control laws. One of the most promising areas is the piezoelectric drive (stack actuators, linear and rotary motors).

II. MODEL DEVELOPMENT

The main requirements [7, 8] to marine diesel generators fuel systems are the force, speed and displacement (Table 1).

Since the arrival of the piezo drive, its applied only to create micro-displacements with a small force [9 - 12]. The use of piezoelectric drives in transport is limited for the following reasons:

- nonlinear frequency response curve of piezo elements, which determines its operation at the resonance frequency or in a narrow linear frequency range up to 20 kHz;
- hysteresis and the high dependence of the displacement on the load;
- high dependence of the displacement on the ambient temperature. However, at the present time, a high-temperature type of piezoceramics is producing, which not losing its

properties up to 350 °C [18];

- creepage of ceramic, which can be reduced by preloading;
- the properties of piezo-manipulators are combined with high internal damping, which lead to strong oscillation in the transient processes due to changing of control field and the mechanical load.

TABLE I. MAIN PARAMETERS OF THE ACTUATING MECHANISMS DRIVE

	Injection control unit (for fuel oil)	Gas injection valve
Force, N	12300	100
Speed, ms	≥ 6.5	≥ 20
Displacement, mm	4	0.4

The advantages of the piezo drive is:

- absence of copper windings and simplicity of manufacturing technology;
- high starting torque and specific power;
- high efficiency, reaching 54%;
- no risk of short circuit on the mechanical side (no coupling is needed);
- linear mechanical characteristic;
- simultaneous flow of direct and reverse piezoelectric effects provides high sensitivity to changing the moment of loading, which allows to estimate the load of the piezo drive.

Another advantage of using a piezoelectric drive is the absence of any kinematic transducers intended for changing speeds. The range of actively processed frequencies can be extended to several kHz for piezoceramic manipulators and motors. It's significantly expands the range of speed changes.

However, having such properties, the piezoelectric drive for a long time did not find wide application in ship diesel engine construction, where the displacement ranges are 2-5 mm. Construction of injection control unit with piezoelectric drive were developed in the studies [13-17].

Stack actuators (Fig. 1), fixed one end on a base. It consists of a piezoelectric washer set with cross-sectional area S_0 and the initial thickness l_0 . The length of the column changes under the action of the electric field E in the direction of the field action by the value Δ , moving the actuator with mass m_0 , connected with its free end. In addition to the actuating mechanisms, the active part volume elements of the piezoelectric stack also move. Their mass m_k is usually less than the mass of the actuating mechanisms. In this case, the piezoelectric element moving volumes inertia can be neglected. Agree that the stack is fixed at one end and this part doesn't participate in the movement. The total reduced mass m_Σ will be equal, kg,

$$m_\Sigma = m_0 + 0.382m_k$$

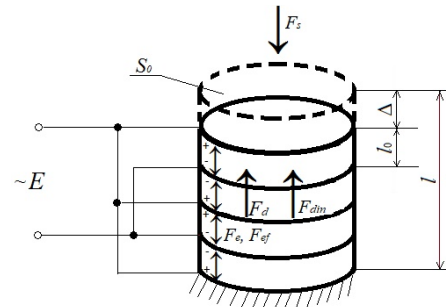


Fig. 1. Construction of piezoelectric stack actuator

According to Newton's third law, for the forces acting on the column, the following equilibrium condition is valid [1]:

$$\bar{F}_e = \bar{F}_{ef} + \bar{F}_s + \bar{F}_d + \bar{F}_{din},$$

- where $F_e = K_e \Delta$ – elastic deformation force, N;
 $F_{ef} = d_p Y S_0 E$ – force in the piezoelectric element caused by an applied electric field, N;
 F_s – static force from the actuating mechanisms, N;
 $F_d = -K_d ((d\Delta)/(dt))$ – damping force in the piezoelectric element, N;
 $F_{din} = -m_\Sigma ((d^2\Delta)/(dt^2))$ – dynamic force in the piezoelectric element, N;
 $K_e = Y S_0 / l_0$ – elastic coefficient of the piezoelectric element, N/m;
 K_d – internal damping coefficient of the piezoelectric element, kg/s;
 m_Σ – total reduced mass, kg;
 Δ – deformation of the piezoelectric element, mm;
 l_0 – washer initial thickness, mm;
 Y – Young modulus, N/m²;
 d_p – piezoelectric constant, C/N;
 E – field strength, V/m.

Mechanical stress σ determined by static force F_s applied to the actuator and acting on the piezoelectric element from the side of the actuator, by the dynamic force F_{din} proportional to the acceleration of the actuating mechanisms and the damping force F_d proportional to the displacement speed of the actuating mechanisms. The dynamic force F_{din} in this case act on the piezoelectric element in the direction of the applied field.

We obtain a block diagram of piezoelectric washers stack (Fig. 2).

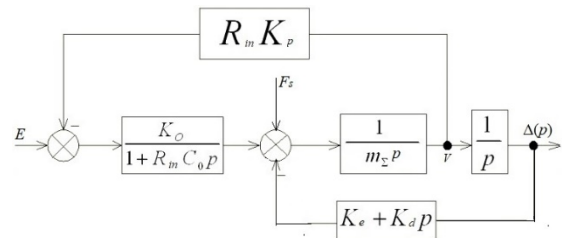


Fig. 2. Structural diagram of a piezoelectric washer stack

The transformation of the obtained structural scheme leads to a transfer function of the following form

$$W_{\Delta}(p) = \frac{K_0}{R_{in}C_0m_{\Sigma}p^3 + (m_{\Sigma} + R_{in}C_0K_d)p^2 + (R_{in}C_0K_d + K_d + R_{in}C_0 + R_{in}C_0K_p)p + K_e} \rightarrow$$

where $V = d\Delta/dt$ – speed of actuating mechanisms, m/s;
 $C_0 = \epsilon_0\chi S_0(1-K_{em}^2)/l_0$ – capacity of piezoelectric element, F;
 $K_p = K_e d_p$ – direct piezoelectric effect coefficient, C/m.
 $K_0 = l_0/Y S_0 d_p = d_p/K_e$ – inverse piezoelectric effect coefficient, m/C.

The blocks taking into account preload spring stiffness and the spool spring stiffness coefficient are introduced into the block diagram for modelling injection control unit with piezoelectric washers stack. Thus, the block diagram of the injection control unit driven by the piezoelectric washer stack shown in Fig. 3. Thus, the transfer function takes the form,

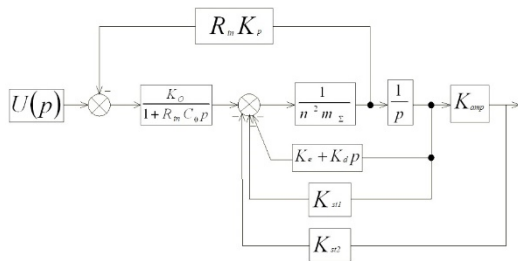


Fig. 3. Model of the injection control unit with piezoelectric washer stack drive: $U(p)$ – control voltage; K_{amp} – amplification coefficient of stack displacement; K_{st1} – preloading spring stiffness coefficient; K_{st2} – spool spring stiffness coefficient

$$W_{\Delta}(p) = \frac{K_0 K_{amp}}{R_{in}C_0m_{\Sigma}p^3 + (m_{\Sigma} + R_{in}C_0K_d)p^2 + (R_{in}C_0K_d + K_d + R_{in}C_0K_{st1} + R_{in}C_0K_p + R_{in}C_0K_{st2}K_{amp})p + K_e + K_{st1} + K_{amp}K_{st2}} \rightarrow$$

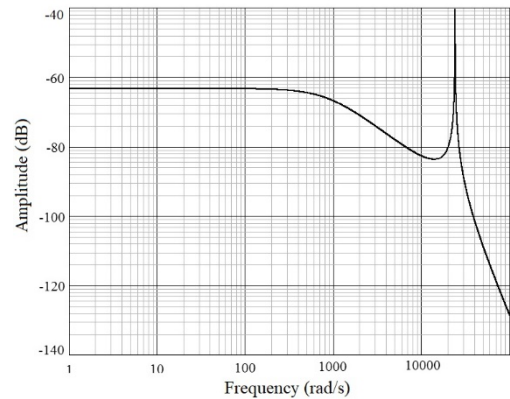
According to Physik Instrumente (PI) [18], currently, one of the most common materials used for the production of piezo-manipulators is PIC 255, which has the following parameters: density ρ – 7800 kg/m³, relative permittivity ϵ – 1750, piezoelectric charge coefficient d_{33} – 400·10⁻¹² C/N, piezoelectric coupling factor k_{33} – 0,69, Young modulus Y_{33} – 10·10¹⁰ N/m², resistance R_{in} – 50 Ω , damping coefficient k_d – 8,9·10⁻³ kg/cm², elastic coefficient K_y – 1,599·10⁹ N/m, inverse K_0 and direct K_p piezoelectric effect – 49,2 N/V and 49,2 V/N.

Model P-056.90 manufactured with PIC 255 material with the following parameters was chosen for the study: displacement Δ – 180·10⁻⁶ m, diameter – 0,056 m, length – 0,154 m, blocking force – 78000 N, electric capacity, C_0 – 2,7·10⁻⁵F, resonant frequency – 7000 Hz, weight of the column is 2,96 kg.

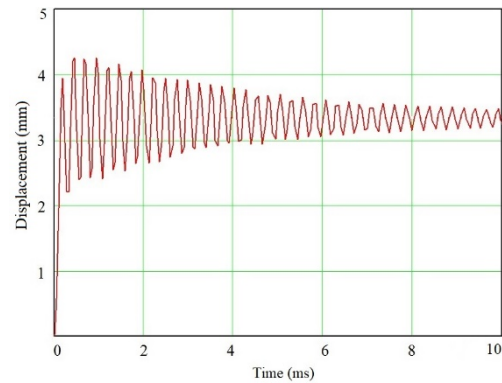
After substituting the values in (11), obtain the following transfer function,

$$W_{\Delta}(p) = \frac{1094}{3,105 \cdot 10^{-3} p^3 + 2,95 p^2 + 1,8 \cdot 10^6 p + 1,599 \cdot 10^9}$$

The analysis of the frequency response curve and the step response (Fig. 4) allows us to conclude that it is possible to obtain the required displacement with the required force, without exceeding the time limit requirements for the transient process, which is less than 1 ms with the required 6.5 ms. In addition, the linearity of the frequency response curve in the frequency range from 0 to 100 Hz indicates the possibility of using this construction in marine diesel generators with a rotational speed of up to 6,000 rpm. However, due to strong internal damping of the piezoceramics, the oscillations of the actuator appear, which leads to irregularity of the fuel supply and increase wear of injection control unit spool.



a)



b)

Fig. 4. Frequency response curve (a) and the step response (b)

The use of the piezo drive positioning system with a PID controller [8] make it possible to reduce the amplitude of the oscillations (Fig. 5) with increasing transient time, but did not completely eliminate it.

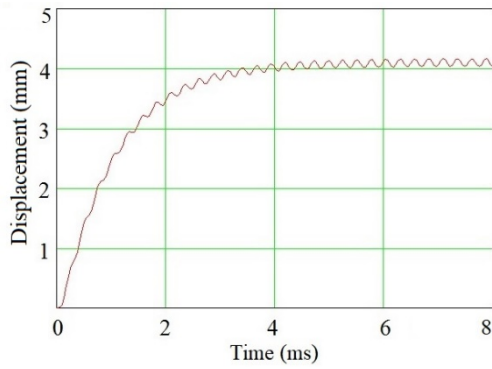


Fig. 5. Injection control unit spool movement with piezo drive by step change PID controller set point

Retrieval for possible options for an additional decrease in the amplitude of the oscillations has shown that the use of a fuzzy regulator leads to an almost complete elimination of oscillations in the electromechanical system [19]. It was a prerequisite for creation of a new automated piezo drive positioning system, based on the principles of fuzzy logic (Fig. 6).

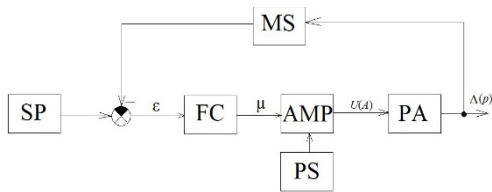


Fig. 6. Functional diagram of actuating mechanisms fuzzy logic positioning system: SP – set point, FC – fuzzy controller, AMP – amplifier, PS – power supply unit, PA – piezo actuator (control object), MS – displacement sensor, A is the amplitude, $U(A)$ is the voltage

Approbation of the proposed fuzzy positioning system on the mathematical model (Fig. 7) demonstrated its effectiveness. Thus, the oscillations of the spool of the fuel delivery control unit are almost eliminated.

So, the use of a piezoelectric actuator with a fuzzy positioning system will reduce the energy intensity of the engine and expand the range of possible fuel injection curve, increasing the energy and environmental efficiency of the diesel generator. And also the number and capacity of rails will be reduced.

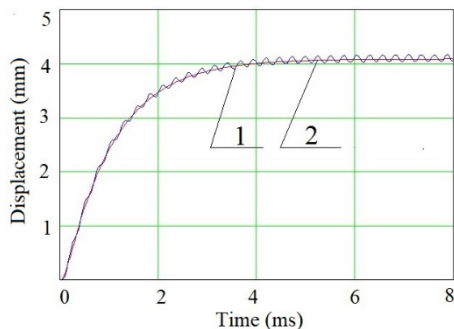


Fig. 7. Displacement of the injection control unit spool with piezo drive due to step change of set point for the systems: 1 – with PID controller; 2 – with fuzzy controller

Replacement of the electromagnetic drive of the SOGAV gas valve of dual-fuel diesel generators can be realized by using linear piezoelectric motors and piezoelectric washers stack. Construction of a valve with a linear piezoelectric motor drive (Fig. 8) and a construction with a stuck (Fig. 9), has been developed and patented.

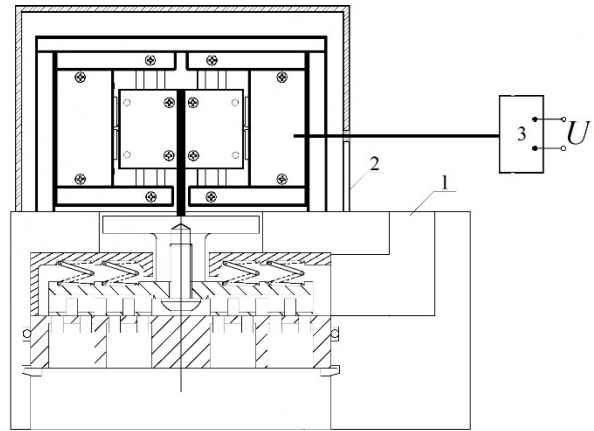


Fig. 8. Gas supply valve with a linear piezoelectric motor: 1 – gas supply valve; 2 – linear piezoelectric motor; 3 – control unit

The requirements for the gas valve drive displacement are lower than to the injection control unit drive, as shown in Table 1. This makes it possible to use a piezoelectric washers stack without an additional amplifier.

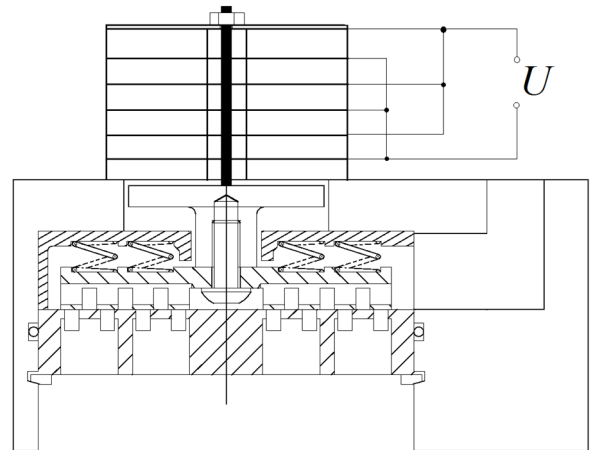


Fig. 9. The gas supply valve with piezoelectric washer stack

The market review showed that the company Physik Instrumente (PI) [18], offers manipulators that provide movement up to 0.3 mm. Therefore, by combining them in parallel, it is possible to obtain a displacement of up to 0.6 mm. PIC 151 material is used for their production, which has the following parameters: density $\rho - 7800 \text{ kg/m}^3$, relative permittivity $\epsilon - 2400$, piezoelectric charge coefficient $d_{33} - 500 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$, piezoelectric coupling factor $k_{33} - 0,69$, Young modulus $Y_{33} - 10 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, resistance $R_{in} - 50 \text{ } \Omega$, damping coefficient $k_d - 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$, elastic coefficient $K_y - 2.011 \cdot 10^8 \text{ N/m}$, inverse K_0 and direct K_p piezoelectric effect – 12.3 N/V and 12.3 V/N.

Model P-025.200 manufactured with PIC 151 material with

the following parameters was chosen for the study: displacement $\Delta - 300 \cdot 10^{-6}$ m, diameter - 0,025 m, length - 0,244 m, blocking force - 16000 N, electric capacity, $C_0 - 0.8 \cdot 10^{-5}$ F, resonant frequency - 5000 Hz, weight of the column is 0.93 kg.

Parallel connection allows to obtain the required movement without the use of additional gears, but increases the electrical capacity of the system by 2 times. So, the block diagram of the gas valve drive will have the form shown in Fig. 5 Therefore, the transfer function after substitution of the values will have the form,

$$W_{\Delta}(p) = \frac{12,3}{7,47 \cdot 10^{-4} p^3 + 0,93 p^2 + 1,7 \cdot 10^5 p + 2,011 \cdot 10^8} \cdot$$

The study of the developed positioning system with two parallel-connected stacks, with a PID and fuzzy regulator, confirmed the possibility of its application in marine diesel generators (Fig. 10).

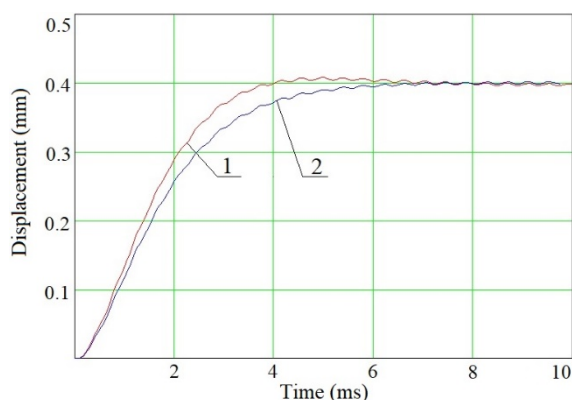


Fig. 10. Displacement of the gas valve plate with a step change of positioning system set point: 1 - with a PID controller; 2 - with fuzzy controller

CONCLUSIONS

The use of a piezo drive also will increase the life time of the gas valves from 5000 hours to 50,000, save its operating characteristics and reduce the operating costs for servicing the diesel generator.

Thus, the goal of the research was achieved.

REFERENCES

- [1] First converted LNG container carrier. – <http://seafarers.com.ua/1st-boxship-converted-to-lng-launched/13087/>
- [2] Carnival Corporation Begins Construction of World's First Fully LNG-Powered Cruise Ship. – <http://www.carnivalcorp.com/phoenix.zhtml?c=200767&p=irol-newsArticle&ID=2298791>
- [3] DieselFacts 2017/1. – <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/dieselfacts/dieselfacts-2017-1.pdf?sfvrsn=4>
- [4] Electro-hydraulic pumps increase engine efficiency // MER (Marine engineers review). – 2011. – № 10 (December/January). – P. 32.
- [5] Engine failure on container vessel Savannah Express and subsequent contact with linkspan / Marine Accident Investigation Branch. – Report No 8/2006. – March 2006.
- [6] Jussi Peurala. Model-based design, modelling and simulation of digital hydraulic gas admission valve. – Tampere University Of Technology, Master of Science Thesis. – March 2014.
- [7] V. Nikolskyi, V. Lisenko, M. Nikolskyi. Use of a piezoelectric valve for the gas supply valve of a two-fuel internal combustion engine // Automation of ship technical means: scien. and techn. ser. – 2017. – № 23. Odessa: NU "OMA". – P. 65 – 69.
- [8] Yevgen Ozhenko. Appraisal of capabilities piezoelectric actuator application for fuel injection control system effectiveness increasing // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering & Technologies. – №2. –2013. – p. 137-142
- [9] V. Lavrinenko, I.Kartashev, V. Piezoelectric motors. – Moscow: Energiya, 1980. – 112 p.
- [10] Sergey Petrenko. Piezoelectric engine in instrument making. – Kyiv: «Korniychuk», 2002. – 96 p.
- [11] Alexey Nikolskyi. Precise two-channel servo drives with piezocompensators: monograph / A.A. Nikolskyi. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. – 160 p. – ISBN5-283-00504-6.
- [12] Vitalii Nikolskyi. Intelligent engine fuel injection control system [Usefull model patent] / V.V. Nikolskyi, Y.M. Ozhenko. – MIIK (2009) G01N11/10. – № 43426; Published 10.08.2009, Bulletin № 15.
- [13] Vitalii Nikolskyi. Intelligent engine fuel injection control system [Usefull model patent] / V.V. Nikolskyi, Y.M. Ozhenko. – MIIK (2010) G01N11/10. – № 55019; Published 10.12.2010, Bulletin № 23.
- [14] Vitalii Nikolskyi. Intelligent engine fuel injection control system [Usefull model patent] / V.V. Nikolskyi, Y.M. Ozhenko. – MIIK (2009) G01N11/10. – № 54256; Published 10.11.2010, Bulletin № 21.
- [15] Vitalii Nikolskyi. Intelligent engine fuel injection control system [Usefull model patent] / V.V. Nikolskyi, Y.M. Ozhenko. – MIIK (2009) G01N11/10. – № 54257; Published 10.11.2010, Bulletin № 21.
- [16] Vitalii Nikolskyi. Intelligent engine fuel injection control system [Usefull model patent] / V.V. Nikolskyi, Y.M. Ozhenko. – MIIK (2009) G01N11/10. – № 54258; Published 10.11.2010. Bulletin № 15.
- [17] Piezoelectric Ceramics, Piezo Actuators, Piezo Motors, PZT Ceramics, Piezo Assemblies, Piezo Transducer. — www.piceramic.de.
- [18] Onishenko, O.A. Scientific substantiation and development of automated control systems for low-capacity refrigeration compressors: dis. ... doktor of technical science: 05.13.07. – Odessa, 2010. – 244 p.

Концепція Побудови Логічних і Арифметичних Пристроїв для Багатозначних Логік

Юрій Гунченко

кафедра математичного забезпечення комп'ютерних систем
Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова
Одеса, Україна
7996445@mail.ru

Світлана Кузніченко

кафедра інформаційних технологій
Одеський державний екологічний університет
Одеса, Україна
skuznichenko@gmail.com

Вікторія Левчук

кафедра математичного забезпечення комп'ютерних систем
Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова
Одеса, Україна
levchuk.viktoria@stud.onu.edu.ua

Олексій Олейник

кафедра комп'ютерної алгебри та дискретної математики
Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова
Одеса, Україна
db74c9@gmail.com

The Concept of Constructing Logical and Arithmetical Devices of Multivalued Logic

Yuri Gunchenko

dept. of Mathematical Support of Computer Systems
Odessa I.I.Mechnikov National University
Odessa, Ukraine
7996445@mail.ru

Svitlana Kuznichenko

dept. of Information Technologies
Odessa State Environmental University
Odessa, Ukraine
skuznichenko@gmail.com

Viktoria Levchuk

dept. of Mathematical Support of Computer Systems
Odessa I.I.Mechnikov National University
Odessa, Ukraine
levchuk.viktoria@stud.onu.edu.ua

Alexey Oleinik

dept. of The Computing Algebra and Discrete Mathematics
Odessa I.I.Mechnikov National University
Odessa, Ukraine
db74c9@gmail.com

Анотація—В роботі розглядається проблема розвитку елементної бази недвійкових обчислювальних систем. Показано, що елементи на двійковій логіці майже вичерпали потенціал розвитку. Запропоновано принципи побудови логіки, значність яких перевищує двійку. Запропоновано структура багатопорогового елемента багатозначної логіки (БПЕБЛ), за допомогою якої можна побудувати логічні та арифметичні елементи логік різної значності, запропоновано структурну схему елемента для трійкової симетричної логіки, наведено приклади побудови деяких елементів на її основі.

Abstract—The paper analyzes the modern development of binary elements and systems based on this elements. The paper shows that elements on binary logic have almost completely

exhausted the its potential of development. As a prospect of further development, the creation and use of fundamentally new solutions based on non-binary systems of calculation is offered. As one of the possible variants, a multi-threshold element of multivalued logic (MTEML) is offered, on the basis of which it is possible to create logical and arithmetic devices for multivalued logics. The features of MTEML are that it operates not the potential but the current values of the signals, and that it allows to forme any number of thresholds for distinguishing the input signals or their sums. In the paper the term of functions terlev is introduced, which describes the set of input signals, in detail the structure and principles of the operation of the MTEML and output signals that can be united to form the necessary functions are described. The structure, scheme solutions and principles of the use of MTEML with four symmetric thresholds for ternary

symmetric logic are offered. Examples of the use of MTEML are shown in the paper: the structure of the ternary half-adder, the principles of combining its outputs to obtain sum and carry signals are shown. The paper shows that the proposed systems and new solutions based on MTEML are much simpler than existing known analogs.

Ключові слова—багатозначна система числення; недвійкова обчислювальна система; трійкова симетрична система; трійковий напісуматор; елемент багатозначної логіки

Keywords— multivalued logic; non-binary computing system; ternary symmetric system; ternary half-adder; element of multivalued logic

I. ВСТУП

Вузли та блоки сучасних систем, як власне і будь-які обчислювальні системи будуються на двійковій логіці. У той же час існуючі системи вже практично вичерпали потенціал розвитку, не створюються принципово нові рішення на основі двійкової системи числення. Єдиний якісний шлях сучасного розвитку двійкових систем – вдосконалення технологій їх виробництва, шляхом зменшення фізичних розмірів напівпровідникових елементів. Однак, і цей варіант розвитку себе практично вичерпав.

Тому єдиним шляхом подальшого розвитку елементної бази обчислювальних систем є створення принципово нових технічних рішень на основі недвійкових, багатозначних логік.

Відома велика кількість різноманітних рішень на основі багатозначних систем числення, більшість з яких пов'язані з трійковою системою [1–8], так як вона найекономічніша. Відомі реалізації багатозначних логічних і арифметичних елементів, частіше створюються тільки під конкретну систему числення, зазвичай є різними для конкретних пристроїв однієї значності.

Науково-технічною проблемою створення систем багатозначної логіки є відсутність перевірених схемотехнічних рішень і укорінена думка про складність подібних систем. Дійсно, недвійкові елементи є більш складними, проте за рахунок зменшення кількості елементів і зв'язків між ними – недвійкові системи можуть виявитися більш простими, при цьому володіти великими логічною і арифметичною потужностями, простим формальним описом, знайти більш широке застосування.

II. БАГАТОПороГОВИЙ ЕЛЕМЕНТ БАГАТОЗНАЧНОЇ ЛОГІКИ

Одним з варіантів вирішення поставленої науково-технічної проблеми є реалізація багатозначних елементів на основі БПЕБЛ [9].

В роботі запропонована структура БПЕБЛ (рис. 1), на основі якої можна реалізувати логічні і арифметичні елементи для будь-якої багатозначної системи числення.

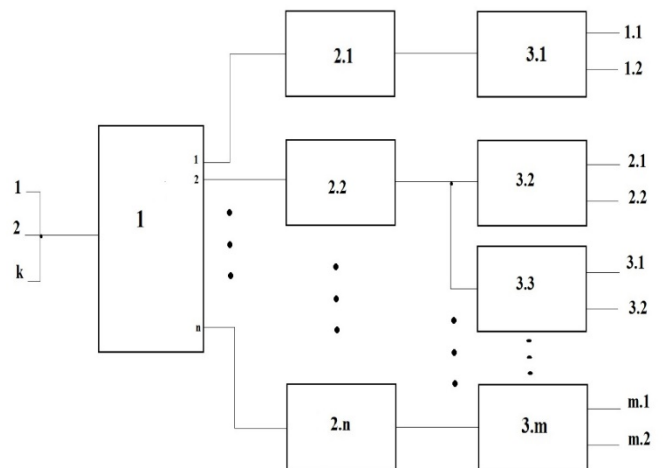


Рис. 1. Структурна схема багатопорогового елемента багатозначної логіки

1 – блок формування порогів, 2.1...2.n – емітерні повторювачі, 3.1...3.m – струмові перемикачі.

На вхід блоку формування порогів (БФП) подаються k вихідних шин попередніх елементів, а n виходів поєднуються з входами n емітерних повторювачів (ЕП) 2.1...2.n, вихід кожного з яких з'єднано з входом щонайменше одного струмового перемикача (СП) 3.1...3.m, кожний з яких має два виходи, причому виходи всіх m струмових перемикачів у сукупності формують вихідну шину БПЕБЛ.

Особливості запропонованої структури:

- Система оперує не з потенціальними, а зі струмовими значеннями сигналів, тому виходи БПЕБЛ можуть об'єднуватися у довільній кількості, але подаватися сигнал може тільки на вхід одного елемента.
- Можливість формування будь якої кількості порогів, які БПЕБЛ в змозі розрізнити.

Від кількості порогів БФП залежить кількість рівнів вхідної змінної, які БПЕБЛ в змозі розрізнити й, відповідно, розрядність змінної або складність операцій, які можуть виконуватися.

Запропонована система працює таким чином. На вхід БФП 1 поступають k дискретних струмових сигналів I_j з попередніх елементів. Вони можуть приймати одне з типових значень (наприклад, для двійкової логіки таких значень буде два: $I_j = +1, I_j = 0$; для трійкової симетричної системи таких значень буде три: $I_j = +1, I_j = 0, I_j = -1$).

БФП формує необхідну кількість порогів n . Його n виходів з'єднуються з входами емітерних повторювачів (ЕП) 2.1...2.n. В залежності від результату додавання вхідних струмів $\sum I_j$ активується частка виходів БФП, і відповідні їм ЕП. Активні ЕП формують сигнали на підключених до них струмових перемикачів (СП) 3.1...3.m. В залежності від вхідного сигналу кожний СП

формує стандартний струм I_{ϕ} на одному зі своїх двох виходів.

Виходи струмових перемикачів можуть об'єднуватися у довільних комбінаціях для формування необхідної логіки функціонування багатопорогового елемента багатозначної логіки.

III. ВИКОРИСТАННЯ БПЕБЛ ДЛЯ ТРІЙКОВОЇ СИМЕТРИЧНОЇ ЛОГІКИ

На прикладі трійкової симетричної логіки розглянемо перетворення, що виконуються багатопороговим елементом багатозначної логіки з чотирма симетричними порогоми $n = 4$ (відповідно 5 рівнями).

Структура можливої реалізації наведена на рис.2. На вхід БФП поступають k дискретних струмових сигналів I_j з вихідних шин попередніх елементів.

$$k = k_{+1} + k_{-1} + k_0,$$

де k_{+1} – число сигналів, поточні значення яких $+1$, k_{-1} – число сигналів, поточні значення яких -1 , k_0 – число сигналів, поточні значення яких 0 .

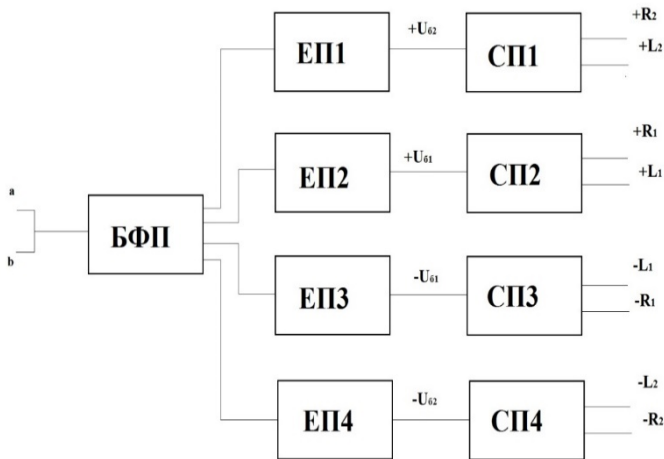


Рис. 2. БПЕБЛ з чотирма симетричними порогоми

В схемі чотири емітерних повторювачів (ЕП1...ЕП4) та чотири струмових перемикачів (СП1...СП4). На БФП може подаватися будь-яка кількість вхідних сигналів k . Значення напруг, що формуються на виходах ЕП і відповідно подаються на входи струмових перемикачів наведені у таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ II. Значення напруг на виходах ЕП1...ЕП4

Сума вхідних струмів	ЕП1 (+U62)	ЕП2 (+U61)	ЕП3 (-U61)	ЕП4 (-U62)
--	1	1	0	0
-	0	1	0	0
0	0	0	0	0
+	0	0	1	0
++	0	0	1	1

У таблиці 1 позначено «1» – активний сигнал (який впливає на СП), «0» – неактивний сигнал (який не впливає на СП) на виході відповідного ЕП.

Виходи СП, в залежності від вхідних сигналів, фактично від функції $terlev$, наведено у таблиці 2.

ТАБЛИЦЯ III. Вихідні сигнали СП1...СП4

Сума вхідних струмів	Вихідні сигнали струмових перемикачів							
	СП1		СП2		СП3		СП4	
$Terlev$	$+R_2$	$+L_2$	$+R_1$	$+L_1$	$-R_1$	$-L_1$	$-R_2$	$-L_2$
--	0	+	0	+	-	0	-	0
-	+	0	0	+	-	0	-	0
0	+	0	+	0	-	0	-	0
+	+	0	+	0	0	-	-	0
++	+	0	+	0	0	-	0	-

IV. РЕАЛІЗАЦІЯ БПЕБЛ З ЧОТИРМА СИМЕТРИЧНИМИ ПОРОГОМИ

На рис. 3 наведено електричну принципову схему реалізації БПЕБЛ з чотирма симетричними порогоми, яку можна використати для побудови майже будь-яких логічних і арифметичних елементів трійкової симетричної логіки.

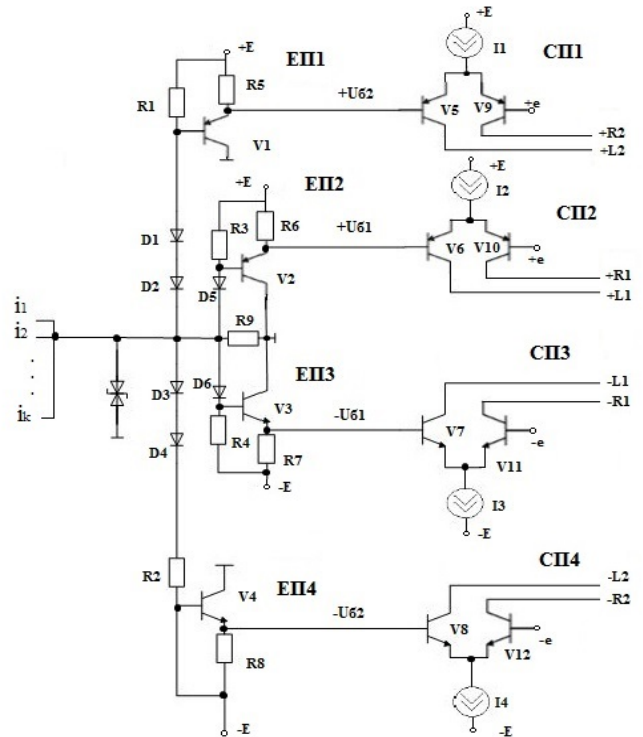


Рис. 3. Принципова схема БПЕБЛ з чотирма порогоми та чотирма виходами

БФП складається з обмежувача вхідної напруги $D1$, резистора навантаження $R9$, та схем формування порогів – $R1, D1, D2$ – для ЕП1, $R3, D5$ – для ЕП2, $R4, D6$ – для ЕП3, $R2, D3, D4$ – для ЕП4. Самі емітерні повторювачі зібрано на елементах – ЕП1 на $V1, R5$, ЕП2 на $V2, R6$, ЕП3 на $V3, R7$, ЕП4 на $V4, R8$. Вихідні сигнали ЕП формуються в залежності від вхідних сигналів згідно таблиці 1 і

подаються на СП. СП1 зібрано на транзисторах V5, V9 і джерелі струму I1. Відповідно СП2 на V6, V10, I2, СП3 на V7, V11, I3, СП4 на V8, V12, I4. +E, -E – джерела опорної напруги.

Якщо сигнал на вході СП активний («1» по таблиці 1), на виході L відповідного СП формується струм, інакше – струм формується на виході R. СП у сукупності мають 8 виходів, комбінація яких може формувати необхідні логічні або арифметичні функції.

За необхідністю, кількість порогів, струмових перемикачів та виходів може змінюватися для зручної побудови конкретних пристроїв.

V. ПРИКЛАДИ ПОБУДОВИ ПРИСТРОЇВ НА БПЕБЛ

Для побудови трійкового напівсуматора на основі БПЕБЛ запропоновано наступну структуру (рис. 4).

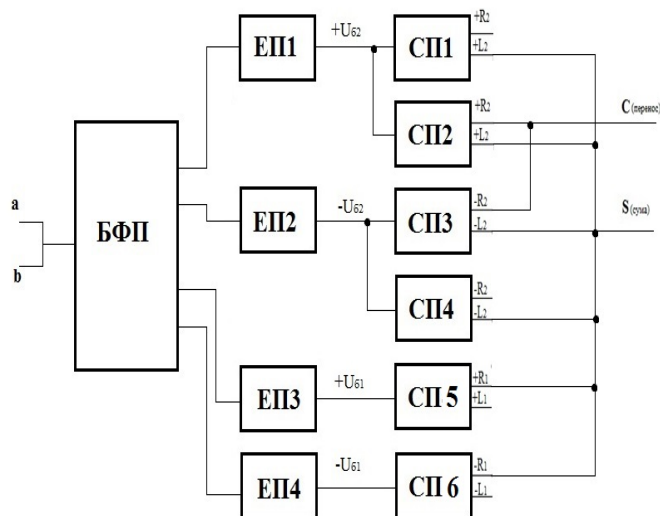


Рис. 4. Структура трійкового напівсуматора

БФП – блок формування порогів, ЕП1...ЕП4 – емітерні повторювачі, СП1...СП6 – струмові перемикачі.

В таблиці 3 наведено значення виходів струмових перемикачів СП1...СП6, в залежності від суми вхідних сигналів terlev.

ТАБЛИЦЯ IV. ЗНАЧЕННЯ ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ СТРУМОВИХ ПЕРЕКЛЮЧАЧІВ СП1...СП6

Сума вхідних струмів terlev	Вихідні сигнали струмових перемикачів							
	СП1, СП2		СП3, СП4		СП5		СП6	
	+R ₂	+L ₂	-R ₂	-L ₂	+R ₁	+L ₁	-R ₁	-L ₁
--	0	+	-	0	0	+	-	0
-	+	0	-	0	0	+	-	0
0	+	0	-	0	+	0	-	0
+	+	0	-	0	+	0	0	-
++	+	0	0	-	+	0	0	-

В таблиці 4 наведено значення виходів S – суми та C – переносу, а також показано яким чином вони отримуються з вихідних сигналів струмових перемикачів СП1...СП6.

ТАБЛИЦЯ V. ЗНАЧЕННЯ ВИХОДІВ СУМИ S ТА ПЕРЕНОСУ C ВІД ВХІДНИХ СИГНАЛІВ ТА ФУНКЦІЇ TRRLEV

a	b	terlev	S	2(+L ₂ (ab), -L ₂ (ab))	+R ₁ (ab), -R ₁ (ab)	C	+R ₂ (ab), -R ₂ (ab)
-	-	--	+	++	-	-	-
-	0	-	-	0	-	0	0
-	+	0	0	0	0	0	0
0	-	-	-	0	-	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	+	+	+	0	+	0	0
+	-	0	0	0	0	0	0
+	0	+	+	0	+	0	0
+	+	++	-	--	+	+	+

З табл. 4 випливає, що:

$$S=2(+L_2(ab), -L_2(ab)) + (+R_1(ab), -R_1(ab))$$

$$C=(+R_2(ab), -R_2(ab))$$

Таким чином, для отримання суми S поєднуємо виходи +L₂ СП1 та СП2, -L₂ СП3 та СП4, +R₁ СП5, -R₁ СП6, а для отримання переносу C поєднуємо виходи +R₂ СП2, -R₂ СП3.

Невикористані виходи струмових перемикачів можливо застосувати в інших частинах більш складних систем.

ВИСНОВКИ

На основі запропонованої структури БПЕБЛ отримано трійкові напівсуматор, суматор, логічні елементи, що реалізують операції I, АБО, універсальний пристрій для реалізації будь-яких трійкових одномісних операцій. Отримані пристрої мають набагато простішу архітектуру (наприклад, напівсуматор на основі БПЕБЛ містить 11 блоків, прототип – 38 блоків) та є більш логічно-потужними у порівнянні з відомими системами.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Пат. 2394366 Россия, МПК (2006.01) H03K19/00. Пороговый элемент трюичной логики и элементы на его основе. Оpubл. 10.07.2010.
- [2] Пат. 2461122 Россия, МПК (2006.01) H03K19/00. Узел трюичной схемотехники и дешифраторы-переключатели на его основе. Оpubл. 10.09.2012
- [3] Пат. 2510129 Россия, МПК (2006.01) H03K19/00. Трюичный Д-триггер (варианты). Оpubл. 20.03.2014
- [4] Пат. 2015130589 Россия, МПК (2006.01) H03K19/00. Трюичный реверсивный регистр сдвига. Оpubл. 27.05.2016
- [5] Пат. 19832101 Германия. Realisierung Ternärer Grundschaltungen in CMOS Technologie (Реализация трюичных базовых схем в КМОП-технологии), Josef von Stackelberg. Заявл. 17.07.1998, опубл. 27.01.2000
- [6] Пат. 2005080257 Япония. Схема КМОП-драйвера, а также схема КМОП-инвертора / Хидэки Фукуда. Заявл. 04.09.2003, опубл. 24.03.2005.
- [7] Пат. 2278469 Р.Ф. Логическое устройство "ИЛИ" / Попов Н.Д., Лукашенко В.А. Заявл. 01.11.2004, опубл. 20.06.2006.
- [8] Пат. 2287895 Р.Ф. Логическое устройство "Отрицание" (варианты) / Попов Н.Д., Лукашенко В.А. Заявл. 01.11.2004, опубл. 20.06.2006.
- [9] Пат. UA 118735 Україна, МПК (2017.01) H03K19/00. Багатопороговий елемент багатозначної логіки / Гунченко Ю.О. Заявка 23.03.2017, опубл. 28.08.2017.

Способи Забезпечення Якості та Балансування Навантаження в Комп'ютерних Мережах

Катерина Шевчук

Кафедра обчислювальної техніки
Факультет інформаційних технологій
та комп'ютерної інженерії
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
kateryna.shevchuk092@gmail.com

Сергій Захарченко

Кафедра обчислювальної техніки
Факультет інформаційних технологій
та комп'ютерної інженерії
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
zahar@vntu.net

Methods of Quality Assurance and Load Balancing in Computer Networks

Katerina Shevchuk

Department of Computer Engineering
Faculty for Information Technologies and Computer
Engineering
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsya, Ukraine
kateryna.shevchuk092@gmail.com

Sergiy Zakharchenko

Department of Computer Engineering
Faculty for Information Technologies and Computer
Engineering
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsya, Ukraine
zahar@vntu.net

Анотація—Наведено параметри, які дозволяють проаналізувати трафік, що проходить у комп'ютерній мережі, можливий вплив на них для балансування трафіку та прогнозування перевантажень в каналах зв'язку мереж для підвищення захищеності, якості передачі інформації та ефективності функціонування комп'ютерних мереж. Запропоновані способи маршрутизації для оптимального розподілу трафіку в мережах даних також можуть забезпечити достатній рівень якості сервісу (QoS) для користувачів, що є однією із глобальних проблем при передачі трафіку. Основна вимога QoS в більшості випадків є уникнення верхніх меж затримки на шляху. Визначено основні проблеми при передачі трафіку, такі як нерівномірне навантаження мережі. Для ефективного використання ресурсів мереж, пропонується виконувати перерозподіл пакетів при передачі трафіку на різні маршрути у способи, які дозволяють уникнути коливального ефекту в динамічній мережі.

Abstract- The work presents options that allow you to analyze the traffic that passes through the computer network, the possible impact on traffic balancing and forecasting of overloads in networks of communication networks for increase of security, quality of transmission of information and efficiency of functioning of computer networks. The proposed methods of routing for optimal traffic distribution in data networks can also provide a sufficient level of quality of service (QoS) for users, which is one of the global problems in transmitting traffic. The

basic requirement of QoS in most cases is to avoid the upper limits of the delay in the path. The main problems in transmitting traffic, such as uneven network load, are identified. For efficient use of network resources, it is proposed to redistribute packets when transmitting traffic to different routes in ways that avoid the oscillatory effect in a dynamic network.

Ключові слова: трафік, оптимізація потоку, динамічність, балансування, якість передачі трафіку, комп'ютерна мережа, альтернативні маршрути. .

Keywords: traffic, stream optimization, dynamics, balancing, traffic quality, computer network, alternative routes.

I. ВСТУП ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

У багатоканальних мережах дуже часто трапляється ситуація за якої певний зв'язок недостатньо використовується там, де основна магістральна лінія може мати перевантаження зв'язку. Виникнення такого стану мережі або її окремих каналів відбувається тому, що протоколи маршрутизації IGP при виявленні найкоротшого шляху надсилають трафік на нього, не враховуючи інші параметри динамічної мережі, такі як вимоги до трафіку, завантаженість каналів тощо.

Traffic Engineering (TE) - це техніка, яка допомагає маніпулювати потоком – пакетами інформації, щоб досягти більш рівномірного розподілу трафіку по всім

маршрутам та шляхам. Вміння «примушувати» трафік прямувати певним шляхом, дозволяє максимально використовувати існуючу ємність мережі, спрощуючи, одночасно, передачу трафіку.

Проблематичне використання стандартних протоколів маршрутизації полягає в тому, що вони не враховують максимально всі можливі параметри мережі в режимі реального часу, не здійснюють постійного контролю за станом мережі.

Як дистанційно-векторні протоколи – RIP, так і протоколи з урахуванням стану каналів (OSPF, IS-IS, NLSF) передають інформацію по вузлам мережі, використовуючи виявлені найкоротші шляхи з відповідним урахуванням певних метрик. Обраний протоколами стану каналів найкоротший шлях можна вважати більш раціональним, якщо в розрахунок приймається до уваги номінальна пропускна здатність каналів зв'язку, величина та наявність затримок в мережі, або менш раціональним, якщо в основу розрахунку найкоротшого шляху покладено лише кількість проміжних вузлів між вузлом відправлення та вузлом місця призначення.

Крім того, миттєве реагування на негативні зміни в роботі мережі з метою прийняття рішення з перенаправлення трафіку дозволить вирішити проблему нерівномірного навантаження.

Інжиніринг трафіку (TE) допомагає ефективніше використовувати мережеві ресурси, зокрема створити умови балансування навантаження, запобігання перевантаженню та середньої затримки.

Аналіз досліджень показав, що проблему балансування трафіку та забезпечення якості його передачі в повному обсязі не вирішено.

На основі запропонованої моделі мережевого трафіку [1] функціональна залежність розміру буфера від пропускної здатності каналу і параметрів вхідного трафіку дозволяє при заданих розмірах буферної пам'яті і пропускної здатності каналу визначити гранично допустиме навантаження в мережі.

Одним із способів підвищення рівня якості обслуговування трафіку є вибір найбільш раціонального шляху для його направлення через мережу.[2]

II. ЗАСТОСУВАННЯ ЗАХОДІВ ВПЛИВУ НА ТРАФІК, ЩО ПЕРЕДАЄТЬСЯ В МЕРЕЖІ

Для будь-яких впливів на потоки інформації з метою їх оптимізації необхідної та першочерговою задачею є визначення параметрів які характеризують трафік. Подальший аналіз дасть можливість дізнатися, на які параметри можна вплинути.

Застосування обмежень на параметри процесів керування в мережах, що регулюються на основі методів прийняття рішення вибирається таким чином, щоб забезпечити максимальне значення показників: часу реакції, пропускної здатності та мінімальне значення затримки передачі пакетів, урівноваження та зниження коефіцієнту завантаження каналу.

Як зазначалося раніше, протоколи маршрутизації робота яких зосереджена на передачі трафіку по найкоротшому шляху, як наслідок отримуємо перевантаження основного шляху, а інші мережеві вузли простоюватимуть в режимі очікування. Типовим прикладом ситуації неефективного використання ресурсів є мережа з топологією, зображена на рис.1. Трафік буде рухатися по маршруту 1-4-7, не дивлячись на існування альтернативних маршрутів 1-2-5-7 та 1-3-6-7. Більше того, хоч і основний маршрут є найкоротшим з точки зору кількості переходів через вузлові маршрутизатори, це абсолютно не означає, що він є оптимальним, оскільки не враховані ні сумарна швидкість навантаження на канали, ні пропускна спроможність каналу. При паралельному використанні всіх маршрутів, ситуаційна картина навантаження буде більш зрівноважена.

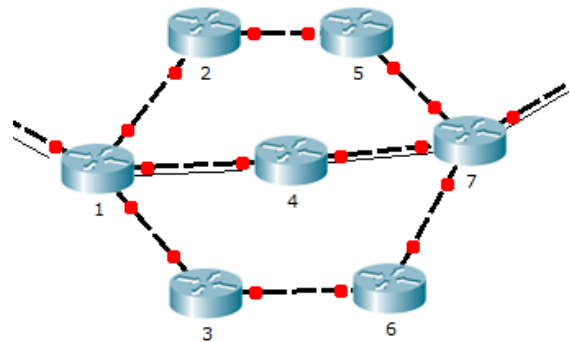


Рис. 1. Неефективне використання ресурсів мережі

Наразі, для повноти проведення аналізу необхідно виділити основні характеристики мереж. В загальному мережа характеризується такими параметрами:

- кількість інформації (кількість передаваного потоку; швидкість передачі та кількість трафіку, що очікує на передачу).
- заходи з оцінки якості (наскільки швидко, оптимально та без втрат відбувається використання ресурсів для передачі трафіку).
- класифікаційні заходи (який вид трафіку передається).

Кількість інформації характеризується обсягом даних, часовими можливостями та пропускною спроможністю.

Обсяг даних виражається у визначенні сумарної швидкості потоку, що представляє собою вимірювання кількості трафіку, який транспортується через певну точку в визначений період часу.

Зміна ситуації в мережі при передачі трафіку відбувається у кожен момент часу. Динаміка передачі даних залежить не лише від швидкості (інтенсивності) потоку, а й від механізму руху інформації, зокрема маршруту трафіку.

Вимірювання потоку трафіку може мати різні інтерпретації, в залежності від умов, що існують вище або

нижче за місцем вимірювання, а також безпосередньо в місцях проведення виміру.

Розглянемо ситуацію, коли в мережі немає заторів, які обмежують швидкість потоку передачі трафіку, тоді швидкість потоку дорівнює існуючій кількості трафіку. В іншій ситуації, коли в мережі сформувалась черга, то вимірюваний потік виражається у величині пропускної здатності вузьких місць в цьому потоці.

В такому випадку доцільно визначити поняття «попиту» в комп'ютерних мережах. Отже, попит - це обсяг трафіку або швидкості потоку, що надходить, з певним набором умов проходження по мережі. Коли обмеження пропускної спроможності мережі відсутнє, фактичний коефіцієнт потоку в мережі буде відповідати попиту. Однак, у випадках, коли кількість інформації, яку необхідно передати через мережу, перевищує пропускну спроможність самої мережі, виникає ситуація формування черги, фактичні вимірювання будуть меншими ніж попит на передачу трафіку.

III. ВИЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ СМУГОЮ ПРОПУСКАННЯ ЗА АЛЬТЕРНАТИВНИМИ МАРШРУТАМИ

Для оптимального прийняття рішень підсистеми керування і аналізу трафіку, необхідно передбачити можливе навантаження в мережі на наступному етапі передачі інформації, а не після виникнення заторів в мережі. Виявлення збільшення потоку інформації можливо на попередніх вузлах мережі, тоді пакети, які будуть надходити заздалегідь будуть розподілені на інші гілки мережі, в залежності від їх пропускної спроможності та навантаження.

Коли трафік буде розподілений по іншим каналам (альтернативним маршрутам), на цьому етапі буде важливо оцінити очікуваний попит на альтернативний маршрут.

На жаль, значення попиту на передачу трафіку важко отримати безпосередньо. Якщо перевантаження існує або в напрямку трафіку вище точки відведення по мережі або по альтернативному маршруту, виміряна швидкість потоку буде нижча за потенційний попит.

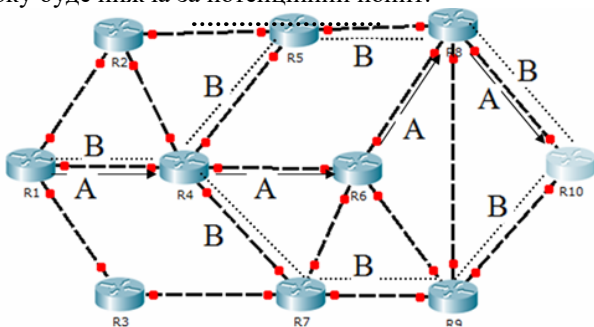


Рис. 2. Демонстрація фрагменту мережі з альтернативними маршрутами: А – напрямок трафіку по ланці, де виникло перевантаження на переході R4-R6-R8; В – напрямок трафіку в мережі – альтернативного маршруту.

На рис. 2 зображено фрагмент мережі з виявленням затримок та перерозподіл трафіку на незавантажений альтернативний маршрут.

Так, припустимо, що в мережі на маршруті А (R1-R4-R6-R8-R10) на переході R4-R6-R8 виникло перевантаження, реакція на це – перерозподіл трафіку на альтернативні маршрути В : R1-R4-R5-R8-R10 та R1-R4-R7-R8-R10.

Технологія інжинірингу трафіку здійснює управління смугою пропускання, яка враховує максимальну пропускну спроможність, мінімальну завантаженість і балансування навантаження в мережі. ТЕ направляє трафік по каналах, де доступна пропускну здатність мережі. Інжиніринг трафіку з метою балансування навантаження може зменшити максимальне використання лінії зв'язку і підвищити ефективність пропускної здатності. Через те, що значна затримка може виникнути в переповнених з'єднаннях, зменшення кінцевої затримки може бути досягнуто як побічний результат балансування навантаження.

Завдання інжинірингу трафіку у визначенні маршрутів проходження потоків трафіку через мережу, тобто визначається точна послідовність проміжних вузлів, комутаторів та інтерфейсів. При цьому вибір шляху повинен відбуватися так, щоб ресурси мережі були навантажені рівномірно, а кожен потік був забезпечений достатнім рівнем якості обслуговування (QoS).

IV. ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАДАЧІ ІНЖИНІРИНГУ ТРАФІКУ

Визначаємо параметри та формули, якими будемо оперувати для розв'язання задачі Т1.

Так, λ (п/с) – сумарна швидкість з урахуванням всіх потоків через певний канал.

- Визначаємо пропускну спроможність каналу у можливій кількості пакетів, переданих за 1 с:

$$\mu V = V/N_{\text{пак}} \quad (1)$$

де V – пропускну спроможність каналу в бітах за секунду (б/с), $N_{\text{пак}}$ – середній розмір пакету.

- Для проведення відносного аналізу загальної ситуації в мережі застосовується коефіцієнт завантаження каналу - ρ . Так, він прямо пропорційно залежить від сумарної швидкості потоку, середнього розміру пакету та обернено пропорційно від пропускної спроможності каналу.

$$\rho = \lambda/\mu V \quad (2)$$

- Розраховуємо затримку пакетів у каналі – T, як зворотну величину різниці пропускної спроможності та сумарної швидкості, для цього скористаємось формулою (3) при дотриманні умови $\mu V \neq \lambda$

$$T = \frac{1}{(\mu B - \lambda)} \quad (3)$$

- Визначаємо M - масштабний коефіцієнт, відсоток трафіку, що проходить через канал із співвідношенні до всього трафіку досліджуваного фрагменту мережі.

$$M = \lambda / \sum_n \lambda \quad (4)$$

де n – кількість з'єднань між маршрутизаторами (ребер між вершинами).

- Для розрахунку W - зваженої затримки пакетів в каналі скористається добутком (4) масштабного коефіцієнту та затримки пакетів в каналі:

$$W = M \times T \quad (5)$$

- З метою оцінки загального стану рівня незавантаженості каналів скористаємось коефіцієнтом простою - τ :

$$\tau = \mu B / \lambda \quad (6)$$

- Визнаємо ефективність використання мережі в межах кожного окремого каналу як відношення коефіцієнту завантаження до коефіцієнту простою:

$$\varepsilon = \rho / \tau \quad (7)$$

Так і в межах масштабної характеристики всіх мережі:

$$\varepsilon_M = \frac{\sum_n \rho}{\sum_n \tau} \quad (8)$$

V. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧІ ІНЖИНІРИНГУ ТРАФІКУ

Технологія інжинірингу трафіку здійснює управління смугою пропускання, яка враховує максимальну пропускну спроможність, мінімальну завантаженість і балансування навантаження в мережі. ТЕ направляє трафік по каналах, де доступна пропускна здатність мережі. Інжиніринг трафіку з метою балансування навантаження може зменшити максимальне використання лінії зв'язку і підвищити ефективність пропускну здатності. Через те, що значна затримка може виникнути в переповнених з'єднаннях, зменшення кінцевої затримки може бути досягнуто як побічний результат балансування навантаження.

Проведемо експериментальні розрахунки вищенаведених параметрів за принципом теорії масового обслуговування [3]. Для початку необхідно визначити

початкові умови задачі: топологію мережі, пропускну спроможності каналів (рис. 3), потоки та кількість пакетів в них (табл. 1).

Вирішення задачі інжинірингу трафіку розглянемо на прикладі мережі, зображеної на рис. 3.

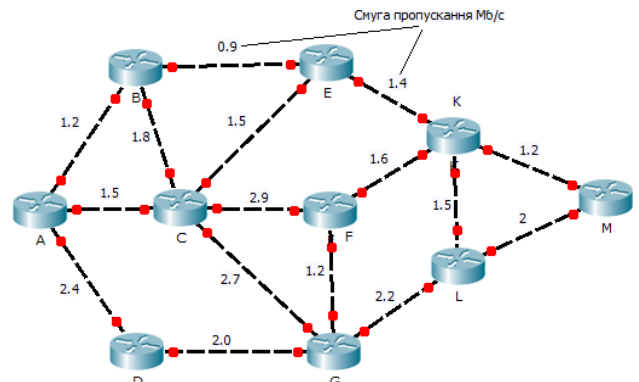


Рис. 3. Топологія мережі з визначеними смугами пропускання.

На основі топології досліджуваної комп'ютерної мережі, в якості параметрів зазначаємо потоки та кількості пакетів, які проходять через них. Ці вхідні дані, необхідні для аналізу та подальших розрахунків, заносимо до табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1. ПОЧАТКОВІ ДАНІ ЗАДАЧІ ІНЖИНІРИНГУ ТРАФІКУ

№	Потік	Пакети (к-сть)	№	Потік	№
1	ABEK	19	13	ECFKM	28
2	ABCF	8	14	DGLM	21
3	ABCE	9	15	CFGLM	4
4	ACEK	5	16	ECGLM	15
5	ACFK	9	17	ECFKL	23
6	ACFGL	12	18	BCEKM	9
7	ACGL	5	19	BCFKM	11
8	ADGF	24	20	BCGL	16
9	ADGL	17	21	FKLG	12
10	ADGC	8	22	DACF	23
11	BADGL	3	23	DGCE	8
12	CGLM	10	24	FCBE	11

Величини вихідних параметрів та розрахунків занесемо до табл. 2.

ТАБЛИЦЯ II. – РОЗРАХУНОК ОСНОВНИК ПАРАМЕТРІВ

Рєбро	B (Mb/s)	Λ (p/s)	μB (p/s)	ρ, %	T (ms)	M	W(ms)
AB	1,20	39	103	37,86	15,63	0,04	0,625
AC	1,50	54	128	42,19	13,51	0,055	0,748
AD	2,40	75	205	36,59	7,69	0,076	0,591
BE	0,90	30	77	38,96	21,28	0,030	0,654
BC	1,80	64	154	41,56	11,11	0,065	0,729
DG	2,00	81	171	47,37	11,11	0,083	0,923
CE	1,50	97	128	75,78	32,26	0,099	3,209
CF	2,90	129	248	52,02	8,40	0,132	1,111
CG	2,70	62	231	26,84	5,92	0,063	0,376
FG	1,20	40	103	38,83	15,87	0,041	0,651
EK	1,40	33	120	27,50	11,49	0,033	0,389
FK	1,60	83	137	60,58	18,52	0,085	1,576
GL	2,20	115	188	61,17	13,70	0,117	1,615
KL	1,50	35	128	27,34	10,75	0,035	0,385
KM	1,20	28	103	27,18	13,33	0,028	0,382
LM	2,00	10	171	5,85	6,21	0,010	0,063
Всього пакетів		975		6,48	Сумарна затримка		14,03
Розмір пакету		1,5			Середня затримка		0,8771

Якщо проаналізувати коефіцієнт завантаження каналу, на маршрутах, який включає ланку CE, бачимо високий рівень завантаження мережі – 75,78 %. Серед наборів потоків знайдемо такі, котрі прямують від однієї тієї ж початкової точки точок до того ж самого місця призначення через ланку CE. Так, таким набором є – ECFKM (28 пак) та ECGLM (15 пак). Проаналізуємо маршрути за пропускною спроможністю мережі та перерозподіємо трафік для врівноваження.

Розрахуємо пропускні спроможності каналів для ECFKM та ECGLM:

$$V_{ECFKM} = 1,5 \text{ Mb/s} + 2,9 \text{ Mb/s} + 1,6 \text{ Mb/s} + 1,2 \text{ Mb/s} = 7,2 \text{ Mb/s}$$

$$V_{ECGLM} = 1,5 \text{ Mb/s} + 2,7 \text{ Mb/s} + 2,2 \text{ Mb/s} + 2 \text{ Mb/s} = 8,4 \text{ Mb/s}$$

Параметри мережених потоків дозволяють не лише визначити завантаження системи в цілому, а й після впровадження певних змін досягнути покращення результату передачі інформації з меншими затримками, з мінімальним перевантаженнями мережених потоків та рівномірного розподілу

У маршрутах ECFKM - 28 пакетів, а ECGLM - 15 пакетів, останній маршрут має більшу пропускну спроможність, тому частину пакетів маршруту ECFKM пере направимо по маршруту ECGLM, отримаємо ECFKM - 18 пакетів, а ECGLM - 25 пакетів. Зміни занесемо до табл. 3.

ТАБЛИЦЯ III. – РОЗРАХУНОК ОСНОВНИК ПАРАМЕТРІВ ПІСЛЯ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ПАКЕТІВ

Рєбро	λ(p/s)	ρ, %	T(ms)	M	W(ms)
AB	39	37,86%	15,63	0,0404145	0,6314767
AC	54	42,19%	13,51	0,0559585	0,7561966
AD	75	36,59%	7,69	0,0777202	0,5978477
BE	30	38,96%	21,28	0,0310881	0,6614486
BC	64	41,56%	11,11	0,0663212	0,7369027
DG	81	47,37%	11,11	0,0839378	0,9326425
CE	97	75,78%	32,26	0,1005181	3,2425205
CF	119	47,98%	7,75	0,1233161	0,9559385
CG	72	31,17%	6,29	0,0746114	0,4692541
FG	40	38,83%	15,87	0,0414508	0,6579488
EK	33	27,50%	11,49	0,0341969	0,3930677
FK	73	53,28%	15,63	0,0756477	1,1819948
GL	125	66,49%	15,87	0,1295337	2,0560901
KL	35	27,34%	10,75	0,0362694	0,3899939
KM	18	17,48%	11,76	0,0186528	0,2194453
LM	10	5,85%	6,21	0,0103627	0,0643646
Всього пакетів	965	6,36	Сумарна затримка		13,947133
Розмір пакету	1,5		Середня затримка		0,8716958

ВИСНОВКИ

Дослідження методів впливу на передачу трафіку та параметрів в комп'ютерній мережі є найбільш необхідним для забезпечення якості, балансування та оптимізації передачі інформації. Особливо важливу роль це відіграє для роботи сервісів, що забезпечують передачу мультимедійного трафіка і трафіка реального часу.

Таким чином, актуальною є задача розробки та аналізу методів балансування навантаження та інжинірингу трафіку, які враховують характеристики пакетів інформації і завантаження кожного вузла та всієї системи загалом. Запропонований спосіб визначення альтернативних маршрутів та перерозподіл частини трафіку з більш завантаженої гілки на менш завантажену, дозволяє вирішити проблему надмірного навантаження на визначений найкоротший та оптимальний шлях..

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1]] L. Kyrychenko, Algoritm preduprezhdeniya peregruzki komp'yuternoy seti putem prognozirovaniya sredney dliny ocheredi / L. O. Kyrychenko, T. A. Radyvylova, A. V. Storozhenko // Kibernetika ta systemnyy analiz: Zbirnyk naukovykh prats'. - Kh.: Kharkiv's'kyi universytet povitryanykh syl imeni Ivana Kozheduba, 2007. – Vyp. 3 (15). – S. 94-97.
- [2] Kucheryavyy Ye.A. Upravleniye trafikom i kachestvo obsluzhivaniya v seti Internet. – SPb.: Nauka i Tekhnika, 2004. – 336 s.
- [3] Rozenberg, V. YA. Chto takoye teoriya massovogo obsluzhivaniya [Tekst] / V. YA. Rozenberg, A. I. Prokhorov. – M. : Sovetskoye radio, 1962.– 254 s.
- [4] Tiwari A., Sahoo A. A local coefficient based load sensitive routing protocol for providing QoS // IEEE International conference on parallel and distributed systems. – Volume 1. – 2006.

Структурно-Параметричний Синтез Згорткових Нейронних Мереж

Віктор Синеглазов
кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих
комплексів
Національний авіаційний університет
Київ, Україна
svm@nau.edu.ua

Олена Чумаченко
кафедра технічної кібернетики
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського», Київ, Україна
chumachenko@tk.kpi.ua

Structural-Parametric Synthesis of Convolution Neural Networks

Victor Sineglazov
dept. of Aviation Computer-Integrated Complexes
National Aviation University
Kyiv, Ukraine
svm@nau.edu.ua

Olena Chumachenko
dept. of Technical Cybernetic,
National Technical University of Ukraine
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine
chumachenko@tk.kpi.ua

Анотація—Розглянуто структурно-параметричний синтез згорткових нейронних мереж для розв'язання задачі обробки зображень. Наведено класифікацію типів шарів, які формують згорткові нейронні мережі з визначенням їх функціонального призначення та математичних моделей, які їх описують. Детально розглянуто процедуру ініціювання вагових коефіцієнтів. Проаналізовано методи запобігання перенавантаженню згорткових нейронних мереж. Показано, що найбільшу перспективу має метод виключення. Визначення найбільш значущих з точки зору ефективності параметрів згорткової нейронної мережі проводилося в результаті експерименту над комбінованою мережею, яка складається з згорткової нейронної мережі, класифікатора та розгорткової нейронної мережі що дозволяє не тільки розпізнавати елементи зображення, а й помічати на ньому розпізнанні елементи. Для експерименту використовувалася база даних MNIST (база даних зразків рукописного написання цифр). Наведено план проведення чисельного експерименту з метою виявлення параметрів згорткових нейронних мереж, які найбільше впливають на результати розв'язання задачі їх структурно-параметричного синтезу. В якості алгоритму оптимізації запропоновано використання генетичного алгоритму, для реалізації якого визначено розмір і структуру хромосоми. Визначено вид операторів генетичного алгоритму та розмір популяції. Наведено приклад побудови оптимальної згорткової нейронної мережі за критерієм точності.

Abstract—Structural-parametric synthesis of convolutional neural networks for solving the problem of image processing is considered. Classification of types of layers that form

convolutional neural networks with the definition of their functional purpose and mathematical models that describe them are given. The procedure of weight coefficients initialization is considered in detail. Methods of overfitting avoidance of convolutional neural networks are analyzed. It has been shown that dropout has the greatest prospect. The definition of the most significant parameters of convolutional neural networks by the criterion of their effectiveness was carried out as a result of the experiment on a combined network consisting of a convolutional neural network, a classifier and a deconvolutional neural network, that allows not only to recognize the elements of the image, but also to mark the recognition elements on it. For the experiment, it was used database MNIST (database of samples of digits handwritten writing). The plan of the numerical experiment design with the purpose of convolutional neural networks parameters determination that most influence on the structural-parametric synthesis problem solution results is given. As an algorithm of optimization, it is proposed a genetic algorithm for the realization of which the chromosome size and structure is determined. The type of genetic algorithm operators and the size of the population are determined. An example of an optimal convolutional neural network constructing according to the criterion of accuracy is given.

Ключові слова—згорткова нейронна мережа; структурно-параметричний синтез; алгоритм оптимізації

Keywords—convolution neural network; structural-parametric synthesis; genetic optimization algorithm

I. ВСТУП

Згорткова нейронна мережа (ЗНМ) – це особлива архітектура штучної нейронної мережі, що імітує особливості зорової області кори головного мозку.

Згорткова нейронна мережа будується на основі операції згортки, що дозволяє навчати ЗНМ на окремих частинах зображення, ітераційно збільшуючи локальну область навчання окремого ядра згортки.

Припустимо, що $x(t)$ це деяка функція при $t \in \mathfrak{R}$.

Тоді згортка $x(t)$ з ядром $k(t)$ це функція $S(t)$, яка визначається як

$$S(t) = (x \cdot k)(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)k(t - \tau)d\tau. \quad (1)$$

Якщо функція дискретна, тобто $t \in Z$, то

$$S(t) = (x \cdot k)(t) \equiv \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} x(\tau)k(t - \tau). \quad (2)$$

Якщо $I(i, j)$ – зображення, то згортку зображення $I(i, j)$ з ядром $K(t, s)$ буде записано як

$$S(i, j) = (I \cdot K)(i, j) \equiv \sum_{m=0}^i \sum_{n=0}^j I(m, n)K(i - m, j - n), \quad (3)$$

де m, n – поточне положення ядра відносно зображення $I(i, j)$ з розміром $i \times j$.

Ключовим моментом в розумінні ЗНМ є поняття так званих спільних ваг, тобто частина нейронів деякого шару нейронної мережі може використовувати одні і ті самі вагові коефіцієнти. Нейрони, що використовують одні й ті самі ваги, об'єднуються в карти ознак, а кожен нейрон карти ознак пов'язаний з частиною нейронів попереднього шару. При обчисленні мережі виходить, що кожен нейрон виконує згортку деякої області попереднього шару (яка визначається множиною нейронів, пов'язаних з даними нейроном). Шари нейронної мережі, побудовані описаним чином, називаються згортковими шарами. Крім згорткових шарів в згортковій нейронній мережі можуть бути шари агрегації (субдискретизації), що виконують функції зменшення розмірності карти ознак, і повнозв'язані шари (класифікатор, який знаходиться на виході мережі). Згорткові шари та шари агрегації можуть чергуватися, найчастіше шари агрегації розміщують за шарами згортки.

Загальний вигляд ЗНМ показано на рис. 1.

Комбіновану мережу, яка складається з згорткової нейронної мережі, класифікатора та розгорткової нейронної мережі наведено на рис. 2. Така архітектура дозволяє не тільки розпізнавати елементи зображення, а й помічати на ньому розпізнанні елементи. Розгорткова нейронна мережа є дзеркальним відображенням згорткової нейронної мережі.



Рис. 1. Загальний вигляд згорткової нейронної мережі.

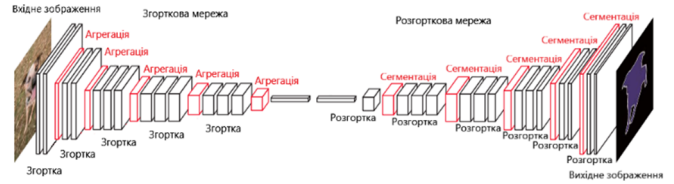


Рис. 2. Комбінована згорткова нейронна мережа.

Навчання згорткової нейронної мережі можна розподілити на чотири етапи: ініціалізація вагових коефіцієнтів, пряме проходження еталонних вхідних сигналів, розрахунок функції похибки, обернене поширення похибки та оновлення вагових коефіцієнтів.

Першим етапом навчання згорткової мережі є ініціювання вагових коефіцієнтів. В загальному випадку, якщо в згортковій нейронній мережі використовуються шари згортки, агрегуючі та повнозв'язані шари, то необхідно ініціювати лише ядра згортки згорткових шарів та повнозв'язані шари. Якщо в мережі використовуються також розгорткові шари, то необхідно також ініціювати їх вагові коефіцієнти. Для навчання згорткової нейронної мережі в даній роботі використовується нормалізовану ініціалізацію [5] – [7], яка носить назву ініціалізація Glorot

$$W \cong U \left[-\frac{\sqrt{6}}{\sqrt{n_j + n_{j+1}}}, \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{n_j + n_{j+1}}} \right], \quad (4)$$

де U – рівномірне розподілення на відрізку; n_j – кількість нейронів на поточному шарі мережі; n_{j+1} – кількість нейронів на наступному шарі мережі. Використання нормалізованої ініціалізації приводить до зниження насичення нейронів й сигнал помилки поширюється значно краще.

Метод нормалізованої ініціалізації вагових коефіцієнтів було адаптовано для функції активації ReLU, коли початкові вагові коефіцієнти W ініціюють наступним чином:

$$W \cong U \left[-\frac{2}{n_j}, \frac{2}{n_j} \right], \quad (5)$$

де U – рівномірне розподілення на відрізку; n_j – кількість нейронів на поточному шарі мережі. Метод нормалізованої ініціалізації вагових коефіцієнтів дозволив досягати якісного навчання глибоких нейронних мереж без необхідності використовувати попереднє навчання без учителя.

Для навчання ЗНМ використовується метод зворотного поширення похибки.

Однією із серйозних проблем навчання ЗНМ є проблема перенавчання, коли модель добре пояснює тільки приклади з навчальної вибірки, адаптуючись до навчальних прикладів, замість того щоб вчитися класифікувати приклади, які не брали участі в навчанні (втрачаючи здатність до узагальнення). Існують наступні підходи для уникнення такої ситуації: штучні дані, рання зупинка, обмеження кількості параметрів, методи проріджування або виключення, виключення з'єднань, ослаблення ваг, ієрархічних координатних сіток.

Метод Dropout також значно покращує швидкість тренування, що робить поєднання моделей практичним, навіть для глибоких нейронних, і послаблює взаємодії між вузлами, ведучи їх до навчання надійніших ознак, що краще узагальнюються на нові дані.

II. ВИЗНАЧЕННЯ НАЙБІЛЬШ ЗНАЧУЩИХ З ТОЧКИ ЗОРУ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Визначення найбільш значущих з точки зору ефективності параметрів згорткової нейронної мережі проводилося в результаті експерименту над комбінованою мережею, яка складається з згорткової нейронної мережі, класифікатора та розгорткової нейронної мережі.

Для експерименту використовувалася база даних MNIST (база даних зразків рукописного написання цифр).

В якості функції активації використовується функція ReLU, а класифікатора – автоенкодер.

На основі аналізу результатів перевірки комбінованої ЗНМ на перевіірочній вибірці, представлений у табл. 1 – 4 можна визначити значущі параметри для ЗНМ:

- 1) Кількість шарів згортки.
- 2) Кількість шарів агрегації.
- 3) Взаємне розміщення шарів згортки та агрегуючих шарів.

- 4) Шари згортки (на кожному шарі окремо):
 - розмір ядра згортки(на кожному шарі окремо);
 - кількість карт ознак(на кожному шарі окремо);
 - величина зміщення (на кожному шарі окремо);
 - параметр крайового ефекту.
- 5) Шари агрегації (на кожному шарі окремо):
 - розмір ядра агрегації;
 - функція ядра агрегації.
- 6) Повноз'єднані шари (на кожному шарі окремо):
 - кількість повноз'єднаних шарів;
 - розмір кожного шару;
 - тип класифікатора: повнозв'язний шар або щось інше.
- 7) Наявність операції вилучення для кожного шару: – процент вилучення та випадкова функція.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Змінні, які визначено у пункті II відображають структуру та параметри згорткової нейронної мережі.

Ставиться задача структурно-параметричного синтезу ЗНМ, що передбачає визначення оптимальних значень вищенаведених змінних.

IV. РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Для оптимізації структури та параметрів ЗНМ використано генетичний алгоритм [1] – [4].

У першу чергу опишемо структуру та розмір хромосоми.

Схематичне зображення одної хромосоми показано у табл. 1.

ТАБЛИЦЯ I. МАСШТАБОВАНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ХРОМОСОМИ, УСЬОГО 30 ГЕНІВ

Наявність 1 біт	Наявність 1 біт	Наявність 1 біт	Наявність	Наявність	Наявність
Кількість карт ознак 7 біт – від 4 до 256	Кількість карт ознак 7 біт – від 4 до 256	Кількість карт ознак 7 біт – від 4 до 256	Розмір повнозв'язаного шару 11 біт – шар має розмір від 0 до 1024 включно.	Розмір повнозв'язаного шару 11 біт – шар має розмір від 0 до 1024 включно.	Розмір повнозв'язаного шару 11 біт – шар має розмір від 0 до 1024 включно.
Розмір ядра 3 біта – від 3 до 8 включно	Розмір ядра 3 біта – від 3 до 8 включно	Розмір ядра 3 біта – від 3 до 8 включно			
Зміщення, 2 біта	Зміщення, 2 біта	Зміщення, 2 біта	Dropout, 5 бітів, можливі значення виключення від 0% до 30%.	Dropout, 5 бітів, можливі значення виключення від 0% до 30%.	Dropout, 5 бітів, можливі значення виключення від 0% до 30%.
Dropout, 5 бітів, можливі значення виключення від 0% до 30%.	Dropout, 5 бітів, можливі значення виключення від 0% до 30%.	Dropout, 5 бітів, можливі значення виключення від 0% до 30%.			
Крайові ефекти	Крайові ефекти	Крайові ефекти			
Шар агрегації (пулінгу), 3 біта.	Шар агрегації (пулінгу), 3 біта.	Шар агрегації (пулінгу), 3 біта.			

Результати роботи генетичного алгоритму з оптимізації згорткової мережі наведено у табл. 2 [8], [9].

ТАБЛИЦЯ II. ДЕСЯТЬ КРАЩИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

0	Перший шар згортки	Другий шар згортки	№	Пра- щури	Точ- ність	Час нав- чан- ня	Параметри мережі
1	12 карт ознак з розміром ядра 3x3 та зміщенням 1. Шар макспулінгу з розміром ядра 2x2.	72 карт ознак з розміром ядра 3x3 та зміщенням 1. Шар макспулінгу з розміром ядра 2x2.	46	М=10, Б=5	0,000814 6313731	788,4 2384 6	{'ПЗШ': [256], 'Зм': [1, 1], 'КЕ': ['0', '0'], 'Пр': 'М=10 , Б=5', 'Ід': 46, 'РП': [2, 2], 'ВПЗШ': [0], 'ВЗ': [0, 0], 'РЯ': [3, 3], 'КЯЗ': [12, 72]}

*ПЗШ – повноз’язаний шар; Зм – зміщення; КЕ – крайові ефекти; Пр – пращури; М – мати; Б – батько; Ід – ідентифікатор; РП – розмір пулінгу (агрегації); ВПЗШ – виключення повноз’єданого шару (дропаут); ВЗ – виключення згорткового шару; РЯ – розмір ядра згортки; КЯЗ – кількість ядер згортки.

Усі найкращі результати мають 2 шари згортки, тому в табл. 2 не наведені мережі з 3 або 4 згортковими шарами. В кожній мережі за згортковим шаром слідує агрегуючий.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу експериментальних даних визначено найбільш значущі з точки зору ефективності параметри згорткових нейронних мереж. Обґрунтовано використання генетичного алгоритму для розв’язання задачі структурно-параметричного синтезу згорткових нейронних мереж. Наведено приклад визначення оптимальної структури та параметрів згорткових нейронних мереж, використовувалася база даних MNIST.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] J. Horn, N. Nafpliotis, and D. E. Goldberg, “A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization,” *In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Piscataway, vol. 1, pp. 82-87, 1994.
- [2] S. Watanabe, T. Hiroyasu, and M. Miki, “NCGA: Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization

- Problems,” *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2002, pp. 458-465.
- [3] E. Zitzler, K. Deb, and L. Thiele, “Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results,” *Evolutionary Computation*, vol. 8, pp. 173-195, 2000.
- [4] E. Zitzler and L. Thiele, “Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, no. 4, pp. 257-271, 1999.
- [5] Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard and L. D. Jackel, “Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition,” *Neural Computation*, Winter, 1989, pp. 541-551.
- [6] H. Lee, R. Grosse, R. Ranganath, and A. Y. Ng, (2009a). Convolutional deep belief networks for scalable unsupervised learning of hierarchical representations. In *ICML’2009*.
- [7] В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко, Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособ. Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО, 2008, 192 с.
- [8] Е. И. Чумаченко, О. Ю. Левицкий, «Разработка алгоритма обработки изображений для задач диагностики.» *Электроника та системи управління*, Київ, НАУ, 2011, №1(27), С.57-65.
- [9] О. І. Чумаченко, Д. Ю. Коваль, «Гібридний еволюційний алгоритм формування топології глибокої нейромережі.» *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп’ютерне моделювання»*. Івано-Франківськ, Яремче, Україна (23 – 28 травня 2016 р.), С. 20-22.

СЕКЦІЯ 7.

***Математичне та комп'ютерне
моделювання складних систем***

SECTION 7.

***Mathematical and computer
modelling of complex systems***

Про Спрямоване Переміщення Графохідного Автомату без Компаса на Графі Квадратної Решітки

Сапунов Сергій Валерійович
відділ теорії керуючих систем
Інститут прикладної математики і механіки НАН України
Слов'янськ, Україна
sapunov_sv@yahoo.com

On the Directional Movement of a Graph-Walking Automaton without a Compass on Square Grid Graph

Sergiy Sapunov
dept. of Control Systems Theory
Institute of Applied Mathematics and Mechanics of NAS of Ukraine
Sloviansk, Ukraine
sapunov_sv@yahoo.com

Анотація—Розглянуто задачу організації спрямованого переміщення скінченного автомата без компаса на графі квадратної цілочисельної решітки з позначеними вершинами. Знайдено мінімальну кількість класів позначок необхідну і достатню для того, щоб автомат зберігав довільний напрямок пересування на графі. Розроблено алгоритми побудови мінімальної вершинної розмітки для скінчених та нескінчених решіток.

Abstract—This paper deals with the problem of organizing a directional movement of a finite automaton without a compass on vertex-labeled square grid graph. A minimal number of classes of vertex labels is found that is necessary and sufficient for the automaton to maintain movement direction on the graph. Algorithms for constructing minimal vertex-labeling for finite and infinite grids are developed.

Ключові слова—граф квадратної решітки; графохідний автомат; вершинна розмітка; спрямоване переміщення

Keywords—square grid graph; graph-walking automaton; vertex-labeling; directional movement

I. INTRODUCTION

Automata walking on graphs are a mathematical formalization of autonomous mobile agents with limited memory operating in discrete environments. Under this model arose an intensively developing broad area of studies of the

behaviour of automata in labyrinths (labyrinth is an embedded directed graph of special form) [1, 2]. Research in this regard received a wide range of applications, for example, in the problems of image analysis and navigation of mobile robots [3]. The results for automata and labyrinths are based on the important assumption that automata operating in labyrinths can distinguish directions, that is, they have a compass [4, 5].

In this paper we consider the following problem. Initially the automaton located at an arbitrary vertex of the vertex-labeled square grid graph. The automaton looking over neighborhood of the current vertex and may travel to some neighboring vertex selected by its label. The automaton does not distinguish between equally labeled vertices by their coordinates of direction (that means automaton has no compass). It is required to find necessary and sufficient conditions in the form of restrictions on the properties of the automaton and on the labeling of the graph under which the automaton maintain movement direction.

II. BASIC DEFINITIONS

Let N denote the set of all positive integers and Z the set of integers. For any $n \in N$ we set $Z_n = \{0, 1, \dots, n-1\}$.

An infinite square grid graph $G(Z^2)$ is the graph whose vertices correspond to the points in the plane with integer

coordinates and two vertices are connected by an edge whenever the corresponding points are at distance l . It is a regular graph where each vertex has degree 4 . We consider the vertex coordinates as its name. A square grid graph $G(Z_n \times Z_m)$ is a subgraph of the $G(Z^2)$ induced by all vertices whose x -coordinates being in the range $0, \dots, n-1$ and y -coordinates being in the range $0, \dots, m-1$. We will consider the infinite pass graph as a degenerate square grid graph $G(Z \times Z_l)$.

A labeled graph is a simple connected vertex-labeled graph $G = (V, E, M, \mu)$, where V is a set of vertices, E is a set of edges, M is a set of labels, $\mu : V \rightarrow M$ is a mapping. The set of vertices adjacent to a vertex $v \in V$ is called the open neighborhood of v . The neighborhood of v in which v itself is included is called closed neighborhood. A sequence of vertices $p = v_1 \dots v_k$ where $(v_i, v_{i+1}) \in E$ for $i = 1, \dots, k-1$ will be called the path in the graph G . We call $k \in \mathbb{N}$ the length of the path p . The label $\mu(p)$ of this path is the word $w = \mu(v_1) \dots \mu(v_k)$ in the alphabet of labels M . We say that the word w is defined by the vertex v_1 .

A graph-walking automaton on labeled graph G is a sextuple $A = (S, X, Y, s_0, \varphi, \psi)$, where S is a finite set of internal states, $X = \{(a_0, \{a_1, \dots, a_k\}) \mid a_i \in M, 0 \leq i \leq k\}$ is a finite input alphabet (a_0 is a current vertex label, $\{a_1, \dots, a_k\}$ is a set (or multiset) of labels of all vertices on the current vertex neighborhood, k is a degree of current vertex), $Y = M$ is a finite output alphabet ($y = a$ means that the automaton moves from the current vertex to the adjacent vertex with the label a), $s_0 \in S$ is the initial state, $\varphi : S \times X \rightarrow S$ is a transition function, $\psi : S \times X \rightarrow Y$ is an output function. Given a labeled graph G , the automaton begins its computation in the state s_0 , observing the labeling \bar{X}_0 of closed neighborhood of vertex v_0 . At each step of the computation, with the automaton in a state $s \in S$ observing a labeling x of closed neighborhood of vertex v , the automaton looks up the transition tables φ and ψ for s and \bar{X} . If $\varphi(s, \bar{X})$ is defined as s' and $\psi(s, \bar{X})$ is defined as a , the automaton enters the state s' and moves to the vertex labeled by a . The automaton does not have a compass, that is, it does not distinguish directions and relative position of vertices. Therefore, it does not distinguish vertices with the same labels. It is shown in [6] that automaton without additional resources cannot maintain movement direction on the graph all whose vertices are unlabelled or, equivalently, are labeled with the same label.

Let automaton A at time t be placed at the vertex $v(t)$ of graph $G(Z^2)$. The automaton movement is called uniform and directional if there exists period $T \in \mathbb{N}$ that $v(t+T) - v(t) = v(t+2T) - v(t+T)$ or any time $t \in \mathbb{N}$.

III. VERTEX LABELLING SUFFICIENT FOR DIRECTIONAL MOVEMENT

Let us select on graph $G(Z^2)$ two pairs of opposing directions corresponding to coordinate axes on the plane Z^2 . Any automaton trajectory on this graph can be represented as a sequence of moves along these directions. The number of different sequences of labels that automaton must remember increases with the number of directions it can move along. The complexity of automaton increases as a result. An automaton that can move only in four directions defined by coordinate axes we will consider as a simple one. The computing capabilities of a finite automaton are limited by amount of memory. This leads to restrictions on the labeling of the graph by which automaton moves. First, the alphabet of vertex labels must be finite, and secondly, the words in this alphabet defining the trajectories of the automaton must have a periodic structure. The labeling of graph G can be considered as function $\mu : Z^2 \rightarrow M$. A labeling μ of $G(Z^2)$ is periodic in direction $(q, t) \in Z^2$ if $\mu(i+q, j+t) = \mu(i, j)$ for all $i, j \in Z$. We call a labeling traversable if an automaton can move on the graph in any direction with its use. A vertex labeling that minimizes the number of different label types is called a minimal labeling.

Labeling function is called deterministic if all vertices in closed neighborhood of every vertex have different labels. We call labeled graph deterministic if its labeling function is deterministic. From the definition of deterministic graph it follows: (1) for any vertex, every word in the alphabet of labels defines at most one path from this vertex; (2) the distance between two equally labeled vertices is at least 4 (see [7] for more details). These properties provide a principled opportunity for targeted movement of the graph-walking automaton on a deterministic graph. For example, it is possible to construct an automaton moving along paths connecting the vertices of a graph if the labels of these paths are known.

Theorem 1. For a minimal traversable deterministic labeling of the path graph $G(Z \times Z_l)$ it is necessary and sufficient to have three types of labels.

Let us build a minimal traversable deterministic labeling of the graph $G(Z \times Z_l)$. Without loss of generality, assume the $M = \{0, 1, 2\}$. We define the required labeling by the following condition: for any vertex v if $\mu(v) = a$, $a \in M$, then vertices adjacent to v have labels $b = a \oplus_3 1$ and $c = a \oplus_3 (-1)$ where \oplus_3 denotes addition modulo 3 . The obtained labeling is periodic in the direction 3 . An automaton using this labeling can move in two opposite directions, which we will conditionally call “east” and “west”. Suppose the automaton is at the vertex labeled by a . Then in order to move to the “east”, it must move to the vertex labeled by b , and in order to move to the “west” – to the vertex labeled by c .

Theorem 2. For a minimal traversable deterministic labeling of the square grid graph:

1) $G(Z \times Z_2)$ it is necessary and sufficient to have four types of labels;

2) $G(Z^2)$ it is necessary and sufficient to have five types of labels.

Let us build a minimal traversable deterministic labeling of the graph $G(Z \times Z_2)$. Assume $M = \{0, 1, 2, 3\}$. We define the required labeling by the following condition: for any vertex v if $\mu(v) = a$, $a \in M$, then vertices adjacent to v have labels $b = a \oplus_4 1$, $c = a \oplus_4 (-1)$ and $d = a \oplus_4 2$, where \oplus_4 denotes addition modulo 4. As an example, let $(i, 0) \in Z^2$ is an arbitrary vertex and $\mu(i, 0) = a$, $\mu(i + 1, 0) = b$, $\mu(i - 1, 0) = c$, $\mu(i, 1) = d$. The obtained labeling is periodic in the direction $(4, 0)$. Under this labeling the automaton movement along abscissa axis from vertex $(i, 0)$ are similar to the movements eastward and westward on the graph $G(Z \times Z_1)$. The automaton movement along ordinate axis is to move to a vertex labeled by d .

Let us build a minimal traversable deterministic labeling of the graph $G(Z^2)$. Assume $M = \{0, 1, 2, 3, 4\}$. We define the required labeling by the following condition: for any vertex v if $\mu(v) = a$, $a \in M$, then vertices adjacent to v have labels $b = a \oplus_5 1$, $c = a \oplus_5 (-1)$, $d = a \oplus_5 2$ and $e = a \oplus_5 (-2)$, where \oplus_5 denotes addition modulo 5. As an example, let $(i, j) \in Z^2$ is an arbitrary vertex and $\mu(i, j) = 0$, $\mu(i + 1, j) = 1$, $\mu(i - 1, j) = 4$, $\mu(i, j + 1) = 2$, $\mu(i, j - 1) = 3$ (see Figure 1). The obtained labeling is periodic in directions $(5, 0)$ and $(0, 5)$. An automaton using this labeling can move in two pairs of opposite directions, which we will conditionally call "east", "west", "north" and "south". Suppose the automaton is at the vertex labeled by a . Then in order to move to the "east", it must moves to the vertex labeled by b , to the "west" – c , to the "north" – d , to the "south" – e .

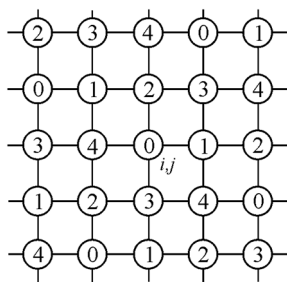


Fig.1. A minimal deterministic labeling of the square grid graph.

Corollary 1. For a minimal traversable deterministic labeling of the square grid graph $G(Z_n \times Z_m)$, $n > 2$, $m > 2$, it is necessary and sufficient to have five types of labels.

We will consider a graph traversal as any path passing through all vertices of the graph. It is shown that there exists an

automaton that traverses any graph $G(Z_n \times Z_m)$ with minimal deterministic labeling. A single graph-walking automaton without any enhancements cannot traverse infinite graph. In studies of behavior of automata in labyrinths, one of enhancements consists of permission to drop and lift pebbles at the vertices. In essence, the permission to drop pebbles means that the automaton possesses an unbounded external memory, which greatly increases its possibilities. It is shown that there exists an automaton with two pebbles that traverses any graph $G(Z \times Z_n)$ with minimal deterministic labeling, where $n \geq 1$. It is also shown that there exists an automaton with three pebbles that traverses graph $G(Z^2)$ with minimal deterministic labeling.

IV. MINIMAL TRAVERSABLE LABELING

In this section we discuss problem: is it possible to build a traversable labeling of square grid graph with fewer types of labels than deterministic labeling?

We call a path $p = v_1 \dots v_k$ deterministic if its labeling $\mu(p) = a_1 \dots a_k$ satisfies condition: for any path vertex v_i there exists unique adjacent vertex labeled by a_{i+1} where $i = 1, \dots, k$. It is shown that for the traversability of graph labeling it is necessary and sufficient that for any vertex there exists a deterministic path to all vertices from its neighborhood.

Theorem 3. For a minimal traversable labeling of the path graph $G(Z \times Z_l)$ it is necessary and sufficient to have two types of labels.

Let us build a minimal traversable labeling of the graph $G(Z \times Z_l)$. Assume $M = \{0, 1\}$. We define the required labeling by following condition: for any vertex v if $\mu(v) = a$, $a \in M$, then vertices adjacent to v have labels a and $b = a \oplus 1$. The obtained labeling is periodic in direction 4. An automaton using this labeling can move in two opposite directions: first – to the vertex whose label coincides with the label of current vertex and second – to the vertex whose label different from the label of current vertex. We will conditionally call first direction "west" and second direction – "east". Let $i, i + 1 \in Z$ are arbitrary vertices and $\mu(i) = \mu(i + 1)$. Then "east" for the automaton at the vertex i means "west" for the automaton at the vertex $i + 1$ and vice versa. This is the difference between considered labeling and deterministic labeling where at any vertex both directions are uniquely defined. The automaton movement "eastward" consists in the sequential repetition of two steps: (1) move to the vertex whose label different from the label of current vertex; (2) move to vertex whose label coincides with the label of current vertex. Movement "westward" is obtained by interchanging of steps (1) and (2).

Let $G(Z_n \times Z_m)$ be arbitrary finite square grid graph where $n > 2$, $m \geq 2$. It is shown that traversable labeling of $G(Z_n \times Z_m)$ using two types of labels does not exist.

Theorem 4. For a minimal traversable labeling of the square grid graph $G(Z^2)$ it is necessary and sufficient to have three types of labels.

Let us build a minimal traversable labeling of the graph $G(Z^2)$. Assume $M = \{0, 1, 2\}$. One of possible labeling of this graph defines by following conditions: if vertices (i, j) , $(i+1, j)$, $(i-1, j) \in Z^2$ labeled by $a \in M$ then vertices $(i, j+1)$, $(i-1, j+1)$, $(i-1, j-1)$, $(i+2, j)$ labeled by $b = a \oplus_3 1$ and vertices $(i, j-1)$, $(i+1, j+1)$, $(i+1, j-1)$, $(i-2, j)$ labeled by $c = a \oplus_3 (-1)$ (see Figure 2). The obtained labeling is periodic in directions $(9, 0)$ and $(0, 9)$. It is shown that under this labeling for any vertex there exists a deterministic path to all vertices from its neighborhood. The sequence of such paths determines the movement in the required direction.

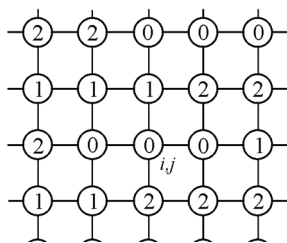


Fig.2. A minimal labeling of the square grid graph.

Corollary 2. For a minimal traversable labeling of the square grid graph $G(Z_n \times Z_m)$, where $n > 2$, $m \geq 2$, it is necessary and sufficient to have three types of labels.

It is shown that there exists an automaton that traverses any graph $G(Z_n \times Z_m)$ with minimal labeling. It is also shown that there exists an automaton with three pebbles that traverses graph $G(Z^2)$ with minimal labeling.

An automaton built to move using minimal traversable labeling is more complicated than an automaton that uses deterministic labeling for movement. The reason is that the first automaton may need to go through several other vertices in order to get from the current vertex to an adjacent one. The automaton trajectories are particularly complicated for vertices that define external face of a finite graph. Hence minimizing traversable labeling of the graph leads to an increase in complexity of the graph-walking automaton.

V. BUILDING MINIMAL TRAVERSABLE LABELING

Due to the applicability of both types of minimal labeling to organization of a directional movement of a graph-walking

automaton the following problem arises: is it possible to construct an automaton that is capable of constructing a minimal labeling (or deterministic labeling) of an unlabeled graph? Theorems 5 and 6 give positive answers to the question of this problem.

Theorem 5. There exists an automaton that build minimal traversable labeling (deterministic labeling) on path graph $G(Z \times Z_1)$.

Theorem 6. There exists an automaton with three pebbles that build minimal traversable labeling (deterministic labeling) on square grid graph $G(Z^2)$.

Here similar to that of preceding section the automaton building a minimal labeling is more complicated than the automaton building a deterministic labeling.

CONCLUSION

Necessary and sufficient conditions in the form of restrictions on the properties of the automaton and on the labeling of the graph under which the automaton without a compass maintains movement direction are obtained. Two types of automaton traversable vertex labeling of the graph are proposed. Methods and algorithms of automaton traversal of finite and infinite graphs and building both types of labeling for unlabeled graphs are developed. The obtained results lay the basis for studying navigation of automata without a compass and their collectives in stationary homogeneous discrete environments.

REFERENCES

- [1] G Kilibarda, V. B. Kudryavtsev, Š. Ušćumlić, "Independent systems of automata in labyrinths", Discrete Mathematics and Applications, 2003, vol. 13, is. 3, pp. 221-255.
- [2] G Kilibarda, V. B. Kudryavtsev, Š. Ušćumlić, "Collectives of automata in labyrinths", Discrete Mathematics and Applications, 2003, vol. 13, is. 5, pp. 429-466.
- [3] G. Dudek, M. Jenkin, Computational Principles of Mobile Robotics, Cambridge University Press, 2010.
- [4] M. Blum, D. Kozen, "On the Power of the Compass", SFCS '78 Proc. 19th Annu. Symp. Found. Comput. Sci., IEEE Computer Society Washington, 1978, pp. 132-142.
- [5] B. R. Donald, "The Compass That Steered Robotics", Logic and Program Semantics, Springer, 2012, pp.50-65.
- [6] O. M. Kurganskyy, S. V. Sapunov, "On the Directional Movement of a Collective of Automata without a Compass on a One-dimensional Integer Lattice", Izv. Sarat. Univ. (N.S.), Ser. Mat. Mekh. Inform., 2016, vol. 16, is. 3, pp. 356-365 (in Russian).
- [7] I. S. Grunsky, S. V. Sapunov, "Reconstruction of the Graph of Operating Environment of Mobile Robot by Vertex Labeling Sufficient for Further Navigation", Iskusstvennyiy intellekt, 2012, vol. 4, pp. 420-428 (in Russian).

Комп'ютерне Моделювання Поведінки Стриження з Трилінійного Двофазного Матеріалу при Розтягуванні

Олександр Петров

кафедра теоретичної та комп'ютерної механіки
Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара
Дніпро, Україна
alex93203@rambler.ru, caf-vmi@ukr.net

Computer Simulation of Sample Behavior From Trilinear Two-Phase Material Under Tension

Alexander Petrov

dept. of Theoretical and Computer Mechanics
Oles Honchar Dnipro National University
Dnipro, Ukraine
alex93203@rambler.ru, caf-vmi@ukr.net

Анотація—У запропонованій роботі формується феноменологічна модель для опису властивостей сплавів з пам'яттю форми в точці. Встановлено, що класичні діаграми матеріалів представляють собою криву, що огинає сімейство діаграм матеріалу, яке побудовано для певних законів зміни швидкості фронту розриву деформацій.

Abstract—The present paper formulates a phenomenological model for describing the properties of alloys with shape memory at a specify point. It is established that the classical material diagrams is an envelope of a certain family of material diagrams constructed for certain laws of velocity variation and the front of strain rupture.

Ключові слова — псевдопружність; пам'ять форми; фазові переходи

Keywords — pseudoelasticity; shape memory; phase transitions

I. ВСТУП

В задачах механіки, де вивчається поведінка матеріалів, в яких мають місце фазові переходи, для побудови фізичних співвідношень між напругою та деформацією необхідно знати положення фронту фазового переходу $s = s(t)$ і функцію кінетичного відгуку $\dot{s} = \Phi(f)$ [1,2].

Узагальнена залежність між напругою σ і деформацією γ , в матеріальній точці моделюється кривою що зображена на Рис 1. При побудові такої діаграми задаються точки площини (σ_M, γ_M) і (σ_m, γ_m) ,

функції $\gamma = \psi_i(\sigma), i = 1, 2, 3$ і визначається змінна деформація перетворення

$$\gamma_T = \psi_3(\sigma) - \psi_1(\sigma).$$

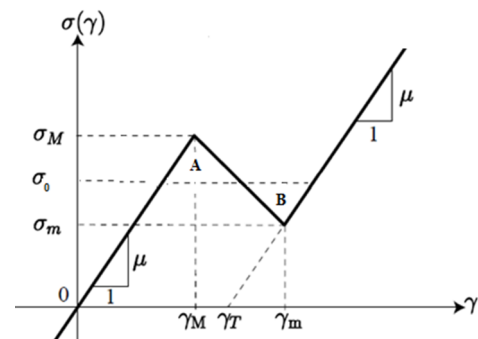


Рис. 1. Крива напруга-деформація для двофазного пружного матеріалу

Функції $\psi_i(\sigma)$ повинні задовольняти наступним вимогам.

$$\psi_1(0) = 0, \psi_1(\sigma_M) = \gamma_M, \psi'_1(\sigma) > 0,$$

$$\psi_2(\sigma_M) = \gamma_M, \psi_2(\sigma_m) = \gamma_m, \psi'_2(\sigma) < 0, \quad (1)$$

$$\psi_3(\sigma_m) = \gamma_m, \psi'_3(\sigma) > 0.$$

Поле зміщень в зразку повинно бути неперервним

$$u(x) = \begin{cases} \psi_3(\sigma)x, & 0 \leq x < s, \\ \psi_1(\sigma)x + \gamma_T(\sigma)s, & s \leq x \leq L. \end{cases}$$

Відповідний кусково-однорідний розподіл деформації в стрижени дається формулою

$$\gamma(x) = \begin{cases} \psi_3(\sigma), & 0 \leq x < s, \\ \psi_1(\sigma), & s \leq x \leq L. \end{cases}$$

Залежність між збільшенням довжини $u(L) = \delta$ стрижня і напругою визначається виразом

$$\delta = \psi_3(\sigma)s + \psi_1(\sigma)(L - s). \quad (2)$$

Тут s - положення границі розділу фаз.

Рівняння (2) дає змогу визначити сімейство $\delta(\sigma, s)$. Якщо δ задано, то можна знайти напругу σ , розв'язуючи відповідно до умов (1) крайову задачу нелінійної пружності. При цьому з виразу (2) не можна зразу визначити σ оскільки невідомо положення границі розділу фаз.

Для однозначного розв'язку цієї задачі необхідно надати допоміжну інформацію окрім рівняння балансу (2), фізичних співвідношень $\gamma = \psi_i(\sigma), i = 1, 2, 3$, граничних умов і вимог до гладкості. Зазвичай ці вимоги достатні при відсутності нестійких ділянок діаграми, для звичайних еластичних матеріалів, для яких напруга монотонно зростає зі збільшенням деформації.

Порушення єдності виникає в (2), якщо задано σ , а не δ . Ця проблема може бути вирішена шляхом введення поняття рушійної сили f . Вона визначається так

$$f(\sigma) = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \gamma_T(\sigma) d\sigma. \quad (3)$$

Тут $\sigma_0 = (\sigma_M + \sigma_m) / 2$ - напруга Максвела. Напругу Максвела можна інтерпретувати геометрично як напругу, при якій дві площі, обмежені кривою напруга-деформація, мають рівну площу. Оскільки напруга в стані рівноваги в змішаній фазі повинна знаходитися між σ_m і σ_M , то діапазон можливих значень рушійної сили $[f_m, f_M]$. Розглянемо квазістатичний процес, в якому треба визначити функції часу $\sigma = \sigma(t), s = s(t), \delta = \delta(t)$.

Похідна за часом від виразу (2) дає наступне нелінійне рівняння

$$\dot{\delta} = \gamma_T(\sigma)\dot{s} + (\gamma'_T(\sigma)s + \psi'_1(\sigma)L)\dot{\sigma}. \quad (4)$$

Тут точкою позначено похідні за часом, а штрихом похідні по σ .

В загальному випадку дотичний модуль діаграми матеріалу можна визначити з (4) так

$$\frac{d\sigma}{d\delta} = \frac{L - \gamma_T(\sigma)\dot{s} / \dot{\delta}}{\psi'_1(\sigma)L + \gamma'_T(\sigma)s}.$$

При його обчисленні треба попередньо визначити функції $\sigma = \sigma(t), s = s(t)$, а для цього до рівняння (4) слід додати функцію кінетичного відгуку $\dot{s} = \Phi(f)$ (Рис. 2) і вираз для рушійної сили (3), який можна представити так

$$f(\sigma) = \int_{\sigma_0}^{\sigma} [\psi_3(\sigma) - \psi_1(\sigma)] d\sigma \quad (5)$$

II. ТРИЛІНІЙНИЙ ДВОФАЗНИЙ МАТЕРІАЛ

Для трилінійного двофазного матеріалу з різними модулями пружності $\mu_1 \neq \mu_3$ і відповідно змінною трансформаційною деформацією γ_T на основі наведених вище формул (4) і (5) можна записати залежності між напругою і збільшенням довжини пружного зразка, а також для рушійної сили.

Рівняння першої прямої на ділянці $\gamma \in [0; \gamma_M], \sigma \in [0; \sigma_M]$ має вигляд

$$\gamma(\sigma) = \psi_1(\sigma) = \sigma / \mu_1. \quad (6)$$

Рівняння прямої на ділянці $\gamma \in [\gamma_m; \infty), \sigma \in [\sigma_m; \infty)$ має вигляд

$$\gamma(\sigma) = \psi_3(\sigma) = \gamma_m + (\sigma - \sigma_m) / \mu_3. \quad (7)$$

Звідки

$$\gamma_T(\sigma) = k\sigma + b, \quad (8)$$

де

$$k = 1 / \mu_3 - 1 / \mu_1, b = \gamma_m - \sigma_m / \mu_3.$$

На основі формул (4)-(8) запишемо

$$\dot{\delta} = (k\sigma + b)\dot{s} + (ks + L / \mu_1)\dot{\sigma}. \quad (9)$$

$$f(\sigma) = (k \frac{\sigma^2}{2} + b\sigma) - (k \frac{\sigma_0^2}{2} + b\sigma_0). \quad (10)$$

Звідси отримаємо

$$\dot{f}(\sigma) = \gamma_T(\sigma)\dot{\sigma} = (k\sigma + b)\dot{\sigma}.$$

Для трилінійного двофазного матеріалу з однаковими модулями пружності $\mu_1 \equiv \mu_3 = \mu$ на основі формул (8) отримаємо

$$k = 0, b \equiv \gamma_T = \gamma_m - \sigma_m / \mu.$$

В результаті цього спроститься диференціальне рівняння (9)

$$\dot{\delta} = b\dot{s} + L\dot{\sigma} / \mu$$

і вираз для рушійної сили (10)

$$f(\sigma) = b(\sigma - \sigma_0).$$

Границі зміни рушійної сили будуть такими

$$f_m = b(\sigma_m - \sigma_0), f_M = b(\sigma_M - \sigma_0),$$

Розглянемо випадок, коли функція кінетичного відгуку $\dot{s} = \Phi(f)$ буде мати вигляд, представлений на Рис. 2.

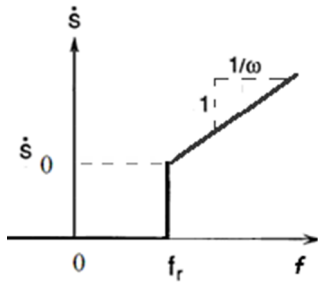


Рис. 2. Схематичний графік функції кінетичного відгуку.

Ця функція може бути задана аналітично [2].

$$\dot{s} = \begin{cases} 0; & f \in [0; f_r]; \\ \dot{s}_0 + \omega(f - f_r). & \end{cases} \quad (11)$$

На першій ділянці (до фазового переходу) $\dot{s} \equiv 0; s \equiv 0$. В силу цього рівняння (4) набуде вигляд

$$\dot{\delta} = \psi'_1(\sigma)L\dot{\sigma}.$$

Звідси отримаємо формулу для обчислення дотичного модуля діаграми

$$\frac{d\sigma}{d\delta} = \frac{1}{\psi'_1(\sigma)L}.$$

На другій ділянці (після фазового переходу) рівняння (4) з урахуванням (11) прийме вигляд

$$\dot{\delta} = \gamma_T(\dot{s}_0 + \omega(f - f_r)) + (\gamma'_T s + \psi'_1 L) \frac{\dot{f}}{\gamma_T}.$$

$$s = (\dot{s}_0 - \omega f_r)(t - t_r) + \omega \int_{t_r}^t f(\tau) d\tau. \quad (12)$$

В результаті

$$\dot{f} = \frac{\gamma_T}{\gamma'_T s + \psi'_1 L} [\dot{\delta} - \gamma_T(\dot{s}_0 + \omega(f - f_r))]. \quad (13)$$

Для випадку трилінійного двофазного матеріалу з однаковими модулями пружності отримаємо

$$\dot{f} = \frac{\mu b}{L} [\dot{\delta} - b(\dot{s}_0 + \omega(f - f_r))].$$

Після інтегрування можна записати

$$f(t) = \alpha_* + (f_r - \alpha_*) e^{-(t-t_r)/\beta},$$

$$\beta = \frac{\mu b^2 \omega}{L}, \alpha_* = (\dot{\delta} / b - \dot{s}_0 + f_r) / \omega$$

$$t \in [t_r; \infty), f(t_r) = f_r, f(t_r) = f_r < f_M.$$

З метою спрощення запису введемо позначення

$$c_1 = b^2 + 2k(c + f_r), F = f - f_r.$$

Перепишемо (12), (13) так

$$\dot{F} = \Phi(F, s), s = \dot{s}_0(t - t_r) + \omega \int_{t_r}^t F(\tau) d\tau,$$

$$\Phi(F, s) = \frac{\gamma_T(F)}{ks + L/\mu_1} [\dot{\delta} - \gamma_T(F)(\dot{s}_0 + \omega F)], \quad (14)$$

$$\gamma_T(F) = \sqrt{c_1 + 2kF}.$$

На першій ділянці (до фазового переходу) $\dot{s} \equiv 0; s \equiv 0; t \in [0; t_r]$. З формул (9) і (10) отримаємо

$$\dot{\sigma} = \frac{\mu_1}{L} \dot{\delta} \Rightarrow \sigma = \frac{\mu_1}{L} \dot{\delta} \cdot t,$$

$$\dot{f}(\sigma) = (k\sigma + b)\dot{\sigma} = \left(\frac{k\mu_1 \dot{\delta}}{L} t + b \right) \frac{\mu_1}{L} \dot{\delta}.$$

Інтегруючи останню рівність, отримаємо

$$f(t) = k \left(\frac{\mu_1 \dot{\delta}}{L} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{b\mu_1 \dot{\delta}}{L} \cdot t,$$

$$t \in [0; t_r], f(0) = 0, f(t_r) = f_r < f_M.$$

На другій ділянці систему рівнянь (14) будемо розв'язувати чисельно при наступних умовах

$$s(t_r) = 0, F(t_r) = 0.$$

Для цього введемо сітку за часом і зробимо позначення

$$t_p = t_{p-1} + \tau, p = 1; 2; 3; \dots, t_0 = t_r,$$

$$s^p = s(t_p), F^p = F(t_p),$$

$$\Phi^p = \Phi(F^p, s^p), \gamma_T^p = \gamma_T(F^p).$$

В результаті диференціальне рівняння та інтеграл (14) можна замінити еквівалентними різницеvim рівняннями і сумою. Звідси отримаємо розрахункові формули, для рушійної сили F

$$F^{p+1} = F^p + \tau \cdot \Phi(F^p, s^p), s^p = p \cdot \dot{s}_0 \cdot \tau + \omega \cdot J^p,$$

$$J^p = J^{p-1} + \frac{\tau}{2}(F^{p-1} + F^p), J^0 = 0, F^0 = 0.$$

III. ЧИСЕЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

При чисельному розв'язанні системи (14) за допомогою наведених різницеvim формул спочатку задаються $L, \omega, \dot{s}_0, \dot{\delta}, \gamma_M, \sigma_M, \gamma_m, \sigma_m, \mu_1, \mu_3, \tau$.

Обчислюються $k, k_0, k_1, b, \sigma_0, c, \mu_2$, а потім $t_r, f_r, c_1, b, \sigma_0, \mu_2$.

Результати розрахунків наведено нижче. На Рис.3. показана типова залежність для швидкості розповсюдження фазового переходу від часу. Графік має три ділянки. На першій ділянці швидкість дорівнює нулю, а на третій досягає постійного значення. Між ними міститься ділянка зі змінною швидкістю. В результаті обчислення дотичного модуля на кожному кроці інтегрування за часом для інтегральної діаграми матеріалу теж маємо три характерні ділянки (Рис.4).

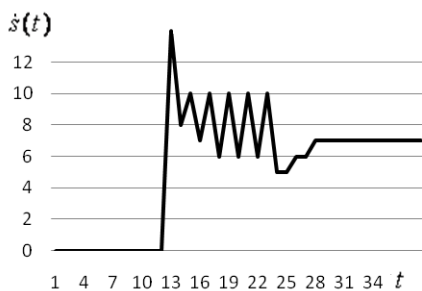


Рис. 3. Швидкість розповсюдження фазового переходу

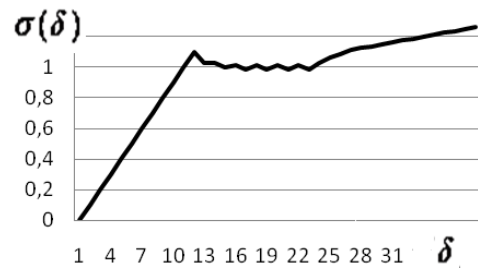


Рис. 4. Інтегральна діаграма матеріалу

Перша ділянка відповідає пружній поведінці матеріалу. Третя характеризує зміцнення матеріалу. Між ними міститься ділянка, яка нагадує поведінку ідеально пластичного матеріалу.

ВИСНОВКИ

Як встановлено в експериментальних дослідженнях поведінку матеріалу в точці тіла в загальному випадку відрізняється від поведінки зразка в цілому. У роботі формулюється феноменологічна модель для опису властивостей матеріалу саме в точці. Для опису пружної деформації і деформації фазового перетворення використовувалася діаграма пружного матеріалу, що складається з трьох прямолінійних ділянок. Таке трактування теорії призводить до нестійкої діаграми напруження-деформація і вимагає рішення граничної задачі з урахуванням розвитку фронту деформації перетворення. Таке трактування дозволило з позиції досить простої моделі матеріалу описати ряд експериментальних даних на різних зразках при різних умовах навантаження. Встановлено, що класичні діаграми матеріалів представляють собою криву, що огинає деяке сімейство діаграм матеріалу, побудоване для певних законів зміни швидкості фронту розриву деформацій.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Abeyaratne R., Knowles J.K. Evolution of phase transitions. – Cambridge University Press, 2006. – 258 p.
- [2] Shaw J. A., Kyriakides S. On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy. Acta Materialia, 1997. – No 45, p.683-700.

Моделювання Окиснення Чадного Газу на Поверхні Металевого Каталізатора: Тонка Структура Коливної Реакції

Петро Костробій, Ірина Рижа
кафедра прикладної математики
Національний університет “Львівська політехніка”
Львів, Україна
ira.saj@gmail.com

Modeling of Carbon Monoxide Oxidation on the Metal Catalyst Surface: Fine Structure of Oscillatory Reaction

Petro Kostrobii, Iryna Ryzha
dept. of Applied Mathematics
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
ira.saj@gmail.com

Анотація—Досліджено двовимірну математичну модель окиснення чадного газу (CO) на поверхні платиного каталізатора (Pt) згідно механізму Лангмюра-Гіншелвуда, яка враховує впливи процесів перебудови каталітичної поверхні та температури підложки. Показано, що врахування двовимірності веде до зміни динаміки процесу окиснення та дозволяє отримати коливання змішаного режиму.

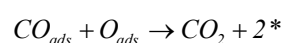
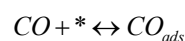
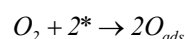
Abstract—The two-dimensional mathematical model for carbon monoxide (CO) oxidation on the platinum (Pt) catalyst surface is investigated according to the Langmuir-Hinshelwood (LH) mechanism. The effects of the catalyst surface reconstruction processes and the substrate temperature are taken into account. It is shown that when two-dimensionality is accounted for, the dynamics of oxidation process changes and mixed mode oscillations (MMO) can be obtained.

Ключові слова—каталітична реакція окиснення; реакційно-дифузійна модель; математичне моделювання реакційно-дифузійних процесів.

Keywords— reaction of catalytic oxidation; reaction-diffusion model; mathematical modeling of reaction-diffusion processes

I. ВСТУП

Окиснення чадного газу (CO) на платині (Pt) відбувається згідно класичного механізму Ленгмюра-Гіншелвуда (LH) [1], який описується наступними рівняннями реакцій



де * позначає вільне активне місце на каталітичній поверхні, індекс “ads” – адсорбовану фазу відповідної речовини.

Обидві реагуючі речовини CO та кисень (O₂) повинні адсорбуватися на поверхні каталізатора до того як відбудеться реакція. Адсорбована молекула CO може прореагувати з адсорбованим на сусідньому активному місці атомом окисену (O). Продукт реакції – вуглекислий газ (CO₂) – швидко десорбується з поверхні каталізатора, залишаючи два вільних місця, доступних для адсорбції нових реагентів. Десорбція і дифузійна рухливість адсорбованого O не враховується [2, 3].

Важливо [4] при побудові математичної моделі реакції врахувати структурні зміни поверхні каталізатора, що впливають на швидкості інших елементарних процесів.

II. ОПИС МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Розглянемо модель реакції каталітичного окиснення CO, яка враховує процес дифузії молекул CO на поверхні платини Pt(110). На відміну від існуючих моделей [5, 6], поверхню каталізатора вважатимемо плоскою з заданою декартовою системою координат XOY. Часова еволюція поверхневих покриттів CO (u) та O (v) на поверхні визначається наступними кінетичними рівняннями [7]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \overbrace{p_u \kappa_u s_u \left(I - \left(\frac{u}{u_{sat}} \right)^q \right)}^{\text{адсорбція}} - \overbrace{k_{des} u}_{\text{десорбція}} - \overbrace{-k_r uv + D_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}}^{\text{дифузія}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \overbrace{p_v \kappa_v s_v \left(I - \frac{u}{u_{sat}} - \frac{v}{v_{sat}} \right)^2}_{\text{адсорбція}} - \overbrace{k_r uv}_{\text{реакція}}. \quad (2)$$

Тут p_u , p_v – парціальні тиски відповідних речовин; κ_u , κ_v – частоти зіткнень молекул з поверхнею; s_u , s_v – коефіцієнти налипання; u_{sat} , v_{sat} – відповідають максимальному покриттю речовин, тобто покриттю насичення; k_r , k_{des} – коефіцієнти, які характеризують швидкості реакції та десорбції CO; D_x , D_y – коефіцієнти дифузії CO в напрямку координат x та y , відповідно. Показник степеня $q = 3$ враховує пригнічення адсорбції для CO та O₂, оскільки адсорбований CO сильніше блокує адсорбцію кисню [8].

Структурний фазовий перехід $(1 \times 1) \leftrightarrow (1 \times 2)$ на поверхні Pt(110) будемо моделювати так [9]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \overbrace{k_{ph} (f(u) - W)}^{\text{перевбудова}}, \quad (3)$$

де змінна W позначає частку поверхні неперевбудованої структури (1×1) , $f(u)$ – неспадна гладка функція інтервалу $[0; 1]$; коефіцієнт k_{ph} – швидкість структурного фазового переходу.

Функцію $f(u)$ змодельємо виразом [6]:

$$f(u) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{u_0 - u}{\delta u}\right)}, \quad (4)$$

де параметр u_0 визначає значення порогу, вище якого адсорбовані молекули CO істотно впливають на структуру поверхні, а δu – крутизна цього порогу.

Коефіцієнт налипання кисню s_v у рівнянні (2) модифікується і запишеться як лінійна комбінація значень для структур (1×2) , (1×1) :

$$s_v = s_v^{(1)} W + s_v^{(2)} (1 - W). \quad (5)$$

Тут $s_v^{(1)}$, $s_v^{(2)}$ – коефіцієнти налипання кисню у фазах (1×1) та (1×2) , відповідно.

Постійні швидкостей реакції k_r , десорбції k_{des} та фазового переходу k_{ph} залежать від температури T і підпорядковуються рівнянням Арреніуса [10]:

$$k(T) = k^0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (6)$$

де k^0 – коефіцієнт, який не залежить від температури, E – енергія активації, R – універсальна газова стала.

Рівняння (1)-(3) складають запропоновану двовимірну математичну модель процесу окисації CO на поверхні платинового каталізатора.

III. ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛІ

Для числового дослідження знерозмірно рівняння (1)-(3) використавши підстановку:

$$u = u_{sat} U, \quad v = v_{sat} V, \quad (7)$$

$$x = l_0 \tilde{x}, \quad y = l_0 \tilde{y}, \quad t = t_c \tilde{t}, \quad (8)$$

де

$$t_c = \frac{v_{sat}}{p_u \kappa_u s_u} \quad (9)$$

Параметр l_0 вибираємо з експериментальних даних по розмірах кристалу Pt, згідно яких $l_0 \approx 10^{-3}$ см [11].

У знерозміреній формі рівняння (1)-(3) складають математичну модель реакції окиснення CO на поверхні Pt:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial \tilde{t}} = \frac{u_{sat}}{v_{sat}} (1 - U^3) - \tilde{k}_{des} U - \tilde{k}_r v_{sat} UV + \\ + \tilde{D}_x \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \tilde{x}^2} + D_0 \frac{\partial^2 U}{\partial \tilde{y}^2} \right), \\ \frac{\partial V}{\partial \tilde{t}} = \tilde{p}_v s_v (1 - U - V)^2 - \tilde{k}_r u_{sat} UV, \\ \frac{\partial W}{\partial \tilde{t}} = \tilde{k}_{ph} \left(1 + \exp\left(\frac{u_0 - U}{\delta u}\right) \right)^{-1} - \tilde{k}_{ph} W. \end{cases} \quad (10)$$

Тут

$$\tilde{k}_{des} = k_{des} t_c, \quad \tilde{k}_r = k_r t_c, \quad \tilde{k}_{ph} = k_{ph} t_c, \quad (11)$$

$$\tilde{p}_v = \frac{p_v \kappa_v t_c}{v_{sat}}, \quad \tilde{D}_x = \frac{D_x t_c}{l_0^2}, \quad D_0 = \frac{D_x}{D_y}. \quad (12)$$

Величини параметрів, які використовувалися в числових розрахунках, наведені в табл. 1 [7]. Парціальні тиски p_u та p_v , а також температура T відіграють роль контрольних параметрів моделі.

Результати числового аналізу моделі (10) подано на Рис. 1-9.

З Рис. 1-9 видно, що динаміка залежності поверхневих покриттів $U(x, y, t)$, $V(x, y, t)$, частки поверхні неперебудованої структури (1×1) $W(x, y, t)$ має яскраву осциляційну поведінку. Амплітудні значення коливань змінюються зі зміною y -координати, що говорить про вплив дифузії CO вздовж осі Oy , незважаючи на те, що $D_y \ll 0, 1 D_x$ [3, 11].

На відміну від одновимірної моделі [12], розрахована нами динаміка залежності поверхневих покриттів демонструє коливання змішаного режиму, які спостерігаються експериментально на Pt(110) [13]. Як видно з часових рядів на Рис. 1-6, малі коливання ϵ на поверхні переважно вкритій O, що також узгоджується з експериментом.

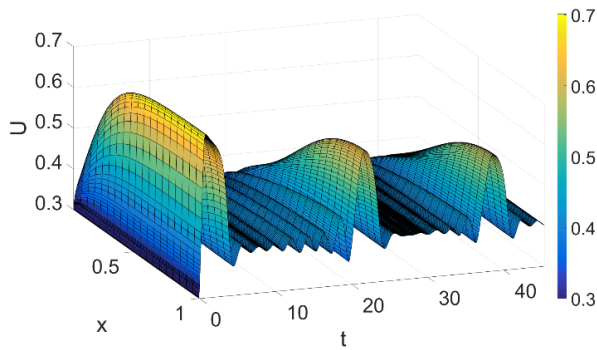


Рис. 1. Залежність поверхневого покриття CO $U(x, y, t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,25$.

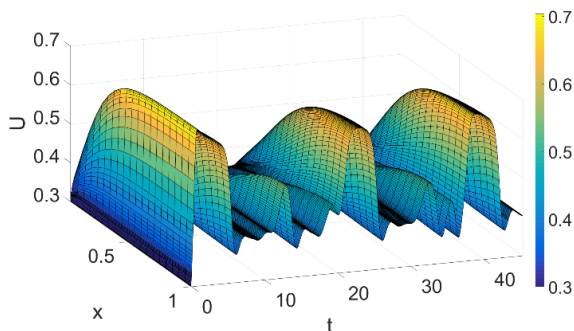


Рис. 2. Залежність поверхневого покриття CO $U(x, y, t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,5$.

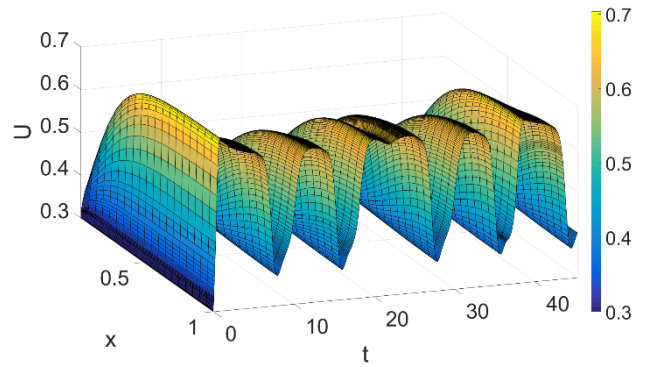


Рис. 3. Залежність поверхневого покриття CO $U(x, y, t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,75$.

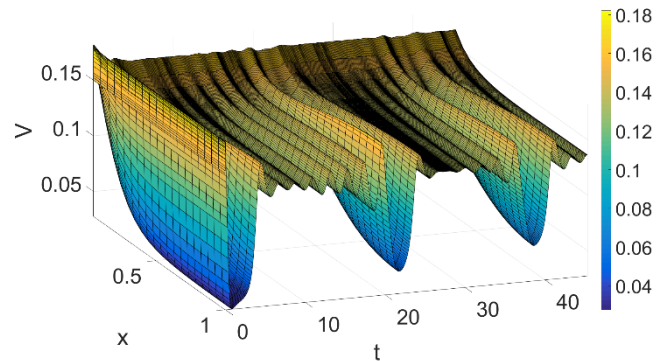


Рис. 4. Залежність поверхневого покриття O $V(x, y, t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,25$.

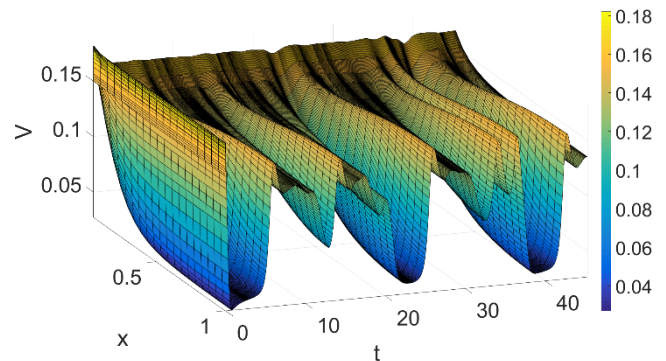


Рис. 5. Залежність поверхневого покриття O $V(x, y, t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,5$.

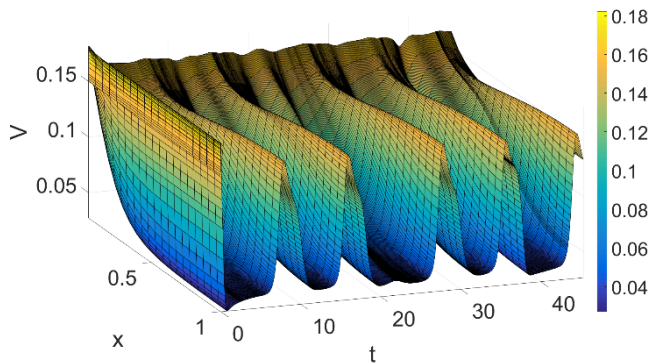


Рис. 6. Залежність поверхневого покриття O $V(x,y,t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,75$.

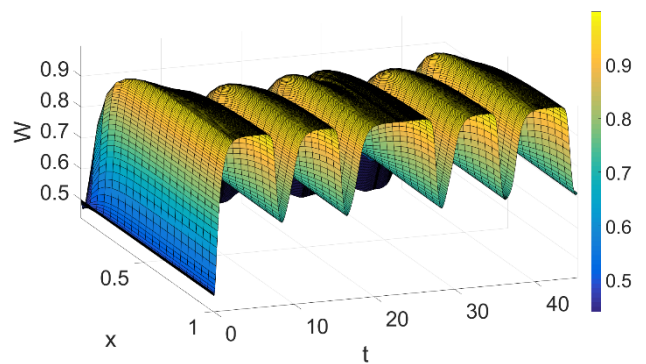


Рис. 9. Залежність частки поверхні неперебудованої структури (1×1) $W(x,y,t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,75$.

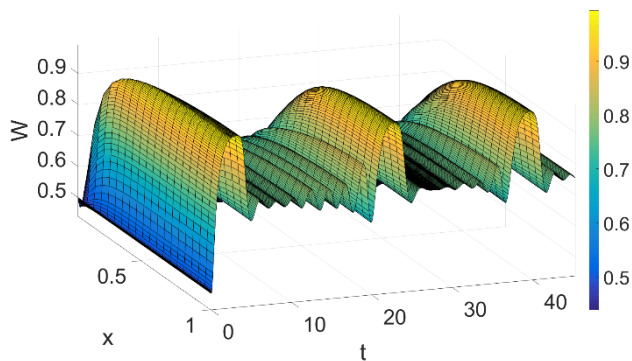


Рис. 7. Залежність частки поверхні неперебудованої структури (1×1) $W(x,y,t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,25$.

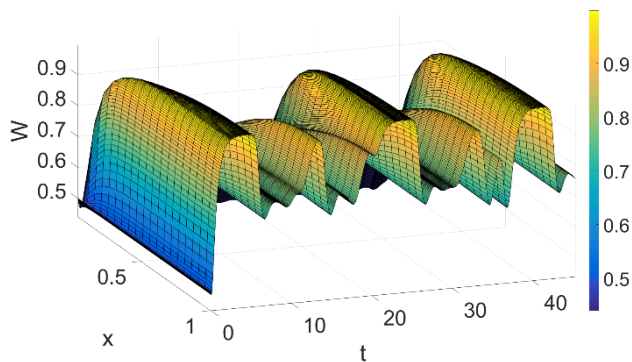


Рис. 8. Залежність частки поверхні неперебудованої структури (1×1) $W(x,y,t)$ при фіксованому значенні координати $y = 0,5$.

ВИСНОВКИ

У роботі побудовано та досліджено двовимірну математичну модель окиснення чадного газу згідно механізму Лангмюра-Гіншелвуда. Показано, що врахування двовимірності дозволяє отримати коливання змішаного режиму, які не вдалось передбачити одновимірною моделлю [12] без урахування рівняння для зміни ступеня огранювання [5].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Baxter R. J., Hu P., "Insight into why the Langmuir-Hinshelwood mechanism is generally preferred," *J. Chem. Phys.*, vol. 116, no. 11, pp. 4379-4381, 2002.
- [2] M. Wilf, P. T. Dawson, "Adsorption and desorption of oxygen on the Pt(110) surface; A thermal desorption and LEED/AES study," *Surf. Sci.*, vol. 65, pp. 399-418, 1977.
- [3] R. Gomer, "Diffusion of adsorbates on metal surfaces," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 53, no. 7, pp. 917-1002, 1990.
- [4] T. Gritsch, D. Coulman, R. J. Behm, G. Ertl, "Mechanism of the CO-induced (1×2) - (1×1) structural transformation of Pt(110)," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 63, no. 10, pp. 1086-1089, 1989.
- [5] Krischer K., Eiswirth M., Ertl G., "Oscillatory CO oxidation on Pt(110): Modeling of temporal self-organization," *J. Chem. Phys.*, vol. 96, pp. 9161-9172, 1992.
- [6] Bzovska I. S., Mryglod I. M., "Chemical oscillations in catalytic CO oxidation reaction," *Condens. Matter Phys.*, vol. 13, no. 3, pp. 34801:1-5, 2010.
- [7] Ryzha I., Matseliukh M., "Carbon monoxide oxidation on the Pt-catalyst: modeling and stability," *Math. Model. Comput.*, vol. 4, no. 1, pp. 96-106, 2017.
- [8] R. P. H. Gasser, E. B. Smith, "A surface mobility parameter for chemisorption," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 1, no. 10, pp. 457-458, 1967.
- [9] M. Bertram, A. S. Mikhailov, "Pattern formation on the edge of chaos: Mathematical modeling of CO oxidation on a Pt(110) surface under global delayed feedback," *Rhys. Rev. E.*, vol. 67, no. 3, pp. 036207-1-11, 2003.
- [10] Штиллер В., *Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика*, М.: Мир, 2000.
- [11] Suchorski Y. Private communication.
- [12] Бзовська І. С., Мриглюд І. М., "Поверхневі структури в каталітичній реакції монооксиду вуглецю," *Укр. фіз. журн.*, Т. 61, № 2, С. 140-148, 2016.
- [13] Eiswirth M., Krischer K., Ertl G., "Nonlinear dynamics in the CO-oxidation on Pt single crystal surfaces," *Appl. Phys. A.*, vol. 51, no. 2, pp. 79-90, 1990.

Динаміка Квазігармонічних Хвильових Пакетів у Середовищах з Включеннями

Скуратівський Сергій Іванович, Скуратівська Інна Антонівна
Відділення геодинаміки вибуху
Інститут геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України
Київ, Україна
skurserg@gmail.com, inna.skurativska@gmail.com

Dynamics of Quasiharmonic Wave Packets in Media with Inclusions

Skurativskiy Sergii, Skurativska Inna
Division of geodynamics of explosion
Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
skurserg@gmail.com, inna.skurativska@gmail.com

Анотація—В роботі вивчаються хвильові режими у середовищі з коливними включеннями. Середовище розглядається як сукупність взаємно проникаючих континуумів, один із яких проявляє нелінійні та просторово нелокальні властивості. У слабо нелінійному випадку засобами методу багатьох масштабів побудовано розв'язок, який описує поширення квазігармонічного хвильового пакету. Амплітуда цього розв'язку задовольняє нелінійне рівняння Шредінгера, яке дозволяє дослідити модуляційну нестійкість хвильового пакету в залежності від параметру просторової нелокальності середовища.

Abstract—In this paper the wave regimes in a medium with oscillating inclusions were studied. The medium is considered as the set of mutually penetrated continua, one of which manifests the nonlinear and spatially nonlocal properties. When the weak nonlinear case is considered via the method of multiple scales, we constructed the solution describing the propagation of quasiharmonic wave packet. Solution's amplitude satisfies the nonlinear Schrodinger equation supporting to study the modulational instability of wave packets depending on the parameter of spatial nonlocality of medium.

Ключові слова—структуроване середовище; нелінійні хвилі; солітон

Keywords—structured medium; nonlinear waves; soliton

I. ВСТУП

Природні середовища, зокрема геофізичні, мають яскраво виражену дискретну структуру, структурні елементи якої перебувають у коливальному русі [1]. В

умовах інтенсивних навантажень такі середовища проявляють особливості внутрішньої будови і можуть переходити у стан самоорганізації, що проявляється у формуванні локалізованих динамічних режимів, відомих як дисипативні структури [2]. Опис подібних явищ вимагає перегляду класичних моделей механіки суцільного середовища та врахування структурованості середовища.

Зокрема, серед способів моделювання хвильових полів у неоднорідних геосередовищах використовують класичні рівняння руху, але модифікують динамічні рівняння стану, в які включають опис динаміки структурних елементів. Як показано у роботах [2, 3], такі моделі допускають інваріантні розв'язки, що описують нелінійні періодичні, багатоперіодичні, квазіперіодичні, хаотичні, солітоноподібні хвильові режими.

Іншим напрямом удосконалення моделей є модифікація рівнянь руху середовища, які описують динаміку додаткових ступенів свободи структурних елементів, зокрема коливальних. У цьому випадку в рівняння руху системи вводяться додаткові об'ємні сили, зумовлені рухом елементів структури. На основі таких ідей у роботах [4, 5] була запропонована лінійна математична модель складного середовища у вигляді взаємно проникаючих континуумів.

Також варто зазначити, що для гетерогенних середовищ властивим є прояви нелінійних властивостей та далекосяжних кореляцій (просторова нелокальність). Врахування нелінійності та просторової нелокальності приводить до наступної математичної моделі середовищ з коливними включеннями [6-11]

Робота частково виконувалась в рамках НДР 0118U000044

$$\begin{aligned}
u_{tt} &= \sigma_x - m_1 w_{tt} - m_2 v_{tt}, \\
w_{tt} + \Omega_1^2 (w - u) &= 0, \quad v_{tt} + \Omega_2^2 (v - u) = 0, \\
\sigma - \theta \sigma_{xx} &= e_1 u_x + e_3 (u_x)^3,
\end{aligned} \quad (1)$$

де u зміщення основного середовища густини ρ ; σ – механічна напруга; w, v – зміщення осцилюючих включень двох видів, які характеризуються: густиною $m_1 \rho$ та власною частотою Ω_1 , а також густиною $m_2 \rho$ та власною частотою Ω_2 ; $e_{1,3}$ – модулі пружності. Параметр θ описує вплив розподілу градієнтів напружень (просторово нелокальні ефекти) [12] у несучому середовищі.

II. ПОБУДОВА ПЕРШОГО НАБЛИЖЕННЯ КВАЗІГАРМОНІЧНОГО РОЗВ'ЯЗКУ МОДЕЛІ СЕРЕДОВИЩА З ВКЛЮЧЕННЯМИ

Розглянемо поширення квазігармонічних хвильових пакетів [13, 14, 15] у середовищі з коливними включеннями в рамках слабо нелінійної моделі (1), коли фізична нелінійність несучого середовища мала, тобто $e_3 = \varepsilon e_3$, ε – малий параметр. Для побудови розв'язку використаємо метод багатьох масштабів [13], згідно з яким шукані функції мають наступний вигляд

$$\{u, w, v, \sigma\} = \left\{ \sum_{j=1}^4 \varepsilon^j U_j; \sum_{j=1}^4 \varepsilon^j W_j; \sum_{j=1}^4 \varepsilon^j V_j; \sum_{j=1}^4 \varepsilon^j S_j \right\},$$

де функції

$$\begin{aligned}
U_j &= U_j(X_1, X_2, \dots, T_1, T_2, \dots); \quad W_j = W_j(X_1, X_2, \dots, T_1, T_2, \dots); \\
V_j &= V_j(X_1, X_2, \dots, T_1, T_2, \dots); \quad S_j = S_j(X_1, X_2, \dots, T_1, T_2, \dots)
\end{aligned}$$

залежать тільки від повільних змінних $X_j = \varepsilon^j x$, $T_j = \varepsilon^j t$, $j = 1, 2, \dots$

У першому порядку малості за малим параметром отримаємо наступну систему:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 U_1}{\partial T_0^2} &= \frac{\partial S_1}{\partial X_0} - m_1 \frac{\partial^2 W_1}{\partial T_0^2} - m_2 \frac{\partial^2 V_1}{\partial T_0^2}, \\
\frac{\partial^2 W_1}{\partial T_0^2} + \Omega_1^2 (W_1 - U_1) &= 0, \quad \frac{\partial^2 V_1}{\partial T_0^2} + \Omega_2^2 (V_1 - U_1) = 0, \\
S_1 - \theta \frac{\partial^2 S_1}{\partial X_0^2} &= e_1 \frac{\partial U_1}{\partial X_0}.
\end{aligned} \quad (2)$$

Розв'язок лінійної системи (2) шукатимемо у вигляді

$$U_1 = A(X_1, T_1) \exp(i\varphi) + \text{к.с.}, \quad W_1 = B(X_1, T_1) \exp(i\varphi) + \text{к.с.},$$

$$V_1 = C(X_1, T_1) \exp(i\varphi) + \text{к.с.}, \quad S_1 = Q(X_1, T_1) \exp(i\varphi) + \text{к.с.},$$

де фаза хвилі $\varphi = \omega T_0 - k X_0$, ω та k – її частота та хвильове число.

Легко переконатись, що існування нетривіального розв'язку системи (2) можливе за наступної умови

$$\frac{e_1 k^2}{1 + \theta k^2} = \omega^2 \left(1 + m_1 \frac{\Omega_1^2}{\Omega_1^2 - \omega^2} + m_2 \frac{\Omega_2^2}{\Omega_2^2 - \omega^2} \right). \quad (3)$$

Рівняння (3) є дисперсійним співвідношенням системи (2). Уявлення про форму дисперсійної кривої дає рис. 1, на якому можна розрізнити три гілки дисперсійної кривої. Зазначимо, що врахування нелокальних ефектів спричинює появу на оптичній гілці дисперсійного співвідношення точки перегину, яка відповідає існуванню довжини хвилі нульової дисперсії [13]. Також на графіках існують інтервали частот, які відповідають аномальній дисперсії $k'' < 0$, коли високочастотні компоненти інформації поширюються швидше від низькочастотних.

Отже, враховуючи умову (3), амплітуди розв'язку першого наближення мають наступний вигляд

$$W_1 = q_W U_1, \quad V_1 = q_V U_1, \quad S_1 = i q_S U_1,$$

$$\text{де } q_W = \frac{\Omega_1^2}{\Omega_1^2 - \omega^2}, \quad q_V = \frac{\Omega_2^2}{\Omega_2^2 - \omega^2}, \quad q_S = -\frac{k e_1}{1 + \theta k^2}.$$

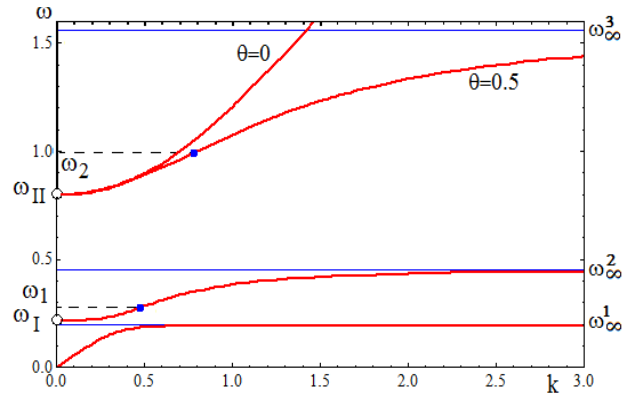


Рис. 1. Дисперсійна крива $\omega = \omega(k)$, визначена рівнянням (3) при $e_1 = 1$, $\Omega_1 = 0.2$, $\Omega_2 = 0.5$, $m_1 = 0.5$, $m_2 = 1.5$, $\theta = 0.5$. Інтервал $(\omega_I; \omega_{II})$, $(\omega_{II}; \omega_2)$ відповідає аномальній дисперсії.

III. ПОБУДОВА ВИЩИХ НАБЛИЖЕНЬ КВАЗІГАРМОНІЧНОГО РОЗВ'ЯЗКУ МОДЕЛІ СЕРЕДОВИЩА З ВКЛЮЧЕННЯМИ

У другому наближенні теорії збурень компоненти розв'язку мають вигляд

$$U_2 = R_U \exp(i\varphi) + \text{к.с.}, \quad W_2 = R_W \exp(i\varphi) + \text{к.с.},$$

$$V_2 = R_V \exp(i\varphi) + \text{к.с.}, \quad S_2 = i R_S \exp(i\varphi) + \text{к.с.}$$

Амплітуди $R_{U,W,V,S}$ задовольняють вироджену систему лінійних рівнянь з ненульовими правими частинами F_i (через громіздкість виразів тут не наводяться). Умовою сумісності такої системи є співвідношення

$$\sum_{j=1}^4 \chi_j F_j = 0,$$

$$\text{де } \chi_1 = 1, \chi_2 = \frac{m_1 \omega^2}{\Omega_1^2 - \omega^2}, \chi_3 = \frac{m_2 \omega^2}{\Omega_2^2 - \omega^2}, \chi_4 = \frac{k}{1 + \theta k^2}.$$

Цю умову можна переписати у наступній формі

$$A_{T_1} [-2\omega - 2m_1 q_w \omega - 2m_2 q_v \omega - 2\chi_2 \omega q_w - 2\chi_3 \omega q_v] + A_{X_1} \left[q_s - \frac{k}{1 + \theta k^2} (2\theta k q_s + e_1) \right] = 0. \quad (4)$$

Отримане співвідношення має вигляд рівняння переносу $A_{T_1} + A_{X_1} v_g = 0$, де $v_g = \frac{d\omega}{dk}$ – групова швидкість. Як і очікувалось, збурення обвідної у такому наближенні поширюються з груповою швидкістю.

Таким чином, у випадку, коли виконується співвідношення (4), розв'язки системи другого наближення мають вигляд

$$R_U = B, R_W = \frac{B\Omega_1^2}{\Omega_1^2 - \omega^2} - \frac{2q_w i \omega}{\Omega_1^2 - \omega^2} A_{T_1} \equiv B q_w - \frac{2q_w i \omega}{\Omega_1^2 - \omega^2} A_{T_1},$$

$$R_V = B \frac{\Omega_2^2}{\Omega_2^2 - \omega^2} - \frac{2q_v i \omega}{\Omega_2^2 - \omega^2} A_{T_1} \equiv B q_v - \frac{2q_v i \omega}{\Omega_2^2 - \omega^2} A_{T_1},$$

$$R_S = \frac{-k e_1 B}{1 + \theta k^2} - \frac{i(2\theta k q_s + e_1) A_{X_1}}{1 + \theta k^2} \equiv B q_s - \frac{i(2\theta k q_s + e_1)}{1 + \theta k^2} A_{X_1}.$$

Умова відсутності секулярних членів (містять $\exp(i\varphi)$) у третьому наближенні приводить до більш точного співвідношення відносно амплітуди A у формі нелінійного рівняння Шредінгера

$$i \left(A_{X_2} + A_{T_2} \frac{1}{v_g} \right) - \beta A_{T_1 T_1} + \gamma |A|^2 A = 0, \quad (5)$$

де

$$\beta = \left[1 + (m_1 + \chi_2) q_w \left(1 + \frac{4\omega^2}{\Omega_1^2 - \omega^2} \right) + (m_2 + \chi_3) q_v \left(1 + \frac{4\omega^2}{\Omega_2^2 - \omega^2} \right) - (1 + 2k\chi_4 \theta) \frac{(2\theta k q_s + e_1)}{v_g^2 (1 + \theta k^2)} + \chi_4 \frac{\theta}{v_g^2} q_s \right] / [q_s - \chi_4 (2q_s k \theta + e_1)],$$

$$\gamma = \frac{3e_3 \chi_4 k^3}{q_s - \chi_4 (2q_s k \theta + e_1)}.$$

Власне, для рівняння (5) відомо багато точних розв'язків, але тут доречним буде вказати розв'язок виду $A = a(\xi) \exp(i\varphi(\zeta))$. Тоді величина a задовольняє рівняння

$$a'' - v_1 a + v_0 a^3 = 0, \text{ де } v_1 = \frac{v - 2u}{4uv^2}, v_0 = -\frac{\gamma}{\beta}, (\cdot)' = d/d\xi,$$

$\xi = T_1 - X_2/u$, $\zeta = T_1 - X_2/v$, величини u та v – сталі швидкості. Вказане рівняння має гомоклінічний розв'язок виду $a = a_m \operatorname{sech}(\xi/\Delta)$, де $a_m^2 = 2v_1/v_0$, $\Delta^2 = 1/v_1$. Цей розв'язок відповідає солітонному розв'язку рівняння (5) і формується після втрати стійкості квазігармонічним пакетом.

Якщо коефіцієнти β та γ мають однакові знаки, то модуляційної нестійкості немає. Для визначення областей стійкості, розглянемо функцію $F(k, \omega) = \beta\gamma$ та побудуємо для неї лінію нульового рівня, тобто $F(k, \omega) = 0$ (лінія 2, рис. 2). Для усіх точок праворуч від цієї ізолінії функція $F(k, \omega) > 0$ (стійкість), тоді як для суміжної множини вона $F(k, \omega) < 0$ (нестійкість).

Дослідження показали, що при малих значеннях параметра нелокальності θ ізолінія 2 наближається до дисперсійної кривої, яка у свою чергу, згідно з рис. 1, втрачає точку перегину і стає вгнутою для всіх частот. Отже, коли ефекти просторової нелокальності не враховуються, тобто $\theta = 0$, в моделі (1) реалізується модуляційна нестійкість для точок $k'' < 0$, тоді як при $\theta \neq 0$ з'являються інтервали частот (у першу чергу у височастотній області), де можлива реалізація модуляційної стійкості.

У третьому наближенні методу багатьох масштабів з'являється кубічна нелінійність:

$$\frac{\partial^2 U_3}{\partial T_0^2} - \frac{\partial S_3}{\partial X_0} + m_1 \frac{\partial^2 W_3}{\partial T_0^2} + m_2 \frac{\partial^2 V_3}{\partial T_0^2} = \frac{\partial S_1}{\partial X_2} + \frac{\partial S_2}{\partial X_1} - 2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial T_0 \partial T_1} - \frac{\partial^2 U_1}{\partial T_1^2} - 2 \frac{\partial^2 U_1}{\partial T_0 \partial T_2} - m_1 \left(2 \frac{\partial^2 W_2}{\partial T_0 \partial T_1} + \frac{\partial^2 W_1}{\partial T_1^2} + 2 \frac{\partial^2 W_1}{\partial T_0 \partial T_2} \right) - m_2 \left(2 \frac{\partial^2 V_2}{\partial T_0 \partial T_1} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial T_1^2} + 2 \frac{\partial^2 V_1}{\partial T_0 \partial T_2} \right);$$

$$\frac{\partial^2 W_3}{\partial T_0^2} + \Omega_1^2 (W_3 - U_3) = - \left(2 \frac{\partial^2 W_2}{\partial T_0 \partial T_1} + \frac{\partial^2 W_1}{\partial T_1^2} + 2 \frac{\partial^2 W_1}{\partial T_0 \partial T_2} \right);$$

$$\frac{\partial^2 V_3}{\partial T_0^2} + \Omega_2^2 (V_3 - U_3) = - \left(2 \frac{\partial^2 V_2}{\partial T_0 \partial T_1} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial T_1^2} + 2 \frac{\partial^2 V_1}{\partial T_0 \partial T_2} \right);$$

$$S_3 - \theta \frac{\partial^2 S_3}{\partial X_0^2} - e_1 \frac{\partial U_3}{\partial X_0} = \theta \left(2 \frac{\partial^2 S_2}{\partial X_0 \partial X_1} + \frac{\partial^2 S_1}{\partial X_1^2} + 2 \frac{\partial^2 S_1}{\partial X_0 \partial X_2} \right) + e_1 \left(\frac{\partial U_1}{\partial X_2} + \frac{\partial U_2}{\partial X_1} \right) + e_3 \left(\frac{\partial U_1}{\partial X_0} \right)^3.$$

Будуючи розв'язок цієї системи та використовуючи умову відсутності секулярних доданків у четвертому

наближенні, можна переконались, що амплітуда C задовольняє рівняння переносу

$$C_{T_1} + C_{X_1} v_g = 0,$$

рівняння відносно B має наступний вигляд

$$i(B_{X_2} + v_g^{-1} B_{T_2}) - \beta B_{T_1 T_1} + \gamma(2B|A|^2 + B^* A^2) = 0.$$

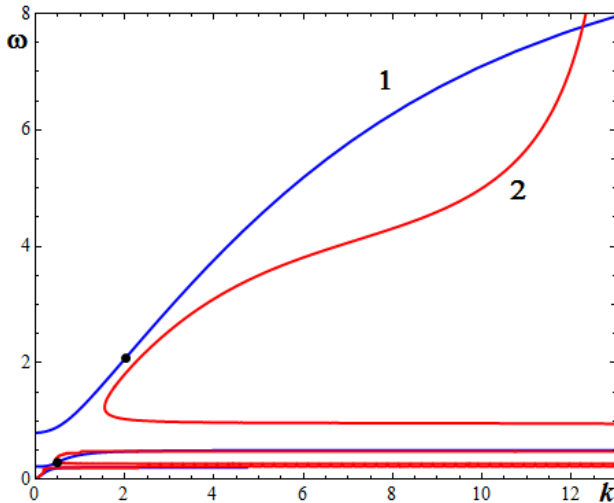


Рис. 2. Нульова ізолінія функції $F(k, \omega)$ (лінія 2) та дисперсійні криві (лінія 1, порівняти з кривими рис. 1). Параметр $\theta = 0,01$, інші параметри такі ж, як на рис. 1.

Амплітуда A задовольняє рівняння

$$i(A_{X_3} + A_{T_3} v_g^{-1}) + \beta_3 A_{T_1 T_2} + i\delta_3 A_{T_1 T_1 T_1} + i\gamma_3(A^2 A^*_{T_1} - 2A_{T_1} |A|^2) = 0.$$

Останні два співвідношення утворюють замкнуту систему зв'язаних рівнянь, аналіз якої становить окрему непросту задачу.

ВИСНОВКИ

У дослідженнях в рамках нелокальної математичної моделі геосередовища з коливними включеннями, проаналізовано дисперсійні співвідношення лінеаризованої моделі, отримано нелінійне рівняння Шредінгера для опису динаміки обвідної квазігармонічного хвильового пакету, вказані умови модуляційної нестійкості та існування в знайденому рівнянні солітонних режимів, побудовано рівняння вищих наближень методу багатьох масштабів.

Отримані результати можуть становити інтерес при вивченні хвильових процесів у нелінійних діелектриках [13], рідинах з пухирцями газу [16], у дворівневих ланцюгах взаємодіючих частинок [17], які у

довгохвильовому наближенні описують двокомпонентні середовища та інших матеріалах зі структурою [18]. Серед питань, що досліджуються, особливий інтерес становлять задачі поширення хвильових пучків із збереженням форми на якомога більші відстані, самофокусування фронтів пучків, резонансна взаємодія хвильових пакетів, що є перспективним для використання в галузі передачі інформації, інтенсифікації видобутку мінеральних ресурсів тощо.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] М. А. Садовский, "Автомодельность геодинамических процессов" *Вестн. АН СССР*, № 8, сс. 3–11, 1986.
- [2] V. A. Danylenko, T. B. Danevych, O. S. Makarenko, S. I. Skurativskiy and V. A. Vladimirov, *Self-organization in nonlocal non-equilibrium media*, Kyiv: Subbotin in-t of geophysics NASU, 2011.
- [3] V. A. Danylenko and S. I. Skurativskiy. "Peculiarities of wave fields in nonlocal media", *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*, vol. 16 no 2, pp. 165–178, 2016.
- [4] Л. И. Слепян, "Волна деформаций в стержне с амортизированными массами", *МТТ*, № 5, сс. 34–40, 1967.
- [5] В. А. Пальмов, "Об одной модели среды сложной структуры", *ПММ*, Вып. 4, сс. 768–773, 1969.
- [6] В. А. Даниленко, С. И. Скуративський, "Резонансні режими поширення нелінійних хвильових полів у середовищах з коливними включеннями", *Доповіди НАН України*, № 11, сс. 108–112, 2008.
- [7] С. И. Скуратовский, И. А. Скуратовская, "Локализованные автоволновые решения нелинейной модели сложной среды" *Техническая акустика*, [Електронний ресурс], Режим доступу: <http://www.ejta.org> 2010, 6.
- [8] S. I. Skurativskiy, "Chaotic wave solutions in a nonlocal model for media with vibrating inclusions", *Journal of Mathematical Sciences*, vol. 198, no. 1, pp. 54–61, 2014.
- [9] В. А. Даниленко, С. И. Скуративський, "Хвильові розв'язки моделі середовища з осциляторами Ван дер Поля", *Динамические системы*, Т. 2(30), № 3-4, сс. 227–239, 2012.
- [10] V. A. Danylenko and S. I. Skurativskiy, "Peculiarities of wave dynamics in media with oscillating inclusions", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 84, pp. 31–38, 2016.
- [11] V. A. Danylenko and S. I. Skurativskiy, "Dynamics of Waves in the Cubically Nonlinear Model for Mutually Penetrating Continua" *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity*, vol 6(4), pp. 425–433, 2017.
- [12] A. C. Eringen, *Nonlocal Continuum Field Theories*, NY, Springer-Verlag, 2002.
- [13] Н. М. Рыскин, Д. И. Трубецков, *Нелинейные волны. Ч.2*, М. Наука, 2000.
- [14] S. A. Rybak and O. M. Zozulya, "One-dimensional modulation instability of wave packets in media with resonant dispersion", *Physica A*, vol. 241, pp. 128–132, 1997.
- [15] S. I. Skurativskiy and I. A. Skurativska, "Propagation of quasi-harmonic wave packets in nonlocal media with oscillating inclusions", in *Proceedings of the 15th Conference "Mathematics in Technical and Natural Sciences"*, AGH, Koscielisko, Poland, 17-22 September 2017.
- [16] Р. И. Нигматулин, *Динамика многофазных сред. Ч.2.*, М. Наука, 1987.
- [17] I. Sh. Akhatov, V. A. Baikov and K. R. Khusnutdinova, "Non-linear dynamics of coupled chains of particles", *J. Appl. Maths Mech*, vol. 59, no. 3, pp. 353–361, 1995.
- [18] В. А. Пальмов, *Колебания упруго-пластических тел*. Москва, Наука, 1976.

Зсувне Пластичне Відшаровування Прямокутного Включення з Вільною від Контактів Одною Парою Граней

Василь Кривень
кафедра математичних методів в інженерії
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Тернопіль, Україна
kryvenv@gmail.com

Володимир Валяшек
кафедра математичних методів в інженерії
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Тернопіль, Україна
valiashek@gmail.com

Любов Цимбалюк
кафедра математичних методів в інженерії
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Тернопіль, Україна
lubovtsymbaliuk@gmail.com

Андрій Бойко
кафедра математичних методів в інженерії
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Тернопіль, Україна
boyko.a111@gmail.com

Shearing Plastic Peeling of Rectangular Inclusion with Contactless one Plane Pair

Vasyl Kryven
Department of Mathematical Methods in Engineering
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ternopil, Ukraine
kryvenv@gmail.com

Volodymyr Valiashek
Department of Mathematical Methods in Engineering
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ternopil, Ukraine
valiashek@gmail.com

Liubov Tsymbaliuk
Department of Mathematical Methods in Engineering
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ternopil, Ukraine
lubovtsymbaliuk@gmail.com

Andriy Boyko
Department of Mathematical Methods in Engineering
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ternopil, Ukraine
boyko.a111@gmail.com

Анотація—Знайдено чисельно-аналітичний розв'язок задачі про квазістатичне пластичне відшаровування жорсткого прямокутного включення, одна пара паралельних граней якого вільна від контакту із основним середовищем, а друга до навантаження перебувала з ним у ідеальному механічному контакті. Показано, що розвиток пластичних деформацій за схемою односмугового пластичного відшаровування можливий лише у випадку, коли довжина вільної від контакту пари граней не менша довжини другої їх пари.

Abstract—The numerical-analytic solution of the problem for quasi-static plastic peeling of the rigid rectangular inclusion is found, one pair of parallel planes free from contact with the basic medium, and the second one to the load is in the ideal mechanical contact with it. It is shown that the development of plastic deformations according to the scheme of single-band plastic peeling is possible only in case when the length of the contactless plane pair is not less than the length of their second pair.

Ключові слова—прямокутне включення, пластичне відшаровування, аналітичний розв'язок, конформне відображення

Keywords—rectangular inclusion, plastic exfoliation, analytical solution, conformal mapping

1. ВСТУП

Дослідження пружно-пластичного напружено деформованого стану (НДС) тіл з урахуванням пластичного відшарування включень залишається важливою задачею механіки. Актуальними і поки недостатньо вивченими залишалися пружно-пластичні поля в околі включень та вирізів форм, відмінних від математичних розрізів, чи безмежно тонких включень [1], наприклад, прямокутних щілин, включень прямокутної форми [2-4, 6]. Однак, саме такі концентратори часто з'являються в результаті технологічних процесів і часто є конструктивно необхідними [5]. Важливими та недостатньо вивченими залишаються задачі дослідження НДС тіл із включеннями за умови їх неідеального механічного контакту з середовищем. Недосконалий зв'язок на межі включення-середовище є додатковим джерелом концентрації напружень, що може призводити до міжфазних пластичних розшарувань і, як наслідок, втрати міцності чи функціональних характеристик механічної конструкції.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Дослідимо пластичне відшарування жорсткого прямокутного включення $|x| \leq a; |y| \leq b; |z| < \infty$ (рис.1) у ідеально пружно-пластичному середовищі під дією квазістатично зростаючого навантаження $\tau_{xz} = 0; \tau_{yz} = \tau_\infty$, прикладеного на нескінченності. Включення приймаємо абсолютно жорстким, його горизонтальні грані вільними

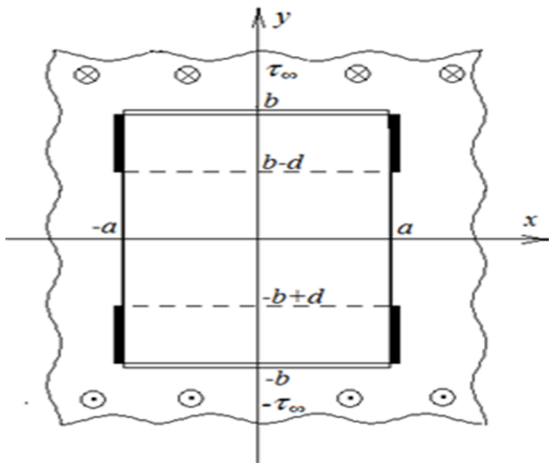


Рис. 1. Поперечний переріз тіла. Потовщені відрізки – шари пластичного відшарування.

від контакту із середовищем, а вертикальні початково ідеально з ним зчеплені. Досліджуватимемо пластичне відшарування включення, зумовлене розвитком від вершин включення пластичних шарів вздовж вертикальних граней включення. Задача полягає у визначенні НДС середовища і довжини пластичних шарів

у залежності від величини навантаження τ_∞ . Зсувна границя текучості основного середовища рівна k .

III. ФОРМАЛІЗАЦІЯ, АНАЛІЗ І РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Поза включенням тіло перебуває у пружному стані, а складена із компонент напружень функція $\tau(\zeta) = \tau_{yz}(x, y) + i\tau_{xz}(x, y)$ є аналітичною та однолистою областю $D = (\{x > 0, y > b\} \cup \{x > a, y > 0\}) \cap \{x > 0, y > 0\}$ і задовольняє на її межі таким умовам:
 $\text{Im } \tau(\zeta) = 0, (\zeta = iy, y > b);$
 $\text{Re } \tau(\zeta) = 0, (\zeta = x + ib, 0 < x < a);$
 $|\tau_1(\zeta)| = k, (\zeta = a + iy, b - d < y < b);$
 $\text{Im } \tau(\zeta) = 0, (\zeta = a + iy, 0 < y < b - d);$
 $\text{Im } \tau(\zeta) = 0, (\zeta = x, 0 < y < +\infty);$
 $\lim_{\zeta \rightarrow \infty} \tau(\zeta) = \tau_\infty$

Крім того, поза відрізком CK межі області D повинна виконуватися умова $|\tau(\zeta)| < k$, яка означає, що умова пластичності досягається тільки в точках смуг пластичного відшарування.

Внаслідок вказаних умов функція $\tau(\zeta)$ конформно відображає область D на півкруг із розрізом (рис. 2, область G). Стосовно відображення $\tau(\zeta)$ слід зробити таке зауваження: із постановки задачі випливає, що у чотирьох точках A, B, C, M границі області D значення функції $\tau(\zeta)$ наперед відомі та відповідно дорівнюють $\tau_\infty, 0, -ik, 0$. За такої умови припущення про повну визначеність конформного образу області D у площині τ означало б існування конформного відображення заданої області D площини ζ на задану область G площини τ із чотирма фіксованими точками на межі цих областей, що суперечить теоремі Рімана про існування конформного відображення [7]. Для забезпечення існування відображення слід ввести один параметр в образ області D . Єдиним способом уведення такого параметра є припущення невизначеності довжини розрізу

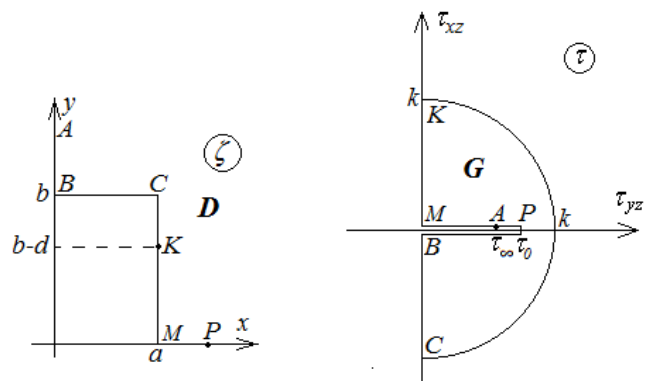


Рис. 2. Области конформних відображень у площинах ζ і τ .

$0 < \operatorname{Re} \tau < \tau_0; \operatorname{Im} \tau = 0 (\tau_0 > \tau_\infty)$ півкруга G . Тоді, відповідним вибором параметра τ_0 можна забезпечити потрібні координати вказаних чотирьох точок на межі областей D та G , а, отже, й існування наведеного на рис. 2 відображення. Фізично це означає, що напруження τ_{yz} на ділянці MA осі абсцис немонотонне і досягає у деякій точці P цієї ділянки свого максимального значення $\tau_0 = \max_{[a, +\infty)} \tau_{yz}(x, 0) > \tau_\infty$.

Відображення $\tau(\zeta)$ шукатимемо в параметричній формі:

$$\tau = \tau(t), \zeta = \zeta(t) \quad (t \in H = \{\operatorname{Im} t > 0\}), \quad (2)$$

увівши площину допоміжного комплексного параметра t , так, аби відповідним точкам межі областей D і G відповідала одна і та ж точка на межі області H , рис. 3.

Область D є прямолінійним прямокутним чотирикутником і тому функцію $\zeta = \zeta(t)$ можна знайти за допомогою перетворення Крістофеля-Шварца:

$$\zeta = a + ib + \frac{1}{BC} \int_0^t \frac{\sqrt{\eta} d\eta}{\sqrt{(\eta+1)(\eta-t_M)}}, \quad (3)$$

$$\text{де } BC = \int_{-1}^0 F(\eta) d\eta.$$

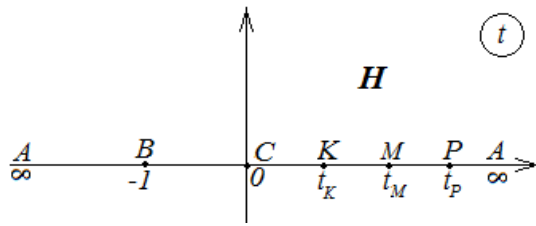


Рис. 3. Область H у площині допоміжного комплексного параметра t .

Функція (3) реалізуватиме подане на рис. 2, 3 відображення області H на область D , якщо параметр t_M підібрати так, аби виконувалися потрібні метричні співвідношення у області D :

$$\frac{BC}{CM} = \frac{a}{b}. \quad (4)$$

Оскільки $CM = \int_0^{t_M} F(\eta) d\eta$, то для знаходження t_M

приходимо до рівняння:

$$a \int_0^{t_M} F(\eta) d\eta = b \int_{-1}^0 F(\eta) d\eta, \quad (5)$$

розв'язаного тут методом ітерацій з допомогою такого алгоритму:

$$t_M^{(j+1)} = t_M^{(j)} - \alpha \frac{\frac{a}{b} - \frac{BC^{(j)}}{CM^{(j)}}}{\frac{a}{b} + \frac{BC^{(j)}}{CM^{(j)}}}, \quad j = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

де $t_M^{(j)}$ – j -е наближення розв'язку рівняння (5), $BC^{(j)}$,

$$CM^{(j)} \text{ – величини відповідно рівні } \int_{-1}^0 F(\eta) d\eta \text{ і } \int_0^{t_M^{(j)}} F(\eta) d\eta,$$

у яких у підінтегральній функції t_M замінено на $t_M^{(j)}$; α – додатне число, що визначає швидкість збіжності алгоритму (6), який для достатньо малих α і довільного $t_M^{(0)} > 0$ збігається як геометрична прогресія. Тут приймалися $t_M^{(0)} = 1$, $\alpha = b/a$.

Для співвідношень $a/b = 1; 2; 5; 10$ отримано такі значення параметра t_M : 1; 0.53017; 0.22686; 0.11793, коли модуль різниці обох частин рівняння (5) не перевищує 0.0001, що достатньо для забезпечення потрібної точності. Функцію $t(\tau)$ можна отримати композицією елементарних відображень. Після відповідних перетворень і спрощень отримуємо:

$$t = f_1(\tau) f_2(\tau) / f_3(\tau), \quad (7)$$

де $f(\tau) = \sqrt{(k^4 - \tau_0^2 \tau^2)(\tau_0^2 - \tau^2)}$ – аналітична функція у комплексній площині t , розрізаній вздовж відрізка $[-\tau_0; \tau_0]$ та променів $[-\infty; -k/\tau_0]$, $[k/\tau_0; +\infty]$ яка набуває дійсних додатних значень на верхньому березі розрізу $[-\tau_0; \tau_0]$;

$$f_1(\tau) = \tau_0(k^2 - \tau_\infty^2) - f(\tau),$$

$$f_2(\tau) = 2kf(\tau) - (k^2 + \tau_0^2)(k^2 - \tau^2),$$

$$f_3(\tau) = (k - \tau_0)^2 \left((k^2 - \tau_\infty^2) f(\tau) - c(k^2 - \tau^2) \right).$$

Поклавши в формулі (7) τ відповідно рівним $ik, 0, \tau_0$,

отримаємо координати точок M, K і P у площині t :

$$tM = \frac{(k + \tau_0)^2 \left(\tau_0(k^2 - \tau_\infty^2) - \sqrt{(\tau_0^2 - \tau_\infty^2)(k^4 - \tau_0^2 \tau_\infty^2)} \right)}{(k - \tau_0)^2 \left(\sqrt{(\tau_0^2 - \tau_\infty^2)(k^4 - \tau_0^2 \tau_\infty^2)} + \tau_0(k^2 - \tau_\infty^2) \right)};$$

$$tK = \frac{4k(k^2 - \tau_\infty^2)(k^2 + \tau_0^2)}{\left(2k\sqrt{(\tau_0^2 - \tau_\infty^2)(k^4 - \tau_0^2 \tau_\infty^2)} + (k^2 - \tau_\infty^2)(k^2 + \tau_0^2) \right)} \times \frac{\left(\tau_0(k^2 - \tau_\infty^2) - \sqrt{(\tau_0^2 - \tau_\infty^2)(k^4 - \tau_0^2 \tau_\infty^2)} \right)}{(k^2 - \tau_\infty^2)(k - \tau_0)^2};$$

$$tP = \frac{(k^2 - \tau_\infty^2)(k^4 - \tau_0^4) \left(\tau_0(k^2 - \tau_\infty^2) - \sqrt{(\tau_0^2 - \tau_\infty^2)(k^4 - \tau_0^2 \tau_\infty^2)} \right)}{(k - \tau_0)^2 (k^2 - \tau_\infty^2)(k^2 - \tau_0^2) \sqrt{(\tau_0^2 - \tau_\infty^2)(k^4 - \tau_0^2 \tau_\infty^2)} (+\tau_0)}.$$

Прообрази точок M і K при відображенні $\tau = \tau(t)$ позначено як tK, tM на відміну від їхніх прообразів t_K, t_M при відображенні $\zeta = \zeta(t)$.

Розв'язавши рівність (7) відносно τ , знаходимо першу із функцій (2):

$$\tau = \frac{(k^2 + \tau_\infty^2)\sqrt{t(t-tK)} - (k^2 - \tau_\infty^2)(t-t_0)}{2\tau_\infty\sqrt{(t+1)(t-tM)}}, \quad (8)$$

Тут під $\sqrt{t(t-tK)}$ та $\sqrt{(t+1)(t-tM)}$ слід розуміти аналітичні функції у комплексній площині t , розрізаній відповідно вздовж відрізків $[0; tK]$ та $[-1; tM]$ і рівні $t + o(t)$ коли $t \rightarrow \infty$.

Пара функцій (3), (8) визначатиме наведене на рис. 2 відображення $\tau = \tau(\zeta)$, якщо кожна точка площини t матиме спільний образ при відображеннях $\tau = \tau(t)$ і $\zeta = \zeta(t)$. І, зокрема, коли виконуватиметься рівність

$$t_M = tM \quad (9)$$

Рівняння (9) матиме розв'язок лише за умови:

$$tM_{\min} < t_M < tM_{\max}$$

і тому, розвиток пластичних деформацій за схемою односмугового пластичного відшарування, наведеною на рис. 1, може розпочинатися тільки для таких включень, висота яких не перевищує їхньої ширини: ($a > b$) і за квазістатичного збільшення навантаження τ_∞ може продовжуватися за цією схемою тільки поки $tM_{\min} < t_M$. Максимально допустиме навантаження $\tau_\infty = T$ для односмугового відшарування знаходимо із рівняння $tM_{\min} = T$:

$$T = k\sqrt{\frac{t_M + 2 - 2\sqrt{t_M + 1}}{t_M}}$$

За відомою координатою tK кінцевої точки пластичного шару в площині t знаходимо довжину пластичного шару із формули (3), рис. 4.

$$d = \frac{1}{BC} \int_0^t F(\eta) d\eta$$

Для включень із співвідношеннями $a/b = 1; 2; 5; 10$ значення критичного навантаження T є такими: 0.4142; 0.3255; 0.2250; 0.1669.

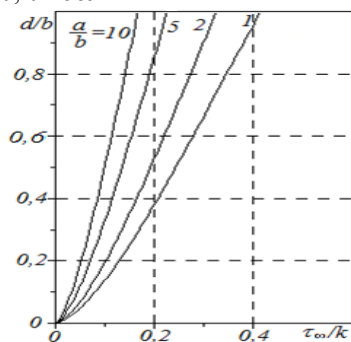


Рис. 4. Залежності довжини пластичного шару від навантаження для декількох форм включень.

Відсутність механічного зв'язку включення з основним середовищем вздовж горизонтальної пари

граней дуже суттєво впливає на хід відшарування. За такого самого навантаження прямокутне включення, яке перебувало в ідеальному механічному контакті з середовищем до навантаження [8], відшарується на порядок повільніше.

ВИСНОВКИ

Визначено антиплоский НДС при зсувному деформуванні необмеженого ідеально пружно-пластичного тіла із жорстким включенням, одна пара граней якого вільна від контакту із основним середовищем, за умови пластичного відшарування вздовж другої пари граней включення, яка до навантаження знаходилася в ідеальному механічному контакті з основним середовищем. Досліджено квазістатичне відшарування під монотонним навантаженням, прикладеним на нескінченності і діючим паралельно до вільних граней. Отримано цікавий, неочікуваний результат, що в рамках розглянутого тут випадку пластичне відшарування за односмуговою схемою можливе лише для включень, довжина вільних від контакту граней яких не перевершує довжини пари граней, зв'язаних із середовищем. Показано, що відсутність контакту на одній парі граней дуже суттєво прискорює процес відшарування, що негативно проявлятиметься на міцності тіла із заповненою порожниною за недосконалого адгезійного зв'язку заповнювача і середовища.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Кривень В.А., Сулим Г.Т. Розвиток зон пластичності біля односторонньо відшарованого тонкого включення при зсуві, паралельному включенню // *Машинознавство*. – 2002 – №1 – С.26-30.
- [2] Kryven' V. A., Valyashek V. B. Initial stage of plastic exfoliation of a rectangular inclusion under conditions of one-sided contact with a medium. // *Journal of Mathematical Sciences*. 2010. – Vol. 171, No. 4. P. 107–116.
- [3] Кривень В.А. Пластичне відшарування жорсткого півбезмежного включення скінченної ширини під зсувним навантаженням за наявності міжфазних тріщин / В.А. Кривень, А.Р. Бойко // *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. – 2014. – Вип. 19. – С. 84–92.
- [4] Кривень В. А. Початкова стадія пластичного відшарування прямокутного включення за умови одностороннього контакту з середовищем / В. А. Кривень, В. Б. Валяшек // *Математичні методи та фізико-механічні поля*. – 2010. – Том 53, № 4. – С. 107-116.
- [5] Саврук М. П. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст] : довідн. посіб. / М.П. Саврук, А. Казберук ; за заг. ред. В. В. Панасюка ; Концентрація напружень у твердих тілах з вирізами. – Львів : СПОЛОМ, 2012. – 384 с. (78).
- [6] Силованюк В. П. Деформація та руйнування матеріалів біля включень під статичним навантаженням тіла / В. П. Силованюк, Р. Я. Юхим // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2007. – № 6. – С. 31–35.
- [7] Коппенфельс В., Штальман Ф. Практика конформних отображений. Пер. с нем. К. М. Фишмана под ред. Л. И. Волковыского, Москва: ИЛ, 1963. – 406с.
- [8] Кривень В.А., Гнатюк О.Б., Гром'як Р.С. Антиплоска деформація ідеально пружнопластичного тіла з жорстким прямокутним включенням // *Фіз-хім механіка матеріалів*. – 2000. – №6. – С. 19-23.

Схеми Чисельного Інтегрування для Скінченно-Різницевого Розв'язання Дробового за Часом Рівняння Дифузії з Узагальненою Похідною Капуто

В.О. Богаєнко

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України
Київ, Україна
sevab@ukr.net

Numerical Integration Schemes for Finite Difference Solution of Time-Fractional Diffusion Equation with Generalized Caputo Derivative

V.O. Bohaienko

V.M. Glushkov Institute of cybernetics of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
sevab@ukr.net

Анотація—У роботі розглядаються алгоритми чисельного обчислення інтегралів, що виникають при дискретизації дробового за часовою змінною рівняння дифузії з узагальненою похідною Капуто. Пропонуються схеми, основані на розкладі підінтегральної функції у ряди Тейлора, що дозволяють пришвидшити обчислення інтегралів порівняно зі схемою рекурсивного підрозбиття. Наводяться результати тестування швидкодії алгоритмів.

Abstract—The algorithms of numerical computation of integrals that arise during the discretization of time-fractional diffusion equation with a generalized Caputo derivative are considered in the paper. We propose several algorithms based on the expansion of the integrand in the Taylor series which allow accelerating the computation of integrals in comparison with the recursive subdivision scheme. The results of the proposed algorithms performance testing are presented.

Ключові слова—узагальнена похідна Капуто; рівняння дифузії; чисельне інтегрування

Keywords—generalized Caputo derivative; diffusion equation; numerical integration

I. INTRODUCTION

Correct mathematical modelling of non-equilibrium diffusion processes requires the use of non-classical differential models, particularly the models with fractional derivatives [1,2]. In the case of media with memory effect, mass transfer is efficiently modelled by introduction of fractional derivative with respect to time variable into the diffusion equation [3,4].

Numerical modelling on the base of such models has higher computational complexity comparing with classical models [5,6]. Generalization of the derivative leads to even higher complexity and makes urgent the development of new numerical algorithms.

The paper deals with numerical modelling of anomalous diffusion using one-dimensional model with generalized Caputo fractional derivative [7] with respect to time variable. Considering the influence of the time spent on computation of integrals arising after discretization of the fractional derivative on the total computation time we propose several specific numerical schemes that lower it.

II. PROBLEM STATEMENT AND FINITE DIFFERENCE SCHEME

We consider the following one-dimensional time-fractional diffusion equation built on the base of the one described in [8]:

$$\sigma D_{t,g}^{(\beta)} C(x,t) = \frac{\partial}{\partial z} \left(d(x,t) \frac{\partial C(x,t)}{\partial z} \right), \quad x \in [0, L], \quad t \geq 0, \quad \beta \leq 1 \quad (1)$$

where $C(x,t)$ is the diffusive substance concentration, σ is the porosity of the medium, $d(x,t)$ is the diffusion coefficient, $D_{t,g}^{(\beta)}$ is the generalized Caputo fractional derivative with respect to time variable t that has the following form:

$$D_{t,g}^{(\beta)} H(x,t) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_0^t \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} (g(t) - g(\tau))^{-\beta} d\tau$$

For the equation (1) we pose the following initial and boundary conditions:

$$C(0,t) = 1, \quad \left. \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad C(x,0) = 0$$

Considering uniform grid domain

$$\omega = \left\{ (x_i, t_j) : x_i = ih, t_j = j\tau, i = 0, \dots, m, j = 0, 1, \dots \right\}, \quad (2)$$

first order finite difference approximation $\Delta_{t,g}^{(\beta)}$ of the operator $D_{t,g}^{(\beta)}$ can be defined [7] as

$$\Delta_{t,g}^{(\beta)} C = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \sum_{s=0}^j b_s^{(j)} \frac{C^{s+1} - C^s}{\tau_s},$$

$$b_s^{(j)} = \int_{t_s}^{t_{s+1}} (g(t_j) - g(\tau))^{-\beta} d\tau \quad (3)$$

Discretizing the equation (1) on the grid (2) using (3) we obtain the following three-diagonal linear equations system (values of C_0^{j+1} and C_m^{j+1} are obtained from the boundary conditions):

$$A_i^j H_{i-1}^{j+1} - R_i^j H_i^{j+1} + B_i^j H_{i+1}^{j+1} = \Omega_i^j \quad (i = 1, \dots, m-1, j = 0, 1, \dots) \quad (4)$$

where

$$A_i^j = \frac{d_{i-1}}{h^2}, \quad B_i^j = \frac{d_i}{h^2}, \quad R_i^j = \frac{d_{i-1} + d_i}{h^2} + \frac{\sigma b_j^{(j)}}{\tau \Gamma(1-\beta)},$$

$$\Omega_i^j = -\frac{\sigma b_j^{(j)}}{\tau \Gamma(1-\beta)} C^j + \frac{\sigma}{\tau \Gamma(1-\beta)} \sum_{s=0}^{j-1} b_s^{(j)} (C^{s+1} - C^s).$$

System (4) can be solved by the sweep method [9].

III. NUMERICAL INTEGRATION ALGORITHMS

Determination of the values of system (4) coefficients needs performing calculation of the integrals $b_s^{(j)}$. These integrals are improper when $s = j-1$ and special approximation methods should be used for their evaluation.

We propose to use the following recursive subdivision algorithm for this purpose:

- 1) The current integration interval $I = [I_l, I_u]$ is set equal to $I = [t_s, t_{s+1}]$;

- 2) Integral over the current integration interval is calculated using the trapezoidal rule;
- 3) The interval is then split into two parts: $I_1 = [I_l, \frac{1}{2}(I_l + I_u)]$ and $I_2 = [\frac{1}{2}(I_l + I_u), I_u]$. The value of the integral over the interval $I = [I_l, I_u]$ is calculated as a sum of integrals over the intervals I_1, I_2 , that are, in turn, evaluated using the trapezoidal rule;
- 4) When the difference between the approximations of the integral's value obtained on steps 2 and 3 is greater than a given ε_1 , the procedure is recursively repeated for the intervals I_1, I_2 .

When $s = j-1$ and the integral has to be computed over the interval $I_3 = [t_{s+1} - \varepsilon_2, t_{s+1}]$ where ε_2 is a given constant, we propose to use the following algorithm:

- 1) The initial step is set equal to $s = \varepsilon_2 / N$ where N is a given number; the initial value of the lower bound of integration interval is set equal to $t_l = t_{s+1} - \varepsilon_2$.
- 2) The value of the integral over $[t_l, t_l + s]$ is calculated by a 4-th order quadrature formula;
- 3) When $F(t_l + s/2) / F(t_l) < F(t_l + s) / F(t_l + s/2)$ where F is an integrand, we decrease the step s by $F(t_l + s)F(t_l) / F^2(t_l + s/2)$. This makes the integrand to be close to a linear function within the interval $[t_l, t_l + s]$;
- 4) The step is halved when $t_l + s > t_{s+1}$;
- 5) When $(t_{s+1} - t_l) < \varepsilon_3$ where ε_3 is a given constant, we shift to the next interval by setting $t_l \leftarrow t_l + s$.

Number of evaluations upon the above-described algorithm that must be performed increases with an increase of time step number. Since it is difficult to construct optimized or recurrent procedures for this algorithm, the construction of other numerical schemes is urgent in order to reduce the time spent on computing the integrals $b_s^{(j)}$.

Assuming there exists an infinitely differentiated function $f(\tau) : f(g(\tau)) = \tau$, the integral $b_s^{(j)}$ can be expanded in series in two following ways.

After doing in $b_s^{(j)}$ a change of variables in the form of $x = g(t_j) - g(\tau) \Rightarrow \tau = f(g(t_j) - x)$ we obtain

$$b_s^{(j)} = \int_{t_s}^{t_{s+1}} (g(t_j) - g(\tau))^{-\beta} d\tau = \int_{g(t_j) - g(t_{s+1})}^{g(t_j) - g(t_s)} f'(g(t_j) - x) x^{-\beta} dx.$$

Expanding $f'(x)$ in the Taylor series at $x = g(t_j)$ we have

$$b_s^{(j)} = \sum_{n=0}^{\infty} \left((-1)^n \frac{f^{(n+1)}(g(t_j))}{n!} \int_{g(t_j)-g(t_{s+1})}^{g(t_j)-g(t_s)} x^{n-\beta} dx \right) =$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \left((-1)^n \frac{f^{(n+1)}(g(t_j))}{n!(n-\beta+1)} \left[(g(t_j)-g(t_s))^{n-\beta+1} - (g(t_j)-g(t_{s+1}))^{n-\beta+1} \right] \right). \quad (5)$$

Another scheme of $b_s^{(j)}$ evaluation can be obtained doing a change of variables in the form of $x = g(\tau) \Rightarrow \tau = f(x)$ having

$$b_s^{(j)} = \int_{t_s}^{t_{s+1}} (g(t_j) - g(\tau))^{-\beta} d\tau = \int_{g(t_s)}^{g(t_{s+1})} f'(x)(g(t_j) - x)^{-\beta} dx.$$

Expanding $(g(t_j) - x)^{-\beta}$ using the generalized Newton binomial series and expanding $f'(x)$ in the Taylor series at $x = g(t_{s+1})$ we have

$$b_s^{(j)} = \sum_{n=0}^{\infty} \left((-1)^n \binom{-\beta}{n} g(t_j)^{-\beta-n} S_n \right),$$

$$S_n(t_s, t_{s+1}) = \sum_{m=0}^{\infty} \left[B_m \frac{f^{(m+1)}(g(t_{s+1}))}{m!} \right],$$

$$B_m = \int_{g(t_s)}^{g(t_{s+1})} x^n (x - g(t_{s+1}))^m dx. \quad (6)$$

The value of the integral B_1 can be calculated using the following recursion:

$$B_0 = \int_{g(t_s)}^{g(t_{s+1})} x^n dx = \frac{1}{n+1} (g(t_{s+1})^{n+1} - g(t_s)^{n+1}),$$

$$B_{i+1} = -\frac{n+i+2}{g(t_{s+1})(i+1)} \left(B_i - \frac{g(t_s)^{n+1} (g(t_s) - g(t_{s+1}))^{i+1}}{g(t_{s+1})(i+1)} \right).$$

The main feature of the scheme (6) is that the values of the coefficients S_n once calculated for the fixed t_s and t_{s+1} can be cached and further used when t_j changes.

Computational experiments performed in the case of $g(\tau) = \tau^2$, $f(\tau) = \tau^{1/2}$, $f'(\tau) = \frac{1}{2}\tau^{-1/2}$, $f^{(n+1)}(\tau) = \frac{1/2-n}{\tau} f^{(n)}(\tau)$ showed that the convergence of the series (5) worsens when $t_s \rightarrow 0$ while the convergence of the series (6) worsens when $t_{s+1} \rightarrow t_j$. To ensure the highest performance we propose the following algorithm of automatic selection of series (5) or (6) for the approximation of the integrals $b_s^{(j)}$ depending on the values of their parameters:

- 1) Let the values of the integrals $b_s^{(j)}$ are calculated sequentially for $t_j, j = 0, 1, \dots$ and $t_s, s = 0, \dots, j-1$;
- 2) $a \leftarrow 2$;
- 3) When $t_s \leq t_a$, the scheme (6) is used for numerical integration;
- 4) When $t_s = t_a$ we perform a correction of the value of the parameter a . If the number of iterations needed to approximate the integral with a given accuracy using the scheme (5) is greater that the corresponding number of iterations for the scheme (6), the value of the parameter must be increased: $a \leftarrow a+1$. Otherwise, if $a \neq 1$ the value must be set to $a \leftarrow a-1$;
- 5) When $t_s > t_a$, the scheme (5) is used for numerical integration.

IV. NUMERICAL EXPERIMENTS

The efficiency of the proposed algorithms was tested solving the initial-boundary problem for the equation (1) with $L=3, d=1, \sigma=1, \beta=0.6, \tau=0.1$. The obtained solutions are presented for $T=5$ on Fig. 1.

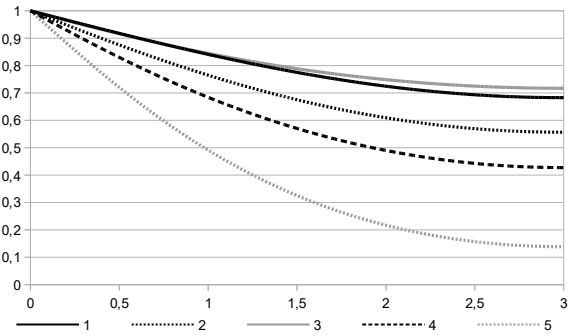


Fig. 1. Solutions of the initial-boundary problem for the equation (1) (1 - $\beta = 1, g(\tau) = \tau$, 2 - $\beta = 0.8, g(\tau) = \tau$, 3 - $\beta = 0.6, g(\tau) = \tau^2$, 4 - $\beta = 0.6, g(\tau) = \tau$, 5 - $\beta = 0.8, g(\tau) = \tau^{1/2}$)

Total time (ms) spent during the solution of the problem on the calculations of $b_s^{(j)}$ for $g(\tau) = \tau^2$ depending on the number of time step is given on Fig.2.

As can be seen from the experimental data, the algorithm for automatic selection of series (5) or (6) allows accelerating the calculation, whereas the use of these series separately due to the peculiarities of their convergence slows down the solution process.

CONCLUSIONS

Improper integrals that arise in discretization of generalized Caputo derivative have to be numerically calculated during modelling of anomalous diffusion on the base of the considered model. As recursive subdivision quadrature formulae that can be used in this case are rather slow, we propose specific computation schemes that can speed-up computations.

The performed computational experiments show that the use of the schemes based of Taylor series expansions of the integrals $b_s^{(j)}$ can achieve up to 2.5 times speed-up solving the considered problem of diffusion process simulation. The speed-up lowers here while modelling the processes on large time intervals; become higher for lower values of time step or higher values of fractional derivative order.

As the proposed algorithms are optimized for the case of sequential changes of the parameters of the integrals $b_s^{(j)}$, further research can be performed to apply them for solving space-fractional differential equation with generalized Caputo derivatives.

REFERENCES

- [1] R. Gorenflo, F. Mainardi, "Fractional calculus: integral and differential equations of fractional order" in *Fractals and Fractional Calculus in Continuum Mechanics*, Wien, Austria, Springer Verlag, 1997, pp.223–276.
- [2] I. Podlubny, "Fractional differential equations", New York, Academic Press, 1999.
- [3] V.M. Bulavatsky, "Numerical modeling of the dynamics of a convection diffusion process locally non-equilibrium in time", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol.48, no.6, pp.861-869, 2012.
- [4] V.A. Bogaenko, V.M. Bulavatsky, Yu.G. Kryvonos, "Mathematical Modeling of Fractional-Differential Dynamics of Process of Filtration-Convective Diffusion of Soluble Substances in Nonisothermal Conditions", *Journal of Automation and Information Sciences*, no.4, pp.12-25, 2017.
- [5] P.Ya. Polubarinova-Kochina, "Theory of groundwater movement (in Russian)", Moscow, USSR, Nauka, 1977.
- [6] V.I. Lavryk, N.A. Nikiforovich, "Mathematical modelling in hydroecologic researches (in Russian)", Kiev, Ukraine, Fitosotsiocentre, 1998.
- [7] V.M. Bulavatsky, Yu.G. Kryvonos, "Mathematical Models with a Control Function for Investigation of Fractional-differential Dynamics of Geomigration Processes", *Journal of Automation and Information Sciences*, no.6, pp.1-11, 2014.
- [8] A. Çetinkaya, O. Kıymaz, "The solution of the time-fractional diffusion equation by the generalized differential transform method", *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, no.9-10, pp. 2349-2354, 2013.
- [9] A. Samarskii, "The Theory of Difference Schemes", New York, CRC Press, 2001.

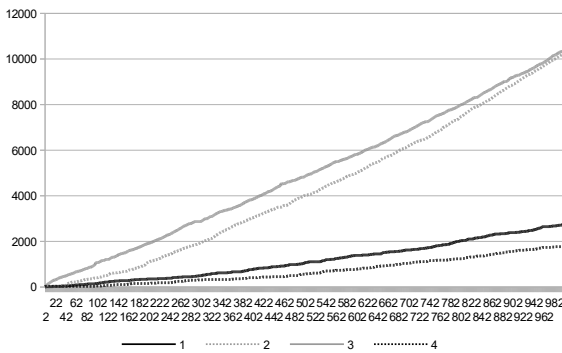


Fig. 2. Time spent to compute the value of $b_s^{(j)}$ depending on the number of time step (1 – the recursive subdivision algorithm, 2 – the series (5), 3 – the series (6), 4 – the algorithm of automatic series selection)

Computational experiments showed that the efficiency of the algorithm of automatic series selection decreases with the increase of time step number. At the same time, it increases with the decrease of the fractional derivative order β or the increase of time step length.

The per cent of the time spent on the calculations of $b_s^{(j)}$ in the total time depending on the number of time step is shown on Fig.3. The obtained data show that the influence of the time spent on computing $b_s^{(j)}$ on the total time decreases with the increase of the number of time step.

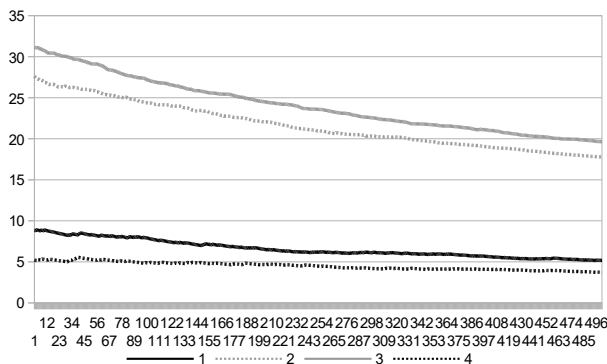


Fig. 3. Per cent of the time spent on the calculations of $b_s^{(j)}$ in the total time depending on the number of time step (1 – the recursive subdivision algorithm, 2 – the series (5), 3 – the series (6), 4 – the algorithm of automatic series selection)

Дослідження Можливості Застосування Закону Керування, Синтезованого на Основі Кінематичної Моделі, для Керування Динамічною Моделлю Реверсного Руху Автопоїзда

Володимир Вербицький
кафедра Програмного забезпечення
автоматизованих систем
Запорізька державна інженерна академія
Запоріжжя, Україна
oxsidan@ukr.net

Дмитро Татієвський
кафедра Програмного забезпечення
автоматизованих систем
Запорізька державна інженерна академія
Запоріжжя, Україна
dtdissert@gmail.com

Анатолій Безверхий
кафедра Програмного забезпечення
автоматизованих систем
Запорізька державна інженерна академія
Запоріжжя, Україна
anatoliy.bezverkhyy@hotmail.com

Studying a Possibility to Apply the Control Law Synthesized on the Basis of the Kinematic Model to Control the Dynamic Model of Reverse Road Train Motion

Volodymyr Verbytskyy
dept. Software of Automated Systems
Zaporizhzhia State Engineering Academy,
Zaporizhia, Ukraine
oxsidan@ukr.net

Dmytro Tatievskyi
dept. Software of Automated Systems
Zaporizhzhia State Engineering Academy,
Zaporizhia, Ukraine
dtdissert@gmail.com

Anatoliy Bezverkhyy
dept. Software of Automated Systems
Zaporizhzhia State Engineering Academy,
Zaporizhia, Ukraine
anatoliy.bezverkhyy@hotmail.com

Анотація—У цьому дослідженні проведено вивчення стану вирішення проблеми, пов'язаної з реверсним рухом автопоїзда, що складається з тягача і напівпричепа зі зчпним пристроєм точно над задньою віссю тягача ("on-axle hitching" модель). На основі аналізу підходів до синтезу законів управління таким автопоїздом, прийнято рішення

реалізувати синтез управління для кінематичної моделі, з використанням методу функцій Ляпунова. Основна ідея дослідження полягає в перевірці можливості застосування синтезованого закону до управління динамічною моделлю. Для вивчення поведінки синтезованих законів для різних моделей, проводився порівняльний аналіз фазових портретів

траєкторій, кутів складання і управління, а також виконувався аналіз якості перехідних процесів при зміні швидкості руху автопоїзда. Синтез керування та чисельне інтегрування виконані у системі Maple. Такий аналіз дозволяє зробити висновок про можливість застосування синтезованого, для кінематичної моделі, закону управління до моделі динамічної, при русі з малими швидкостями, малими початковими збуреннями за кутом складання та для малих часових проміжків.

Abstract—The current research contains studying of an issue solution state related to reverse motion of a road train consisting of a tractor truck and a semitrailer with a hitching unit on the tractor truck rear axle directly (an “on-axle hitching” model). Based on analyzing approaches towards the kind of road train steering laws synthesis it's decided to synthesize kinematic model controlling using Lyapunov's functions method. The main research idea is in checking the possibility to apply the synthesized law to control a dynamic model. Comparative analysis of trajectory phase portraits, folding and steering angles and also analyzing transitions quality when changing road train motion speed have been performed to study synthesized laws behaviour for different models. Steering synthesis and computational integration are done in the Maple system. The kind of analysis allows making a conclusion that it's possible to use the steering law synthesized for a kinematic model to control a dynamic model when moving at low speeds, with small folding angle initial disturbance and for short time intervals.

Ключові слова—автопоїзд; динаміка; закон керування рухом; кінематична модель; модель реверсного руху

Keywords—road train; motion steering law; kinematic model; reverse motion model

I. ВСТУП

Автопоїзди, що складаються із тягача та пасивних напівпричепів, відносяться до класу нелінійних, неголономних, структурово нестійких (при реверсному русі) динамічних систем. Внаслідок цього, завдання керування їх рухом є актуальним з точки зору практичної реалізації програмного руху із заданими обмеженнями.

Завдання керування рухом автопоїзда з напівпричепом у припущенні реалізації неголономних зв'язків (відсутність бічного ковзання опорних коліс) має велике теоретичне та прикладне значення. Дослідження в цій галузі стимулюються численними прикладними завданнями [1, 2], оскільки існує проблема управління такою системою при русі реверсом (виконанні парковки, в'їзді в обмежений простір (dock), маневруванні при виїзді заднім ходом з доку та інше). Без належного управлінського впливу, ланки автопоїзда будуть «видавлювати» один одного, що супроводжується необмеженим ростом кута складання, явище, відоме як jackknifing, в той час як при русі вперед напівпричіп

відстежуватиме курсовий кут тягача. Тому автономні системи вантажоперевезень є в даний час об'єктом численних дослідницьких проєктів, серед яких можна виділити роботи по синтезу законів керування для реверсного руху таких систем.

Синтезовані при цьому закони керування можуть бути безпосередньо використані для програмного управління робототехнічними установками відповідних моделей, розробки машини Дубінса для цих моделей, для побудови автоматичних систем управління, які б допомагали водієві керувати автомобілем з причепом при русі зворотним ходом.

Щодо згаданих моделей, слід зазначити, що для автопоїздів досить типовим є розташування тягово-зчіпного пристрою як точно над задньою віссю тягача (on-axle hitching), так і зі зміщенням зчіпних пристроїв щодо задньої осі тягача (off-axle hitching). У даному дослідженні кінематичне керування синтезовано для першого типу моделей.

II. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для моделі, що досліджується, пропонуються методи керування та планування із застосуванням різноманітного математичного апарату. Серед методів, що використовуються найчастіше, виділимо метод зворотних зв'язків [3, 4] та ланцюгових систем [5].

Також, використовуються методи, зумовлені виключно геометричними особливостями кінематики моделі, що сформульовані у каскадній формі [6].

Синтез закону керування може бути виконаний після лінеаризації моделі зворотним зв'язком, згідно із станом, використовуючи апарат алгебри Лі [7] та нечіткої логіки (fuzzy logic) [8].

Використовується каскадна стратегія керування (VFO) [4]. Застосовуються лінійно-квадратичні контролери [9], нільпотентна апроксимація [10] та інше.

Якісний аналіз таких систем виконано у дослідженнях А.А. Мартинюка та Н.В. Нікітіна [11].

При цьому синтез законів керування розробляється, як правило, для динамічної та кінематичної моделей окремо.

Мета дослідження полягає в реалізації синтезу закону керування для кінематичної моделі, із застосуванням методу функцій Ляпунова та у перевірці можливості керування реверсним прямолінійним рухом дволанкового автопоїзда, що описується динамічною моделлю за допомогою синтезованого закону.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Синтезуємо закон керування реверсним рухом автопоїзду для кінематичної схеми, що наведена на рис. 1.

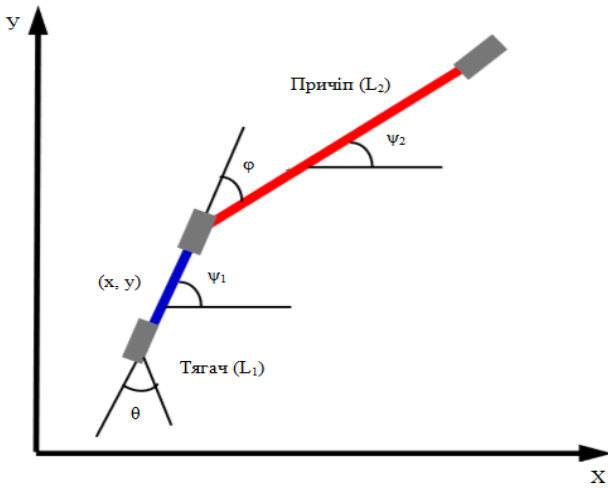


Рис. 1. Кінематична схема дволанкового автопоїзда

Тут ψ_1, ψ_2 – орієнтаційні (курсіві) кути об'єктів системи, L_1, L_2 – їх лінійні розміри, θ – керування (кут повороту рульових коліс тягача), $\varphi = \psi_2 - \psi_1$ – кут складання між тягачем та напівприцепом. До цього кута застосовується обмеження $|\varphi| < \pi/2$, обмеження кута θ визначаються технічними можливостями керування.

Вважаючи $\psi_1 = \psi$, модель такого автопоїзда описується наступною системою диференціальних рівнянь (1):

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= v \cdot \cos(\psi); \\
 \dot{y}_1 &= v \cdot \sin(\psi); \\
 \dot{\omega} &= v \cdot \tan(\theta) / L_1; \\
 \dot{\varphi} &= v \cdot \sin(\varphi) / L_2 - v \cdot \tan(\theta) / L_1; \\
 \theta &= \text{Theta}; \\
 \psi &= \omega,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

у якій вираз Theta (2) є похідною керування за часом, що синтезована за допомогою методу функцій Ляпунова [12]. Даний метод використовувався для синтезу кінематичного керування [13].

Синтез керування та чисельне інтегрування виконані у системі Maple:

$$\begin{aligned}
 \text{Theta} &= \cos^2(\theta) \cdot ((v \cdot \sin(\varphi) / L_1 - \\
 &- v \cdot \tan(\theta) / L_2) \cdot (1 + \cos(\varphi) \cdot L_2 / L_2) - \\
 &- \tan(\theta) + \varphi + \sin(\varphi) \cdot L_2 / L_1).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Цей вираз використовувався у якості керування для динамічної моделі [14]. У маплеті реалізована можливість порівняння необхідних фазових портретів. Для цього спочатку відпрацьовує динамічна модель, потім – кінематична. Після цього отримані фазові портрети об'єднуються для порівняльного візуального аналізу.

Чисельне інтегрування СДР виконано за однакових початкових умов (умови Коші).

Нижче зображені траєкторії характерної точки в площині руху (рис. 2), інтегральні криві за кутами складання (рис. 3) та залежність закону керування як функції від часу (рис. 4) для обох розглянутих моделей.

При швидкості $v = 1$ м/с траєкторії тягача носять прямолінійний характер у часовому інтервалі, що дорівнює приблизно 10 сек. від початку руху, надалі їх бокові зміщення носять різноспрямований характер із більшою тенденцією до зростання їх норми у кінематичній моделі.

Напрямок цих зміщень однозначно визначається кутом складання (зміщення міняють знак при зміні знака цього кута).

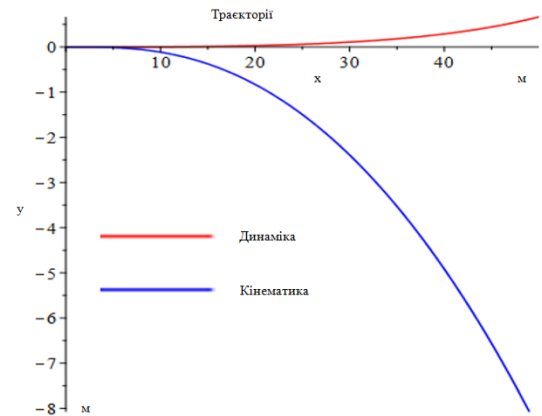


Рис. 2. Траєкторії характерної точки тягача в площині руху для різних моделей

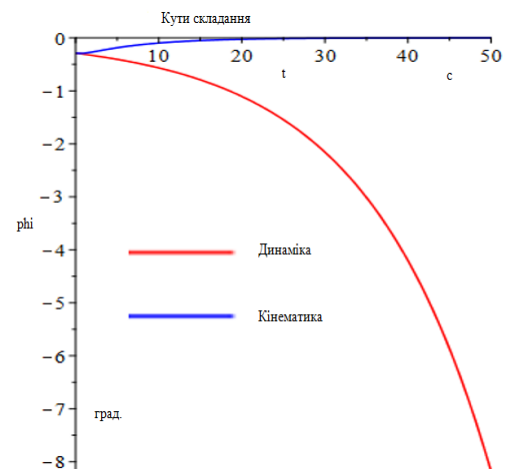


Рис. 3. Інтегральні криві кутів складання для обох моделей

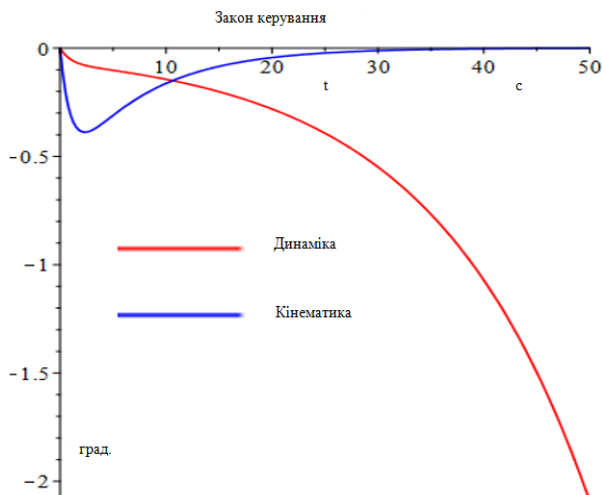


Рис. 4. Кут керування як функція від часу для кінематичної та динамічної моделей

При цьому, кут складання для кінематичної моделі наближається до нуля, у той час як, для динамічної моделі спостерігається його неперервне зростання з посиленням цієї тенденції при зростанні швидкості руху. Ця ж тенденція характерна і для динаміки керування для обох моделей.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволяє зробити висновки про те, що синтезоване для кінематичної моделі керування, може бути застосовано для динамічної моделі при русі з малими швидкостями, малими початковими збуреннями відносно кута складання та для малих часових проміжків. То ж за вищезазначених умов існує принципова можливість використання кінематичного керування динамічною моделлю.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

[1] T. W. Erkert. Computer simulation of off tracking of truck and trailer combinations using forest roads: Department of Civil Engineering Oregon State University Publ., Oregon State, 1989.
 [2] D. W. Harwood, I. B. Potts, D. J. Torbic. Highway/Heavy Vehicle Interaction: Transportation research board publ., Washington, 2003.

[3] P. Bolzern, R. M. DeSantis, A. Locatelli, D. Masciocchi. Path-Tracking for Articulated Vehicles with Off-Axle Hitching: IEEE transactions on control systems technology, 1998, vol. 6, № 4, pp. 515-523.
 [4] C. Altafini. Path Following With Reduced Off-Tracking for Multibody Wheeled Vehicles: IEEE transactions on control systems technology, 2003, vol. 11, № 4, pp. 598-605.
 [5] R. M. Murray, S. S. Sastry. Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids: IEEE Trans. on Automatic Control, 1993, vol. 38, № 5, pp. 700-716.
 [6] Michalek Maciej. Application of the VFO method to set-point control for the N-trailer vehicle with off-axle hitching: Poland, International Journal of Control, 2012, vol. 85, pp. 502-521 [On-line]. Available: <http://etacar.put.poznan.pl/maciej.michalek/PublikacjePliki/MyT3ONTrackingVFORoMoCo.pdf>.
 [7] E. G. Sklyarenko. Stabilizaciya zadnego hoda avtopoezda s dvuhosnim pricepom metodom linearizacii obratnoi svyazyu po sostoyaniyu: Vestnik Nacionalnogo universiteta «HPI», 2010, 28, pp. 275-278.
 [8] J. Cheng, B. Wang, Y. Zhang, Y. Xu. Backward Path Tracking Control for Mobile Robot with Three Trailers: China, School of Electrical Engineering, University of Jinan, 2016 [Online]. Available: http://www.uniobuda.hu/users/szakala/SMC%202016%20pendrive/1030_smc2016.pdf.
 [9] N. Evestedt, O. Ljungqvist, D. Axehill. Motion planning for a reversing general 2-trailer configuration using Closed-Loop RRT: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016, pp. 3690-3697 [Online]. Available: <https://iu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1066727/FULLTEXT01.pdf>.
 [10] A. A. Ardentov, (2016). Controlling of a mobile robot with a trailer and its nilpotent approximation: Russia, Pereslavl-Zalessky, Yaroslavl Region, 152020, Program Systems Institute of RAS, 2016 [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1612.01344.pdf>.
 [11] A. A. Martinyuk, N. V. Nikitina. O kachestvennom analize odnoi modeli transportnih mashin: Prikladnaya mehanika, 2018, № 2, pp. 110-115.
 [12] A. M. Lyapunov. Collected Papers in 6 Volumes: Moskow, Izd. Akd. NaukSSSR, vol. 2, 1956.
 [13] D. Tatievskiy. The synthesis of steering rules for stabilizing road train reverse motion to solve the task of reaching a set goal: Technology Transfer: fundamental principles and innovative technical solutions, 2017 [Online]. Available: www.google.com/url?q=http://eufr.eu/tfpts/article/download/482/459&sa=U&ved=0ahUKEwj9lbrCrITZAhUJhaYKHfshDMcQFggYMAE&usg=AOvVaw3VTgy9M9_z1DKwW2jjahsJ.
 [14] V. G. Verbitskii, A. D. Bumaga. Analyzing stability and handing of bolster-type road train with bearing semi-trailer axis control system model movement: Modern industrial and civil engineering, 2008, vol. 4, № 2, p. 65-76. [Online]. Available at: http://donnasa.org/publish_house/journals/spgs/2008-2/02_verbickij_bumaga.pdf.

Моделювання Еволюції Поодиноких Хвиль в Конструкційних Матеріалах

Ярема Рушицький
відділ реології, Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка,
Національна академія наук України
Київ, Україна
rushch@inmech.kiev.ua

Василь Юрчук
відділ реології, Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка,
Національна академія наук України
Київ, Україна
reol@inmech.kiev.ua

Modeling the Evolution of Solitary Waves in the Engineering Materials

Jeremiah Rushchitsky
Department of Rheology, S.P.Timoshenko Institute of
Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
rushch@inmech.kiev.ua

Vasyl Yurchuk
Department of Rheology, S.P.Timoshenko Institute of
Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
reol@inmech.kiev.ua

Анотація—З метою вивчення еволюції початкового профіля внаслідок слабкої нелінійності матеріалу теоретично і чисельно проаналізовано поширення поздовжніх хвиль з початковим гармонічним і дзвіноподібним профілями, поперечних хвиль з початковим профілем у вигляді функції Уїттекера, циліндричних хвиль з початковим профілем у вигляді функції Макдональда. Проведено порівняльний аналіз нелінійних поодиноких хвиль з різними початковими профілями на основі отриманих авторами розв'язків, що включає вплив довжини хвилі (підшви), початкової амплітуди і параметрів матеріалу на еволюцію хвиль.

Abstract—To study the evolution of initial profile owing to weak nonlinearity of material, the propagation of longitudinal waves with the initial harmonic and bell-shaped profiles, transverse waves with initial profile in the form of Whittaker function, cylindrical waves with initial profile in the form of Macdonald function is analyzed theoretically and numerically. An comparative analysis is carried out for the solitary waves with different initial profiles basing on the obtained by authors solutions that includes an effect of the wave length (bottom), initial amplitude, and material parameters on the wave evolution.

Ключові слова—подинока пружна хвиля; нелінійне хвильове рівняння; числове моделювання; еволюція хвилі

Keywords—solitary elastic wave; nonlinear wave equation; numerical modeling; wave evolution

Теорія нелінійних хвиль в пружних матеріалах являє собою великий розділ нелінійної теорії пружності, який через властиві теорії нелінійних хвиль математичні труднощі не є закінченим до цього часу і розвивається у багатьох наукових центрах світової механіки. З іншого боку, сучасна промисловість виробляє незлічену кількість машин,

конструкцій, приладів, устаткування, які або постійно працюють у динамічних режимах, або у роботі яких використовуються механізми поширення хвиль, або в яких іноді спостерігаються хвильові процеси. Тому знання про хвилі є затребуваним продуктом для сучасної промисловості. Зпосеред маси різноманітних хвиль виділяються певні типи, затребуваність яких є особливою. Саме до таких відносяться поодинокі хвилі, знання про які є потрібним фактично у всіх галузях практичної діяльності людини – від медицини до архітектури, від машинознавства до історії. Підтвердження цього можна знайти у пошуковій системі Google за ключовими словами solitary waves in materials.

Поодинокі хвилі мають давню історію. Вважається, що дослідження таких хвиль бере початок від спостережень Рассела (1838 рік) поодиноких хвиль в одному із водних каналів Англії. З тих пір поодинокі хвилі традиційно вивчаються в рамках гідромеханіки. Переважаюча кількість результатів відноситься до особливого типу поодиноких хвиль – солітонів. Існує багато монографій і оглядів на цю тему. Поодинока хвиля в даному дослідженні розуміється як хвиля з залежним від просторових координат профілем, що концентрується в обмеженій частині простору і здебільшого має вигляд одного або кількох горбів. Відмінність так означеної поодинокі хвилі від солітону полягає у тому, що вона взаємодіє сама з собою і іншими хвилями, змінюючи при поширенні свій початковий профіль.

Дане дослідження проведене в рамках нелінійної теорії пружності для конкретного потенціалу Мурнагана. Він є кубічним щодо тензора деформацій і записується через компоненти нелінійного тензора деформацій Гріна $\varepsilon_{ik}=(1/2)\times$

$\times(u_{i,k}+u_{k,i}+u_{m,i}u_{m,k})$ у вигляді $W(\varepsilon_{ik})=(1/2)\lambda(\varepsilon_{mm})^2+\mu(\varepsilon_{ik})^2+(1/3)A\varepsilon_{ik}\varepsilon_{im}\varepsilon_{km}+B(\varepsilon_{ik})^2\varepsilon_{mm}+(1/3)C(\varepsilon_{mm})^3$, або через перші алгебраїчні інваріанти I_k цього тензора

$$W(I_1, I_2, I_3) = \frac{1}{2}\lambda I_1^2 + \mu I_2 + \frac{1}{3}A I_3 + B I_1 I_2 + \frac{1}{3}C I_1^3$$

$(I_1 = \text{tr}(\varepsilon_{ik}), I_2 = \text{tr}[(\varepsilon_{ik})^2], I_3 = \text{tr}[(\varepsilon_{ik})^3])$, λ, μ є пружними постійними Ляме, A, B, C - постійними Мурнагана).

Модель Мурнагана вважається класичною в нелінійній теорії гіперпружних матеріалів, вона враховує всі квадратичні і кубічні складові і описує деформування великого класу конструкційних та інших матеріалів.

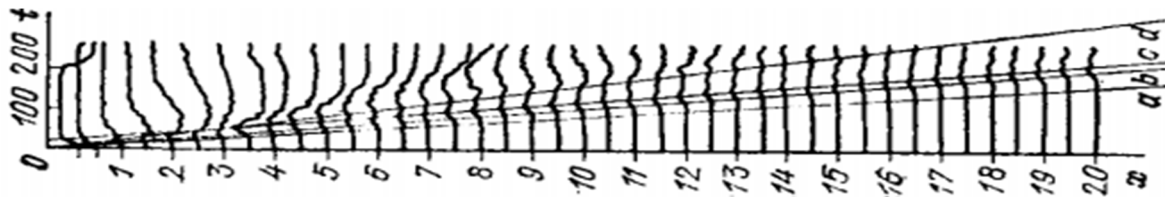


Рис. 1. Хвиля радіального зміщення [1]

Далі до нелінійних хвильових рівнянь застосовувався наближений метод, оснований на перетворенні хвильового рівняння і обмеженні на градієнт зміщення. Розглянемо для прикладу нелінійне рівняння, що описує поздовжню плоску хвилю $u_{1,1} - (v_L)^2 u_{1,1} = (N_1/\rho)u_{1,1}u_{1,1}$. Припустимо, що поодинокі хвилі з початковим профілем у вигляді $F(ax_1)$ поширюється у такому ж вигляді, але функція F вже залежить від фазової змінної $\sigma = a(x_1 - vt)$, тобто $u(x_1, t) = F[a(x_1 - vt)]$, де $v = \sqrt{1 + \alpha u_{1,1}}$ - швидкість поширення хвилі, $\alpha = [N_1/(\lambda + 2\mu)]$. Далі корінь $\sqrt{1 + \alpha u_{1,1}}$ розкладемо за умови $|\alpha u_{1,1}| \ll 1$ за першими двома наближеннями і запишемо розв'язок у вигляді $u_1(x_1, t) \cong F[a(x_1 - v_L t - (1/2)\alpha u_{1,1} t)]$.

Тоді отриманий розв'язок розкладемо в ряд Тейлора за малим параметром $\delta = -(1/2)\alpha a v_L u_{1,1} t$ в околі постійного значення фази $\sigma = a(x_1 - v_L t)$: $u_1(x_1, t) \approx F(\sigma) + F'(\sigma) a \delta = F(\sigma) - (1/2)\alpha a^2 v_L t [F'(\sigma)]^2$.

Отримане наближене представлення розв'язку має загальний характер і для різних конкретно вибраних функцій описує один і той же нелінійний хвильовий ефект - виникнення (окрім першої гармоніки) другої гармоніки чи подібних до неї нових доданків і збільшення амплітуди другого доданка з часом поширення хвилі.

В рамках моделі Мурнагана отримано різні типи нелінійних хвильових рівнянь. Їх особливістю є те, що ліві частини є класичними лінійними хвильовими рівняннями. Праві частини включають лише квадратично нелінійні доданки. Ця структура виявилася дуже зручною в наближених дослідженнях поширення хвиль. Друга особливість полягає в тому, що, на відміну від лінійних хвильових рівнянь, нелінійні рівняння є зв'язаними і цей зв'язок не є симетричним.

Поодинокі хвилі в конструкційних матеріалах вивчалися експериментально досить кваліфіковано. Нижче показано один з класичних результатів Белла: радіальні зміщення при поздовжному ударі кульки в стержень, t - час в мкс, x - відстань від торця, по якому відбувся удар. Для кожного перетину, який знаходиться на вказаній відстані на осі стержня, отримано графік профілю хвилі радіального зміщення [1].

Далі показано коротко результати вивчення еволюції поодиноких хвиль з чотирма різними початковими профілями.

Гармонічний профіль. Наближений розв'язок для плоскої поздовжньої хвилі має наступний вигляд [2]:

$$u_1(x_1, t) = a^0 e^{-ik_L(x_1 - c_L t)} - (1/2)c_L t \alpha (k_L)^2 (a^0)^2 e^{-2ik_L(x_1 - c_L t)}$$

На рис. 2 показані графіки зміни амплітуди з шляхом, що пройшла хвиля, для наступних значень параметрів: матеріал - алюміній, $\alpha = -16,811$, $a^0 = 1 \cdot 10^{-5}$, $\omega = 0,8 \cdot 10^5$.

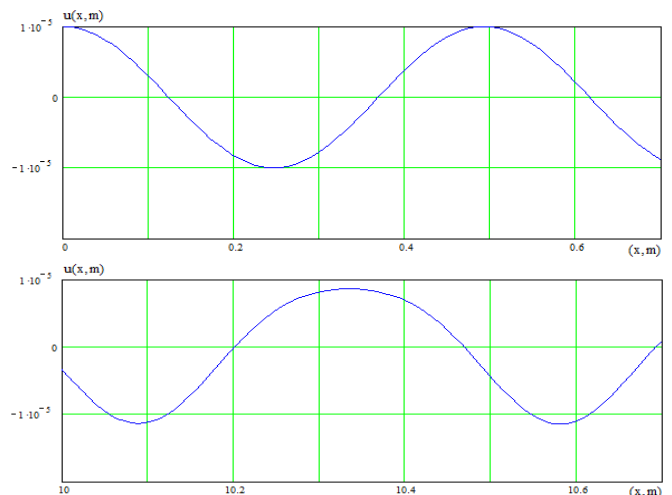


Рис. 2. Графіки еволюції гармонічної хвилі

Із зіставлення Рис. 2 та відповідних рисунків, отриманих класичним методом послідовних наближень [2], випливає що еволюція початкового профіля хвилі відбувається з практично однаковим якісним результатом, однак швидкість еволюції різна. Це пов'язано з тим, що методи основані на певних обмеженнях.

Дзвіноподібний профіль (у формі функції Гаусса чи Чебишова-Ерміта нульового порядку). Наближений розв'язок для плоскої поздовжньої хвилі має наступний вигляд [2,3]:

$$u_1(x_1, t) = A^0 e^{-[a^2(x_1 - c_L t)^2 / 2]} - (1/2) t a c_L a^2 (x_1 - c_L t)^2 (A^0)^2 e^{-a^2(x_1 - c_L t)^2}$$

На Рис. 3 показані графіки зміни амплітуди з шляхом, що пройшла хвиля, при наступних значеннях параметрів: матеріал - алюміній $\alpha = -16,811$, $a_0 = 5 \cdot 10^{-3}$, параметр, що визначає довжину підшови хвилі $a = 20$. На нижньому графіку зіставлено початковий і деформований профілі

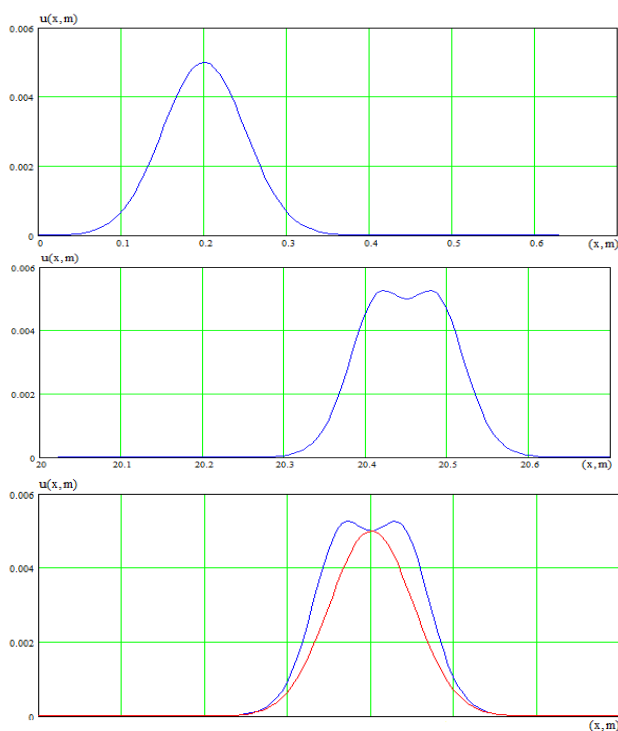


Рис. 3. Графіки еволюції дзвіноподібної хвилі

З графіків Рис. 3 випливає, що дисторсія початкового профіля зростає зі збільшенням відстані, яку пройшла хвиля. Отже, вплив «другої гармоніки» на еволюцію початкового профілю хвилі достатньо великий. Аналогічно проведені дослідження для різного типу матеріалів, різної довжини хвилі та різного максимального значення амплітуди. Всі отримані графіки свідчать, що дисторсія початкового профіля є суттєвою. Швидкість еволюції залежить від характеристик матеріалу і профіля.

Профіль у вигляді функції Уїттекера. Наближений розв'язок для плоскої поздовжньої хвилі має наступний вигляд [4]:

$$u(x, t) = a_0 W_{1/4, 1/4}(a(x - c_L t)) - (1/2) t a c_L (a)^2 (a_0)^2 \times \left(\left(\frac{1}{4a(x - c_L t)} - \frac{1}{2} \right) W_{1/4, 1/4}(a(x - c_L t)) \right)^2$$

На рис. 4 показані графіки зміни амплітуди з шляхом, що пройшла хвиля, для наступних значень параметрів: матеріал - алюміній $\alpha = -16,811$, $a_0 = 1 \cdot 10^{-5}$, параметр, що визначає довжину підшови хвилі $a = 30$. На нижньому графіку зіставлено початковий і деформований профілі.

Отже одинична хвиля з несиметричним профілем у вигляді функції Уїттекера еволюціонує таким чином: зменшується початкова амплітуда, ліва та права частини горба по ступово стають крутішими, профіль поступово зміщується вправо, сформований профіль нагадує дзвіноподібний. Підшова хвилі у всіх випадках залишається незмінною.

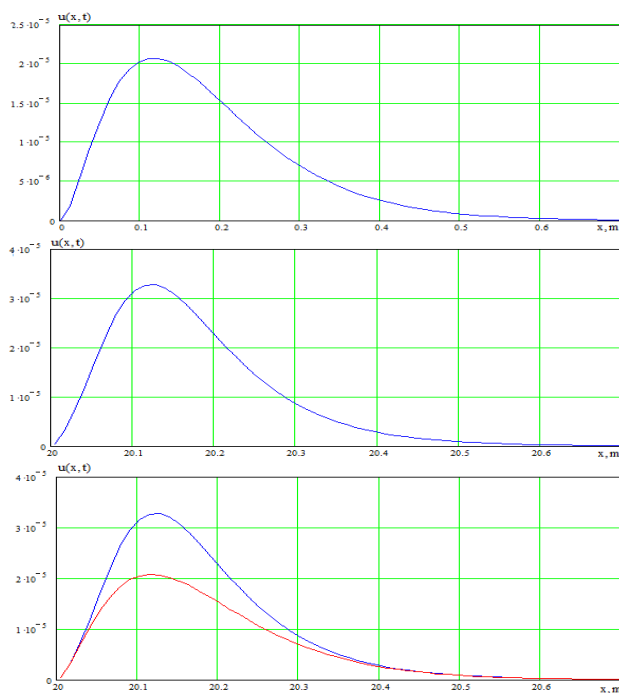


Рис. 4. Графіки еволюції хвилі з профілем функції Уїттекера

Порівняння еволюції симетричної дзвіноподібної хвилі та хвилі з несиметричним профілем у вигляді функції Уїттекера показує, що профілі першої змінюються симетрично, тоді як профіль другої – несиметрично.

Дзвіноподібний профіль. Однак хвиля плоска поперечна.

Нелінійне хвильове рівняння поширення має вигляд [5]: $\rho u_{3,tt} - \mu u_{3,11} = N_4 u_{3,11} (u_{3,1})^2$ (права частина містить кубічну нелінійність)

$$u_3(x_1, t) \approx u_3^o e^{-(\sigma^o)^2 (x_1 - v_T t)^2 / 2} + (1/2) t \alpha_3 v_T (\sigma^o)^3 (x_1 - v_T t)^3 (u_3^o)^3 e^{-3(\sigma^o)^2 (x_1 - v_T t)^2 / 2}.$$

На Рис. 5 показані графіки зміни амплітуди з шляхом, що пройшла хвиля, що відповідають розв'язку (13) для плоскої поперечної хвилі дзвіноподібного профіля для таких значень параметрів: матеріал – алюміній, $\alpha_3 = -82,648$; $u_3^o = 8 \cdot 10^{-3}$, параметр, що визначає довжину підосви хвилі $\sigma^o = 0,8$.

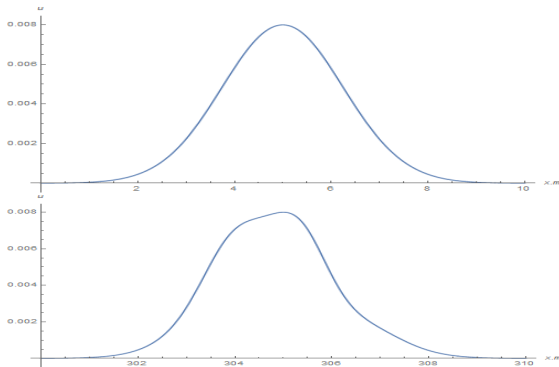


Рис. 5. Графіки еволюції дзвіноподібної хвилі

Графіки Рис. 5 свідчать про суттєву еволюцію початкового профіля хвилі. При цьому ширина горба і значення максимальної амплітуди залишаються незмінними. Порівняння зі зміною профіля дзвіноподібної поодинокі поперечної хвилі показує, що дзвіноподібна поперечна хвиля змінює свій профіль дещо по-іншому. Відмінності в еволюції поперечної і позадвожної хвилі, що викликані відмінностями нелінійного деформування – кубічна для поперечної та квадратична для позадвожної.

Профіль у вигляді функції Макдональда. Однак хвиля циліндрична, яка поширюється від циліндричної порожнини вздовж радіуса циліндра і залежить від радіуса і часу. Нелінійне хвильове рівняння є таким:

$$(c_L)^2 (1 - \tilde{N}_1 u_{r,r}) \left(u_{r,rr} + \frac{1}{r} u_{r,r} - \frac{u_r}{r^2} \right) - u_{r,tt} = 0.$$

Наближений розв'язок має наступний вигляд: $u_r(r, t) \approx a^o K_0(a(r - c_L t)) - (1/2) \tilde{N}_1 a c_L t (a^o)^2 [K_1(a(r - c_L t))]^2$.

Підставляючи в останню формулу наближені значення функцій K_0 і K_1 отримуємо розв'язок:

$$u_r(r, t) \approx a^o \sqrt{\frac{2}{\pi a(r - c_L t)}} e^{-a(r - c_L t)} - (1/2) \tilde{N}_1 a c_L t (a^o)^2 \times \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{a(r - c_L t)}} + \frac{1}{\sqrt{a(r - c_L t)}} \right) \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-a(r - c_L t)} \right]^2.$$

На Рис. 6 показані графіки поширення хвилі для таких значень параметрів: алюміній $\tilde{N}_1 = -16,811$; $a_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ та параметр, що відповідає довжині підосви хвилі $a = 5$.

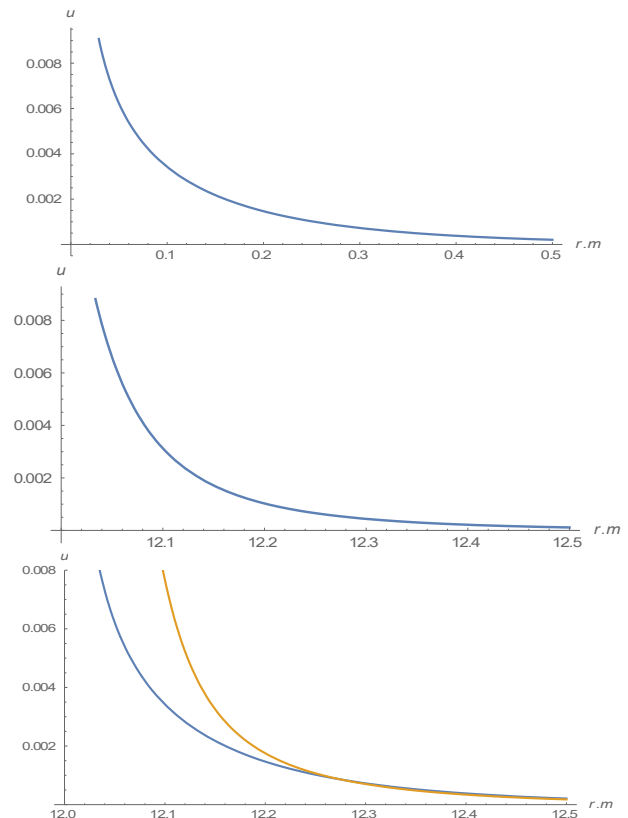


Рис. 6. Графіки еволюції хвилі з профілем функції Макдональда

На нижньому графіку Рис. 6 зіставлено початковий і деформований профіль. Графіки свідчать про суттєву еволюцію початкового профіля і зміну параметрів хвилі, та значну зміну значення максимальної амплітуди.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Flügge's Encyclopedia of Physics. Vol. VIa/1. Mechanics of solids. Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- [2] J. J. Rushchitsky, Nonlinear Elastic Waves in Materials. Series: Foundations of engineering mechanics, Heidelberg: Springer, 2014.
- [3] J. J. Rushchitsky, V. N. Yurchuk, "An Approximate Method for Analysis of Solitary Waves in Nonlinear Elastic Materials", Int. Appl. Mech., 52, N3, P. 282-289. 2016.
- [4] V. N. Yurchuk, J. J. Rushchitsky, "Numerical Analysis of Evolution of Plane Longitudinal Nonlinear Elastic Waves with Different Initial Profiles", Int. Appl. Mech., 53, N1, P.104-121. 2017.
- [5] V. N. Yurchuk, J. J. Rushchitsky, "Evolution of SV-Wave with Gaussian Profile", Int. Appl. Mech., 53, N3, P.300-304. 2017.
- [6] V. N. Yurchuk, J. J. Rushchitsky, "Numerical Analysis of Evolution of Solitary Cylindrical Radial Wave with an Initial Profile in the Form of Macdonald Function", Int. Appl. Mech., 54, N3, P.312-317. 2018.

Інтелектуальний Метод Розпізнавання Найближчої Пари в Нечітких Умовах

Сергій Нестеренко

кафедра комп'ютерних систем та мереж
Одеський національний політехнічний університет
Одеса, Україна
san@onpu.ua

Олеся Дадерко

кафедра комп'ютерних систем та мереж
Одеський національний політехнічний університет
Одеса, Україна
o.daderko@gmail.com

Ігор Саух

кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування
Одеський національний політехнічний університет
Одеса, Україна
isaukhl@gmail.com

Intelligent Method for Recognizing the Closest Pair in Fuzzy Conditions

Serhii Nesterenko

Department of Computer Systems and Networks
Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine
san@onpu.ua

Olesya Daderko

Department of Computer Systems and Networks
Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine
jqutel@gmail.com

Ihor Saukh

Dept. of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering
Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine
isaukhl@gmail.com

Анотація—Показано, що парні органи багатьох технічних пристроїв, а також пари римованих слів у лінгвістиці, пари учасників експедицій і багато чого іншого має потребу в ретельному відборі при їхньому складанні та заміні, тому що багато схованих, нечітких параметрів у них можуть бути далекі. Запропоновано алгоритм інтелектуального методу розпізнавання найближчої пари в кінцевій безлічі однотипних об'єктів у нечітких умовах. Випробування методу на реальних об'єктах підтвердили його технічну ефективність.

Abstract—It has been shown that paired bodies of many technical devices, as well as a pair of rhymed words in linguistics, a pair of expedition participants, and much more, require careful selection during their assembly and replacement, since many

hidden, fuzzy parameters in them may be distant. The algorithm of the intelligent recognition method of the nearest pair in the finite set of the same type objects in the fuzzy conditions is proposed. Tests of the method on real objects confirmed its technical efficiency.

Ключові слова—найближчі пари, нечіткі умови, розпізнавання образа, інформаційна складова, автомобільні колеса

Keywords—closest pairs, fuzzy conditions, image recognition, information component, automobile wheels

I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Автомобільний транспорт має найважливіше значення для функціонування суспільного виробництва та життя

людей. Однак при цьому він є головним глобальним джерелом забруднення навколишнього середовища. На його частку доводиться до 60 – 80 % забруднення, а в районах найбільшого зосередження людей – до 90 – 95 %. Основна причина забруднення повітря полягає в неповному і нерівномірному згорянні палива. Усього 15 % його витрачається на рух автомобіля, а 85 % «летить на вітер». До того ж камери згоряння автомобільного двигуна – це своєрідний хімічний реактор, що синтезує отруйні речовини та викидає їх в атмосферу. У відпрацьованих газах двигуна внутрішнього згоряння міститься понад 170 шкідливих компонентів, з них близько 160 – похідні вуглеводнів, прямо зобов'язані своєю появою неповному згорянню палива у двигуні [1].

Відпрацьовані гази, продукти зношування механічних частин і покришок автомобіля, а також дорожнього покриття становлять біля половини атмосферних викидів антропогенного походження. Найбільш дослідженими є викиди двигуна та картера автомобіля. Крім того, під час експлуатації транспортних засобів утворюється велика кількість твердих відходів, більшу небезпеку серед яких являють собою зношені автомобільні шини, які складно збирати та утилізувати [2].

Однак шини несуть ще одну латентну небезпеку, – якщо суміжна пара шин була споконвічно неоднаковою в деякому змісті (або хтось при ремонті поставив у парі «невідповідну» шину), і навантаження, і реакція на нього стають несиметричними, змушуючи автомобіль реагувати на це погіршенням умов роботи: двигун починає працювати в неоптимальному режимі, – звідси неповне згоряння та підвищення кількості шкідливих вихлопів, шини зношуються нерівномірно і т.д.

II. АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Автомобіль містить у своєму складі велику кількість «парних» органів. Головними парами з погляду екології є колеса, тому що невірний підбір такої пари приводить і до погіршення умов роботи двигуна, а, отже, – до збільшення шкідливих викидів, і до підвищеного зношування автомобільних покришок і дороги з усіма впливаючими із цього екологічними наслідками.

У той же час паспортні дані та відомі маркування покришок не містять всієї інформації, необхідної для підбору пар. Частина такої інформації схована від користувача (і від виробника!), частина носить стохастичний або нечіткий характер. Тому дослідження, спрямовані на оптимізацію процесу підбору пари «найближчих» по експлуатаційних характеристиках умовних коліс, є досить актуальними.

Авторська розробка присвячена вирішенню важливої наукової і практичної задачі підвищення терміну служби покришок автомобільних коліс і дороги, а також зменшення шкідливих викидів автомобільного двигуна шляхом підвищення рівномірності навантажень на автомобіль при русі за рахунок нового методу підбору близьких за експлуатаційними характеристиками пар покришок.

III. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

У багатьох додатках людської діяльності зустрічаються ситуації, коли до деякого об'єкта необхідно підібрати пари з кінцевої безлічі однорідних об'єктів. Підбор повинен бути виконаний, шляхом розпізнавання найближчого елемента цієї безлічі по заданому наборі ознак. Передбачається, що розпізнана пара об'єктів буде надалі «працювати» спільно. Прикладами таких пар можуть служити парні елементи комп'ютерів та їхніх аксесуарів [3], радіотехнічних стереосистем [4], метрологічних пристроїв [5] – у техніці, римовані рядки [6] – у поезії, колективи відособлених експедицій [7] – у психології й багато чого іншого.

Якщо ознаки однозначно вимірні або обчислюємі, то розпізнавання є тривіальні. Якщо ж хоча б одна ознака носить стохастичний або не чіткий характер, то завдання нерозв'язне без застосування технологій штучного інтелекту із застосуванням властивих останньому інформаційних технологій. Таким чином, завдання підбору пари є одночасно завданнями розпізнавання образу та завданнями оптимізації, тому що образ шукається найкращий!

Відомо, що при комплектації пар в технічних пристроях рекомендується підбирати їх по найближчих значень характеристик. Однак навіть підбір однакових по маркуванню виробів від одного виробника не гарантує вирішення цієї проблеми. Адже у виробництві всі враховувані параметри «пливуть» в межах допуску, а невраховувані можуть взагалі істотно відрізнятись. Саме це є основними невірними раніше частинами загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

Запропоновані методи і моделі є новими в розвитку проблем розпізнавання образу і оптимізації. Новизна в розпізнаванні полягає в тому, що для цього запропоновано використовувати метод розпізнавання образів в нечітких умовах, в якому вихідними параметрами служать додаткові нечіткі, отримані експрес методом характеристики, які доповнюють основні паспортні дані шин і створюють певний проміжний псевдовізуальний образ останніх [8]. Далі застосовується один з відомих методів розпізнавання візуальних образів (зображень) [9]. Новизна в оптимізації полягає в застосуванні гібридних методів людино-машинного відбору найкращого варіанту.

Методологічне або загальнонаукове значення безпосередньо впливає з інваріантності запропонованих методів і моделей, що дозволяє прогнозувати їх ефективне використання в різноманітних галузях людських знань.

IV. ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Підбір пари при «взуванні» автомобіля відбувається у двох випадках: при первинній зборці автомобіля та заміні двох коліс одночасно, а також при заміні одного колеса, коли нове підбирається в парі до старого.

У запропонованому методі всі дані про колеса – учасниках відбору – на першому етапі перетворюються до деякого образу, що за структурою (двомірне поле умовних «яскравостей») нагадує зоровий, але з феноменологічної

точки зору таким не є. Дійсно, цей віртуальний образ у процесі відбору пари ніде не візуалізується: не виводиться на екран або будь-який «твердий» носій [10].

Проте, маючи всі математичні властивості зорового образу або зображення, цей віртуальний образ може бути перетворений одним з відомих способів обробки зображень до числа [11]. По отриманих числах можна виконати ранжировку елементів безлічі образів, а виходить, і безлічі вихідних об'єктів – гумових коліс.

У підсумку вибір найбільш близької пари шин з наявних має такий вигляд (рис. 1).

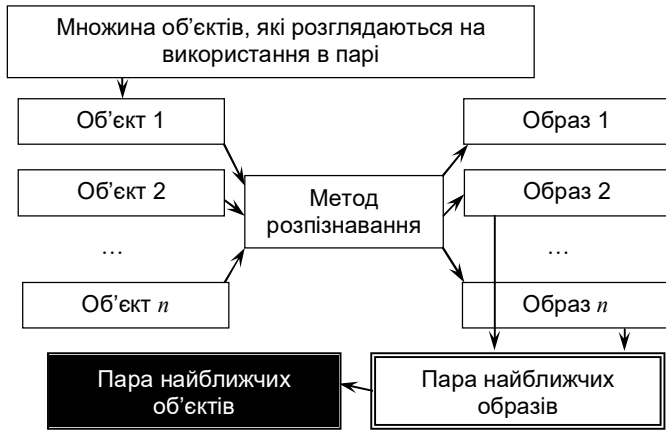


Рис. 1. Вибір найбільш близької пари шин з наявних

У свою чергу, вибір другої шини по відомій першій представлений на рис. 2.

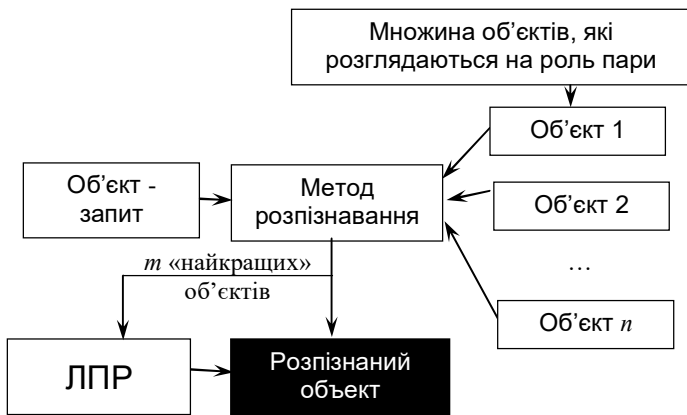


Рис. 2. Схема процесу розпізнавання «найкращого» об'єкта

Природно припустити, що описані методи ефективні тільки в тому випадку, коли характеристики (параметри) елементів безлічі шин виходять за рамки стандартних (детермінованих). До останнього відносяться наступні паспортні параметри (перший список).

Діаметр – визначає товщину гумового шару, вага шини.

Розривне зусилля – визначає напруженість шин, вага шини.

Лінійна маса – визначає щільність армуючого матеріалу, вага шини.

Повне подовження – визначає зміну геометрії шин під навантаженням, здатність пручатися ударним навантаженням.

Адгезія – визначає ступінь закріплення армуючого матеріалу в гумі.

У протилежному випадку всі шини однієї стандартної групи були б математично нерозрізнені, і процедура ранжування втратила б зміст, – числа, що становлять всі образи безлічі, були б рівні. Тому методи розпізнавання образів, що беруть участь у процесах, представлених на рис. 1 та 2, мають потребу в забезпеченні додаткової (стохастичної, нечіткої) інформації.

В якості такої інформації можуть бути використані наступні нечіткі параметри (другий список).

Згинальна твердість – у брекерних шарах шин визначає ходимість шин, рівень опору коченню, разом з величиною розривного зусилля - ваги шин.

Еластичність – характеризує ступінь відновлення металлокордом своєї первісної форми, після того, як він піддався певній деформації.

Втомна витривалість – визначає строк експлуатації шин.

Контактна втома (фреттинг-коррозія) – визначає запас міцності для армуючих матеріалів, що приводить до обваження шин.

Зусилля анкеровки – визначає зусилля висмикування дротів внутрішніх шарів з оболонки дротів зовнішніх стосовно них шарів. Низький рівень анкеровки знижує показник витривалості та створює проблеми при переробці резинокордового полотна.

Подовження при частковому навантаженні – визначає здатність пручатися ударним навантаженням.

Ємність плоского конденсатора, у якому шина відіграє роль заповнювача простору між обкладками – відбиває щільність, форму та рівномірність заповнення кордом внутрішнього об'єму шини.

Відкладаючи на двомірному полі віднормовані до одиниці значення параметрів першого списку по горизонталі, а другого – по вертикалі, одержимо псевдовізуальний (віртуальний) образ, приклад якого наведений на рис. 3 [9].

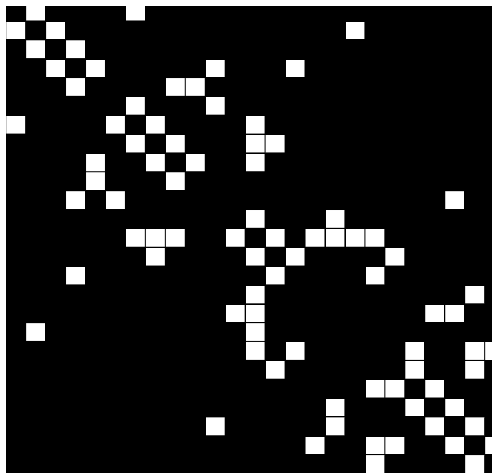


Рис. 3. Псевдовізуальний (віртуальний) образ однієї із безлічі шин, з якого має бути зроблено вибір.

Перетворюючи образ у число, наприклад, за допомогою поля напрямків, одержимо відповідне чисельне значення, що легко піддається ранжуванню та порівнянню [9].

Нечіткі параметри другого списку не можна взяти з паспортних даних або виміряти прямим методом. Вони можуть бути отримані тільки в результаті експерименту: неруйнуючого – для всієї безлічі або руйнуючого (наприклад, висмикування ниток корду) – для вибіркової підмножини [14].

Висновки

У результаті аналізу проблем розвитку транспорту встановлено, що істотною небезпекою для навколишнього середовища є складноконтролюєма в експлуатації взаємодія невдало підібраних пар, наприклад, автомобільних шин [4].

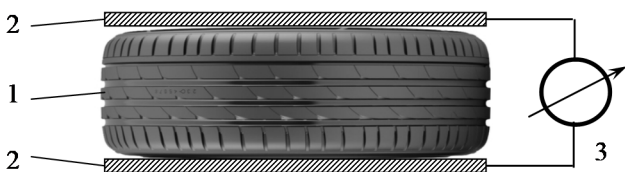


Рис. 4. Схема вимірювання ємності конденсатора з армованою шиною як заповнювач простору між обкладками: 1 - шина; 2 - металеві обкладки; 3 - прилад для вимірювання ємності

Запропоновано додатковий до простого підбору за паспортним даними метод ідентифікації найбільш близьких пар, що полягає в інтелектуальному розпізнаванні образу кожної шини з урахуванням схованих параметрів і формуванні цих пар по близькості отриманих образів.

Запропоновано метод одержання додаткової інформації про сховані характеристики автомобільних шин, що полягає у вимірі ємності конденсатора, у якому досліджувана шина відіграє роль заповнювача простору між його обкладками.

Результати дослідження можуть становити практичний інтерес, перш за все, для автомобілебудівних і автомобілеремонтних підприємств, а також для будь-якого технічного, психологічного та ін. додатку, де проблема підбору пар стоїть особливо гостро. Результати представляють також науковий інтерес в галузі штучного інтелекту (розпізнавання образів) і в області оптимізації об'єктів з нечіткими вихідними даними.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Забруднення автотранспортом навколишнього середовища. - Доступно: <http://ustroistvo-avtomobilya.ru/sistemy-snizheniya-toksichnosti/zagryaznenie-avtotransportom-okruzhayushhej-sredy/>.
- [2] Шульдякова К.А. Вплив автомобільних шин на навколишнє середовище й здоров'я людини / К.А. Шульдякова // Молодий учений. - 2016. - № 20. - С. 472-477.
- [3] M. SkottOperativnayaparm'yat. Modernizatsiya i remont PK. *Upgrading and Repairing PCs.*, М.: Vilyams, 2007, pp. 499-572. Підбор динаміків - Доступно: <https://www.audiomania.ru/content/art-1740.html>.
- [4] Podbor dinamikov - Available: <https://www.audiomania.ru/content/art-1740.html>.
- [5] Stanovskiy O. Compensation of the spatial deviations of measuring elements in CAD / O. Stanovskiy, A. Toropenko, O. Lebedeva, V. Dobrovolska, O. Daderko // Технологічний аудит та резерви виробництва. - 2018. - № 1/2(39). - С. 52-60.
- [6] Становский А.Л. Деякі концепції системи підтримки автоматизованого перекладу віршованого тексту / А.Л. Становский, В.Ю. Поздняков // Праці Одеського політехнічного університету. - 2007. - Спецвыпуск № 2(28). - С. 162-165.
- [7] R. Hollingem, «Doroga k Marsu: kak nabirayut v marsianskie kolonisty» BBC Future, 2015, Available: http://www.bbc.com/russian/science/2015/01/150127_vert_fut_one_way_ticket_to_the_red_planet..
- [8] Нестеренко С.А. Перетворення структури складної технічної системи йз частково недоступними елементами до зорового образу / С.А. Нестеренко, Ан.О. Становський, А.В. Торопенко, П.С. Швель // Східно-Європейський журнал передових технологій. - Харків, 2015. - № 5/3 (77). - С. 30-35.
- [9] Нестеренко С.А. Розпізнавання стану бездротових комп'ютерних мереж за допомогою тривимірного поля напрямків / С.А. Нестеренко, А.О. Становський, О.О. Оборотова // Технологічний аудит та резерви виробництва. - Харків, 2015. - № 6/2(26). - С. 28-35.
- [10] Поиск пары чисел оптимально близких до заданого константного числа. - Доступно: <https://www.mql5.com/ru/forum/216667>.
- [11] Глушань В.М. Нечіткі моделі й методи многокритеріального вибору в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень / В.М. Глушань, В.П. Карелин, О.Л. Кузьменко // Звістки ЮФУ. Технічні науки Тематичний випуск. - С. 106-113.
- [12] Луцив Д.В. Завдання пошуку нечітких повторів при організації повторного використання документації / Д.В. Луцив, Д.В. Кознов, Х.А. Басяць, А.Н. Терехов // Програмування, 2016. - № 4. - С. 39-49.
- [13] Пименов В.Ю. Обчислювально-ефективний метод пошуку нечітких дублікатів у колекції зображень / В. Ю. Пименов // Доступно: http://romip.ru/romip2009/09_ifm.pdf.
- [14] Металлокорд. Steel cord. - Доступно: http://www.belmet.com/files/products/steel_cord.pdf.

Синтез Моделей Багатокритеріального Оцінювання Методом Компараторної Ідентифікації

Володимир Безкоровайний, Оксана Драз
кафедра системотехніки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна

vladimir.beskorovainyi@nure.ua oksana.draz@nure.ua

Валерій Семенець
ректор
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна

Synthesis of Multi-Criteria Estimation Models by Comparator Identification

Volodymyr Beskorovainyi
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radioelectronics
Kharkiv, Ukraine
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Oksana Draz
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radioelectronics
Kharkiv, Ukraine
oksana.draz@nure.ua

Анотація—Запропоновано метод структурно-параметричного синтезу моделей багатокритеріального оцінювання, побудованих на основі поліному Колмогорова-Габора, з універсальними функціями корисності часткових критеріїв. Метод базується на технології компараторної ідентифікації, що дозволяє здійснювати перехід від ординалістичних оцінок особи, що приймає рішення, до кількісних скалярних оцінок рішень.

Abstract—The method of structural-parametric synthesis of multi-criterion estimation models is constructed on the Kolmogorov-Gabor polynomial basis, with universal functions of utility of partial criteria is proposed. The method is based on the technology of comparative identification, which allows to the transition from the ordinances of the decision maker to quantitative scalar estimates of the decisions.

Ключові слова—системи прийняття рішень; модель багатокритеріального оцінювання; функція корисності часткових критеріїв; поліном Колмогорова-Габора

Keywords—decision-making system; multicriteria assessment model; function of usefulness of partial criteria; Polmogon Kolmogorov-Gabor

I. ВСТУП

Процеси проектування, планування розвитку, реінжинірингу та керування сучасними антропогенними об'єктами передбачають розв'язання задач оптимізації за множинами функціональних і вартісних показників. При цьому однією з першочергових задач вважається задача

синтезу моделей для скалярного багатокритеріального оцінювання варіантів.

Методологія розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації базується на теорії прийняття рішень [1–3]. При цьому вибір найкращого рішення з множини ефективних тільки в найпростіших ситуаціях може здійснюватися особою, яка приймає рішення (ОПР) без використання формальних методів або з використанням методу аналізу ієрархії. Для автоматизації процедур оцінки альтернативних рішень необхідно залучення додаткової інформації щодо цінності окремих формалізованих властивостей (часткових критеріїв) і їх значень. Це обумовлює актуальність задачі розробки ефективної математичної моделі для автоматичного оцінювання та вибору рішень за множиною часткових критеріїв з використанням методології компараторної ідентифікації переваг ОПР чи експертів.

II. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

Найважливішим завданням формалізації процесу вибору рішень за множиною критеріїв є визначення метрики для їх ранжирування. Як методологічна основа для побудови метрики традиційно використовується теорія корисності [4], відповідно до якої для кожного з рішень x з допустимої множини X може бути визначено значення його загальної корисності (цінності) $P(q, x)$ (де q – вектор параметрів функції). При цьому для всіх $x, y \in X$

виконуються умови: $x \sqsubset y \leftrightarrow P(q, x) = P(q, y)$;
 $x \succ y \leftrightarrow P(q, x) > P(q, y)$; $x \succcurlyeq y \leftrightarrow P(q, x) \geq P(q, y)$.

Через неповну визначеності вимог до властивостей багатокритеріальних рішень як функцію загальної корисності (ФЗК) використовують функцію належності нечіткій множині «краще рішення», що може бути подана як множина упорядкованих пар [5]:

$$\text{«Краще рішення»} = \{ \langle x, P(q, x) \rangle \}, \quad (1)$$

де $x \in X$ – рішення з множини допустимих; $P(q, x)$ – значення функції (ступінь) належності рішення $x \in X$ нечіткій множині «Краще рішення» (1).

Визначення метрики $P(q, x)$ для ранжирування рішень з множини допустимих $x \in X$ полягає в розв'язанні задачі ідентифікації переваг ОПР і передбачає розв'язання підзадач структурного та параметричного синтезу ФЗК $P(q, x)$. У загальному випадку це передбачає вибір критерію подібності, набору інформативних вхідних даних, структури та параметрів функції, оцінки її точності (адекватності перевагам ОПР). За умови визначеної структури моделі $P(q, x)$ задача зводиться до визначення найкращих значень її параметрів з множини допустимих $q \in Q$.

Як критерії ідентифікації, у залежності від умов задачі використовуються мінімум сумарної, сумарної квадратичної, максимальної, абсолютної чи відносної похибки оцінки загальної корисності, максимум функції правильності вибору або мінімум похибки відновлення порядку альтернатив $x \in X$ [6].

Моделі багатокритеріального оцінювання та вибору синтезуються на основі адитивних, мультиплікативних або змішаних ФЗК з використанням вагових коефіцієнтів λ_i та функцій корисності $\xi_i(x)$ часткових критеріїв $k_i(x)$, $i = \overline{1, m}$ [6, 7]. Найбільш поширеною функцією корисності часткових критеріїв (ФКЧК) є функція [7]:

$$\xi_i(x) = \left(\frac{k_i(x) - k_i^-}{k_i^+ - k_i^-} \right)^{\alpha_i}, \quad (2)$$

де α_i – параметр, що визначає вид залежності (2); при $\alpha_i = 1$ реалізується лінійна, при $0 < \alpha_i < 1$ – опукла, при $\alpha_i > 1$ – увігнута залежності.

Недоліком ФКЧК (2) вважається її нездатність реалізовувати S- та Z-подібні залежності, що більш адекватно описують ситуації вибору багатокритеріальних рішень з використанням нечіткої математики [5, 8-9].

Якщо в моделі оцінювання визначено вектор вагових коефіцієнтів $\lambda_i \geq 0$, $\lambda_{ij} \geq 0$, $i = \overline{1, m}$ та параметри α_i , функцій корисності часткових критеріїв $\xi_i(x)$, $i = \overline{1, m}$,

то задача вибору найкращого рішення за множиною критеріїв може бути зведена до задачі оптимізації виду:

$$x^o = \arg \max_{x \in X} P(q, x). \quad (3)$$

Через свою складність задача визначення вектора параметрів моделей багатокритеріального оцінювання традиційно розв'язується в два етапи. На першому етапі шляхом апроксимації оцінок експертів здійснюється визначення параметрів ФКЧК (2) α_i , $i = \overline{1, m}$. На другому етапі експертним шляхом методами ранжирування, приписування балів, послідовних переваг або парних порівнянь визначаються вагові коефіцієнти часткових критеріїв $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ та, за необхідності, адаптаційний параметр g [8]. Недоліками цих методів вважаються складність і відносно невисока точність оцінок.

Як альтернатива експертному визначенню вагових коефіцієнтів часткових критеріїв використовується технологія компараторної ідентифікації [6-7]. Для структурно-параметричної ідентифікації моделей змішаного виду, запропоновано використовувати метод групового урахування аргументів на основі генетичних алгоритмів [9]. Практичне застосування цього методу обмежується його високою часовою складністю і невисокою точністю одержуваних рішень.

Огляд сучасного стану проблеми автоматизації багатокритеріального оцінювання та вибору показує, що до теперішнього часу окремо розв'язуються задачі структурного, параметричного або структурно-параметричного синтезу в одному з класів адитивних, мультиплікативних або змішаних функцій загальної корисності, побудованих на основі не універсальних ФКЧК (2) або подібних до них, з використанням евристичних чи експертних методів їх ідентифікації. Це не гарантує отримання достатньо адекватних моделей оцінювання для автоматизованих систем підтримки прийняття багатокритеріальних управлінських чи проектних рішень, що на практиці може приводити до суттєвих натуральних чи функціональних втрат. На цій підставі можна стверджувати, що існує протиріччя між необхідністю підвищення ефективності систем підтримки прийняття рішень в інтелектуальних системах проектування чи управління складними антропогенними об'єктами та обмеженими можливостями сучасної методології створення відповідних моделей. Це обумовлює актуальність завдань розробки, розвитку та дослідження сучасних підходів до синтезу моделей багатокритеріального оцінювання на основі теорії нечітких множин.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для розв'язання задачі структурно-параметричного синтезу моделей багатокритеріального оцінювання скористаємось універсальною функцією загальної корисності $P(q, x)$, побудованою на основі поліному Колмогорова-Габора [7]:

$$P(q, x) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \xi_i(x) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m \lambda_{ij} \cdot \xi_i(x) \cdot \xi_j(x) + \dots, \quad (4)$$

де m – кількість часткових критеріїв, λ_i, λ_{ij} – вагові коефіцієнти часткових критеріїв $k_i(x)$ та їх добутків $\lambda_i \geq 0, \lambda_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}, \xi_i(x)$ – ФКЧК $k_i(x), i = \overline{1, m}, q$ – вектор параметрів моделі.

В функції (4) кількість доданків $N = C_{m+n}^n - 1$ обирається виходячи з необхідної точності моделі (де n – ступінь полінома). Як основу функції (4) використаємо універсальну ФКЧК, що дозволяє з високою точністю реалізувати лінійні, опуклі, увігнуті, S - і Z -подібні залежності від значень часткових критеріїв [10], яка має більшу точність апроксимації оцінок ОПР, ніж функції Гауса, Харрінгтона та логістична функція [11-12]:

$$\xi_i(x) = \begin{cases} \bar{a} \cdot \left(\frac{\bar{k}(x)}{\bar{k}_a} \right)^{\alpha_1}, & 0 \leq \bar{k}(x) \leq \bar{k}_a; \\ \bar{a} + (1 - \bar{a}) \cdot \left(\frac{\bar{k}(x) - \bar{k}_a}{1 - \bar{k}_a} \right)^{\alpha_2}, & \bar{k}_a < \bar{k}(x) \leq 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{k}(x) = \frac{k(x) - k^-}{k^+ - k^-}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

де \bar{k}_a, \bar{a} – нормовані значення координат точки склейки ФКЧК (2), $0 \leq \bar{k}_a \leq 1, 0 \leq \bar{a} \leq 1, \alpha_1, \alpha_2$ – коефіцієнти, що визначають вид залежності на початковому та кінцевому відрізках, $k(x), k^+, k^-$ – значення часткового критерію для рішення x , найкраще та найгірше значення критерію $k(x)$.

Суть технології компараторної ідентифікації переваг ОПР полягає в такому [7]. ОПР (експерт) аналізує пари рішень $\langle x, y \rangle$ з підмножини допустимих, які формують в його свідомості суб'єктивні оцінки корисності $P(x)$ і $P(y)$, значення яких не можуть бути виміряні. На підставі цих оцінок ОПР формує бінарні відношення (дає висновок про еквівалентність або перевагу варіантів):

– еквівалентності

$$R_E(X) = \{ \langle x, y \rangle : x, y \in X, \quad x \square y \}; \quad (7)$$

– строгої переваги

$$R_S(X) = \{ \langle x, y \rangle : x, y \in X, \quad x \succ y \}; \quad (8)$$

– нестрогой переваги

$$R_N(X) = \{ \langle x, y \rangle : x, y \in X, \quad x \bar{\succ} y \}. \quad (9)$$

Вони описуються системами рівнянь і нерівностей:

$$P(q, x) = P(q, y), \quad x, y \in R_E(X), \quad (10)$$

$$P(q, x) > P(q, y), \quad x, y \in R_S(X), \quad (11)$$

$$P(q, x) \geq P(q, y), \quad x, y \in R_N(X), \quad (12)$$

де $q = [\lambda_i, \lambda_{i,j}, \bar{a}_i, \bar{k}_{ia}, \alpha_{1i}, \alpha_{2i}], i = \overline{1, m}, j = \overline{i, m}$ – вектор параметрів функції (4) на основі ФКЧК (5).

Тоді задача структурно-параметричної ідентифікації ФЗК (4) зводиться до визначення вектора параметрів $q \in Q$, який задовольняє сформованій системі рівнянь (10) чи нерівностей (11) або (12). При цьому може існувати один, нескінченна множина або жодного рішення, яке б задовольняло системам (10), (11) або (12). Найбільш поширеною на практиці ситуацією є встановлення ОПР відношення строгої переваги (8).

Введемо позначення:

$$\xi_1(x) \cdot \xi_1(x) = \xi_{m+1}(x), \quad \lambda_{1,1} = \lambda_{m+1},$$

$$\xi_1(x) \cdot \xi_2(x) = \xi_{m+2}(x), \quad \lambda_{1,2} = \lambda_{m+2}, \dots \quad (13)$$

З урахуванням (13) функцію (4) подамо в адитивній формі:

$$P(q, x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \xi_i(x). \quad (14)$$

Оптимізацію параметрів $q \in Q$ моделі (14) будемо здійснювати на основі інформації щодо переваг ОПР, серед альтернатив $x, y \in X' \subseteq X^C$ (де $x, y \in X^C$ – підмножина компромісних рішень). Для встановленого ОПР відношення переваги $R_S(X \check{y})$ (8) з урахуванням ФКЧК (5) зі співвідношення (11) отримаємо системи нелінійних нерівностей і лінійних нормуючих умов:

$$q = \begin{cases} \eta_j(q, x, y) \equiv \sum_{i=1}^N \lambda_i \xi_i(x) > \sum_{i=1}^N \lambda_i \xi_i(y); \\ j = \overline{1, n_S}, \langle x, y \rangle \in R_S(X); \\ \eta_{n_S+1}(\lambda) \equiv \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0, i = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (15)$$

де $q = [\lambda_i, \lambda_{i,j}, \bar{a}_i, \bar{k}_{ia}, \alpha_{1i}, \alpha_{2i}], i = \overline{1, m}, j = \overline{i, m}$ – шуканий вектор параметрів функції (14), n_S – потужність відношення строгої переваги (8), $n_S = \text{Card } R_S(X \check{y})$.

Задача визначення вектора найкращих параметрів $q = [\lambda_i, \lambda_{i,j}, \bar{a}_i, \bar{k}_{ia}, \alpha_{1i}, \alpha_{2i}], i = \overline{1, m}, j = \overline{i, m}$ з області допустимих, що задається системою (15) є некоректною за Адамаром. Для її регуляризації можуть бути використані різні прийоми, зокрема для задач з визначеними параметрами ФКЧК (5) шляхом пошуку чебишовської точки [7]. Це дозволяє звести вихідні задачі до задач лінійного програмування [6, 12-13].

Для регуляризації загальної задачі, що враховує нелінійність ФКЧК (5), за найкращий будемо вважати вектор параметрів $q^o \in Q$, що максимізує мінімальну відстань $\Delta P_j(q, x, y) = P(q, x) - P(q, y)$ між рішеннями у бінарному відношенні строгої переваги (8):

$$\begin{cases} q^o = \arg \max_{q \in Q} \min_{1 \leq j \leq n_s} \{ \Delta P_j(q, x, y) = P(q, x) - P(q, y) \}; \\ \eta_j(q, x, y) \equiv P(q, x) > P(q, y), \forall j = \overline{1, n_s}; \\ \langle x, y \rangle \in R_S(X); \\ \eta_{n_s+1}(\lambda) \equiv \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0, i = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (16)$$

де $n_s = \text{Card } R_S(X)$, $P(q, x)$, $P(q, y)$ значення ФЗК (4) для пари рішень $\langle x, y \rangle \in R_S(X)$, $N = C_{m+n}^n - 1$, m – кількість часткових критеріїв, n – ступінь полінома моделі (4).

Якщо система обмежень (15) сумісна, то $\Delta P_j(q, x, y) > 0$ і отриманий розв'язок буде максимально стійким. Якщо система обмежень (15) несумісна, то $\Delta P_j(q, x, y) \leq 0$, і для системи переваг (8), що описується бінарним відношенням (11), не існує жодного вектора параметрів, що задовольняє даній системі обмежень.

Запропонований метод може бути узагальнений для розв'язання задач синтезу моделей багатокритеріального оцінювання з вихідними даними, що подані у вигляді бінарних відношень еквівалентності (7) та нестрогої переваги (9). Його часткові випадки знайшли застосування для розв'язання задач параметричної ідентифікації переваг ОПР з визначеними параметрами ФКЧК виду (2) та (5), зокрема, при оптимізації топології територіально розподілених об'єктів [14-17].

ВИСНОВКИ

Для підвищення адекватності моделей багатокритеріального оцінювання запропоновано використовувати функцію корисності часткових критеріїв, що дозволяє реалізувати не тільки лінійні, опуклі або увігнуті, але і S- (Z)-подібні залежності від їх значень. Її використання дозволяє істотно підвищити точність наближення оцінок експертів у порівнянні з моделями, побудованими на основі функцій Гаусса, Харрінгтона і логістичної функції. Розроблено метод структурно-параметричного синтезу моделей багатокритеріального оцінювання, побудованих на основі поліному Колмогорова-Габора, з універсальними функціями корисності часткових критеріїв. Метод базується на технології компараторної ідентифікації, що дозволяє здійснювати перехід від якісних оцінок особи, що приймає рішення, до їх кількісних скалярних оцінок. Запропоновані модель та метод дозволять здійснювати автоматичне формування оцінок варіантів у підсистемах підтримки прийняття рішень. Їх практичне застосування дозволить підвищити точність оцінок альтернативних варіантів і на цій основі підвищити функціонально-

вартісну ефективність сучасних систем підтримки прийняття багатокритеріальних проектних і управлінських рішень.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] S. Greco, Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art Surveys / S. Greco, M. Ehrgott, J.R. Figueira. – New York: Springer, 2016. – 1346 p.
- [2] I. Kaliszewski, Mechanical design, Multiple Criteria Decision Making and Pareto optimality gap / I. Kaliszewski, T. Kiczowski, J. Miroforidis // Engineering Computations. – 2016. Vol. 33(3). – P. 876-895.
- [3] И.М. Макаров, Теория выбора и принятия решений / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубинский, В.Б. Соколов. – М.: Наука, 1982. – 328 с.
- [4] П. Фишберн, Теория полезности // Исследование операций: В 2 т. Т.1: Методологические основы и математические методы / Под ред. Дж. Муудера, С. Элмаграби: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. С. 448-480.
- [5] Л.Г. Раскин, Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / Л.Г. Раскин, О.В. Серая. – Харьков: Парус, 2008. – 352 с.
- [6] В.В. Бескоровайный, Структурно-параметрична ідентифікація моделей багатокритеріального оцінювання / В.В. Бескоровайный, И.В. Трофименко // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 3 (7). – С. 56-59.
- [7] О.А. Овезгельдыев, Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации / О.А. Овезгельдыев, Э.Г. Петров, К.Э. Петров. – К.: Наукова думка, 2002. – 161 с.
- [8] В.В. Крючковский, Введение в нормативную теорию принятия решений / В.В. Крючковский, Э.Г. Петров, Н.А. Соколова, В.Е. Ходаков. – Херсон: Гринь Д.С. 2013. – 284 с.
- [9] К.Э. Петров, Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания: монография / К.Э. Петров, В.В. Крючковский. – Херсон: Олд-плюс, 2009. – 294 с.
- [10] Э.Г. Петров, Формирование функций полезности частных критериев в задачах многокритеріального оценивания / Э.Г. Петров, В.В. Бескоровайный, В.П. Писклакова // Радиоэлектроника и информатика. – 1997. – №1. – С. 71-73.
- [11] В.В. Бескоровайный, Идентификация частной полезности многофакторных альтернатив с помощью S-образных функций / В.В. Бескоровайный, Е.В. Соболева // Бионика интеллекта. – 2010. – №1. – С. 50-54.
- [12] V. Beskorovainyi, Identification of preferences in decision support systems / V. Beskorovainyi, H. Berezovskyi // ECOTECHMOD. – 2017. – Vol. 06. – №4. – P. 15-20.
- [13] В.В. Бескоровайный, Параметрическая идентификация аддитивно-мультипликативных моделей многофакторного оценивания / В.В. Бескоровайный, И.В. Трофименко // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – № 4. – С. 41-46.
- [14] В.В. Бескоровайный, Выбор многокритериальных решений при реинжиниринге топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескоровайный, К.Е. Подоляка // Системи обробки інформації. – 2016. – № 5(142). – С. 80-86.
- [15] В.В. Бескоровайный, Многофакторное оценивание вариантов реинжиниринга крупномасштабных объектов на основе компараторной идентификации / В.В. Бескоровайный, А.С. Москаленко, К.Е. Подоляка // Электротехнические и компьютерные системы. – 2016. – № 23 (99). – С. 192-200.
- [16] В.В. Бескоровайный, Параметрическая идентификация аддитивно-мультипликативных моделей многофакторного оценивания / В.В. Бескоровайный, И.В. Трофименко // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – № 4. – С. 41-46.
- [17] V. Beskorovainyi, Reengineering the topological structure of large-scale monitoring systems / V. Beskorovainyi, K. Podoliaka // ECOTECHMOD. – 2015. – Vol. 4 (3). – P. 13-18.

Комп'ютерне Моделювання Модифікованого Методу Оптимальної Зупинки

Леонід Файнзільберг
кафедра біомедичної кібернетики
Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського
Київ, Україна
fainzilberg@gmail.com

Юлія Яременко
кафедра біомедичної кібернетики
Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського
Київ, Україна
juliayaremenko98@gmail.com

Computer Modeling of the Modified Method of Optimal Stopping

Leonid Fainzilberg
department of biomedical cybernetics
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
fainzilberg@gmail.com

Yulia Yaremenko
department of biomedical cybernetics
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
juliayaremenko98@gmail.com

Анотація — розглядається модифікований метод оптимальної зупинки, який, на відміну від традиційного, передбачає послідовний пошук найкращої альтернативи з заданою поступкою. На основі статистичного експерименту визначені оптимальний крок зупинки та імовірність успіху при різних значеннях поступки.

Abstract — the modified method of optimal stopping, which, unlike the traditional one, involves a consistent search for the best alternative with a given concession is considered. On the basis of the statistical experiment were defined the optimal stopping step and the probability of success with different values of concession.

Ключові слова — альтернатива; особа, що приймає рішення; послідовний аналіз.

Keywords — alternative; decision maker; sequential analysis.

I. Вступ

Задача оптимальної зупинки виникає при рішенні багатьох прикладних задач, зокрема задач пошуку

- кандидата на вакантну посаду за результатами послідовного кастингу;
- місця паркування або заправки автомобіля на дорозі з рухом в одному напрямку;
- найбільш привабливого банку для отримання кредиту;

- квартири для оренди або купівлі в великому місті;
- окремого товару на ринку.

Передбачається, що на основі послідовного аналізу альтернатив у випадковому порядку особа, що приймає рішення (ОПР), має обрати найкращу з альтернатив зі скінченної множини за таких обмежень:

- кожна з альтернатив переглядають лише один раз;
- на кожному кроці ОПР може прийняти одне з двох рішень: або продовжити пошук кращої альтернативи, або зупинитися, вважаючи, що поточна альтернатива не тільки краща за попередні, але й найкраща з усіх альтернатив.

II. Традиційний метод оптимальної зупинки

Нехай $D = \{d_1, \dots, d_N\}$ – скінченна множина альтернатив. Припускають, що особа, яка приймає рішення (ОПР), заздалегідь не знає особисті якості альтернатив d_1, \dots, d_N , але на основі «експерименту» може їх послідовно порівнювати та визначити альтернативу, яка має переваги над попередніми. Також вважають, що для альтернатив виконується традиційна властивість транзитивності [1]:

$$\text{якщо } d_i \succ d_j \text{ та } d_j \succ d_z, \text{ то } d_i \succ d_z \quad (1)$$

Оскільки альтернативи переглядаються у випадковому порядку, то зрозуміло, що на кожному кроці $t = 1, \dots, N$

імовірність появи найкращої альтернативи дорівнює $P_0 = 1/N$.

Задача оптимальної зупинки ставить за мету знайти такий крок $t^* \in [1, N]$, на якому слід зробити остаточний вибір, щоб максимізувати імовірність $P > P_0$ вибору найкращої альтернативи з усіх можливих, тобто:

$$t^* = \arg \max_{\substack{1 \leq t \leq N \\ \forall j \neq t}} P(d_t \succ d_j), \quad j = 1, \dots, N \quad (2)$$

Існують різні підходи до аналітичного визначення оптимального кроку зупинки, що задовольняє умову (2) [2-5].

Зрозуміло, що на будь-якому кроці ОПР має тривіальне рішення – відкинути альтернативу, якщо вона гірша за попередні. Якщо ж чергова альтернатива краща за усі попередні, то ОПР має прийняти нетривіальне рішення: або обрати поточну альтернативу як найкращу або відкинути її, чекаючи, що більш краща буде далі.

Оптимальний крок t^* зупинки може бути визначений за допомогою методу динамічного програмування [5].

Введемо означення випадкових подій:

A – ОПР обрала найкращу альтернативу з усієї множини $D = \{d_1, \dots, d_N\}$;

B_t – ОПР обрала поточну альтернативу на t -му кроці, вважаючи що вона залишиться найкращою далі;

\bar{B}_t – ОПР відкинула поточну альтернативу на t -му кроці, вважаючи що краща буде далі.

Для визначення оптимальної стратегії, яка забезпечує найбільшу імовірність $P = P(A)$, розглянемо дві умовні імовірності:

$g_t = P(A|B_t)$ – імовірність випадкової події, яка полягає у тому, що поточна альтернатива на t -му кроці не лише краща за всі попередні, а й найкраща з усіх альтернатив множини $D = \{d_1, \dots, d_N\}$;

$h_t = P(A|\bar{B}_t)$ – імовірність обрати найкращу альтернативу, якщо ОПР на t -му кроці відкине поточну альтернативу (хоча вона виявилась кращою за попередні) у припущенні, що починаючи з наступного $t+1$ -го кроку ОПР використовує оптимальну стратегію.

Зрозуміло, що оптимальна стратегія ОПР на t -му кроці така:

а) відкинути альтернативу, якщо вона не краща за попередні;

б) обрати поточну альтернативу, якщо вона краща за попередні та виконується умова

$$g_t \geq h_t. \quad (3)$$

На основі методу динамічного програмування можна довести [5], що

$$g_t = \frac{t}{N}, \quad (4)$$

а

$$h_t = \frac{t}{N} \left(\frac{1}{t} + \frac{1}{t+1} + \dots + \frac{1}{N-1} \right). \quad (5)$$

З умови $g_t = h_t$ з урахуванням виразів (4) та (5) безпосередньо випливає, що оптимальний крок зупинки визначається за формулою

$$t^* = N/e, \quad (6)$$

де $e = 2,71828$, причому найбільша імовірність успіху $P \approx 0,368$ досягається при виборі першої з альтернатив, яка перевершує всі альтернативи на попередніх кроках $1, 2, \dots, t^*$.

III. МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЇ ЗУПИНКИ

Припустимо, що кожен з альтернатив множини $D = \{d_1, \dots, d_N\}$ характеризує сукупність критеріїв x_1, \dots, x_Q . Якщо припустити, що для критеріїв виконується умова незалежності за перевагами [6], то для порівняння якостей альтернатив можна перейти від критеріїв x_1, \dots, x_Q до суперкритерію у вигляді адитивної згортки

$$x^0 = \sum_{k=1}^Q a_k x_k, \quad (7)$$

де a_k – вагові коефіцієнти, що характеризують відносну важливість k -го критерію x_k у суперкритерії x^0 .

При відсутності об'єктивних міркувань про значення вагових коефіцієнтів a_k відносну важливість критеріїв можна заздалегідь визначити, наприклад, за методом Сааті [7] на основі таблиць парних порівнянь, наданих експертами.

Тепер припустимо, що метою ОПР є не вибір найкращої альтернативи з усієї множини $D = \{d_1, \dots, d_N\}$, а вибір альтернативи $\tilde{d}^* \in D$, яка за суперкритерієм $x^0(d)$ відрізняється від найкращої альтернативи не більше як на задану величину поступки $\Delta \geq 0$. Іншими словами, поставимо задачу знайти такий оптимальний крок t^* послідовного перегляду альтернатив з множини D , на якому буде максимальна імовірність \tilde{P} вибору альтернативи, що задовольняє умову

$$|x^0(\tilde{d}^*) - x^0(d^*)| \leq \Delta. \quad (8)$$

Оскільки аналітичне визначення оптимального кроку t^* у такій постановці стикається з певними складнощами, будемо визначати t^* та відповідну імовірність \tilde{P}^* на основі методу статистичного експерименту.

Як відомо, статистичний експеримент – ефективний метод дослідження поведінки об'єкту у випадкових умовах [8]. В результаті комп'ютерного моделювання випадкового процесу можуть бути визначені характеристики об'єкта, аналітична оцінка яких скрутна або неможлива. Для цього проводяться багаторазові іспити з різними значеннями вихідних параметрів та статистичне оброблення отриманих спостережень.

IV. ТЕХНОЛОГІЯ СТАТИСТИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Статистичний експеримент, що пропонується, ґрунтується на методі Монте-Карло [9], в основі якого лежить багаторазова генерація масиву X випадкових чисел x_t^0 , $t = 1, \dots, N$ з рівномірним розподілом імовірностей в інтервалі значень $[x_{\min}^0, x_{\max}^0]$. Кожне згенероване число $x_t^0 \in [x_{\min}^0, x_{\max}^0]$ імітує значення суперкритерію альтернативи $d_t \in \{D_1, \dots, D_N\}$, яку ОПР спостережіє на t -му кроці.

Загальну схему проведення експериментів ілюструє use-case діаграма в нотаціях універсальної мови моделювання UML (рис. 1).

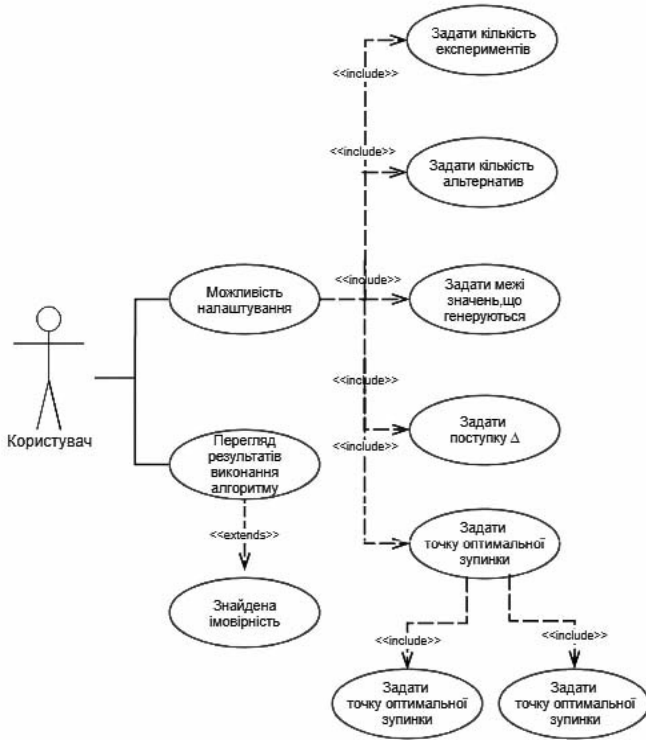


Рис. 1. USE-CASE діаграма

Зрозуміло, що найкраща альтернатива (істинний лідер) d^* , що відповідає максимальному значенню супер критерію x_{\max}^0 , може зустрітись на довільному місці $t \in [1, N]$ згенерованого масиву X .

Метою експериментів є визначення імовірності успіху при різних $t \in [1, N]$ прийняття остаточного рішення за схемою:

- визначають «умовного» лідера за попередніми значеннями масиву, тобто визначають число

$$x_{1,t}^{\max} = \max \{x_1^0, \dots, x_t^0\}; \quad (9)$$

- остаточним лідером вважається перша з наступних альтернатив, яку характеризує супер критерій, що перевищує число $x_{1,t}^{\max}$.

Для визначення властивостей модифікованого методу оптимальної зупинки проводиться M статистичних експериментів для кожного фіксованого кроку $t \in [1, N]$ та за кожною серією визначають імовірність вибору альтернативи $\tilde{d}^* \in D$, що задовольняє умову (8).

Імовірність досягнення мети (8) оцінюють частотою

$$P(t) = \frac{m(t)}{M}, \quad (10)$$

де $m(t)$ – число успіхів на t -му кроці в серії з M експериментів.

Для ілюстрації на рис. 2 наведена блок-схема алгоритму.

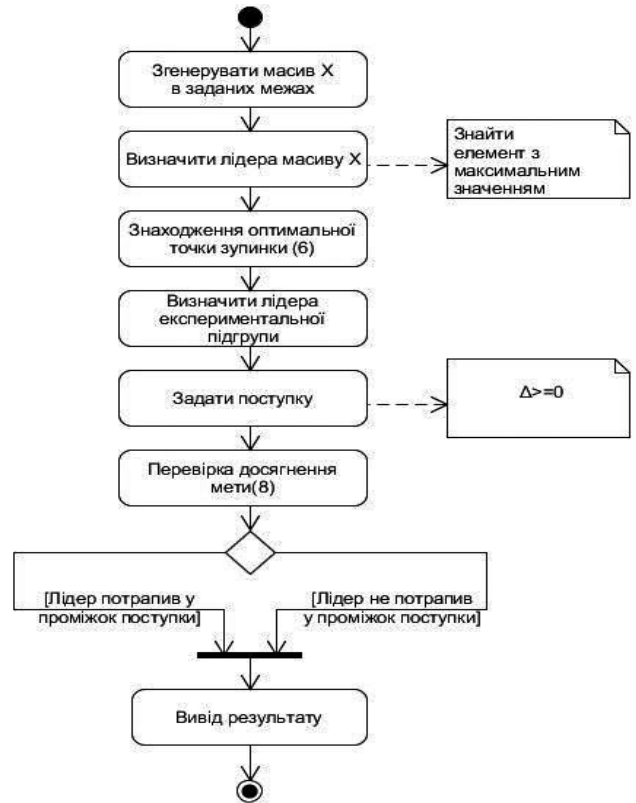


Рис. 2. Блок-схема алгоритму

Таким чином, замість аналітичного визначення властивостей модифікованого методу оптимальної зупинки, можна за допомогою запропонованої системи провести комп'ютерне моделювання процесу прийняття рішень для заданих N та M за рахунок оцінювання імовірності досягнення мети на різних кроках $t \in [1, N]$. В результаті за максимумом обчисленої імовірності визначають оптимальний момент зупинки t^* при різних значеннях поступки $\Delta \geq 0$.

V. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Імовірності \tilde{P} оцінювались методом Монте-Карло для $N = 100$ альтернатив в серіях з $M = 1000$ експериментів

на послідовностях випадкових чисел, що імітували значення суперкритерію.

Графіки залежності оцінок імовірності (9) від кроку t прийняття остаточного рішення при різних значеннях поступки Δ наведені на рис. 3.

Як видно з рис. 3 при збільшенні поступки Δ оптимальний крок $t^* \in [1, N]$, на якому слід приймати остаточний вибір, зменшується, а імовірність \tilde{P} прийняття правильного рішення збільшується.

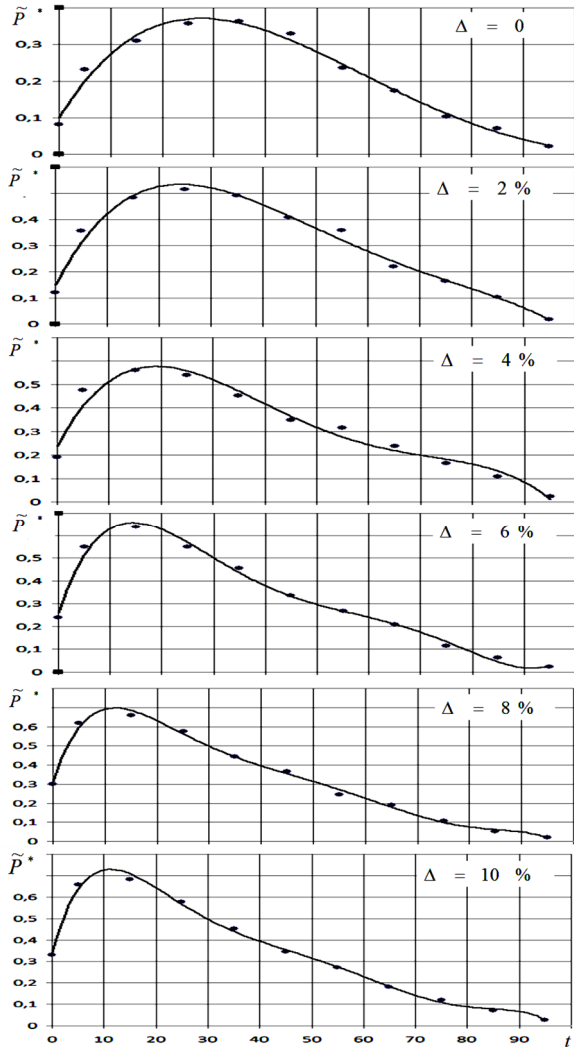


Рис. 3. Залежність імовірності успіху \tilde{P}^* від кроку t прийняття остаточного рішення при різних поступках Δ

Для ілюстрації на рис. 4 наведено графік залежності імовірності \tilde{P}^* прийняття остаточного рішення на оптимальному кроці від поступки Δ , а на рис. 5 – графік залежності оптимального кроку від поступки Δ .

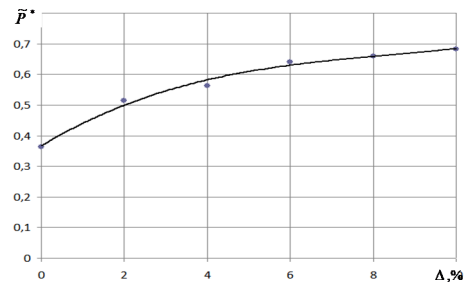


Рис. 4. Залежність імовірності \tilde{P}^* від поступки Δ

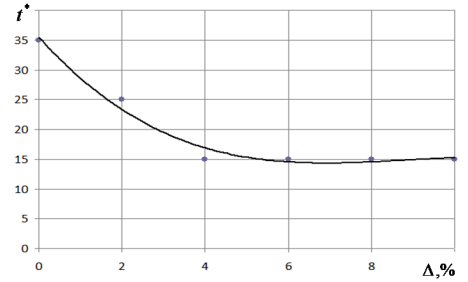


Рис. 5. Залежність оптимального шагу t^* зупинки від поступки Δ

ВИСНОВОК

За рахунок введення поступки $\Delta > 0$ на значення суперкритерію, що характеризує найкращу альтернативу, оптимальний крок зупинки зменшується від 37% (класичний метод) до значення 15% від загальної кількості альтернатив вже при значенні поступки $\Delta = 4\%$ (рис. 5). При цьому імовірність \tilde{P} прийняття правильного рішення збільшується (рис. 4) та досягає 68,3% при поступці $\Delta = 10\%$ у порівнянні з імовірністю $P = 36,8\%$ правильного рішення класичного методу оптимальної зупинки, який передбачає відсутність поступки.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] О.А Жуковська, Л.С Файнзільберг, Математичні моделі прийняття колективних рішень. Київ: Освіта України, 2018.
- [2] B. Hernendes, (2010). The secretary problem solution details. [Online]. Available: <https://thebryanhernandezgame.files.wordpress.com/2010/05/secretary-problem.pdf>
- [3] T.S. Ferguson, "Who Solved the Secretary Problem?", Statistical Science, 1989, Vol. 4, No. 3, pp. 282-289
- [4] M. Sakaguchi, "Optimal stopping problems for randomly arriving offers". Math. Japon. 1976, No. 21, pp. 201-217.
- [5] С.М. Гусейн-Заде, Разборчивая невеста. – М.: МЦНМО, 2003.
- [6] Р.Л. Кини, Х. Райфа, Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981
- [7] Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993.
- [8] R.Y Rubinstein, D.P, Kroese., Simulation and the Monte Carlo Method New York: John Wiley & Sons; 2016.
- [9] С.Р. Роберт, Г. Каселла, Monte Carlo statistical methods. New York: Springer; 2004.

Mathematical Modeling and Simulation of Processes of Heterodiffusion with Cascade Decay of Particles

Yevgen Chaplya

Department of mathematical modeling of nonequilibrium processes

Centre of Mathematical Modelling of Y. S. Pidstryhach
Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Lviv, Ukraine

Institute of Mechanics and Applied Informatics

Kazimierz Wielki University in Bydgoszcz

Bydgoszcz, Poland

czapla@ukw.edu.pl

Olha Chernukha, Yurii Bilushchak

Department of mathematical modeling of nonequilibrium processes

Centre of Mathematical Modelling of Y. S. Pidstryhach
Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Department of Computational Mathematics and Programming
Institute of Applied Mathematics and Fundamental Sciences

Lviv Polytechnic National University

Lviv, Ukraine

zaliznuchna6@gmail.com, byixx13@gmail.com

Математичне та Комп'ютерне Моделювання Процесів Гетеродифузії за Каскадного Розпаду Частинок

Євген Чапля

Відділ математичного моделювання нерівноважних процесів

Центр математичного моделювання

Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України

Львів, Україна

Інститут механіки і прикладної інформатики

Університет Казимира Великого у Бидгощі,

м. Бидгощ, Польща

czapla@ukw.edu.pl

Ольга Чернуха, Юрій Білушак

Відділ математичного моделювання нерівноважних процесів

Центр математичного моделювання

Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України

Львів, Україна

кафедра обчислювальної математики і програмування

Інститут прикладної математики та фундаментальних наук

Національний університет "Львівська політехніка"

zaliznuchna6@gmail.com, byixx13@gmail.com

Abstract—The mathematical model of mass transfer processes with taken into consideration of a local medium structure and cascade decay of admixture particles migrating in two ways is constructed. For the specific scheme of cascade, the balance relations of mass of the system components are formulated, the linear state equations and kinetic relationships are obtained. The heterodiffusion processes of admixture with its cascade decay in a body with two migration ways, accompanied by mass exchange between states, are investigated. For the case of unramified cascade decay, associated initial-boundary value heterodiffusion problems by cascade kind, when the problem solutions at one stage are sources on the next, are formulated. Solutions of the problems are obtained by iterative procedure with using Green functions. The expressions for diffusion fluxes of migrating admixture substances

through the given section of the body and amount of decaying substances that passed through the layer in a certain time interval.

Анотація—Побудована математична модель процесів масоперенесення домішкових речовин з урахуванням локальної структури середовища та каскадного розпаду домішкових частинок, які мігрують двома шляхами. Для конкретної схеми каскадного розпаду сформульовано балансові співвідношення маси компонент системи, отримано лінійні рівняння стану та кінетичні співвідношення. Досліджено процеси гетеродифузії домішок за їх каскадного розпаду в тілі з двома шляхами міграції, що супроводжуються масообміном між станами. Для випадку нерозгалуженого каскадного розпаду сформульовані зв'язані крайові задачі гетеродифузії каскадного типу, коли розв'язки задачі на одному етапі є джерелами на наступному.

Розв'язки задач побудовані за ітераційною процедурою з використанням функцій Гріна. Отримано формули для дифузійних потоків мігруючих домішкових речовин через заданий переріз тіла та кількості розпадних речовин, що пройшли через шар, за певний часовий інтервал.

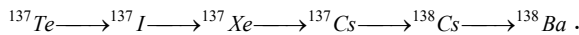
Keywords—mathematical model; heterodiffusion; cascade decay; initial-boundary value problems by cascade kind; software; architecture of program complex

Ключові слова—математична модель; гетеродифузія; каскадний розпад; крайова задача каскадного типу; пакет програм; архітектура комплексу програм

I. INTRODUCTION

Mathematical models of admixture heterodiffusion in two ways in media where migrating particles occur locally in different physical states and differ substantially by their mobilities [1-3], are used for describing the processes of mass transfer in polycrystals, fine-grained systems of different nature, porous fluid-saturated media, etc. For example, a significant numbers of metals and alloys used in engineering are polycrystals. Their structures are characterized by availability of dislocations, grain boundaries and internal boundaries of interphases [4].

An important feature of the processes of heterodiffusion of technogenic substances is their natural decay (degradation), which occur with the same intensity in each of physically different states. In some cases, the substance generated in the process of decay is already less toxic and its redistribution is not of interest for further study. At the same time the generated substance can decay and generate new substance which migrates in two ways, is sorbed-desorbed and decay. Such a process is called cascade decay and can occur as a result of radioactive decay or chemical reactions (in particular, chain reactions), for example [5]:



In the work the mathematical model of heterodiffusion of admixture particles in two ways under their cascade decay is constructed, associated initial-boundary value heterodiffusion problems by cascade kind, when the problem solutions at one stage are sources on the next, are formulated. The solutions of the problems are found and on this basis software is designed.

II. MATHEMATICAL MODEL

A. Object of inquiry

Let decaying particles of one chemical kind migrate in a body with two migration ways and mass exchange between states [1, 3, 6, 7]. Moreover, the substances that formed as a result of decay can also decay. We accept that the body \mathbf{K}^* (discrete set of material particles) is a multicomponent solid solution. We assume interacting discrete sets of material particles $\mathbf{K}_j^{*(0)}$ that form the base of the body ($j = 0$) and admixture particles in two dedicated states ($j = 1; 2$) as thermodynamical components of the system. When the substance $\mathbf{K}_j^{*(0)}$ in the state $j = 1; 2$ decays, the particles of other substances $\mathbf{K}_j^{*(1)}$

and $\mathbf{K}_j^{*(N)}$ are formed, and the particles $\mathbf{K}_j^{*(N)}$ do not decay yet (fig. 1). In turn, the particles of admixture $\mathbf{K}_j^{*(1)}$ decay and generate the particles of substance $\mathbf{K}_j^{*(2)}$ and non-decaying (harmless) substances, which be attributed to $\mathbf{K}_j^{*(N)}$, and so on, while we obtain only non-decaying admixture substances in the $(N - 1)$ -th step.

We juxtapose the continuums $\mathbf{K}_j^{(i)}$ ($i = \overline{0, N}$, $j = \overline{0, 2}$) to each component of the body (subsets of particles $\mathbf{K}_0^{*(0)}$ that forms the skeleton and to the particles of decaying substance in different states $\mathbf{K}_j^{*(0)}$ as well as the particles that formed as a result of decay $\mathbf{K}_j^{*(i)}$ ($j = 1; 2$, $i = \overline{1, N}$)).

B. Balance relations

As reference relations of the model we assume the balance equations for masses of each component of the system. If the change in mass of the component occurs due to mass fluxes and internal sources [8], then the equations of balance of mass of the component ij take place

$$\frac{\partial \rho_j^{(i)}}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho_j^{(i)} \vec{v}_j^{(i)}) + w_j^{(i)} \quad (i = \overline{0, N}, j = \overline{0, 2}), \quad (1)$$

where $\rho_j^{(i)}$ are the densities of the system components, $\vec{v}_j^{(i)}$ is the velocities of motion of material points of the continuums $\mathbf{K}_j^{(i)}$; $\vec{\nabla}$ is Hamilton's nabla-operator; $w_j^{(i)}$ is the density of internal source (or sink) of component ij ; the dot is the scalar product [7].

Since we have assumed that the processes of sorption-desorption and decay of admixture are treated as source (sink) of the component, then in the general case the capacity of mass product $w_j^{(i)}$ can be presented as a sum

$$w_j^{(i)} = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^2 \omega_{jk}^{(i)} + \bar{w}_j^{(i)} \quad (i = \overline{0, N}, j = \overline{0, 2}), \quad (2)$$

where $\omega_{jk}^{(i)}$ is the capacity of mass product of the component i in the state j in connection with its transition from the continuum $\mathbf{K}_k^{(i)}$; $\bar{w}_j^{(i)}$ is the capacity of mass product of the component ij due to decay of particles of the component $i - 1$ ($i = \overline{1, N}$, $j = 1, 2$). Then we have

$$\bar{w}_j^{(0)} = 0 \quad (\forall j), \quad \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \bar{w}_j^{(i)} = 0; \quad (3)$$

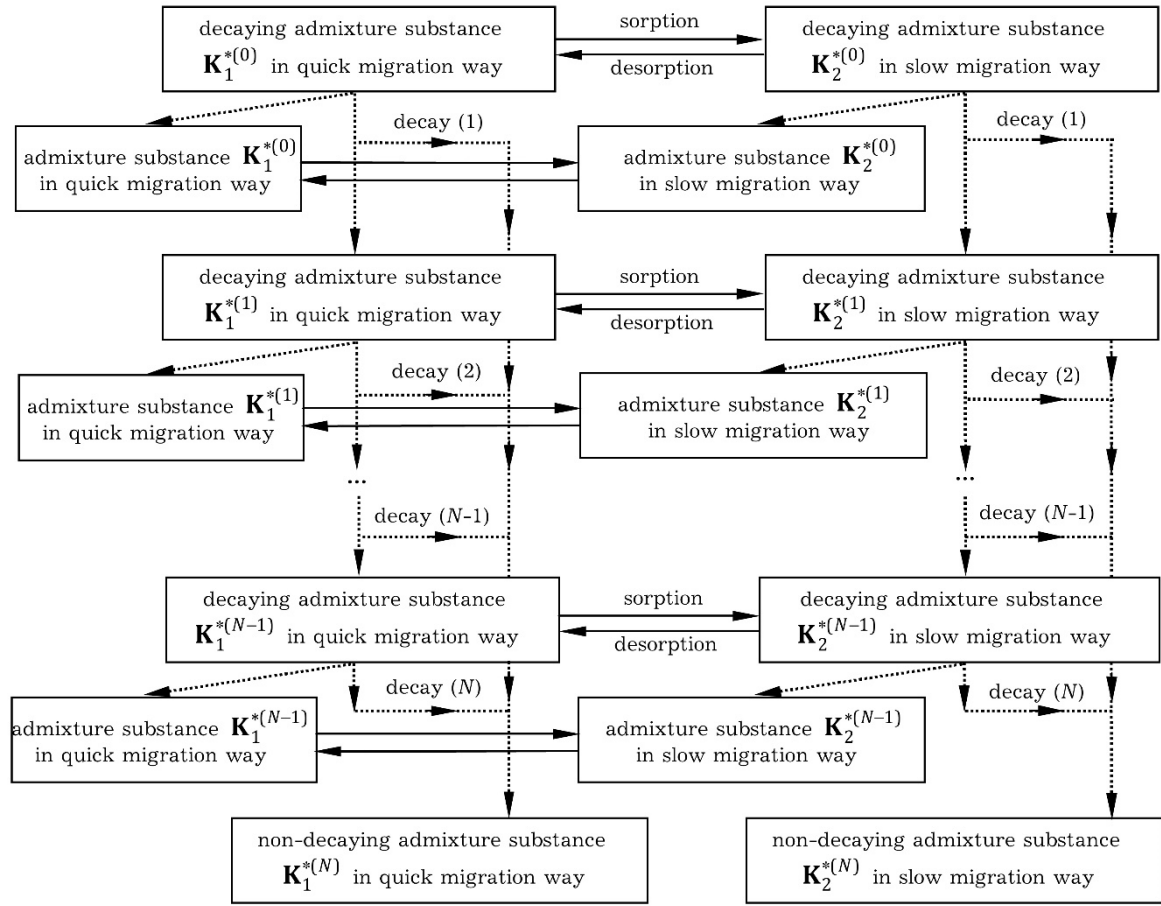


Fig. 1. Scheme of cascade decay of admixture components of the thermodynamic system and sorption-desorption processes

including

$$\omega_{jj}^{(i)} = 0 \quad (\forall j), \quad \omega_{jk}^{(i)} = -\omega_{kj}^{(i)} \quad (\forall i, j, k), \quad \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 \omega_{jk}^{(i)} = 0 \quad (\forall i).$$

Let values of the body density $\rho = \sum_{i,j} \rho_j^{(i)}$ and velocity \vec{v} introduced by the following equation

$$\vec{v} = \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^N \rho_j^{(i)} \vec{v}_j^{(i)} / \rho, \quad (4)$$

is attributed to the points of the continuum of mass centres \mathbf{K}_c . We add Eq.(1) by all indexes i and j .

Using the expressions (2) and (4) we obtain

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \rho \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^N \frac{\rho_j^{(i)} \vec{v}_j^{(i)}}{\rho} = -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} - \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \rho. \quad (5)$$

Using that the total derivation with respect to time is $d/dt = \partial/\partial t + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}$, the Eq.(5) can be written as

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v}. \quad (6)$$

Write equation of balance for mass of component ij per the total derivative with respect to time

$$\frac{d\rho_j^{(i)}}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\rho_j^{(i)} \vec{v}) - \vec{\nabla} \cdot (\rho_j^{(i)} \vec{v}) - \rho_j^{(i)} \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + w_j^{(i)}$$

Take into account that $\rho_j^{(i)} = C_j^{(i)} \rho$, where $C_j^{(i)} = \rho_j^{(i)} / \rho$ is the mass concentration of component satisfying the condition of normalization

$$\sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^N C_j^{(i)} = 1. \quad (7)$$

Then we obtain

$$\frac{d\rho_j^{(i)}}{dt} + \rho_j^{(i)} \bar{\nabla} \cdot \bar{v} = \rho \frac{dC_j^{(i)}}{dt} + C_j^{(i)} \frac{d\rho}{dt} + C_j^{(i)} \rho \bar{\nabla} \cdot \bar{v} = \rho \frac{dC_j^{(i)}}{dt},$$

because the relation (6) is valid. As a result we obtain equation of balance of concentration of the component i in the state j

$$\rho \frac{dC_j^{(i)}}{dt} = -\bar{\nabla} \cdot \rho_j^{(i)} (\bar{v}_j^{(i)} - \bar{v}) + w_j^{(i)} = -\bar{\nabla} \cdot \bar{J}_j^{(i)} + w_j^{(i)}$$

The quantity $\bar{J}_j^{(i)} = \rho_j^{(i)} (\bar{v}_j^{(i)} - \bar{v})$ is the diffusion flux of the component ij , introduced with respect to the points of the continuum \mathbf{K}_c .

Note that if we use the normalization condition (7), than balance equation can be written as

$$\rho \frac{dC_j^{(i)}}{dt} = -\bar{\nabla} \cdot \bar{J}_j^{(i)} + w_j^{(i)}, \quad i = \overline{0, N}, \quad j = 1, 2, \quad (8)$$

$$C_0^{(0)} = 1 - \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^N C_j^{(i)}. \quad (9)$$

C. Kinetic equations and state equations

If we have the aggregate of conjugate thermodynamic forces and corresponding thermodynamic fluxes $\bar{X}_j^{(i)} \div \bar{J}_j^{(i)}$, $X_k^{(i)} \div \omega_k^{(i)}$, here the linear kinetic relations are

$$\begin{aligned} \bar{J}_j^{(i)} &= \sum_{m=1}^2 \sum_{n=0}^N L_{jm}^{(in)} \bar{X}_m^{(n)}, \quad L_{jm}^{(in)} = \left(\frac{\partial \bar{J}_j^{(i)}}{\partial \bar{X}_m^{(n)}} \right)_0; \\ \omega_k^{(i)} &= \sum_{m=1}^2 \sum_{l=1}^N \lambda_{km}^{(il)} X_m^{(l)}, \quad \lambda_{km}^{(il)} = \left(\frac{\partial \omega_k^{(i)}}{\partial X_m^{(l)}} \right)_0, \end{aligned} \quad (10)$$

where $\bar{X}_j^{(i)}$ is vector thermodynamic force conjugated to vector diffusion flux $\bar{J}_j^{(i)}$, namely [7]

$$\bar{X}_j^{(i)} = -\bar{\nabla} (\mu_j^{(i)} + \psi_j^{(i)}); \quad (11)$$

$X_m^{(l)}$ is thermodynamic force conjugated to thermodynamic flux $\omega_m^{(l)}$; $\mu_j^{(i)}$ is the chemical potential of the component ij , $\psi_j^{(i)}$ is potential energy of mass unit of component i in the state j . So long as $\psi_j^{(0)} = \psi_j^{(1)} = \dots = \psi_j^{(N)} = \psi$, the taking into account the conditions (3), which the capacities of mass products $w_j^{(i)}$, we obtain

$$\sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^N \psi_j^{(i)} w_j^{(i)} = \psi \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^N w_j^{(i)} = 0.$$

Let us take into account only the processes of transitions of admixture particles between two ways of migration $\omega_{12}^{(i)}$ ($i = \overline{1, N}$), i.e. the capacities of mass products due to the processes of sorption-desorption $\omega_{12}^{(i)}$ and $\omega_{21}^{(i)}$ are non-zero. Thereto, the capacities of mass products $\bar{w}_j^{(i)}$ for the components $i = \overline{1, N}$ obey the conditions

$$\begin{aligned} \bar{w}_j^{(i)} &= \bar{w}_j^{(i-1)} + \bar{w}_j^{(i+1)} + \bar{w}_j^{(iN)}, \quad \bar{w}_j^{(11)} = 0, \\ \bar{w}_j^{(i+1)} &= -\bar{w}_j^{(ii+1)} \quad (i = \overline{1, N}, \quad j = 1, 2), \\ \bar{w}_j^{(ii\pm l)} &= 0 \text{ for } l \geq 2, \quad \bar{w}_j^{(ii)} = 0 \text{ for } \forall i; \quad \bar{w}_j^{(iN)} = -\bar{w}_j^{(Ni)}, \\ \bar{w}_j^{(N)} &= \sum_{i=1}^{N-1} \bar{w}_j^{(Ni)} = -\sum_{i=1}^{N-1} \bar{w}_j^{(iN)}; \quad \bar{w}_j^{(i)} = 0 \quad (j = 0); \\ \bar{w}^{(i)} &= \bar{w}_1^{(i)} = \bar{w}_2^{(i)} \quad (i = \overline{1, N}). \end{aligned}$$

Here $\bar{w}_j^{(i-1)}$ is the capacities of mass products of substance $\mathbf{K}_j^{(i)}$ in j -th state at the i -th stage of cascade decay due to decay of substance $\mathbf{K}_j^{(i-1)}$; $\bar{w}_j^{(i+1)}$, $\bar{w}_j^{(iN)}$ are the capacities of mass sink of substance $\mathbf{K}_j^{(i)}$ at the stage $i+1$ and the last stage of decay $i = N$ in the j -th way of migration.

Then we have

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^N \mu_j^{(i)} w_j^{(i)} = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^N \mu_j^{(i)} \left[\sum_{k=1}^2 \omega_{jk}^{(i)} + \bar{w}_j^{(i)} \right]. \quad (12)$$

The first term of the right-hand side of (12) can be modified to the form

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^2 \mu_j^{(i)} \omega_{jk}^{(i)} = -\sum_{i=1}^N (\mu_2^{(i)} - \mu_1^{(i)}) \omega_{12}^{(i)}.$$

Denote $\omega_1^{(i)} = \omega_{12}^{(i)}$ ($i = \overline{1, N}$) are the scalar mass flows characterizing mass exchange between states; $X_1^{(i)}$ are the scalar thermodynamic forces conjugated to corresponding mass flows $\omega_j^{(i)}$, namely

$$X_1^{(i)} = \mu_2^{(i)} - \mu_1^{(i)} \quad (i = \overline{0, N}). \quad (13)$$

We present the second term of the right-hand side of (12) as

$$\sum_{i=0}^N \mu_j^{(i)} \bar{w}_j^{(i)} = -\sum_{i=1}^{N-1} (\mu_j^{(i+1)} - \mu_j^{(i)}) \bar{w}_j^{(i+1)} - \sum_{i=1}^{N-1} (\mu_j^{(N)} - \mu_j^{(i)}) \bar{w}_j^{(iN)},$$

Where we assume that $\bar{w}_j^{(ik)}$, $\bar{w}_j^{(iN)}$ ($i, k = \overline{1, N-1}$) are scalar mass flows characterizing decay of admixture particles and we

consider them known; $\bar{X}_j^{(i)} = \mu_j^{(i+1)} - \mu_j^{(i)}$, $\bar{X}_j^{(Ni)} = \mu_j^{(N)} - \mu_j^{(i)}$ ($i = \overline{1, N}$, $j = 1, 2$) are scalar quantities conjugated to corresponding mass flows $\bar{w}_j^{(ik)}$, $\bar{w}_j^{(iN)}$.

As a consequence of Onsager's conditions of reciprocity [9], the coefficients $L_{jm}^{(in)}$, $\lambda_{km}^{(il)}$ have to satisfy the conditions $L_{jm}^{(in)} = L_{mj}^{(ni)}$, $\lambda_{km}^{(il)} = \lambda_{mk}^{(li)}$, and due to the second law of thermodynamics they obey such restrictions: $L_{jj}^{(ii)}, \lambda_{kk}^{(ii)} \geq 0$, $L_{jj}^{(ii)} L_{mm}^{(nn)} \geq (L_{jm}^{(in)} + L_{mj}^{(ni)})^2 / 4$, $\lambda_{kk}^{(ii)} \lambda_{mm}^{(ll)} \geq (\lambda_{km}^{(il)} + \lambda_{mk}^{(li)})^2 / 4$.

The linear state equations is

$$\mu_j^{(i)} = \mu_{j0}^{(i)} + \sum_{k=1}^N d_{jk}^{(i)} c_k^{(i)}. \quad (14)$$

Here $\mu_{j0}^{(i)}$ is the chemical potential of pure substance of the component ij ; $d_j^{(i)} = \left(\partial \mu_j^{(i)} / \partial c_j^{(i)} \right)_0$ are the material characteristics of the system.

D. Key sets of model equations

As solving functions, we choose the derivation of concentration of admixture components $c_j^{(i)} = C_j^{(i)} - C_j^{(i)0}$ from the values in the reference state $C_j^{(i)0}$, which corresponds with the natural state of unlimited body without external influence.

If we substitute the expressions for thermodynamic forces (11), (13) into kinetic equations for the thermodynamic fluxes (10), then we obtain

$$\bar{J}_j^{(i)} = - \sum_{m=1}^N \sum_{n=0}^N L_{jm}^{(in)} \bar{\nabla} \mu_m^{(n)}, \quad \omega_k^{(i)} = \sum_{l=0}^N \lambda_{kl}^{(il)} (\mu_2^{(l)} - \mu_1^{(l)}).$$

We express the chemical potentials per solving functions using the linear state equations (14). Accept that the material characteristics are independent on coordinates. Then

$$\bar{J}_j^{(i)} = - \sum_{m=1}^N \sum_{n=0}^N L_{jm}^{(in)} d_m^{(n)} \bar{\nabla} c_m^{(n)}, \quad \omega_k^{(i)} = \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{k1}^{(il)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{k2}^{(il)} c_2^{(l)} + M_k^{(il)} \right], \quad (15)$$

where $\bar{\lambda}_{k1}^{(il)} = -\lambda_{k1}^{(il)} d_1^{(l)}$, $\bar{\lambda}_{k2}^{(il)} = (\lambda_{k1}^{(il)} - \lambda_{k2}^{(il)}) d_2^{(l)}$ are the concentrative coefficients of intensity of the processes of intertransition of particles between states; $M_k^{(il)} = -\lambda_{k1}^{(il)} \mu_{10}^{(l)} + (\lambda_{k1}^{(il)} - \lambda_{k2}^{(il)}) \mu_{20}^{(l)}$ are the model constants.

Sum of terms in the expression (15) of type $\bar{\lambda}_{k1}^{(il)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{k2}^{(il)} c_2^{(l)} + M_k^{(il)}$ is describing the mass product of the component of the thermodynamic system. From the beginning we have assumed change of admixture mass can occur only

due to particles transitions between states and due to decay of substance. That is $M_k^{(il)} \equiv 0$.

If we substitute the expressions for the thermodynamic fluxes of admixture (15) into equation of balance of components concentration (8), then we obtain the equations of heterodiffusion in the form

for $i = 0$

$$\rho \frac{dc_1^{(0)}}{dt} = \bar{\nabla} \cdot \left[\sum_{m=1}^N \sum_{n=0}^N D_{1m}^{(0n)} \bar{\nabla} c_m^{(n)} \right] + \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{11}^{(0l)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{12}^{(0l)} c_2^{(l)} \right] - \tilde{\lambda}_1^{(1)} c_1^{(0)} - \tilde{\lambda}_1^{(0N)} c_1^{(0)},$$

$$\rho \frac{dc_2^{(0)}}{dt} = -\bar{\nabla} \cdot \left[\sum_{m=1}^N \sum_{n=0}^N D_{2m}^{(0n)} \bar{\nabla} c_m^{(n)} \right] - \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{11}^{(0l)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{12}^{(0l)} c_2^{(l)} \right] + \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{21}^{(0l)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{22}^{(0l)} c_2^{(l)} \right] - \tilde{\lambda}_2^{(1)} c_2^{(0)} - \tilde{\lambda}_2^{(0N)} c_2^{(0)};$$

for $i = \overline{1, N-1}$

$$\rho \frac{dc_1^{(i)}}{dt} = \bar{\nabla} \cdot \left[\sum_{m=1}^N \sum_{n=0}^N D_{1m}^{(in)} \bar{\nabla} c_m^{(n)} \right] + \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{11}^{(il)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{12}^{(il)} c_2^{(l)} \right] + \tilde{\lambda}_1^{(i-1)} c_1^{(i-1)} - \tilde{\lambda}_1^{(i+1)} c_1^{(i)} - \tilde{\lambda}_1^{(iN)} c_1^{(i)},$$

$$\rho \frac{dc_2^{(i)}}{dt} = -\bar{\nabla} \cdot \left[\sum_{m=1}^N \sum_{n=0}^N D_{2m}^{(in)} \bar{\nabla} c_m^{(n)} \right] - \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{11}^{(il)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{12}^{(il)} c_2^{(l)} \right] + \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{21}^{(il)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{22}^{(il)} c_2^{(l)} \right] + \tilde{\lambda}_2^{(i-1)} c_2^{(i-1)} - \tilde{\lambda}_2^{(i+1)} c_2^{(i)} - \tilde{\lambda}_2^{(iN)} c_2^{(i)};$$

for $i = N$

$$\rho \frac{dc_1^{(N)}}{dt} = \bar{\nabla} \cdot \left[\sum_{m=1}^N \sum_{n=0}^N D_{1m}^{(Nn)} \bar{\nabla} c_m^{(n)} \right] + \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{11}^{(Nl)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{12}^{(Nl)} c_2^{(l)} \right] + \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{\lambda}_1^{(iN)} c_1^{(i)}$$

$$\rho \frac{dc_2^{(N)}}{dt} = -\bar{\nabla} \cdot \left[\sum_{m=1}^N \sum_{n=0}^N D_{2m}^{(Nn)} \bar{\nabla} c_m^{(n)} \right] - \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{11}^{(Nl)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{12}^{(Nl)} c_2^{(l)} \right] + \sum_{l=0}^N \left[\bar{\lambda}_{21}^{(Nl)} c_1^{(l)} + \bar{\lambda}_{22}^{(Nl)} c_2^{(l)} \right] + \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{\lambda}_2^{(iN)} c_2^{(i)}. \quad (16)$$

Here $D_{jm}^{(in)} = L_{jm}^{(in)} d_m^{(n)}$ are the kinetic coefficients of diffusion;

$\tilde{\lambda}_j^{(i-1)}$, $\tilde{\lambda}_j^{(i+1)}$, $\tilde{\lambda}_j^{(iN)}$ are constants defining the decay process.

Take into consideration that admixture of the same chemical kind decays equally in different states (fig. 1), i.e. $\tilde{\lambda}^{(i)} = \tilde{\lambda}_j^{(i)}$, $\tilde{\lambda}^{(i+1)} = \tilde{\lambda}_j^{(i+1)}$, $\tilde{\lambda}^{(iN)} = \tilde{\lambda}_j^{(iN)}$. Also take into account only the processes of diffusion and sorption-desorption of particles of one chemical kind. Also we consider that chemical reactions that led to decay of substance are irreversible. And we assume independence of the model coefficients on coordinates, neglect the convective term, and then the key model of heterodiffusion in two ways under cascade decay of migrating substances (16) takes the form for $i = 0$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_1^{(0)}}{\partial t} &= \overline{D}_{11}^{(0)} \Delta c_1^{(0)} + \overline{D}_{12}^{(0)} \Delta c_2^{(0)} - \overline{k}_1^{(0)} c_1^{(0)} + \\ &\quad \overline{k}_2^{(0)} c_2^{(0)} - \widetilde{\lambda}_1^{(1)} c_1^{(0)} - \widetilde{\lambda}_1^{(0N)} c_1^{(0)}, \\ \frac{\partial c_2^{(0)}}{\partial t} &= \overline{D}_{21}^{(0)} \Delta c_1^{(0)} + \overline{D}_{22}^{(0)} \Delta c_2^{(0)} + \overline{k}_1^{(0)} c_1^{(0)} \\ &\quad - \overline{k}_2^{(0)} c_2^{(0)} - \widetilde{\lambda}_2^{(1)} c_2^{(0)} - \widetilde{\lambda}_2^{(0N)} c_2^{(0)};\end{aligned}$$

for $i = \overline{1, N-1}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_1^{(i)}}{\partial t} &= \overline{D}_{11}^{(i)} \Delta c_1^{(i)} + \overline{D}_{12}^{(i)} \Delta c_2^{(i)} - \overline{k}_1^{(i)} c_1^{(i)} + \\ &\quad + \overline{k}_2^{(i)} c_2^{(i)} + \widetilde{\lambda}_1^{(i-1)} c_1^{(i-1)} - \widetilde{\lambda}_1^{(i+1)} c_1^{(i)} - \widetilde{\lambda}_1^{(iN)} c_1^{(i)}, \\ \frac{\partial c_2^{(i)}}{\partial t} &= \overline{D}_{21}^{(i)} \Delta c_1^{(i)} + \overline{D}_{22}^{(i)} \Delta c_2^{(i)} + \overline{k}_1^{(i)} c_1^{(i)} - \\ &\quad - \overline{k}_2^{(i)} c_2^{(i)} + \widetilde{\lambda}_2^{(i-1)} c_2^{(i-1)} - \widetilde{\lambda}_2^{(i+1)} c_2^{(i)} - \widetilde{\lambda}_2^{(iN)} c_2^{(i)};\end{aligned}$$

for $i = N$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_1^{(N)}}{\partial t} &= \overline{D}_{11}^{(N)} \Delta c_1^{(N)} + \overline{D}_{12}^{(N)} \Delta c_2^{(N)} - \overline{k}_1^{(N)} c_1^{(N)} \\ &\quad + \overline{k}_2^{(N)} c_2^{(N)} + \sum_{i=0}^{N-1} \widetilde{\lambda}_1^{(iN)} c_1^{(i)}, \\ \frac{\partial c_2^{(N)}}{\partial t} &= \overline{D}_{21}^{(N)} \Delta c_1^{(N)} + \overline{D}_{22}^{(N)} \Delta c_2^{(N)} + \overline{k}_1^{(N)} c_1^{(N)} - \\ &\quad \overline{k}_2^{(N)} c_2^{(N)} + \sum_{i=0}^{N-1} \widetilde{\lambda}_2^{(iN)} c_2^{(i)}.\end{aligned}\quad (17)$$

Here $\overline{D}_{jm}^{(i)} = D_{jm}^{(ii)} / \rho$ ($j, m = 1, 2$, $i = \overline{0, N}$) are the coefficients of diffusion; $\overline{k}_1^{(i)} = -\lambda_{12}^{(ii)} / \rho$, $\overline{k}_2^{(i)} = \lambda_{21}^{(ii)} / \rho$ are the coefficients of intensity of the processes of particles transitions between states.

The sets of heterodiffusion equations (17) need to be supplemented by the equation for finding the concentration of the material particles (8) as well as the equation of continuity (6).

III. INITIAL-BOUNDARY VALUE HETERODIFFUSION PROBLEMS OF CASCADE KIND

For one-dimensional in spatial coordinate case in the natural dimensionless form [10] heterodiffusion in two ways under cascade decay of migration particles is described by the following sets of partial differential equations at different stages of cascade decay:

for $i = 0$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_1^{(0)}}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 c_1^{(0)}}{\partial \xi^2} + d_1^{(0)} \frac{\partial^2 c_2^{(0)}}{\partial \xi^2} - a_{11}^{(0)} c_1^{(0)} + a_{12}^{(0)} c_2^{(0)}, \\ \frac{\partial c_2^{(0)}}{\partial \tau} &= d_2^{(0)} \frac{\partial^2 c_1^{(0)}}{\partial \xi^2} + d^{(0)} \frac{\partial^2 c_2^{(0)}}{\partial \xi^2} + a_{21}^{(0)} c_1^{(0)} - a_{22}^{(0)} c_2^{(0)};\end{aligned}\quad (18a)$$

for $i = \overline{1, N-1}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_1^{(i)}}{\partial \tau} &= d_0^{(i)} \frac{\partial^2 c_1^{(i)}}{\partial \xi^2} + d_1^{(i)} \frac{\partial^2 c_2^{(i)}}{\partial \xi^2} - a_{11}^{(i)} c_1^{(i)} + a_{12}^{(i)} c_2^{(i)} + a_{\lambda 1}^{(i-1)} c_1^{(i-1)}, \\ \frac{\partial c_2^{(i)}}{\partial \tau} &= d_2^{(i)} \frac{\partial^2 c_1^{(i)}}{\partial \xi^2} + d^{(i)} \frac{\partial^2 c_2^{(i)}}{\partial \xi^2} + a_{21}^{(i)} c_1^{(i)} - \\ &\quad - a_{22}^{(i)} c_2^{(i)} + a_{\lambda 2}^{(i-1)} c_2^{(i-1)};\end{aligned}\quad (18b)$$

for $i = N$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_1^{(N)}}{\partial \tau} &= d_0^{(N)} \frac{\partial^2 c_1^{(N)}}{\partial \xi^2} + d_1^{(N)} \frac{\partial^2 c_2^{(N)}}{\partial \xi^2} - a_{11}^{(N)} c_1^{(N)} + \\ &\quad + a_{12}^{(N)} c_2^{(N)} + \sum_{i=0}^{N-1} a_{\lambda 1}^{(iN)} c_1^{(i)}, \\ \frac{\partial c_2^{(N)}}{\partial \tau} &= d_2^{(N)} \frac{\partial^2 c_1^{(N)}}{\partial \xi^2} + d^{(N)} \frac{\partial^2 c_2^{(N)}}{\partial \xi^2} + a_{21}^{(N)} c_1^{(N)} - \\ &\quad a_{22}^{(N)} c_2^{(N)} + \sum_{i=0}^{N-1} a_{\lambda 2}^{(iN)} c_2^{(i)},\end{aligned}\quad (18)$$

where $d_0^{(i)}$, $d^{(i)}$ are the reduced coefficients of diffusion of substance $\mathbf{K}_j^{(i)}$ ($i = \overline{0, N}$) at i -th step of decay in states $j = 1$ and 2 , $d_1^{(i)}$, $d_2^{(i)}$ are the reduced crossed coefficients of diffusion [7];

$a_{11}^{(i)} = (k_1^{(i)} + \widetilde{\lambda}_1^{(i+1)} + \lambda_{11}^{(iN)}) / k_2^{(0)}$,
 $a_{22}^{(i)} = (k_2^{(i)} + k_3^{(i)} + \widetilde{\lambda}_2^{(i+1)} + \lambda_{22}^{(iN)}) / k_2^{(0)}$, $a_{12}^{(i)} = k_2^{(i)} / k_2^{(0)}$,
 $a_{21}^{(i)} = k_1^{(i)} / k_2^{(0)}$; $a_{\lambda j}^{(i-1)} = \lambda_j^{(i-1)} / k_2^{(0)}$ is the coefficient of intensity of decay of $\mathbf{K}_j^{(i-1)}$ ($i = \overline{1, N}$, $j = 1; 2$), $a_{\lambda 1}^{(iN)}$ is the coefficient determining part of non-decaying substance that has been generated through decay at the i -th step $\mathbf{K}_j^{(i)}$ ($i = \overline{0, N-1}$, $j = 1; 2$); $k_1^{(i)}$, $k_2^{(i)}$ are the coefficients of intensity of the processes of transitions between states; $\lambda_j^{(i-1)}$, $\widetilde{\lambda}_j^{(i+1)}$, $\lambda_j^{(iN)}$ are the constants determining the decay process.

In sets of equations (18a)-(18c) we have used the dimensionless variables $\tau = k_2^{(0)} t$; $\xi = (k_2^{(0)} / D_{11}^{(0)})^{1/2} x$, where t is time, x is the spatial coordinate; $k_2^{(0)}$ is the coefficient of intensity of transitions of particles of $\mathbf{K}^{(0)}$ from the second state into the first one at zero stage of decay; $D_{11}^{(0)}$ is the coefficient of diffusion of substance $\mathbf{K}_1^{(0)}$ in quick migration way $j = 1$. Further consider $d_0^{(i)} < d_1^{(i)}$, $i = \overline{1, N}$, $d_0^{(0)} = 1$.

Assume that at the initial moment admixtures were absent in the body, namely

$$c_1^{(i)}(\xi, \tau) \Big|_{\tau=0} = c_2^{(i)}(\xi, \tau) \Big|_{\tau=0} = 0, \quad i = \overline{0, N}, \quad (19) \square$$

for $\tau > 0$ on the body surface $\xi = 0$ it is kept the constant value of total concentration c_0 of substance $\mathbf{K}^{(0)}$, which is

distributed among different migration ways for $i=0$ as follows

$$c_1^{(0)}(\xi, \tau)\Big|_{\xi=0} = \alpha c_0, \quad c_2^{(0)}(\xi, \tau)\Big|_{\xi=0} = (1-\alpha)c_0, \quad (20a)$$

where α ($0 \leq \alpha \leq 1$) is the parameter determining the part of admixture that came from the body surface into the quick way.

For $i=1, \dots, N$ we assume zero boundary condition at the top layer surface:

$$c_1^{(i)}(\xi, \tau)\Big|_{\xi=0} = 0, \quad c_2^{(i)}(\xi, \tau)\Big|_{\xi=0} = 0, \quad i = \overline{1, N}. \quad (20b)$$

We assume that the particles concentrations at all stages of decay equal zero at “bottom” boundary of the body, i.e.

$$c_1^{(i)}(\xi, \tau)\Big|_{\xi=\xi_0} = c_2^{(i)}(\xi, \tau)\Big|_{\xi=\xi_0} = 0, \quad i = \overline{0, N}. \quad (20c)$$

At zero stage of decay the solutions of heterodiffusion equations (18a) with initial (19) and boundary (20a), (20b) conditions are found using integral transformation. Then we obtain concentration of decaying admixture in quick migration way

$$\begin{aligned} \frac{c_1^{(0)}(\tau, \xi)}{c_0} = & \left\{ \alpha - \frac{\tilde{b}_1}{ce} \right\} \left(1 - \frac{\xi}{\xi_0} \right) - B \left[\left(\tilde{a}_1 + \frac{\tilde{b}_1}{x_1} \right) \frac{\sin(\pi - y)x_1}{\sin \pi x_1} - \right. \\ & \left. - \left(\tilde{a}_1 + \frac{\tilde{b}_1}{x_2} \right) \frac{\sin(\pi - y)x_2}{\sin \pi x_2} \right] - \frac{2}{\xi_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n \xi}{y_n (s_1 - s_2)} \times \\ & \times \left[\left(\alpha s_1 + p_1 + \frac{p_2}{s_1} \right) e^{s_1 \tau} - \left(\alpha s_2 + p_1 + \frac{p_2}{s_2} \right) e^{s_2 \tau} \right], \quad (21a) \end{aligned}$$

concentration of decaying admixture in slow migration way

$$\begin{aligned} \frac{c_2^{(0)}(\tau, \xi)}{c_0} = & \left\{ 1 - \alpha - \frac{\tilde{b}_2}{ce} \right\} \left(1 - \frac{\xi}{\xi_0} \right) - B \left[\left(\tilde{a}_2 + \frac{\tilde{b}_2}{x_1} \right) \frac{\sin(\pi - y)x_1}{\sin \pi x_1} - \right. \\ & \left. - \left(\tilde{a}_2 + \frac{\tilde{b}_2}{x_2} \right) \frac{\sin(\pi - y)x_2}{\sin \pi x_2} \right] - \frac{2}{\xi_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n \xi}{y_n (s_1 - s_2)} \times \\ & \times \left[\left((1-\alpha)s_1 + p_1' + \frac{p_2'}{s_1} \right) e^{s_1 \tau} - \left((1-\alpha)s_2 + p_1' + \frac{p_2'}{s_2} \right) e^{s_2 \tau} \right], \quad (21b) \end{aligned}$$

total concentration of decaying substance $c^{(0)} = c_1^{(0)} + c_2^{(0)}$

$$\begin{aligned} \frac{c^{(0)}(\tau, \xi)}{c_0} = & \left\{ 1 - \frac{\tilde{b}}{ce} \right\} \left(1 - \frac{\xi}{\xi_0} \right) - B \left[\left(\tilde{a} + \frac{\tilde{b}}{x_1} \right) \frac{\sin(\pi - y)x_1}{\sin \pi x_1} - \right. \\ & \left[\left(\tilde{a} + \frac{\tilde{b}}{x_2} \right) \frac{\sin(\pi - y)x_2}{\sin \pi x_2} \right] - \frac{2}{\xi_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n \xi}{y_n (s_1 - s_2)} \times \\ & \times \left[\left(s_1 + \tilde{p}_1 + \frac{\tilde{p}_2}{s_1} \right) e^{s_1 \tau} - \left(s_2 + \tilde{p}_1 + \frac{\tilde{p}_2}{s_2} \right) e^{s_2 \tau} \right], \quad (21c) \end{aligned}$$

$$\text{where } B = \frac{1}{\sqrt{d^2 - 4ec^2}}, \quad x_{1,2} = \frac{1}{2} \left(-\frac{d}{c} \pm \sqrt{\frac{d^2}{c^2} - 4e} \right), \quad \tilde{a} = \tilde{a}_1 + \tilde{a}_2,$$

$$\tilde{b} = \tilde{b}_1 + \tilde{b}_2, \quad \tilde{p}_l = p_l + p_l' \quad (l=1,2), \quad \tilde{a}_1 = \left(d_1^{(0)} \alpha_2 + d^{(0)} \alpha_1 \right) \frac{\pi^2}{\xi_0^2},$$

$$\tilde{b}_1 = \alpha_1 a_{22}^{(0)} - \alpha_2 a_{12}^{(0)}, \quad \tilde{a}_2 = \frac{\pi^2}{\xi_0^2} \left(\alpha_2 + \alpha_1 d_2^{(0)} \right), \quad \tilde{b}_2 = \alpha_2 a_{11}^{(0)} - \alpha_1 a_{21}^{(0)},$$

$$c = \left(d^{(0)} - d_1^{(0)} d_2^{(0)} \right) \frac{\pi^4}{\xi_0^4}, \quad e = a_{11}^{(0)} a_{22}^{(0)} - a_{12}^{(0)} a_{21}^{(0)},$$

$$d = a_{22}^{(0)} + a_{11}^{(0)} d^{(0)} + d_1^{(0)} a_{21}^{(0)} + d_2^{(0)} a_{12}^{(0)} \frac{\pi^2}{\xi_0^2}$$

$$s_{1,2} = -\eta_1/2 \pm \sqrt{(\eta_1/2)^2 - \eta_2}, \quad \eta_1 = y_n \left(d^{(0)} + 1 \right) + a_{22}^{(0)} + a_{11}^{(0)};$$

$$\eta_2 = \left(d^{(0)} - d_1^{(0)} d_2^{(0)} \right) y_n^4 + \left(a_{22}^{(0)} + a_{11}^{(0)} d_2^{(0)} + d_1^{(0)} a_{21}^{(0)} + d_2^{(0)} a_{12}^{(0)} \right) y_n^2 + a_{11}^{(0)} a_{22}^{(0)} - a_{12}^{(0)} a_{21}^{(0)};$$

$$p_1 = \left(\alpha d^{(0)} - d_1^{(0)} \right) \times \left(1 - \alpha \right) y_n^2 + \alpha a_{22}^{(0)} + \alpha_1 + \left(1 - \alpha \right) a_{12}^{(0)},$$

$$p_2 = \left(d_1^{(0)} \alpha_2 + d^{(0)} \alpha_1 \right) y_n^2 + \alpha_1 a_{22}^{(0)} - \alpha_2 a_{12}^{(0)},$$

$$p_1' = \left(1 - \alpha - \alpha d^{(0)} \right) y_n^2 + a \left(1 - \alpha \right)_{11}^{(0)} + \alpha a_{21}^{(0)} + \alpha_2;$$

$$p_2' = \left(\alpha_2 + \alpha_1 d_2^{(0)} \right) y_n^2 + \alpha_2 a_{21}^{(0)} - \alpha_1 a_{21}^{(0)}, \quad y = \pi \xi / \xi_0.$$

Note that for the model of heterodiffusion of decaying substance the asymptotic summand of the obtained solutions are essentially non-linear and consist of various combinations of relation of type $\sin((\pi - y)x)/\sin \pi x$. With that each of such relations is less than 1. Also note that the linear parts of the asymptotic summands of analogical problem heterodiffusion of non-decaying substance, i.e. $1 - \xi/\xi_0$, are proportional to the coefficient determining the part of admixture that came from the boundary into the corresponding migration way (α , $1 - \alpha$ and 1). At the same time taking into consideration decay of migrating substance leads to the appearance of certain “allowance” in such coefficients (\tilde{b}_1/ce , \tilde{b}_2/ce and \tilde{b}/ce). Take into account that these “allowances” are nonnegative then linear parts of asymptotes of function (4) are not larger the similar terms of concentrations of non-decaying substances, and in each state separately.

For the other stages of cascade decay $i = \overline{1, N-1}$ solutions of the initial-boundary value problems are presented per corresponding Green functions, considering admixture decay at the previous stage of cascade as mass source at the step i :

$$c_j^{(i)}(\xi, \tau) = a_{\lambda_j}^{(i-1)} \int_0^{\tau} \int_0^{\xi_0} G_j^{(i)}(\xi, \xi'; \tau, \tau') c_j^{(i-1)}(\xi', \tau') d\xi' d\tau', \quad j = \overline{1, 2}, \quad (22)$$

Here $G_j^{(i)}(\tau, \tau'; \xi, \xi')$ are Green functions of the problems (18b), (19), (20b), (20c) for $i = \overline{1, N-1}$.

For the case of $i = N$ (non-decaying admixture) the process of heterodiffusion is described by the initial-boundary value problem (18c), (19), (20b) and (20c). Its solutions is also

presented in terms of Green functions by analogue of the formula (22) for $i = \overline{1, N-1}$, namely

$$c_j^{(N)}(\xi, \tau) = \int_0^{\tau} \int_0^{\xi_0} G_j^{(N)}(\xi, \xi'; \tau, \tau') \sum_{i=0}^{N-1} a_{ij}^{(iN)} c_j^{(i)}(\xi', \tau') d\xi' d\tau', \quad j = 1, 2, \quad (23)$$

where $G_j^{(N)}(\xi, \xi'; \tau, \tau')$ ($j = 1, 2$) are Green functions of the problem (18c), (19), (20b) and (20c).

Consequently determination of concentrations at each stage $i = 0, \dots, N-1$ by the formulae (21) and (22) with account expressions for Green functions we find concentrations of non-decaying particles under cascade decay of admixtures.

The analytical form of the obtained concentrations allows us to find expressions for the mass fluxes of decaying substances at different stages of cascade decay through the surface $\xi = \xi_*$, where $0 \leq \xi_* \leq \xi_0$. Proceeding from the linear kinetic relations [11], mass fluxes are determined in the natural dimensionless variables such as

$$J_{*1}^{(i)}(\tau) = -\sqrt{k_2^{(0)} D_{11}^{(0)}} \left[d_0^{(i)} \frac{\partial c_1^{(i)}(\xi, \tau)}{\partial \xi} + d_1^{(i)} \frac{\partial c_2^{(i)}(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right]_{\xi=\xi_*},$$

$$J_{*2}^{(i)}(\tau) = -\sqrt{k_2^{(0)} D_{11}^{(0)}} \left[d_2^{(i)} \frac{\partial c_1^{(i)}(\xi, \tau)}{\partial \xi} + d_3^{(i)} \frac{\partial c_2^{(i)}(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right]_{\xi=\xi_*}, \quad i = \overline{0; N} \quad (24)$$

and the total flux through the surface $\xi = \xi_*$

$$J_*^{(i)}(\tau) = J_{*1}^{(i)} \Big|_{\xi=\xi_*} + J_{*2}^{(i)} \Big|_{\xi=\xi_*}. \quad (25)$$

If we have obtained the diffusion fluxes of decaying substances then we can find the function [10]

$$Q_0^{(i)} = \int_0^{\tau_*} J_0^{(i)}(\tau) d\tau, \quad i = \overline{0, N}, \quad (26)$$

which determines quantities of decaying substances $Q_0^{(i)}(\tau)$, that passed through the surface $\xi = \xi_0$ (the bottom body boundary) over time-interval $[0; \tau_*]$.

IV. ARCHITECTURE OF PROGRAM COMPLEX FOR HETERODIFFUSION MODEL

On the basis of the formulae (21), (22), (23) for admixture concentrations and corresponding formulae for mass fluxes (24), (25) and quantities of decaying and non-decaying admixture components that passed through the bottom layer surface (26), software has been designed for simulation of mass transfer processes in a body with two migration way that been accompanied sorption-desorption processes and cascade decay of admixtures particles. Architecture of the program complex for simulating mass transfer processes under cascade decay of particles for the model of heterodiffusion in two ways is presented in Fig.2.

Schemes of application modules for calculation of diffusion fluxes and quantity of substances passed through the layer are shown in Figs.3 and 4.

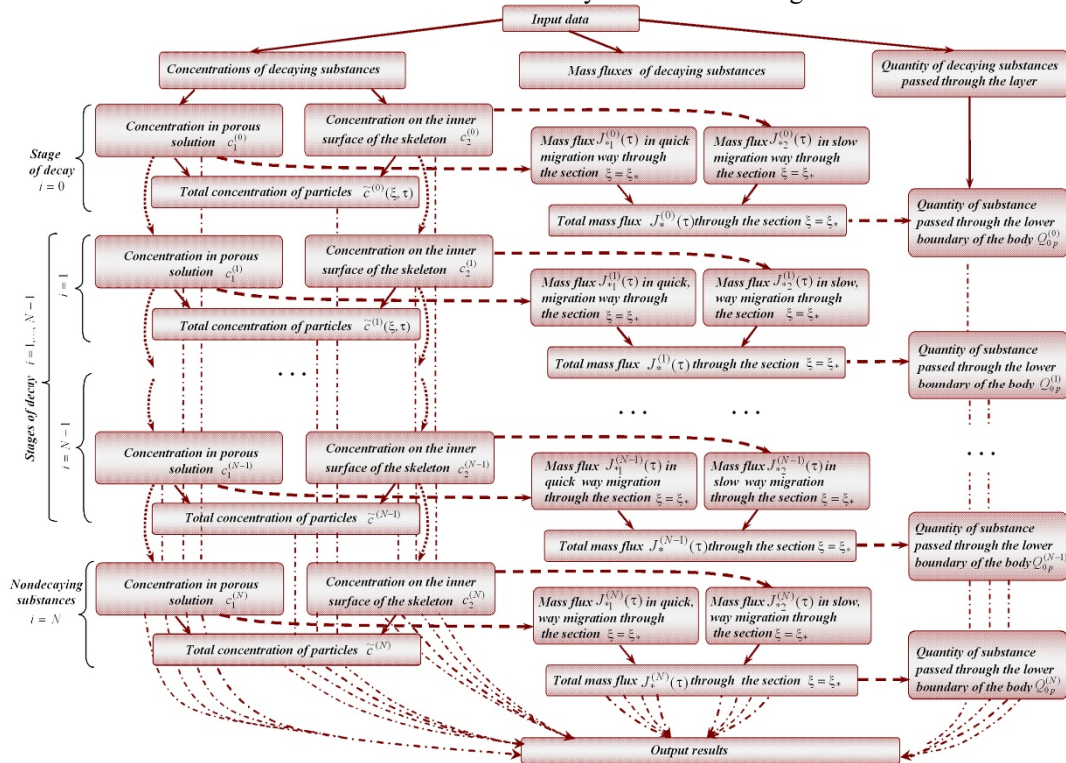


Fig. 2. Architecture of program complex for the model of heterodiffusion in two ways under cascade decay of particles

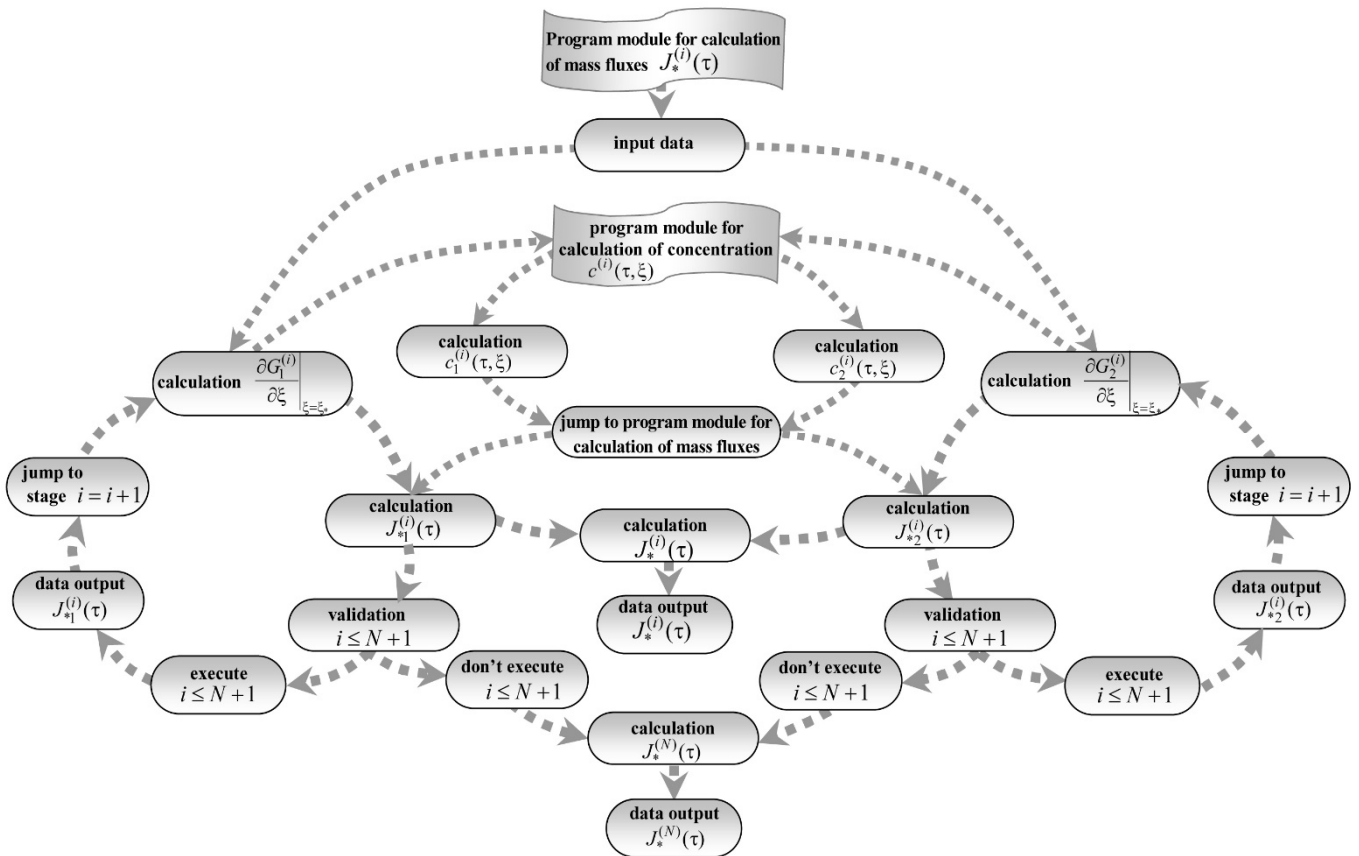


Fig. 3. Scheme of algorithm of the program module for calculating the diffusion fluxes of decaying substances

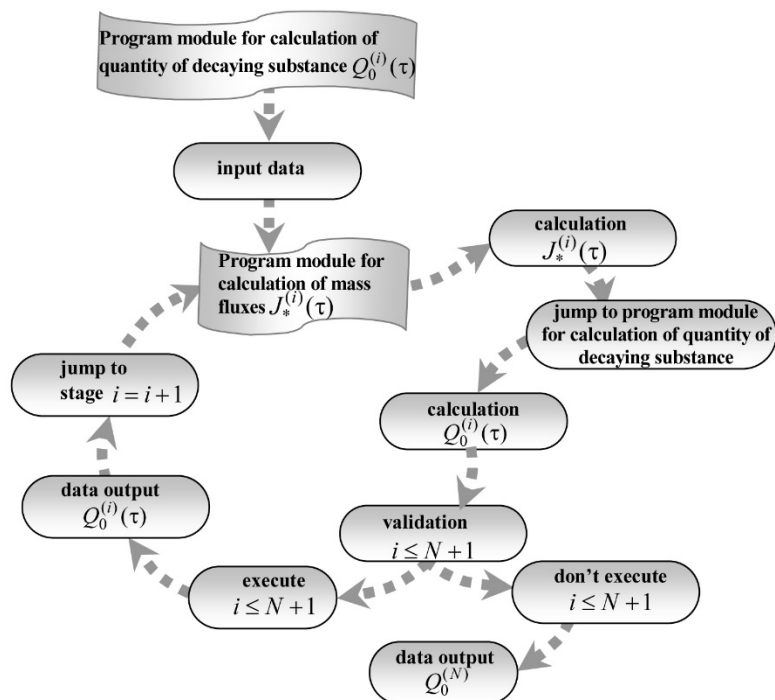


Fig. 4. Scheme of algorithm of the program module for calculating the quantity of decaying substances that passed through the lower boundary of the layer at a given time interval

Note that program modules for fluxes and quantities substances consist of one by one cyclic process, and at each stage the modules interact with the module for concentrations at the previous stage. At the same time the module for calculation of the admixture concentrations contains two cyclic processes.

CONCLUSIONS

Thus, for the description of processes of admixtures mass transfer in two ways under their cascade decay, the mathematical model is constructed where the concentration of particles at certain stage of decay is the mass source of decaying substance diffusing at the next step. For specific scheme of cascade decay the balance relations for mass of components of the system are formulated. The linear state equations and kinetic relations are obtained. The conditions under which the mass production capacities for the components of the system obey, are established. The key sets of equations of the model of heterodiffusion in two ways under cascade decay of migrating particles are obtained taking into consideration only processes of diffusion and sorption-desorption and under the assumption that chemical reactions that led to the decay of substance is irreversible.

On the basis of the constructed model new statements of initial-boundary value problems of cascade type where the concentration of particles at certain step of decay is the mass source of decaying substance at the next, which also diffuses, is sorbed, desorbed and decays. For linear chemical reactions the solutions of the initial-boundary value problems of cascade type are constructed by iterative procedure with using Green functions. This make it possible to obtain the fluxes of migrating components and quantities of corresponding

substances that passed through certain substance, for example bottom boundary of the body, for given time interval.

The program package for simulation of mass transfer in the body with two migration ways under cascade decay of admixtures is designed. Numerical analysis of concentrations of decaying particles and mass fluxes is carried out.

REFERENCES

- [1] Ya.I. Burak, B.P. Galapats and Ye.Ya. Chaplya, Deformation of electrically conducting solids taking into consideration heterodiffusion of charged impurity particles. *J. Materials Science*, 1981, Vol. 16, no.5. pp.395-400,
- [2] Y.Y.Chaplia, O.Y.Chernukha *Physical-Mathematical Modelling Heterodiffusive Mass Transfer*, Lviv, SPOLOM Publishers ,2003, 128 p.
- [3] E.C. Aifantis, J.M. Hill On the theory of diffusion in media with double diffusivity. I. Basic mathematical results,. *J. Mech. appl. Math.*, 1980, vol. 33, no.1. pp. 1-21,
- [4] Uglov V.V. *Radiation processes and phenomena in solids*, Minsk, Vysheysnaya shkola Publishers, 2016, 188 p.
- [5] V.M. Kolobashkin, P.M. Rubtsov, P.A. Ruzhansky and V.D. Sidorenko *Radiation Characteristics of the Irradiated Fuel*. Reference book, Moscow, Energoatomizdat Publishers, 1983, 384 p.
- [6] Burak Y.Y., Halapats B.P., Chaplia Y.Y. Basic equations of processes of deformation of electrically conducting solid solutions with allowance for different ways of admixture particles diffusion, *Mathematical methods and physicomechanical fields*, 1980, Issue 11, P. 60-66.
- [7] Y.Y. Burak, Y.Y. Chaplya and O. Y. Chernukha, *Continual-thermodynamical models of solid solution mechanics*, Kyiv, Naukova Dumka Publishers, 2006, 272 p.
- [8] I. Dyarmati *Non-Equilibrium Thermodynamics. Field Theory and Variational Principles*, Heidelberg, Springer, 1970, 184 p.
- [9] S.R. de Groot and P. Mazur *Non-equilibrium thermodynamics*, New York, Dover publication Inc., 1984, 456 p.
- [10] I. Kaur and V. Gust *Diffusion in grain and phase boundaries*, Moscow, Mashinostroenie Publishers, 1991, 448 p.
- [11] V.P. Sredyna *Soil pollution*, Tomsk, Publishing Houe of Tomsk State University, 2015, 346 p.

Функції Гріна задач дифузії двома шляхами

Ольга Чернуха, Юрій Білушчак

Відділ математичного моделювання нерівноважних процесів

Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України
Львів, Україна

кафедра обчислювальної математики і програмування
Інститут прикладної математики та фундаментальних наук
Національний університет “Львівська політехніка”
zaliznuchna6@gmail.com, byixx13@gmail.com

Євген Чапля

Відділ математичного моделювання нерівноважних процесів

Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України
Львів, Україна

Інститут механіки і прикладної інформатики
Університет Казимира Великого у Бидгощі,
м. Бидгощ, Польща
czapla@ukw.edu.pl

Green functions of problems of diffusion in two ways

Olha Chernukha, Yurii Bilushchak

Department of mathematical modeling of nonequilibrium processes

Centre of Mathematical Modelling of Y. S. Pidstryhach
Institute of Applied Problems of Mechanics and
Mathematics of the National Academy of Sciences of
Ukraine

Department of Computational Mathematics and Programming
Institute of Applied Mathematics and Fundamental Sciences
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
zaliznuchna6@gmail.com, byixx13@gmail.com

Yevgen Chaplya

Department of mathematical modeling of nonequilibrium processes

Centre of Mathematical Modelling of Y. S. Pidstryhach
Institute of Applied Problems of Mechanics and
Mathematics of the National Academy of Sciences of
Ukraine

Lviv, Ukraine
Institute of Mechanics and Applied Informatics
Kazimierz Wielki University in Bydgoszcz
Bydgoszcz, Poland
czapla@ukw.edu.pl

Анотація—У роботі означено матричну функцію Гріна задачі гетеродифузії двома шляхами. Отримано формули для елементів матриці та досліджено поведінку функцій Гріна. На цій основі знайдено розв’язки крайових задач гетеродифузії домішкової речовини за дії внутрішнього точкового джерела маси. Розглянуті випадки як детермінованих джерел, так і стохастичних за рівномірного та трикутного розподілів координати розташування джерела.

Abstract—In the work the matrix Green function of heterodiffusion problem in two ways is defined. Formulae for the elements of matrix are obtained and the behaviour of Green functions is investigated. On this basis the solutions of initial-boundary value problems under action of internal point source of mass are found. The cases of deterministic source are considered as well as stochastic ones under uniform and triangular distributions of coordinate of the mass source location.

Ключові слова—гетеродифузія; крайова задача; функція Гріна; точкове джерело маси; випадкова координата

Keywords—heterodiffusion; initial-boundary value problem; Green function; point mass source; random coordinate

I. ВСТУП

Одним з класичних методів розв’язування крайових задач математичної фізики, які широко застосовуються на практиці, є метод функцій Гріна [1-3]. Отримання такого типу розв’язків крайових задач базується на третій формулі Гріна [4]. В свою чергу функції Гріна є розв’язками відповідних крайових задач з точковим джерелом та нульовими крайовими умовами [5]. Тоді функції Гріна можуть мати самостійне значення, проте часто використовуються для побудови розв’язків неоднорідних задач математичної фізики. Функції Гріна представляють інтерес для знаходження розв’язків крайових задач переносу в тілах з мікроструктурою, особливо за наявності внутрішніх джерел. Крім цього у фізиці елементарних частинок, для опису хвильових процесів, тощо, функції Гріна використовуються як пропатори в діаграмах Фейнмана [6, 7]. Також функції Гріна широко використовуються при застосуванні теорії розсіяння у фізиці твердого тіла (рентгенографія, розрахунки електронних спектрів металічних матеріалів) [2, 3]

Дана робота присвячена означенню, знаходженню і дослідженню функції Гріна задачі гетеродифузії в шарі двома шляхами міграції. На цій основі знайдені концентрації мігруючих частинок за наявності внутрішніх детермінованих і випадкових точкових джерел маси.

II. ФУНКЦІЯ ГРІНА ЗАДАЧ ДИФУЗІЇ ДВОМА ШЛЯХАМИ

Нехай вектор-функція $\mathbf{c}(z,t) = \begin{pmatrix} c_1(z,t) \\ c_2(z,t) \end{pmatrix}$ є такою, що її елементи $c_i(z,t)$, $i=1,2$, є неперервними за змінними z, t в області $R = \{(z,t) : z \in [0, z_0], t \in \mathfrak{R}_+\}$; задовольняють умову Ліпшица за змінною z в області R з константою l [8, 9].

Розглянемо лінійну крайову задачу для системи зв'язаних диференціальних рівнянь в часткових похідних другого порядку

$$\mathbf{L}[\mathbf{c}(z,t)] = \mathbf{F}(z,t), \quad (1)$$

де $\mathbf{L} = \begin{pmatrix} L_1^1(z,t) & L_1^2(z,t) \\ L_2^1(z,t) & L_2^2(z,t) \end{pmatrix}$ - матричний диференціальний оператор, в якому $L_1^1(z,t) = \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + a_{11}$, $L_1^2(z,t) = -d_1 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} -$

$$-a_{12}, \quad L_2^1(z,t) = -d_2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} - a_{21}, \quad L_2^2(z,t) = \frac{\partial}{\partial t} - d \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + a_{22}$$

(верхні індекси елементів матриці оператора вказують на яку функцію діє даний елемент матричного оператора); $\mathbf{F}(z,t) = \begin{pmatrix} F_1(z,t) \\ F_2(z,t) \end{pmatrix}$ - вектор-функція джерел, де $F_i(z,t) \in L_2 \vee F_i \in D(\mathfrak{R}^2) \vee F_i \in \langle \Omega, \sigma, P \rangle$.

Нехай задані крайові умови

$$\mathbf{c}(z,t)|_{t=0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{c}(z,t)|_{z=0} = \mathbf{c}_0 = \begin{pmatrix} c_0^{(1)} \\ c_0^{(2)} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{c}(z,t)|_{z=z_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де $c_0^{(i)} \in L_2$.

Якщо $|\mathbf{c}(z,t) - \mathbf{c}_0(z,t)| \leq b$ для $\forall t \in \mathfrak{R}_+, z \in [0, z_0]$ (b - відома додатна константа), тоді існує єдиний класичний розв'язок задачі (1), (2) [4].

Означення: Функцією Гріна задачі (1), (2) називається матрична функція

$$\mathbf{G}(z, z'; t, t') = \begin{pmatrix} G_1(z, z'; t, t') & 0 \\ 0 & G_2(z, z'; t, t') \end{pmatrix},$$

яка визначена в чотиривимірній області $K = K_1 \times K_2 = \{(z, z'; t, t') | z, z' \in [0, z_0]; t, t' \in \mathfrak{R}_+ : t' < t\}$ і задовольняє такі умови:

1) в K матрична функція $\mathbf{G}(z, z'; t, t')$ є неперервною і має неперервні похідні за змінною t ;

2) для довільних $z' \in [0, z_0]$, $t' \in \mathfrak{R}_+$ має неперервні похідні першого і другого порядку за змінною z в кожному з інтервалів $[0, z']$ і $(z', z_0]$, причому похідна першого порядку $z = z'$ має стрибок, що дорівнює одиниці:

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{G}(z + 0, z'; t, t') - \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{G}(z - 0, z'; t, t') = 1;$$

3) $\mathbf{G}(z, z'; t, t') = 0$ при $t \leq t'$;

4) в кожному з інтервалів $[0, z']$ і $(z', z_0]$ для $t' \leq t$ функція $\mathbf{G}(z, z'; t, t')$, як функція змінної z є розв'язком однорідного рівняння

$$\mathbf{L}[\mathbf{G}(z, z'; t, t')] = 0;$$

5) $\mathbf{G}(z, z'; t, t')$ як функція змінних z, t задовольняє нульові крайові умови типу (2).

Зазначимо, що в банаховому просторі $\bar{C}^{(n,d)}(D^p)$ вектор-функцій $\mathbf{c}(z,t)$ з нормою

$$\|\mathbf{c}\|_{\bar{C}^{(n,2)}(D^p)} = \sum_{j=1}^2 \|c_j\|_{\bar{C}^{(n_j,2)}(D^p)},$$

де $D^p \equiv K' = \{(z, z'; t, t') | z, z' \in [0, z_0]; t, t' \in [0, T] : t' < t\}$, $\bar{n} = (n_1, n_2)$ і $n_1 = n_2 = 1$, для єдиності розв'язку крайової задачі (1), (2) необхідно і достатньо, щоб фундаментальна система розв'язків не мала б розв'язків у цілих числах [9].

Для знаходження матричної функції Гріна $\mathbf{G}(z, z'; t, t')$ сформулюємо крайову задачу з точковим джерелом для елементів матриці

$$\begin{aligned} & \frac{\partial G_1(t, t'; z, z')}{\partial t} - d_0 \frac{\partial^2 G_1(t, t'; z, z')}{\partial z^2} - d_1 \frac{\partial^2 G_2(t, t'; z, z')}{\partial z^2} + \\ & + a_{11} G_1(t, t'; z, z') - a_{12} G_2(t, t'; z, z') = \delta(t - t') \delta(z - z'), \\ & \frac{\partial G_2(t, t'; z, z')}{\partial t} - d_2 \frac{\partial^2 G_1(t, t'; z, z')}{\partial z^2} - d \frac{\partial^2 G_1(t, t'; z, z')}{\partial z^2} - \\ & - a_{21} G_1(t, t'; z, z') + a_{22} G_2(t, t'; z, z') = \delta(t - t') \delta(z - z') \end{aligned} \quad (3)$$

за нульових крайових умов

$$\begin{aligned} G_1(t, t'; z, z')|_{t=0} &= G_2(t, t'; z, z')|_{t=0} = 0; \\ G_1(t, t'; z, z')|_{z=0} &= G_2(t, t'; z, z')|_{z=0} = 0, \\ G_1(t, t'; z, z')|_{z=z_0} &= G_2(t, t'; z, z')|_{z=z_0} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Застосовуємо до крайової задачі (3), (4) інтегральні перетворення Лапласа за часовою змінною та скінченне сіп-перетворення Фур'є за просторовою координатою, враховуючи відомі формули перетворень від узагальнених функцій. Тоді маємо

$$G_1(t, t'; z, z') = \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z \sin y_n z'}{s_1 - s_2} \times \left[(s_1 + A_1) e^{s_1(t-t')} - (s_2 + A_1) e^{s_2(t-t')} \right];$$

$$G_2(t, t'; z, z') = \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z \sin y_n z'}{s_1 - s_2} \times \left[(s_1 + A_2) e^{s_1(t-t')} - (s_2 + A_2) e^{s_2(t-t')} \right]. \quad (5)$$

де $A_1 = y_n^2(d - d_1) + a_{22} + a_{12}$; $A_2 = y_n^2(d_0 - d_2) + a_{11} + a_{21}$; $s_{1,2} = -\eta_1/2 \pm \sqrt{(\eta_1/2)^2 - \eta_2}$; $\eta_1 = (d+1)y_n^2 + a_{22} + a_{11}$; $\eta_2 = (d - d_1 d_2) y_n^4 + (a_{22} + a_{11} d_2 + d_1 a_{21} + d_2 a_{12}) y_n^2 + a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$.

Для того, щоб при $t \rightarrow \infty$ отримані ряди у співвідношеннях (5) були збіжними, повинні виконуватися умови $s_1 < 0$ та $s_2 < 0$ [10]. Враховуючи структуру виразів s_1 та s_2 і що $\eta_1 > 0$, одержимо $s_1 < 0$. Дослідивши умови, за яких s_2 набуває від'ємних значень, отримаємо обмеження [10]

$$d_1 d < d_0 d_2.$$

Числовий аналіз функції Гріна проведено для базових значень: $d = 0.1$, $d_0 = 1$; $d_1 = d_2 = 0$, $a_{11} = 4$, $a_{12} = 1$, $a_{21} = 2.2$, $a_{22} = 2.6$. На рис.1-2 проілюстровано характерні поверхні, які утворюють функції Гріна, обчислені за формулами (5). На рис.1, 2, наведено функції $G_1(t, t'; z, z')$ та $G_2(t, t'; z, z')$ в точках $(z, t) = (5; 1.5)$ (рис.а), $(z, t) = (2; 4)$ (рис.б), $(z, t) = (0.8; 9)$ (рис.с) та $(z, t) = (12; 6)$ (рис.д). Вздовж осі абсцис відкладена просторова координата z' , вздовж осі ординат – часова t' , вздовж аплікати – значення функцій $G_i(t, t'; z, z')$.

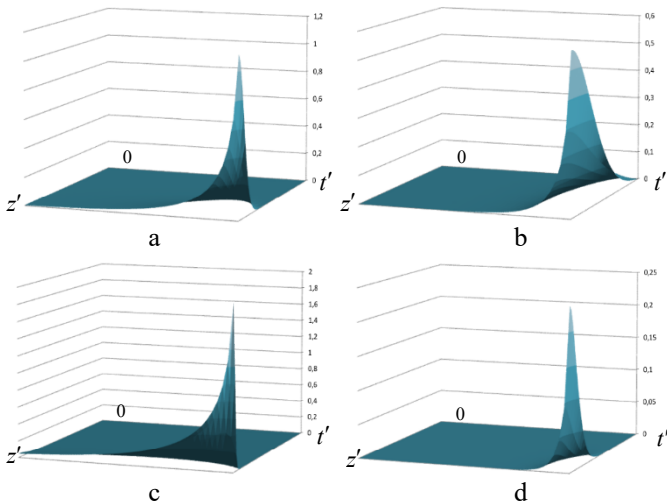


Рис.1. Поверхні функції Гріна $G_1(t, t'; z, z')$

Поверхні, які утворюють функції Гріна (5), мають характерний гострий пік в околі точки $(z', t') = (z, t)$ (рис.1, 2).

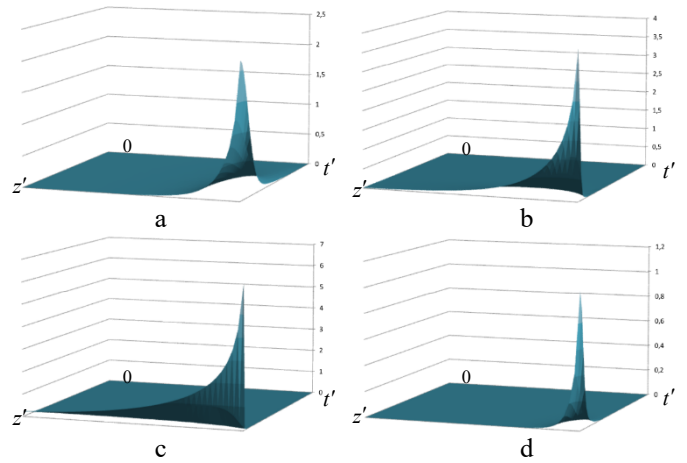


Рис.2. Поверхні функції Гріна $G_2(t, t'; z, z')$

При цьому значення функції $G_2(t, t'; z, z')$ в рази більші ніж $G_1(t, t'; z, z')$ для тих самих значень коефіцієнтів задачі, наприклад, $\max_{z', t' \in K'} G_2 / \max_{z', t' \in K'} G_1 \Big|_{(z, t) = (2; 4)} = 3.2$ (рис.1б і 2б), що пояснюється значно більшим коефіцієнтом сорбції a_{11} , ніж інші «сорбційні» коефіцієнти. Зауважимо, що для малих z і середніх часів t спостерігається найбільш полого спадання функцій Гріна вздовж осі Ot' (рис.1с і 2с).

III. ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЙ ГРІНА ДЛЯ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ ГЕТЕРОДИFUЗІЇ

A. Крайова задача гетеродифузії з точкового джерела за нульових крайових умов

Розглянемо деякі застосування отриманих функцій Гріна для знаходження розв'язків крайових задач гетеродифузії в шарі з двома шляхами міграції. Нехай домішка мігрує в шарі товщини z_0 з точкового джерела, яке розташовано у внутрішній області тіла в точці $z = z_*$. Нехай коефіцієнт α визначає частину домішкової речовини, яка з джерела маси потрапляє на швидкий шлях дифузії (вважаємо, що $d_0 > d > d_1 \geq d_2$). Розглянемо спочатку випадок нульових крайових умов. Тоді крайову задачу на елементи вектор-функції $c(z, t)$, нормовані на коефіцієнт дифузії на швидкому шляху d_0 , можна сформулювати так

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} - \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} - d_1 \frac{\partial^2 c_2}{\partial z^2} + a_{11} c_1 - a_{12} c_2 = \alpha \delta(z - z_*),$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} = d_2 \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} + d \frac{\partial^2 c_2}{\partial z^2} + a_{21} c_1 - a_{22} c_2 = (1 - \alpha) \delta(z - z_*), \quad (6)$$

$$c_1(z, t) \Big|_{t=0} = c_2(z, t) \Big|_{t=0} = 0, \quad (7)$$

$$c_1(z, t) \Big|_{z=0} = 0, \quad c_2(z, t) \Big|_{z=0} = 0, \quad (8)$$

$$c_1(z, t) \Big|_{z=z_0} = c_2(z, t) \Big|_{z=z_0} = 0. \quad (9)$$

де α ($0 \leq \alpha \leq 1$) – параметр, який визначає частку домішкової речовини, що з джерела маси потрапляє на швидкий шлях міграції (у водний поровий розчин).

У загальному випадку розв'язок задачі (6)-(9) з використанням функцій Гріна можна подати таким чином [4].

$$c_1(t, z) = \alpha \int_0^t \int_0^{z_0} G_1(t, t'; z, z') \delta(z - z_*) dz' dt';$$

$$c_2(t, z) = (1 - \alpha) \int_0^t \int_0^{z_0} G_2(t, t'; z, z') \delta(z - z_*) dz' dt'. \quad (10)$$

Враховуючи (5) і (10), після інтегрування отримаємо:

$$c_1(t, z) = \alpha \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \sin y_n z \sin y_n z_* \times$$

$$\times \left(\frac{A_1}{\eta_2} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\left(1 + \frac{A_1}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(1 + \frac{A_1}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] \right),$$

$$c_2(t, z) = (1 - \alpha) \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \sin y_n z \sin y_n z_* \times$$

$$\times \left(\frac{A_2}{\eta_2} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\left(1 + \frac{A_2}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(1 + \frac{A_2}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] \right). \quad (11)$$

Зазначимо, що функції (11) є монотонно зростаючими за часовою змінною (оскільки $s_1, s_2 < 0$), при цьому обмеженими відповідними виразами у стаціонарному режимі

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_1(t, z) = -\alpha \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z \sin y_n z_*}{\eta_2} A_1,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_2(t, z) = -(1 - \alpha) \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z \sin y_n z_*}{\eta_2} A_2. \quad (11a)$$

B. Задача гетеродифузії з точкового джерела та за підтримки сталого значення сумарної концентрації на поверхні шару

Розглянемо тепер аналогічну задачу гетеродифузії за підтримки сталого значення сумарної концентрації домішкової речовини на границі шару $z = 0$. Тоді крайова задача має вигляд (6), (7), (9) і

$$\tilde{c}_1(z, t) \Big|_{z=0} = \tilde{\alpha} c_0, \quad \tilde{c}_2(z, t) \Big|_{z=0} = (1 - \tilde{\alpha}) c_0, \quad (12)$$

де $\tilde{\alpha}$ ($0 \leq \tilde{\alpha} \leq 1$) – параметр, що визначає частку домішкової речовини, яка з поверхні тіла потрапила на швидкий шлях міграції; цей коефіцієнт може співпадати ($\tilde{\alpha} = \alpha$) або відрізнитися ($\tilde{\alpha} \neq \alpha$) від параметра, що визначає частину речовини, яка потрапляє на цей шлях з внутрішнього точкового джерела маси.

Враховуючи відомі вирази для розв'язків задач гетеродифузії двома шляхами за дії сталого джерела на поверхні тіла за формулою

$$\frac{1}{c_0} \mathbf{c}(t, z) = \mathbf{c}^{(0)}(t, z) + \mathbf{A} \int_0^t \int_0^{z_0} \mathbf{G}(z, z'; t, t') \delta(z - z_*) dz' dt',$$

де $\mathbf{c}^{(0)}(z, t) = \begin{pmatrix} c_1^{(0)}(z, t) \\ c_2^{(0)}(z, t) \end{pmatrix}$ – розв'язок однорідної задачі

гетеродифузії за крайових умов (7), (9), (12), $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \alpha \\ 1 - \alpha \end{pmatrix}$.

В результаті одержимо

$$\frac{\tilde{c}_1(t, z)}{c_0} = \left\{ \alpha - \frac{\tilde{b}_1}{ce} \right\} \left(1 - \frac{z}{z_0} \right) - B \left[\left(\tilde{a}_1 + \frac{\tilde{b}_1}{x_1} \right) \times \right.$$

$$\times \frac{\sin(\pi - y)x_1}{\sin \pi x_1} - \left(\tilde{a}_1 + \frac{\tilde{b}_1}{x_2} \right) \frac{\sin(\pi - y)x_2}{\sin \pi x_2} \left. \right] - \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z}{s_1 - s_2} \times$$

$$\times \left\{ \frac{1}{y_n} \left[\left(\alpha s_1 + p_1 + \frac{p_2}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(\alpha s_2 + p_1 + \frac{p_2}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] + \alpha c_0 \times \right.$$

$$\times \sin y_n z_* \left[\frac{A_1(s_1 - s_2)}{\eta_2} + \left[\left(1 + \frac{A_1}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(1 + \frac{A_1}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] \right] \left. \right\};$$

$$\frac{\tilde{c}_2(z, t)}{c_0} = \left\{ 1 - \alpha - \frac{\tilde{b}_2}{ce} \right\} \left(1 - \frac{z}{z_0} \right) - B \left[\left(\tilde{a}_2 + \frac{\tilde{b}_2}{x_1} \right) \times \right.$$

$$\times \frac{\sin(\pi - y)x_1}{\sin \pi x_1} - \left(\tilde{a}_2 + \frac{\tilde{b}_2}{x_2} \right) \frac{\sin(\pi - y)x_2}{\sin \pi x_2} \left. \right] - \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z}{s_1 - s_2} \times$$

$$\times \left\{ \frac{1}{y_n} \left[\left((1 - \alpha) s_1 + p'_1 + \frac{p'_2}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left((1 - \alpha) s_2 + p'_1 + \frac{p'_2}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] + \right.$$

$$\times (1 - \alpha) c_0 \sin y_n z_* \left[\frac{A_2(s_1 - s_2)}{\eta_2} + \left[\left(1 + \frac{A_2}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(1 + \frac{A_2}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] \right] \left. \right\}.$$

де $p_1 = (\alpha d - d_1(1 - \alpha))y_n^2 + \alpha a_{22} + \alpha_1 + (1 - \alpha)a_{12}$, $p_2 = (d_1\alpha_2 + d\alpha_1)y_n^2 + \alpha_1 a_{22} - \alpha_2 a_{12}$, $p'_1 = (1 - \alpha - \alpha d_2)y_n^2 + (1 - \alpha)a_{11} + \alpha a_{21} + \alpha_2$; $p_2 = (\alpha_2 + \alpha_1 d_2)y_n^2 + \alpha_2 a_{11} - \alpha_1 a_{21}$; $y = \pi z / z_0$;
 $B = 1 / \sqrt{d^2 - 4ec^2}$; $x_{1,2} = \left(-d/c \pm \sqrt{d^2/c^2 - 4e} \right) / 2$;
 $b = \alpha \alpha_1 a_{22} - \alpha_2 a_{12}$; $a = (d_1^{(0)}\alpha_2 + d^{(0)}\alpha_1)\pi^2 / z_0^2$;
 $c = (d - d_1 d_2)\pi^4 / z_0^4$; $d = (a_{22} + a_{11}d + d_1 a_{21} + d_2 a_{12})\pi^2 / z_0^2$;
 $e = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$; $\tilde{a}_1 = (d_1\alpha_2 + d\alpha_1)\pi^2 / z_0^2$;
 $\tilde{a}_2 = (\alpha_2 + \alpha_1 d_2^{(0)})\pi^2 / z_0^2$; $\tilde{b}_1 = \alpha_1 a_{22} - \alpha_2 a_{12}$;
 $\tilde{b}_2 = \alpha_2 a_{11} - \alpha_1 a_{21}$.

C. Крайові задачі гетеродифузії з випадкових точкових джерел

Розглянемо задачі гетеродифузії домішки двома шляхами в шарі при дії випадкових точкових джерел маси. Вважаємо, що місце знаходження джерела маси є невідомим,

тобто величина z_* є випадковою. Нехай задано рівномірний розподіл випадкової величини на проміжку $(0; z_0)$. Тоді такий процес гетеродифузії описує система рівнянь (6). Розглянемо випадок нульових крайових умов (7)-(9).

Розв'язок такої задачі отримаємо усереднюючи вирази (11) по z_* з рівномірною функцією розподілу [11]. Тоді маємо

$$\begin{aligned} \bar{c}_1(z, t) &= \langle c_1(z, t) \rangle_{z_*} = \alpha \frac{2}{z_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z}{y_n} B_n \times \\ &\times \left(\frac{A_1}{\eta_2} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\left(1 + \frac{A_1}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(1 + \frac{A_1}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] \right); \\ \bar{c}_2(z, t) &= \langle c_2(z, t) \rangle_{z_*} = (1 - \alpha) \frac{2}{z_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z}{y_n} B_n \times \\ &\times \left(\frac{A_2}{\eta_2} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\left(1 + \frac{A_2}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(1 + \frac{A_2}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] \right), \end{aligned} \quad (13)$$

де $B_n = 1 - (-1)^n$.

Нехай координата розташування точкового джерела маси z_* є випадковою величиною з трикутним розподілом на проміжку $(0; z_0)$. Функція густини трикутного розподілу має вигляд [11]

$$f(z_*) = \begin{cases} \frac{2}{z_0} - \frac{2|z_0 - 2z_*|}{z_0^2}, & z_* \in (0; z_0), \\ 0, & z_* \notin (0; z_0). \end{cases} \quad (14)$$

Розв'язок системи задачі гетеродифузії (6)-(9) усереднюємо на проміжку $(0; z_0)$ по z_* з функцією розподілу (14). У результаті отримаємо

$$\begin{aligned} \bar{c}_1(z, t) &= \langle c_1(z, t) \rangle_{z_*} = \alpha \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z}{y_n} B_n \times \\ &\times \left(\frac{A_1}{\eta_2} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\left(1 + \frac{A_1}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(1 + \frac{A_1}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] \right); \\ \bar{c}_2(z, t) &= \langle c_2(z, t) \rangle_{z_*} = (1 - \alpha) \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin y_n z}{y_n} B_n \times \\ &\times \left(\frac{A_2}{\eta_2} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\left(1 + \frac{A_2}{s_1} \right) e^{s_1 t} - \left(1 + \frac{A_2}{s_2} \right) e^{s_2 t} \right] \right). \end{aligned}$$

Тут $B_n = 1 + 2(-1)^n$.

Зазначимо, що концентрації домішок \bar{c}_i ($i = 1, 2$), а відповідно і сумарні концентрації, в шарі при дії випадково розташованого джерела маси з трикутним розподілом координати в області $(0; z_0)$ відрізняються від відповідних функцій, усереднених за рівномірним розподілом, на коефіцієнт $1/z_0$ і множник B_n , $n = 1, 2, \dots$. При цьому враховуючи, що

$1 - (-1)^n$ дорівнюють 0 при парному n , кількість обчислювальних процедур при числовому аналізі розв'язків (14) зменшується вдвічі. Крім цього усереднення розв'язків по величині z_* приводить до відмінних від (11а) асимптотичних виразів (концентрацій у стаціонарному режимі).

ВИСНОВКИ

Таким чином, для системи рівнянь гетеродифузії двома шляхами, подану у матричному вигляді означено матричну функцію Гріна для крайових умов першого роду. Отримано формули для елементів матриці Гріна та досліджено поведінку функцій Гріна. Зазначимо, що кількісне співвідношення між функціями Гріна у різних станах визначається співвідношеннями коефіцієнтів типу «сорбції-десорбції». При цьому на швидкість спадання функцій Гріна до значень в околі нуля суттєво впливають співвідношення коефіцієнтів дифузії на різних шляхах міграції та час протікання процесу гетеродифузії.

Отримані вирази для функцій Гріна застосовано для знаходження розв'язків крайових задач гетеродифузії домішкової речовини за дії внутрішнього точкового джерела маси. Розглянуті випадки як детермінованих джерел, так і стохастичних за рівномірною та трикутного розподілів координати розташування джерела. Встановлено, що усереднення функцій концентрацій за координатою розташування точкового джерела маси з рівномірним розподілом приводить до зменшення у два рази кількості обчислювальних процедур при числовому аналізі розв'язків задач гетеродифузії домішкових частинок.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] M. Stone, P. Goldbart Mathematics for Physics, Alexandria-Florence-London: PIMANDER-CASAUBON, 2008, 919 p.
- [2] A.D. Polyaniin and V.F. Zaitsev Handbook of Exact Solutions for Ordinary Differential Equations (2nd edition), Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton, 2003, 802 p.
- [3] A.D. Polyaniin, V.E. Nazaikinskii Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists, Second Edition, Chapman & Hall/CRC Press January 15, 2016, 1609 p.
- [4] А.Г. Свешников, А.Н. Боголюбов, В.В. Кравцов. Лекции по математической физике, Москва, Изд-во МГУ, 1993, 352 с.
- [5] L. Eyges The Classical Electromagnetic Field, New York, Dover Publications, 1972, 448 p.
- [6] С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II Случайные поля, Москва, Наука, 1978, 436 с.
- [7] Р. Фейнман, А. Хиббс Квантовая механика и интегралы по траекториям, Москва, Мир, 1968, 454 с.
- [8] М.А. Неймарк Линейные дифференциальные операторы, Москва, Наука, 1969, 526 с.
- [9] Б.Й. Пташник, В.С. Ільків, І.Я. Кміть, В.М. Полішук Нелокальні крайові задачі для рівнянь із частинними похідними, Київ, Наукова думка, 2002, 416 с.
- [10] О. Власій, О. Чернуха Математичне моделювання гетеродифузійних процесів у шарі з випадковим прошарком, Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології, 2014, Вип. 20, С. 58-68.
- [11] В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин Справочник по теории вероятности и математической статистике, Москва, Наука, 1985, 640 с.

Особливості Валідації Комплексних Глобальних Моделей

Микола Густі, Інна Охремчук
Кафедра міжнародної інформації
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
kgusti@yahoo.com, ohremchukia@gmail.com

Specifics of Validation of Complex Global Models

Mykola Gusti, Inna Okhremchuk
Department of International Information
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
kgusti@yahoo.com, ohremchukia@gmail.com

Анотація—Розглянуто особливості валідації складних комп'ютерних моделей, які використовують для інтегральної оцінки. Основні кроки валідації: валідація концептуальної моделі, валідація даних, валідація поведінки моделі (порівняння результатів моделювання з вимірюваннями, результатами інших моделей, аналіз чутливості моделі та ін.) та верифікація комп'ютерного коду моделі. Наведено приклад валідації глобальної моделі лісу. Продемонстровано як розглянута модель пройшла всі зазначені етапи валідації.

Abstract—Specifics of validation of complex computer models that are used for integrated assessment is considered. The main steps of validation are: validation of conceptual model, validation of data, validation of model behavior (comparison of the modelling results with measurements, model intercomparison, model sensitivity analysis etc.) and verification of the model software code. An example of verification of the global forest model is considered. It is shown how the model has passed all considered stages of validation.

Ключові слова—*моделі інтегральної оцінки; комп'ютерне моделювання; валідація моделей; глобальна модель лісу*

Keywords—*integrated assessment models; simulation; model validation; global forest model*

I. ВСТУП

Згідно визначення Товариства інтегральної оцінки (TIAS) інтегральна оцінка – це наукова мета-дисципліна, яка інтегрує знання про проблемну сферу і робить ці знання доступними для суспільного навчання і процесів прийняття рішень [1]. Інтегральна оцінка є важливим елементом аналізу складних соціально-економічно-екологічних систем для підтримки прийняття рішень на

міжнародних переговорах. Зокрема, інтегральна оцінка широко використовується при розв'язанні глобальних проблем навколишнього середовища. Для інтегральної оцінки використовують певний клас комп'ютерних моделей, або комплекси моделей – моделі інтегральної оцінки. Особливістю таких моделей є моделювання взаємопов'язаних процесів у таких сферах як економіка, навколишнє середовище, енергетика та інших важливих сферах для розв'язання конкретної проблеми. Крім того, важливим компонентом моделей інтегральної оцінки є можливість симуляції впровадження заходів для розв'язання проблеми (наприклад, оподаткування емісії парникових газів) та оцінки ефективності цих заходів.

Валідація моделей інтегральної оцінки є необхідною для довіри учасників переговорів до запропонованих варіантів розв'язку проблем, оцінки затрат на впровадження можливих заходів та відповідних ризиків. З іншого боку, не існує, або практично не можливо отримати безпосередні вимірювання параметрів складних соціально-економічно-екологічних систем. В якості вхідних даних та даних для порівняння з результатами моделювання часто виступають статистичні дані, дані отримані на основі дистанційного зондування землі та обмеженої кількості наземних досліджень, експертні оцінки, результати інших обчислень, або моделювання. Крім того, моделі інтегральної оцінки включають моделювання суспільних процесів, які є погано структурованими.

В цій роботі проведено огляд можливих шляхів валідації глобальних моделей інтегральної оцінки, а також наведено приклад валідації глобальної геопросторової моделі лісу G4M, яка застосовується для інтегральної оцінки в рамках комплексу взаємопов'язаних моделей Міжнародного інституту прикладного системного аналізу.

II. ОСОБЛИВОСТІ ВАЛІДАЦІ МОДЕЛЕЙ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ

Моделі інтегральної оцінки є складними комп'ютерними моделями, які включають в себе компоненти моделювання біофізичних та економічних процесів, а також поведінки людей. Ці компоненти можуть бути об'єднані в одній моделі (менш детально, наприклад, AIM/CGE (Asia-Pacific Integrated Assessment/Computable General Equilibrium) [2], International Futures (<http://pardee.du.edu/node/484>)), або у вигляді комплексу зв'язаних між собою більш детальних моделей (наприклад, комплекс моделей інтегральної оцінки Міжнародного інституту прикладного системного аналізу [3]). Враховуючи те, що компоненти моделей об'єднані і виникають зворотні зв'язки, валідація окремих компонентів моделей не буде гарантувати валідації моделі (чи комплексу моделей) в цілому.

Загальноприйнятим є твердження, що валідація моделі тісно пов'язана з призначенням моделі. Nguyen (2005) [4] аналізуючи праці, в яких розглядають валідацію моделей інтегральної оцінки, виділяє такі проблеми валідації моделей цього типу:

- Відсутність загальноприйнятих визначень таких понять як валідність моделі, валідація моделі і критеріїв валідності моделі (філософська проблема);
- складність моделей інтегральної оцінки (методологічна проблема);
- участь людей (психологічна проблема);
- нестача і відсутність даних спостережень (проблема даних);
- високий рівень агрегації (проблема відкритості системи).

V.Hughes [5], один з розробників моделі International Futures, використовує концепцію верифікації-валідації та акредитації (VVA). Розрізняють валідацію концептуальної моделі (або валідацію структури моделі – перевірка того, що теорії та припущення, які використано у концептуальній моделі, є раціональними, враховуючи призначення моделі), валідацію поведінки моделі (або операційну валідацію – перевірка того, що поведінка результатів моделювання має достатню точність відповідно до призначення моделі), валідацію даних (перевірка того, що дані, необхідні для розробки моделі та проведення модельних експериментів є адекватними та коректними) та верифікацію (перевірка того, що концептуальна модель переведена у комп'ютерну модель коректно, без помилок) [6] (рис. 1).

Враховуючи вищенаведені проблеми валідації складних моделей, такі моделі, практично, не валідують. В тому числі це стосується моделей інтегральної оцінки в сільському господарстві [7] та лісовому господарстві. Натомість, визначають, чи модель підходить для певних цілей, - «акредитація» згідно [6] і чого притримується V.Hughes [5] при валідації моделі International Futures. Така «акредитація», в тому числі, може відбуватись через процес використання моделі у різних проектах із

залученням до рецензування моделі та результатів моделювання незалежних експертів, замовників результатів аналізу з використанням моделі та зацікавлених осіб (тих, кого можуть стосуватись результати моделювання, чи політичні рішення, на які можуть вплинути ці результати моделювання) [5, 7, 8]. При наявності відповідних даних «спостережень» порівнюють результати моделювання з цими даними. При наявності інших моделей проводять порівняння результатів різних моделей як для історичного періоду так і майбутнього періоду (наприклад, [9, 10]). Також важливо проводити дослідження чутливості моделі до зміни окремих параметрів (для визначення тих параметрів, які мають суттєвий вплив на результат моделювання, а також вимірювання цього впливу), а також, при можливості, аналіз поширення похибок в моделі (наприклад, методом Монте-Карло).

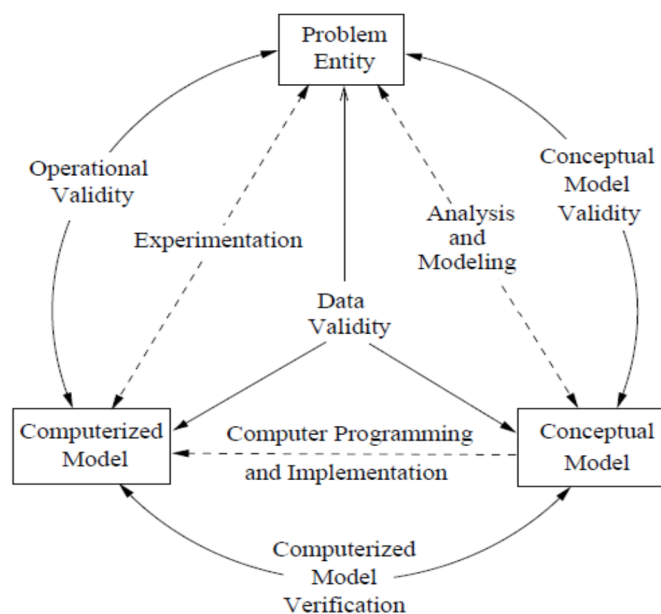


Рис. 1. Схематичне зображення процесу моделювання за [6].

Валідація складної моделі – це тривалий процес, а будь-які вдосконалення моделі вимагають повторення процедур валідації (окремих, чи всіх, в залежності від суттєвості змін).

III. ПРИКЛАД ВАЛІДАЦІ ГЛОБАЛЬНОЇ ГЕОПРОСТОРОВОЇ МОДЕЛІ ЛІСУ G4M

Глобальна модель лісу G4M є геопросторовою моделлю з роздільною здатністю 0.5 градуса. В кожній клітинці моделі симулюється прийняття рішення про зміну землекористування (заліснення, знеліснення, чи без змін) та параметри лісокористування залежно від економічної вигоди ведення сільського та лісового господарства, попиту на деревину, політик зменшення емісії парникових газів, а також обчислюються відповідні емісії (чи поглинання) CO₂ з біомаси, мертвої органічної речовини та ґрунту [11]. Обчислення проводяться для кожного року моделювання (у версії для Європейських країн), або для 5

років (у глобальній версії) клітинка за клітинкою. У поєднанні з глобальною економічною моделлю GLOBIOM її використовують у задачах інтегральної оцінки для зменшення емісії парникових газів у секторі землекористування, зміни землекористування та лісового господарства.

Концептуальна модель G4M була рецензована, при використанні G4M у міжнародних науково-дослідних проєктах, включаючи проєкти, спрямовані на підтримку прийняття рішень щодо зменшення емісії парникових газів (наприклад, PASHIMA [12]; EUCLIMIT [13], [14]), а також при публікації результатів моделювання у рецензованих журналах (наприклад, [3, 9,10,15,16]).

У G4M використовують дані міжнародних організацій, які складені на основі звітів, надісланих країнами, Food and Agriculture Organisation (FAO) [17], United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) [18] та Forest Europe [19], а також дані, які опубліковані у рецензованих журналах (наприклад, [20-22]).

Незважаючи на те, що дані, які використовуються у G4M, проходять перевірку при їх розміщенні у базах даних міжнародних організацій, чи при публікації у рецензованих журналах, існує велика відмінність у відповідних даних з різних джерел, а також даних, опублікованих у звітах у різні роки. Наприклад, дані щодо площі лісу, а також швидкості заліснення і знеліснення, отримані з FAO та UNFCCC, можуть відрізнятись у декілька разів для окремих країн (наприклад, Австралія – оцінка заліснення та знеліснення для 2005 та 2010 років відрізняється у 2-3 рази; та Туреччина – оцінка заліснення відрізняється приблизно у 2 рази, знеліснення відсутнє за даними UNFCCC, але суттєве за даними FAO). Це зумовлено тим, що у різних країнах часто різні державні організації відповідають за подання звітів у FAO та UNFCCC (до UNFCCC дані подають у вигляді таблиць Excel, Common Reporting Format - CRF), можуть використовуватись різні дані для оцінок, різні визначення понять «ліс», «заліснення» та «знеліснення», а також різні методи оцінювання.

Просторові дані, наприклад карти лісового покриву, кількості вуглецю в біомасі лісів, підстилки та ґрунті, придатності ґрунту до ведення сільського господарства та ін. можуть мати суттєві невизначеності. Такі вхідні дані як ціни на деревину та сільськогосподарські землі, а також коефіцієнт корупції (коефіцієнт корупції є середнім арифметичним з трьох перцентилей «політичної стабільності», «ефективності уряду» та «контролю корупції», отриманими з [22] і у моделі G4M визначає ефективність використання коштів, спрямованих на зменшення емісії CO₂ (змінюється від 0 до 1) [10], тобто, чим вищий коефіцієнт, тим вища ефективність використання коштів) є важливими параметрами для аналізу соціально-економічних сценаріїв зменшення емісії парникових газів. Тому важливо оцінити чутливість моделі до зміни її основних параметрів.

A. Аналіз чутливості моделі

В результаті аналізу чутливості моделі до зміни окремих параметрів (+/- 10% від середнього значення) було виявлено, що результати моделювання швидкості заліснення та знеліснення без впливу податку на вуглець найбільш чутливі до зміни валового внутрішнього продукту, коефіцієнта перерахунку вуглецю у об'єм деревини (комбінація щільності деревини та вмісту вуглецю у деревині), приросту деревини (залежить від чистої первинної продукції), щільності розміщення населення, ціни на деревину, придатності землі для ведення сільського господарства та вартості заліснення [23].

В результаті аналізу чутливості оцінки кількості деревини, яка потенційно може бути заготовлена у країнах ЄС, до вибору карти розміщення лісів, яку використовують у G4M, було виявлено, що вплив є незначним у випадку розгляду агрегованих результатів (на рівні ЄС), але суттєвим у випадку розгляду окремих країн. Якщо результати моделювання будуть використані для аналізу вибору шляху досягнення цілі збільшення біоенергії на 10%, вибір карти розміщення лісів може мати вплив на таке рішення. У цьому випадку суттєва різниця між картами вплинула на різницю у результатах моделювання. [24].

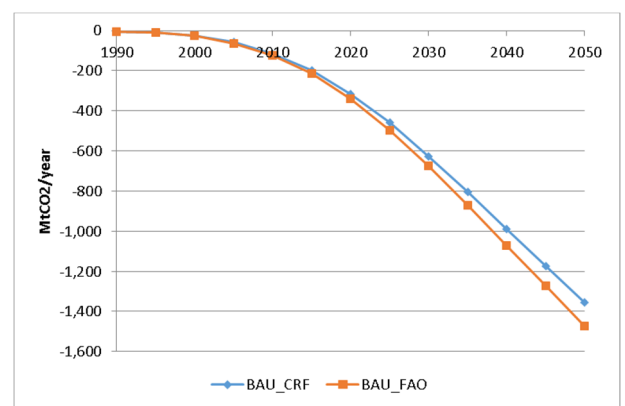


Рис. 2. Глобальні емісії CO₂ від заліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU_FAO) та UNFCCC (BAU_CRF) для калібрування моделі.

Щоб оцінити вплив відмінностей у вхідних даних про площу лісу, а також швидкості заліснення і знеліснення FAO та UNFCCC на результати моделювання, було проведено аналіз чутливості результатів оцінки емісій та стоку вуглекислого газу для історичного періоду та прогнозування до 2050 року, без впливу податку на вуглець та з впливом податку на вуглець (криві граничних витрат на зменшення емісій (MACC)). Результати аналізу наведено на рис. 2 – рис. 4. (рис. 2 – негативні емісії CO₂ від заліснення; рис. 3 – емісії від знеліснення), рис.4).

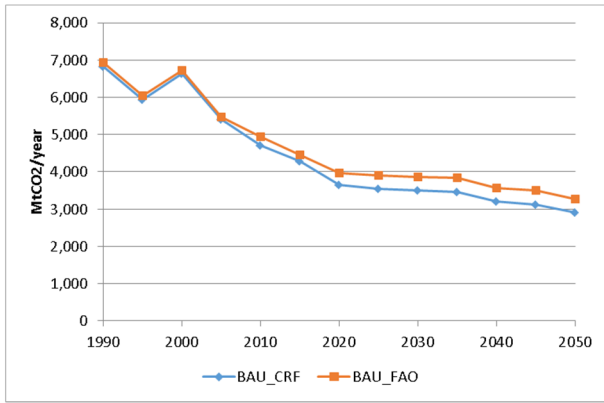


Рис. 3. Глобальні емісії CO₂ від знеліснення без впливу податку на вуглець при використанні даних FAO (BAU_FAO) та UNFCCC (BAU_CRF) для калібрування моделі.

Глобальні (сума для всіх країн) емісії CO₂ від знеліснення та заліснення без впливу податку на вуглець практично не відрізняються протягом історичного періоду, але дещо розходяться з часом (до 9% для заліснення та 12% для знеліснення). Глобальний потенціал зменшення емісії CO₂ від заліснення, знеліснення, лісового господарства та сумарний відрізняється максимум на 20% для заліснення. Разом з тим, для окремих країн різниця перевищує 100%. Тому важливо враховувати призначення результатів моделювання для вибору відповідних даних (FAO, чи UNFCCC) про площу лісу та швидкості заліснення і знеліснення.

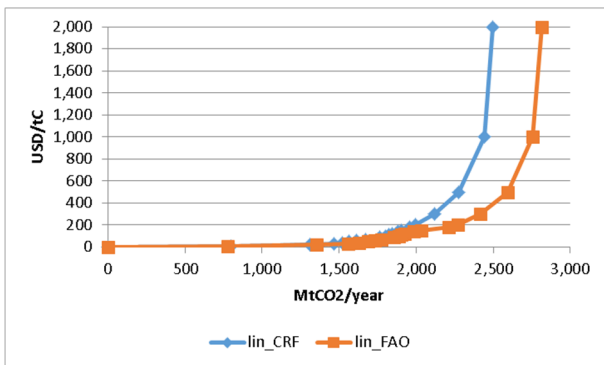


Рис. 4. Глобальний потенціал зменшення емісії CO₂ від знеліснення для різної ціни на вуглець (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р. при використанні даних FAO (lin_FAO) та UNFCCC (lin_CRF) для калібрування моделі.

Також проведено дослідження чутливості кривих граничних витрат на зменшення емісій CO₂ від заліснення, знеліснення та лісового господарства до зміни важливих соціально-економічних факторів – коефіцієнта корупції (відносна невизначеність оцінок компонентів коефіцієнта корупції коливається від декількох відсотків до значно більше 100% для деяких країн, де важко отримати достовірну інформацію (наприклад, Північна Корея, Афганістан), ціни на деревину та ціни на сільськогосподарську землю [25] (у сценаріях, де використовують модель G4M, ціни на

сільськогосподарські товари змінюються від -60% до +50% до 2100 р. порівняно з 2005 р., а заходи по зменшенню емісії парникових газів можуть призвести до збільшення цін на сільськогосподарські товари на 110-570%). Для цього модель розв'язували для різних сценаріїв лінійної зміни ціни на вуглець (від 0 у 2015 році до 0 – 717 \$/tC у 2030 році). Для кожного сценарію зміни ціни вуглецю змінювали кожен з параметрів на +/- 1, 2.5, 5, 10, 50 та 90% відносно середнього значення. Отримали 12 кривих граничних витрат для кожного параметра (позначення: *crpV*, *crmV*, *wpV*, *wmV*, *lpV* та *lmV*; *cr* – коефіцієнт корупції, *w* – ціна деревини, *l* – ціна сільськогосподарської землі, *p* – збільшення параметра, *m* – зменшення параметра, *V* – зміна параметра на 1, 2.5, 5, 10, 50 або 90%; рис.5 – рис.7).

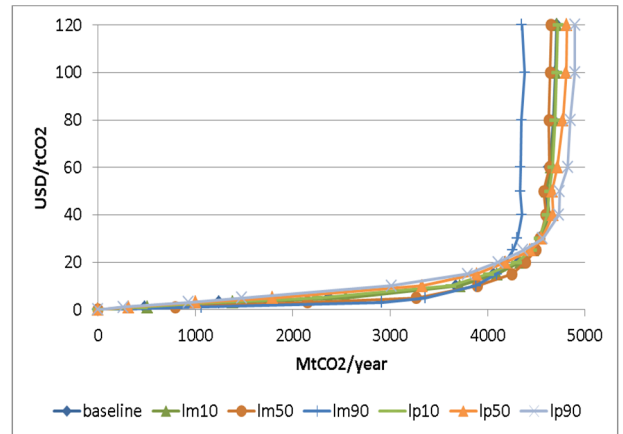


Рис. 5. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісій CO₂ для різної ціни на вуглець та відхиленя ціни на сільськогосподарські землі на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р.

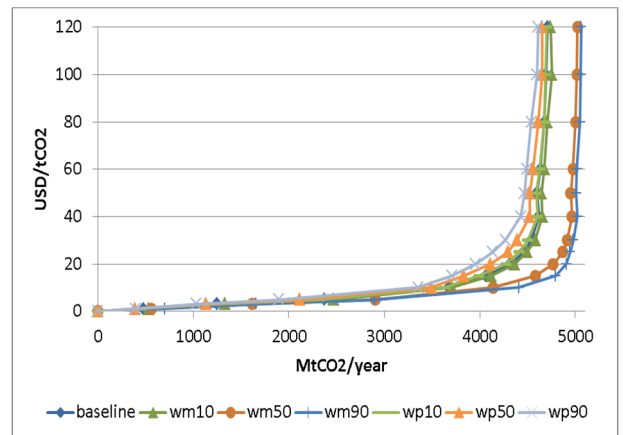


Рис. 6. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісій CO₂ для різної ціни на вуглець та відхиленя ціни на деревину на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісій) у 2030р.

При зміні параметрів на 10% глобальна крива граничних витрат є найбільш чутливою, коли ціна вуглецю становить 18 \$/tC. При такій ціні вуглецю зменшення коефіцієнта корупції має найбільший вплив на МАСС – потенціал зменшення емісій CO₂ знижується на 230

МтСО₂/рік (рис.7). Збільшення коефіцієнта корупції має дещо менший ефект на МАСС – потенціал зменшення емісії СО₂ зростає на 229 МтСО₂/рік. Зміна ціни на сільськогосподарські землі теж суттєво впливає на МАСС – зменшення ціни на землю приводить до збільшення потенціалу зменшення емісії СО₂ на 172 МтСО₂/рік (рис.5), а збільшення ціни на землю приводить до зниження потенціалу зменшення емісії СО₂ на 122 МтСО₂/рік. Зміна коефіцієнта корупції має найбільший вплив на глобальну МАСС у порівнянні з іншими параметрами при цінах вуглецю нижче 180 \$/tC і при ціні 478 \$/tC. Зміна ціни деревини має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з іншими параметрами при ціні вуглецю 239–358 і 597–717 \$/tC. Ціна на деревину досягає свого максимального впливу на МАСС при 90 \$/tC.

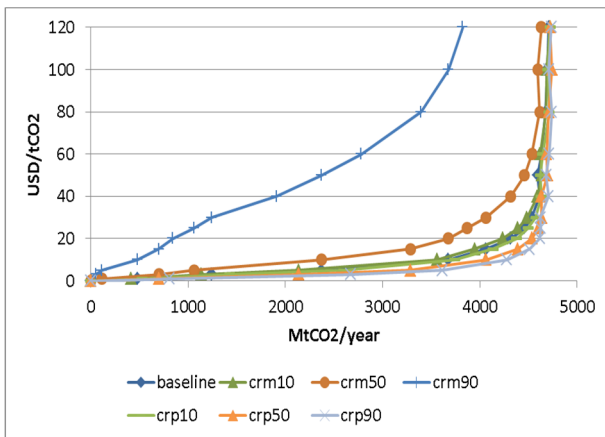


Рис. 7. Глобальний потенціал зменшення сумарних емісії СО₂ для різної ціни на вуглець та відхиленя коефіцієнта корупції на +/- 10, 50 та 90% (криві граничних витрат на зменшення емісії) у 2030р.

При зміні параметрів на 50% глобальна МАСС є найбільш чутливою, коли ціна на вуглець становить 30 \$/tC. При такій ціні на вуглець зменшення коефіцієнта корупції викликає відхилення МАСС на -1310 МтСО₂/рік (рис.7), а при ціні 717 \$/tC – лише на -75 МтСО₂/рік. Коефіцієнт корупції має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з іншими параметрами при ціні на вуглець 6 і 30-179 \$/tC. Ціна деревини має суттєвий вплив на МАСС при всіх цінах вуглецю з максимальним значенням -582 МтСО₂/рік при ціні на вуглець 30 \$/tC (рис.6) і має найбільший ефект у порівнянні з іншими параметрами при ціні вуглецю 239-717 \$/tC. Зміна ціни на сільськогосподарські землі має максимальний вплив на МАСС (903 МтСО₂/рік), а також у порівнянні з іншими параметрами, при ціні на вуглець 18 \$/tC (рис.5).

При зміні параметрів на 90% МАСС є найбільш чутливою при ціні на вуглець 119 \$/tC. При такій ціні на вуглець зменшення коефіцієнта корупції викликає відхилення МАСС на -3477 МтСО₂/рік (рис.7). Вплив зміни коефіцієнта корупції зменшується повільно і має найбільший вплив на МАСС у порівнянні з іншими параметрами при ціні вуглецю 30-717 \$/tC. Зміна ціни сільськогосподарської землі має менший вплив на МАСС, ніж зміна коефіцієнта корупції, з максимумом при ціні вуглецю 30 \$/tC (1699 МтСО₂/рік) (рис.5). У порівнянні з

іншими параметрами, вплив зміни ціни сільськогосподарської землі є найбільшим при ціні вуглецю 6 і 18 \$/tC. Зміна ціни деревини має максимальний вплив на МАСС (733 МтСО₂/рік) при 60 \$/tC (рис.6).

Коефіцієнт корупції має найбільший вплив на МАСС при всіх рівнях зміни параметрів. Зі збільшенням амплітуди зміни параметра максимальний вплив на МАСС зсувається від 30 \$/tC (при змінах на 10 і 50%) до 119 \$/tC (при зміні на 90%). Ціна деревини має відносно рівномірний вплив на МАСС при всіх цінах вуглецю, а ціна на сільськогосподарську землю має два максимуми – більший при низьких цінах вуглецю і менший при високій ціні вуглецю. Збільшення амплітуди зміни параметра до 90% знижує ціну на вуглець, при якій зміна окремих параметрів викликає максимальне відхилення МАСС.

В. Відтворення історичних даних.

Для більшості країн ЄС, де інформація про ліси є більш повною, модель досить точно відтворює емісії СО₂ від лісокористування (у порівнянні з даними, які країни звітують у UNFCCC, наприклад, Фінляндія, рис.8).

В ряді країн ЄС (наприклад, Бельгія, Великобританія, Данія, Франція та Швеція (рис.9) відхилення результатів моделювання від даних, які країни звітують у UNFCCC, в окремі роки є суттєвим. В таких випадках потрібно проводити аналіз вхідних даних та моделі, щоб пояснити причину, або виправити, наприклад, помилки у концептуальній моделі, чи програмній реалізації моделі.

G4M results for countries (Finland, 0)

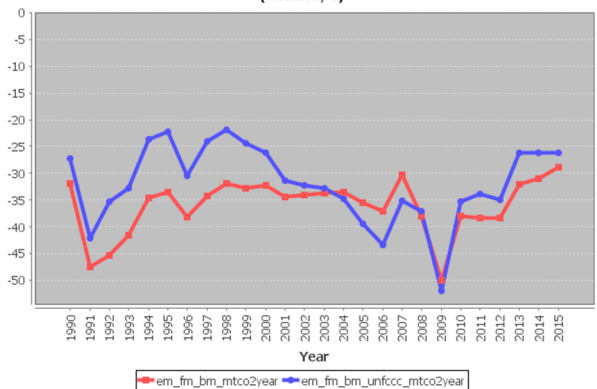


Рис. 8. Емісії СО₂ від лісового господарства (FL-FL) у Фінляндії у 1990-2015рр., подані країною до UNFCCC та змодельовані G4M

У випадку Швеції результати моделювання емісій СО₂ від лісокористування досить добре відповідають даним про лісозаготівлю (рис.10). Це може свідчити про те, що, швидше за все, причину відмінностей потрібно шукати у вхідних даних.

У випадку країн, для яких інформація про ліси є неповною та/або неточною, відтворення емісій вуглекислого газу є менш точним, але і дані «спостережень», з якими проводиться порівняння, також є менш достовірними (наприклад, Індія, рис.11).

Також проводилося порівняння і аналіз результатів моделювання G4M з національними даними країн ЄС [26]. Автори не знайшли єдиний вхідний параметр, який би дозволив пояснити причину відмінностей у результатах моделювання та національних даних країн. Найбільший вплив має метод, який експерти в країнах використовують для обчислення емісій CO₂ від лісового господарства, що може відрізнитись від того, який використано у моделі. Інші впливові причини – це дані про заготівлю деревини, втрати при лісозаготівлі, методи, які використовують у країнах, для корекції відсутніх даних у інвентаризації лісів, а також те, що модель не враховує великомасштабні природні порушення лісів (вітровали, пожежі, хвороби).

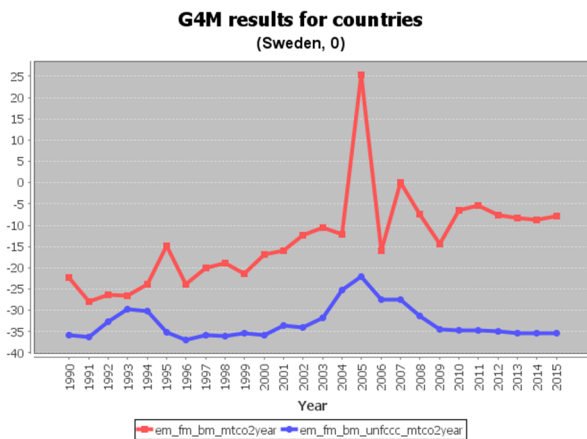


Рис. 9. Емісії CO₂ від лісового господарства (FL-FL) у Швеції у 1990-2015рр., подані країною до UNFCCC та змодельовані G4M

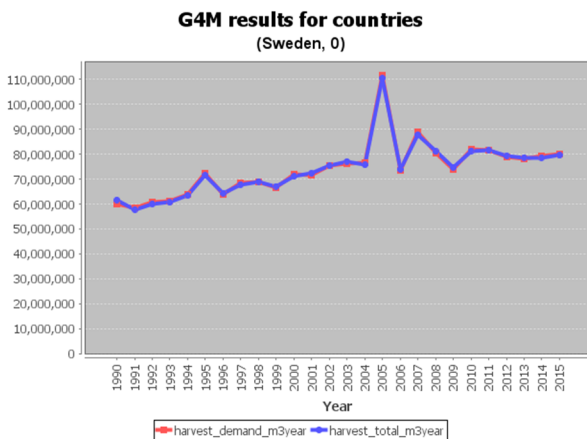


Рис. 10. Заготівля деревини у Швеції за даними FAOSTAT (вхідний параметр моделі) та змодельована G4M

Крім порівнянь з історичними даними, також проводили порівняння з відповідними результатами інших моделей. Детальне порівняння для країн ЄС проводили з моделлю лісу EFISCEN [15], для Бразилії з результатами спеціальної версії GLOBIOM для цієї країни [27] (рис.12) та на глобальному рівні у складі комплексу інтегральної оцінки Міжнародного інституту прикладного системного аналізу з моделями AIM, GCAM, IMAGE та REMIND/MAGPIE [9]. У зазначених випадках результати

G4M є раціональними, а різниця у результатах моделей пояснюється відмінностями у підходах до моделювання відповідних процесів і вхідних даних.

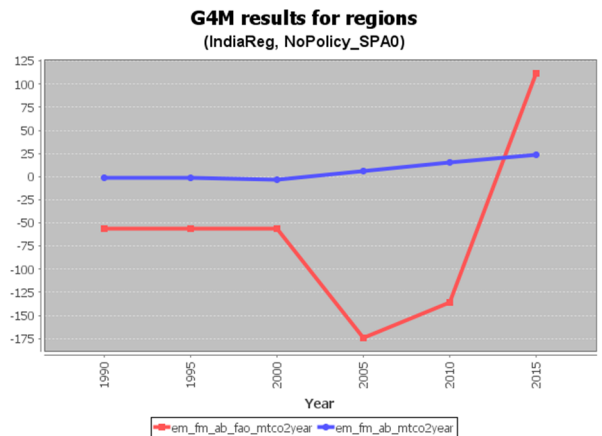


Рис. 11. Емісії CO₂ від лісового господарства (FL-FL) у Індії у 1990-2015рр., за даними FAOSTAT та змодельовані G4M

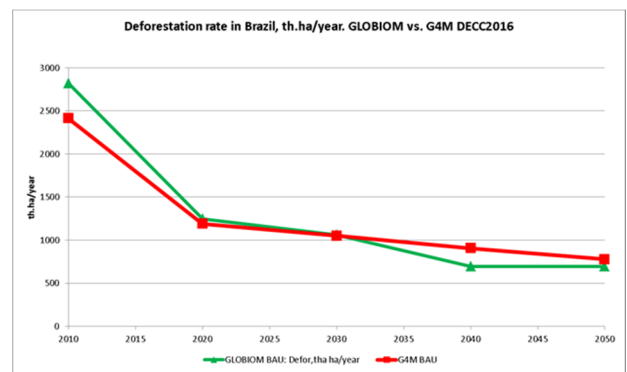


Рис. 12. Швидкість знеліснення, кга/рік, у Бразилії у 2000-2050рр. за результатами спеціальної версії GLOBIOM для Бразилії [27] та G4M

Важливим етапом валідації моделей, які використовують для інтегральної оцінки, є представлення результатів національним експертам, а також тим, кого можуть стосуватись ці результати, та спільний аналіз результатів в режимі питання-відповіді. Ця робота може проводитись віддалено через інтернет та телеконференції, або через організацію спеціальних семінарів [15]. Під час такого аналізу експерти просять пояснити ті, чи інші результати, зазвичай, звертаючи особливу увагу на «аномалії». В результаті такої роботи можуть бути виявлені як проблеми із вхідними даними, так і помилки; обмеження концептуальної моделі, а також помилки програмної реалізації моделі. Розробники моделі і користувачі результатів моделювання можуть узгодити, які вхідні дані краще відповідають для розв'язку поставленої задачі (наприклад, UNFCCC чи FAO). У користувачів результатів моделювання (тих, хто буде приймати рішення, грунтуючись на цих результатах, а також ті, кого ці рішення будуть стосуватись) виробляється розуміння роботи моделі, обмеження моделі, невизначеності результатів моделювання і, відповідно,

рівень довіри до результатів моделювання. Приклад обговорення результатів з користувачами наведено в [28], а рекомендації для політиків, на основі результатів моделювання у [29].

ВИСНОВКИ

Моделі, які використовують для проведення інтегральної оцінки, у більшості випадків, є складними комп'ютерними моделями, або комплексами взаємопов'язаних моделей, які, серед іншого, включають моделювання екологічних, економічних та соціально-політичних процесів. У зв'язку з складністю моделей, а також відсутністю достатньої кількості даних вимірювань, такі моделі валідують у процесі їх застосування, у наукових публікаціях і під час багатоетапного рецензування експертами та користувачами як самих моделей так і результатів моделювання. В результаті цього процесу у користувачів виробляється певний рівень довіри до результатів моделювання, що дозволяє використовувати ці результати для підтримки прийняття рішень.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Defining Integrated Assessment. Website of The Integrated Assessment Society. [Online]. Available: http://www.tias.uniosnabrueck.de/integrated_assessment.php, accessed 27 April 2017
- [2] S. Fujimori, T. Hasegawa, T. Masui, et al. "SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways", *Global Environmental Change*, Vol 42, pp. 268-283, January 2017
- [3] O. Fricko, P. Havlik, J. Rogelj et al. "The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century", *Global Environmental Change*, no. 42, pp. 251-267, 2017
- [4] T.G. Nguyen "A methodology for validation of integrated assessment models with an application to coastal-zone management in South-West Sulawesi", Dissertation to obtain the doctor's degree at the University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2005
- [5] B. Hughes "Assessing the Credibility of Forecasts using International Futures (IFs): Verification and Validation." Working paper 2006.06.20. Pardee Center for International Futures, Josef Korbel School of International Studies, University of Denver, Denver, CO, 2006
- [6] R. Sargent "Verification, Validation, and Accreditation of Simulation Models," Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, J.A. Joines, R.R. Barton, K. Kang, and P.A. Fishwick, eds., 2000 [online] Available: <http://www.informs-sim.org/wsc00papers/009.PDF>. Accessed 27 April 2017
- [7] W. Britz, M. van Ittersum, A.O. Lansink, T. Heckeleei "Tools for Integrated Assessment in Agriculture. State of the Art and Challenges", *Bio-based and Applied Economics*, no. 1(2), pp. 125-150, 2012
- [8] J.P. Van der Sluijs "A way out of the credibility crisis of models used in integrated environmental assessment", *Futures*, no. 34 (2), pp. 133-146, 2002
- [9] A. Popp, K. Calvin, S. Fujimori et al. "Land-use futures in the shared socio-economic pathways", *Global Environmental Change*, no. 42, pp. 331-345, 2017
- [10] G. Kindermann, M. Obersteiner, et al. "Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, no. 105(30), pp. 10302-10307, 2008
- [11] M. Gusti, G. Kindermann "An approach to modeling landuse change and forest management on a global scale". Proceedings, 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011), 29-31 July 2011, Noordwijkerhout, Netherlands, pp.180-185
- [12] PASHIMA Project, [online]. Available: <http://www.pashima-project.eu>, Accessed 27 April 2017
- [13] EUCLIMIT Project [Online]. Available: <http://www.euclimit.eu/Models.aspx> Accessed 27 April 2017
- [14] J. Eliasch "Climate change : financing global forests : the Eliasch review", London ; Sterling, VA : Earthscan, 2008
- [15] H. Böttcher, P.J. Verkerk, M. Gusti et al. "Projection of the future EU forest CO₂ sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models", *GCB Bioenergy*, no.4, pp.773-783, 2012
- [16] G. Kindermann, M. Obersteiner, et al. "Predicting the deforestation-trend under different carbon-prices", *Carbon Balance and Management*, no.1(1), 2006
- [17] FAO Forest Resource Assessment [Online]. Available: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/en> Accessed 27 April 2017
- [18] National Inventory Submissions 2016 [Online]. Available: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php Accessed 27 April 2017
- [19] Forest Europe [Online]. Available: <http://foresteurope.org/state-europes-forests-2015-report/> Accessed 27 April 2017
- [20] G. Kindermann, I. McCallum, et al. "A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics", *Silva Fennica*, no. 42(3), pp. 387-396, 2008
- [21] H. Gallaun, G. Zanchi, et al. "EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements", *Forest Ecology and Management*, no. 260(3), pp. 252-261, 2010
- [22] D. Kaufmann, A. Kraay, M. Mastruzzi "Governance Matters IV: Governance Indicators for 1996-2004", World Bank Policy Research Working Paper, Series No. 3630. World Bank, 2005
- [23] M. Gusti "Uncertainty of BAU emissions in LULUCF sector: Sensitivity analysis of the Global Forest Model", Proceedings of the 3rd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, 2010
- [24] L. Seebach, I. McCallum, S. Fritz et al. "Choice of forest map has implications for policy analysis: A case study on the EU biofuel target", *Environmental Science & Polic*, Vol.22, pp. 13-24, 2012
- [25] M. Gusti, N. Khabarov, N. Forsell "Sensitivity of marginal abatement cost curves to variation of G4M parameters", Proceedings of the 4th International Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, Cracow, Poland 7-9 October 2015, p.163-169
- [26] T. Groen, P. Verkerk, H. Böttcher et al. "What causes differences between national estimates of forest management carbon emissions and removals compared to estimates of large-scale models?", *Environmental Science & Polic*, Vol.33, pp. 222-232, 2013
- [27] G. Camara, A. Soterroni., F. Ramos, et al. (2016) „Modelling Land Use Change in Brazil: 2000-2050“ (Dataset), DOI:10.22022/REDD/09-2016.13782.
- [28] ILUC Quantification Study of EU Biofuels. Meeting Notes [Online]. Available: <http://www.globiom-iluc.eu/project-information/stakeholder-consultation/meeting-minutes/> Accessed 27 April 2017
- [29] Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Commission Staff Working Document. Impact Assessment. European Commission. Brussels, 30.11.2016 SWD(2016) 418 final. [Online]. Available: https://www.parlament.gv.at/PAKT/EU/XXV/EU/12/52/EU_125202/iframe_10677059.pdf . Accessed 27 April 2017

Нова Модель Штучного Нейрону для Побудови Нейронних Мереж у Задачі Апроксимації

Олена Чумаченко
кафедра технічної кібернетики
НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
lobach21@mail.ru

Владислав Горбатюк
кафедра технічної кібернетики
НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
vladislav.horbatiuk@gmail.com

New Artificial Neuron Model for Building Neural Networks in Approximation Tasks

Olena Chumachenko
dept. of technical cybernetics
NTUU «Igor Sikorsky KPI»
Kyiv, Ukraine
lobach21@mail.ru

Vladyslav Gorbatiuk
dept. of technical cybernetics
NTUU «Igor Sikorsky KPI»
Kyiv, Ukraine
vladislav.horbatiuk@gmail.com

Анотація—Запропоновано нову модель штучного нейрону, що певним чином узагальнює та вдосконалює відомі існуючі моделі сімейства ReLU: ReLU, PReLU та maxout моделі. Проаналізовані теоретичні переваги нової моделі по відношенню до вказаних існуючих. Проведено експериментальні порівняльні тести на реальних вибірках, які підтвердили апроксимуючу ефективність нової моделі.

Abstract—A new artificial neuron model is presented, which generalizes and in certain way improves known models that belong to ReLU “family”: ReLU, PReLU and maxout models. Its theoretical advantages in regards to mentioned known models are analyzed. Experimental comparison tests on real data sets were conducted, confirming the approximation effectiveness of the suggested model.

Ключові слова—апроксимація; нейронні мережі; штучний нейрон; ReLU нейрон

Keywords—approximation; neural networks; artificial neuron; ReLU neuron

I. ВСТУП

Математична задача апроксимації невідомої функції за наявною вибіркою потенційно зашумлених спостережень виникає при вирішенні великої кількості практичних задач – прогнозування часових рядів, класифікація зображень, розпізнавання мови – усі ці задачі в тому чи іншому вигляді зводяться до задачі апроксимації.

Останнім часом найкращих результатів у цій області досягають нейромережеві підходи. При цьому, саме

використання ReLU нейронів [1] дозволило значно поліпшити найкращу якість класифікації мережі у змаганні ImageNet. У даній роботі пропонується нова модель нейрону Sigmoid Piecewise (SP), яка певним чином узагальнює та вдосконалює моделі нейронів «сімейства» ReLU (ReLU, leaky ReLU [2], PReLU [3], maxout [4]).

II. ОПИС МОДЕЛІ НОВОГО НЕЙРОНУ

Неперервну функцію багатьох змінних $f: R^n \rightarrow R$ можна з будь-якою заданою точністю апроксимувати кусочно-лінійною функцією, що розбиває простір R^n на опуклі множини $S_1, \dots, S_N \subseteq R^n$, які не перетинаються, і на кожній множині задає деяку лінійну функцію $f_i(\vec{x}) = \vec{w}_i^T \vec{x}, i = 1, \dots, N, \vec{w}_i \in R^n$.

Розглянемо модель простого кусочно-лінійного нейрону як базового елемента для побудови таких складних кусочно-лінійних функцій у задачі апроксимації:

$$PL(\vec{x}; \vec{w}_+, \vec{w}_-, \vec{h}) = \begin{cases} \vec{w}_+^T \vec{x}, \vec{h}^T \vec{x} \geq 0 \\ \vec{w}_-^T \vec{x}, \vec{h}^T \vec{x} < 0 \end{cases}, \vec{w}_+, \vec{w}_-, \vec{h} \in R^n.$$

Вектори параметрів $\vec{w}_+, \vec{w}_-, \vec{h}$ мають наступний зміст:

- вектор \vec{h} задає гіперплощину, що розділяє простір R^n на 2 півпростори;

- вектор \bar{w}_+ задає ваги кусочно–лінійної функції PL на півпросторі, де $\bar{h}^T \bar{x} \geq 0$;
- вектор \bar{w}_- задає ваги кусочно–лінійної функції PL на півпросторі, де $\bar{h}^T \bar{x} < 0$.

Очевидно, що функція PL не є диференційовною в точках $x : \bar{h}^T \bar{x} = 0$. Якщо використовувати нейрони з такою моделлю у задачах апроксимації за навчальною вибіркою, застосування градієнтних методів для пошуку оптимальних значень параметрів буде дещо ускладненим. Для уникнення цієї проблеми пропонується наступна функція–модель нейрону:

$$SP(\bar{x}; \bar{w}_+, \bar{w}_-, \bar{h}) = \frac{\bar{w}_+^T \bar{x}}{1 + e^{-k\bar{h}^T \bar{x}}} + \frac{\bar{w}_-^T \bar{x}}{1 + e^{k\bar{h}^T \bar{x}}}; k > 0,$$

де, для усіх векторів \bar{x} , таких, що $\bar{h}^T \bar{x} \neq 0$, маємо:

$$k \rightarrow \infty : SP(\bar{x}; \bar{w}_+, \bar{w}_-, \bar{h}) \rightarrow PL(\bar{x}; \bar{w}_+, \bar{w}_-, \bar{h}).$$

Хоча функція SP «стає» функцією PL лише у ліміті, уже навіть при невеликих значеннях k вона дуже добре апроксимує цю функцію. У цьому можна впевнитися, записавши функцію PL наступним чином:

$$PL(\bar{x}; \bar{w}_+, \bar{w}_-, \bar{h}) = \bar{w}_+^T \bar{x} * step'(\bar{h}^T \bar{x}) + \bar{w}_-^T \bar{x} * step''(-\bar{h}^T \bar{x}),$$

де:

$$step'(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases}, step''(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x \leq 0 \end{cases}.$$

Власне, функція SP відрізняється від функції PL тим, що замість $step'(\bar{h}^T \bar{x})$ та $step''(\bar{h}^T \bar{x})$ використовуються множники $\frac{1}{1 + e^{-k\bar{h}^T \bar{x}}}$ та $\frac{1}{1 + e^{k\bar{h}^T \bar{x}}}$ відповідно. Порівняємо графіки функцій $step'(x)$ та $sigm(x; k)$ при $k = 10$:

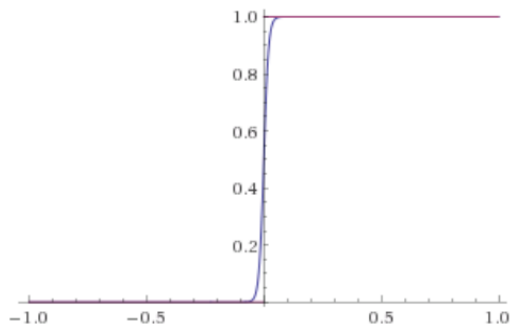


Рис. 1. Графіки функцій $step'(x)$ та $sigm(x, k=10)$

Як бачимо, апроксимація справді доволі точна навіть при відносно невеликому значенні параметру k .

Структурно нейрон з моделлю SP можна представити наступним чином:

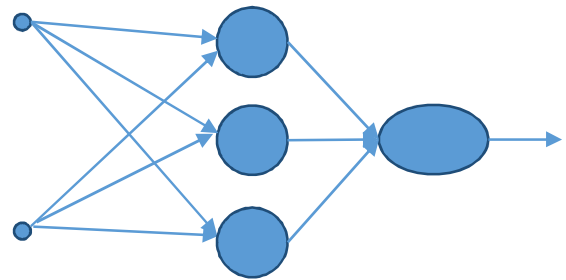


Рис. 2. Структура нейрону SP

Як відомо, класичний штучний нейрон [6] складається з 2 частин: блоку–зваженого суматору $S(\bar{x}; \bar{w}) = \bar{w}^T \bar{x}$ та функції активації $AF(x; \bar{\theta})$, на вхід якої подається вихід суматору, і разом ці 2 частини описують модель нейрону вигляду $f(\bar{x}; \bar{w}, \bar{\theta}) = AF(S(\bar{x}; \bar{w}); \bar{\theta})$. У випадку нейрону з математичною моделлю SP структура дещо складніша: маємо 3 блоки суматори – $S_+(\bar{x}; \bar{w}_+)$, $S_-(\bar{x}; \bar{w}_-)$, $S_h(\bar{x}; \bar{h})$ та, відповідно, функцію активації, що залежить від трьох змінних – $AF(S_+, S_-, S_h; k) = \frac{S_+}{1 + e^{-kS_h}} + \frac{S_-}{1 + e^{kS_h}}$, і використовуючи ці частини повна модель нейрону може бути записана як:

$$SP(\bar{x}; \bar{w}_+, \bar{w}_-, \bar{h}) = AF(S_+(\bar{x}; \bar{w}_+), S_-(\bar{x}; \bar{w}_-), S_h(\bar{x}; \bar{h}); k).$$

Нажаль, через те, що функція активації $AF(S_+, S_-, S_h; k)$ є функцією від 3 змінних, неможливо у загальному випадку зобразити її у вигляді двовимірного або тривимірного графіку. Однак можна це зробити для певних часткових випадків, наприклад якщо умовитися, що $S_- = CS_+$, де C – деяка константа. Ось як виглядає графік функції активації при $C = 5$ та $k = 2$:

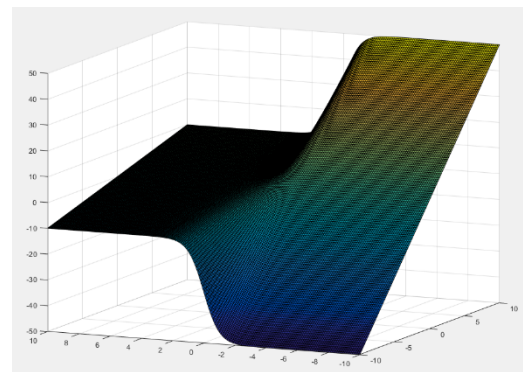


Рис. 3. Поверхня функції активації SP нейрону при $C = 5$ та $k = 2$

III. ПОРІВНЯННЯ З «РОДИНОЮ» ReLU НЕЙРОНІВ

У роботі [7] був запропонований нейрон з моделлю вигляду $ReLU(\bar{x}; \bar{w}) = \max(0, \bar{w}^T \bar{x})$, тобто нейрону, що

складається зі зваженого суматора та функції активації, графік якої має наступний вигляд:

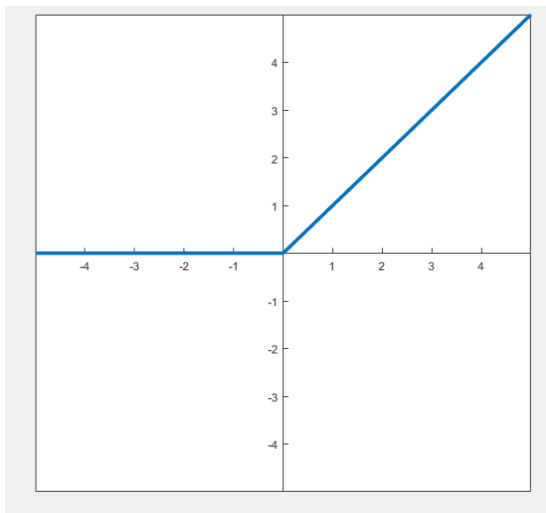


Рис. 4. Графік функції активації ReLU нейрону

Модель нейрону ReLU і деяких його модифікацій – Parametric ReLU (PReLU) нейрону, тахout нейрону є частковими випадками більш загальної моделі PL :

- $\text{ReLU}(\vec{x}; \vec{w}) = \text{PL}(\vec{x}; \vec{w}_+ = \vec{w}, \vec{w}_- = \vec{0}, \vec{h} = \vec{w})$,
- $\text{PReLU}(\vec{x}; \vec{w}, a) = \text{PL}(\vec{x}; \vec{w}_+ = \vec{w}, \vec{w}_- = a * \vec{w}, \vec{h} = \vec{w})$,
- $\text{taхout}(\vec{x}; \vec{w}_1, \vec{w}_2) = \text{PL}(\vec{x}; \vec{w}_+ = \vec{w}_1, \vec{w}_- = \vec{w}_2, \vec{h} = \vec{w}_1 - \vec{w}_2)$

У свою чергу, функція $\text{SP}(\vec{x}; \vec{w}_+, \vec{w}_-, \vec{h})$ при достатньо великому значенні k може точно апроксимувати функцію $\text{piecewise_linear}(\vec{x}; \vec{w}_+, \vec{w}_-, \vec{h})$ – отже модель SP є більш загальною, ніж ReLU, PReLU, та тахout, однак при цьому вона має більше параметрів, які потрібно налаштувати.

Іншою перевагою нейрону SP є можливість окремо налаштувати вектор параметрів, що задає роздільну гіперплощину і окремо – лінійні трансформації для кожного підпростору; в усіх нейронах «сімейства» ReLU є певний зв'язок між цими 3 векторами.

IV. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ НОВОГО НЕЙРОНУ НА РЕАЛЬНИХ ВИБІРКАХ

Виконаємо порівняльний тест ефективності нового нейрону у задачі апроксимації на реальних вибірках. Порівнювати будемо з нейроном ReLU. При заданій вибірці $\langle X, y : X \rightarrow R \rangle$ порівняльний тест складається з наступних кроків:

1. На першій ітерації тесту навчається 2 повнозв'язні мережі прямого поширення з одним прихованим шаром з 1 нейроном, та 1 вихідним лінійним нейроном: мережа з нейроном ReLU у прихованому шарі, та мережа з нейроном SP у прихованому шарі.

2. Якщо помилка обох мереж $< MSE_{target}$ – виконання тесту закінчується.

3. Після i ітерацій маємо мережу з i нейронами у прихованому шарі.

4. На ітерації $i+1$ до прихованого шару кожної мережі додається ще один нейрон відповідного типу, після чого повторно виконується навчання обох мереж, але усі параметри мереж, крім параметрів нових нейронів та їх ваг у вихідному лінійному нейроні, фіксуються.

5. Для кожної мережі розраховується i запам'ятовується поточна помилка MSE_{i+1} – тобто помилка відповідної мережі, досягнута при використанні $i+1$ нейронів.

6. Якщо на ітерації $i+1$ помилка обох мереж стала $< MSE_{target}$ – виконання тесту зупиняється.

7. Після зупинки тесту маємо дані вигляду «кількість нейронів у прихованому шарі» \rightarrow «досягнуте значення помилки апроксимації».

Перший порівняльний тест було виконано на часовому ряді денних значень курсу USD до EUR:

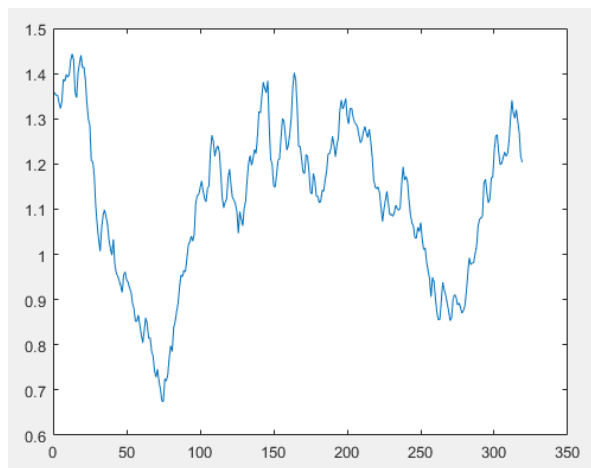


Рис. 5. Графік даних, що використовувалися для першого порівняльного тесту

Навчальна вибірка $\langle X, y : X \rightarrow \mathfrak{R} \rangle$ була побудована з вихідного часового ряду методом вкладення часових рядів з розмірністю вкладення $m = 5$ та горизонтом прогнозування $k = 4$. Середньоквадратична помилка наївної моделі вигляду $\hat{g}_{i+4} = g_i$ дорівнює $MSE_{naive} = 7.16 * 10^{-2}$.

Задамо рівень середньоквадратичної помилки, який потрібно досягнути $MSE_{target} = 5 * 10^{-2}$, виконаємо описаний тест і побудуємо графік залежності кількості нейронів від середньоквадратичної помилки мережі:

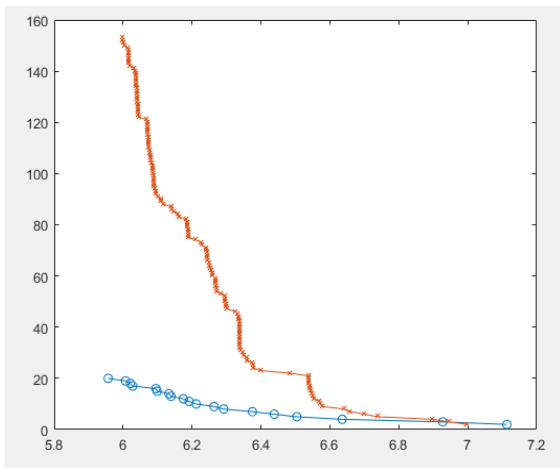


Рис. 6. Графік залежності кількості нейронів від досягнутого рівня помилки апроксимації у першому порівняльному тесті. Помаранчевий графік – для мережі з ReLU нейронами, синій – для мережі з SP нейронами

Починаючи приблизно зі значення помилки $MSE_{threshold} \approx 6.5 \cdot 10^{-2}$ для досягнення значення помилки було потрібно в 3 рази більше нейронів типу ReLU, ніж нейронів типу SP, після чого розрив у потрібній кількості нейронів тільки збільшувався, що свідчить про більшу ефективність нейрону типу SP з точки зору критерію «кількості параметрів, потрібних для досягнення заданого рівня помилки», якщо рівень помилки достатньо малий.

Другий тест було виконано на вибірці середніх процентних ставок за державними облігаціями в Австралії, 1969–1994 роки:

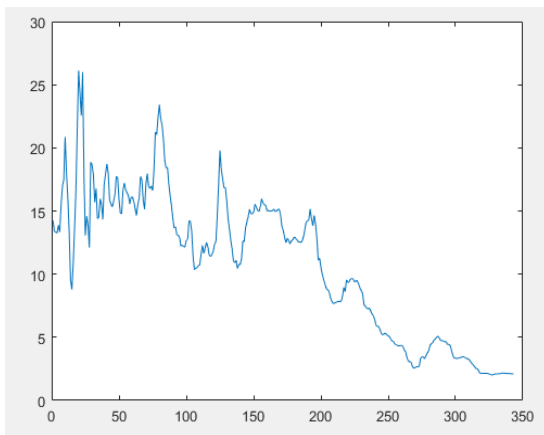


Рис. 7. Графік даних, що використовувалися для другого порівняльного тесту

Після виконання аналогічних кроків для отримання навчальної вибірки $\langle X, y: X \rightarrow R \rangle$ помилка наївної моделі склала $MSE_{naive} = 2.9157$. Задамо помилку, яку потрібно досягнути $MSE_{target} = 1.5$, побудуємо аналогічні графіки:

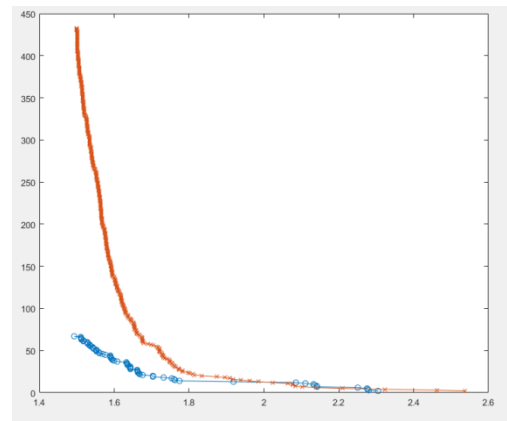


Рис. 8. Графік залежності кількості нейронів від досягнутого рівня помилки апроксимації у першому порівняльному тесті. Помаранчевий графік – для мережі з ReLU нейронами, синій – для мережі з SP нейронами

ВИСНОВКИ

Нейронні мережі показують найкращі результати у задачі апроксимації функції за вибіркою спостережень. Великий вплив на апроксимуючі здібності мережі мають математична моделі нейронів, з яких вона складається. У роботі запропоновано принципово нову модель нейрону Sigmoid Piecewise (SP), яка є узагальненням існуючих моделей сімейства ReLU нейронів – ReLU, PReLU, leaky ReLU та maxout. Нейрон з моделлю SP має перевагу через можливість незалежно налаштувати вектор–нормаль до роздільної площини нейрону і вектори–параметри лінійних функцій, які будуть застосовуватися до векторів входів з різних напівпросторів, утворених роздільною площиною. Ефективність нової моделі було перевірено на реальних вибірках, де він показав кращі апроксимуючі властивості по відношенню до ReLU нейрону при достатньо низькому значенні помилки апроксимації, яку потрібно досягнути.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Krizhevsky, Alex, Ilya Sutskever, and Geoffrey E. Hinton. "Imagenet classification with deep convolutional neural networks." In Advances in neural information processing systems, pp. 1097–1105. 2012.
- [2] Maas, Andrew L., Awni Y. Hannun, and Andrew Y. Ng. "Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models." In Proc. icml, vol. 30, no. 1, p. 3. 2013.
- [3] He, Kaiming, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, and Jian Sun. "Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification." In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp. 1026–1034. 2015.
- [4] Goodfellow, Ian J., David Warde-Farley, Mehdi Mirza, Aaron Courville, and Yoshua Bengio. "Maxout networks." arXiv preprint arXiv:1302.4389 (2013).
- [5] Hochreiter, Sepp. "The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions." International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems 6, no. 02 (1998): 107–116.
- [6] McCulloch, Warren S., and Walter Pitts. "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity." The bulletin of mathematical biophysics 5, no. 4 (1943): 115–133.
- [7] Nair, Vinod, and Geoffrey E. Hinton. "Rectified linear units improve restricted boltzmann machines." In Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10), pp. 807–814. 2010.

До Дослідження Командних Ігор на Базі Моделей з Асоціативною Пам'яттю та Моделей Штучного Життя

Макаренко О. С., Завертаний В.М.
Інститут прикладного системного аналізу
Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
makalex51@gmail.com

To a Study of Team Games on the Model Based on Associative Memory and Models of Artificial Life

Makarenko O., Zavertanii V.
Institute for Applied System Analysis
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Kyiv, Ukraine
makalex51@gmail.com

Анотація—Розглянуто деякі аспекти командних ігор, що потребують моделювання та формалізації. Як базовий приклад розглянуто футбол. Особливу увагу приділено врахування ментальних особливостей учасників гри. Обговорюються можливості використання моделей з асоціативною пам'яттю та концепцій штучного життя.

Abstract— Some aspects of team games that require modeling and formalization are considered. As a basic example, football is considered. Particular attention is paid to the consideration of the mental characteristics of the participants in the game. The possibilities of using models with associative memory and concepts of artificial life are discussed.

Ключові слова— командні ігри, ментальність гравців, сценарії, динаміка гри

Keywords— team games, mentality of players, scenarios, game dynamics

I. ВСТУП

Приблизно з початку 90-х років минулого сторіччя на стику біології, теорії автоматів та клітинних автоматів інформаційних технологій з'явилась відносно нова галузь досліджень – так звані моделі штучного життя (artificial life) [1-3]: (Langton, Epstein, Bert, Burtcev, Zavertaniy&Makarenko). Ця галузь виникла з потреби знайти відносно прості базові моделі для дослідження біологічних систем з урахуванням просторових аспектів, еволюції конкуруючих команд активних агентів,

виникнення соціальних груп та суспільних норм. Результати досліджень виявились досить цікавими та новими і набір проблем, що вивчаються в цьому підході, стає все ширшим та ширшим. В цій статті ми пропонуємо три таких нові задачі, до яких підходить застосування методів штучного життя.

II. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ГРИ У ФУТБОЛ

Гра футбол є дуже популярною та відомою всім. Менш відомими є намагання математичного моделювання такої гри та участь таких програм в спеціальних чемпіонатах світу. Раніше авторами робіт [4] було запропоновано зовсім новий підхід до моделювання динамічних аспектів футболу. Коротше кажучи, він полягає в застосуванні розбиття футбольного поля на клітини простору, так що в одній клітині може знаходитись або один гравець, або м'яч.

Звісно, маємо дві команди гравців з протилежними інтересами. Рух гравців проходить між клітинами, що дозволяє промоделювати його в порівнянні з іншими підходами (найбільше з використанням диференціальних рівнянь для обрахування траєкторії гравців та м'яча). Правила руху з клітини в клітину гравців та м'яча задані так, щоб нагадувати їх реальний рух (деталі такого підходу наведені в роботі [4] та в дипломній роботі А.Мусієнко, виконаній під керівництвом О.Макаренко]. Зауважимо, що навіть така спрощена модель показала результати, що нагадують реальну гру. Вже сама постановка та її

геометрія може бути зрозумілою в термінах теорії штучного життя (агент, команди агентів, клітинний простір і т.ін.). Але в моделювання футбольної гри можуть бути перенесені деякі інші (та, здається, більш глибинні та важливі) компоненти з теорії штучного життя.

В галузі досліджень моделювання спортивних ігор зазвичай присутні дві компоненти: моделювання руху гравців та проблема колективної взаємодії та прийняття рішень, та наступне їх виконання окремими гравцями, командою на полі в цілому та тренером в процесі гри та в процесі власне тренування та створення команди в сенсі цілісності, яка може вирішувати ті чи інші завдання в процесі гри та тренувань. Навіть задачі моделювання руху всіх гравців як єдиної команди є досить важкою задачею. Як приклади наведемо моделі концептуального типу руху окремих гравців, коли застосовуються диференціальні рівняння руху, а також власні розробки про застосування ідей клітинних автоматів [4, 5].

Але саме останній підхід, як здається, найкраще пристосований до розгляду проблеми колективної взаємодії. По суті тут можна виділити такі окремі підзадачі. Базовою одиницею є окремий гравець. У гравця можна виділити дві головні компоненти. Перша – це його умовно кажучи ‘фізичні’ або ‘фізіологічні’ компоненти. До них можна віднести його максимальну швидкість (на короткі та довгі дистанції), можливості прискорення, вагу, зріст, характеристики роботи з м’ячем: відсоток точних передач, радіус бачення поля, коефіцієнт не поступливості (відсоток виграних єдиноборств), гра головою, фізична витривалість гравців і багато інших. Також можна додати сюди набір статистичних характеристик, що, наприклад, використовувала група тренерів В.Лобановського (ТТД), а також які зазвичай зараз накопичуються в сучасних спортивних база даних про гравців, які функціонують на комерційній основі (наприклад, база в Гронінгенському університеті), які можна купити в розробників таких баз даних). Власне, до таких баз даних часто звертаються тренери або скаути, коли шукають певних гравців (з певними характеристиками) для вимог певних команд.

Всі ці використання даних про гравців дають відповіді на певні (в якомусь сенсі статичні, чи усереднені питання). Але, наскільки відомо авторам статті, ще не вирішеними є наступні питання (які, тим не менш, потрібно вирішити при моделюванні).

1. Що таке є стиль гри команд.

Відомо, що, грубо кажучи, інтуїтивно відомі такі стилі: атакуючий, повністю захисний, контр-атакуючий, тотальний та деякі інші. Це стосується і загальної характеристики команди, а також локального (тимчасово обраного під час гри стилю). Наприклад, команда, що виграє, може або «сушити» гру до кінця матчу, або може продовжувати нарощувати перевагу.

2. В чому полягає роль тренера в процесі конкретної гри.

Так, наприклад, тренер може робити заміни гравців (у професійних тренерів це часто призводить до успіху). Або тренер може дати перейти від атакуючого стилю до

оборонного при тих же гравцях. Але моделювання потребує формалізації та розробки моделей.

3. Що таке тренувальний процес, в чому полягає роль тренера, і що він може (або не може) зробити під час тренувань.

Скажімо, він, наприклад, хотів би, щоб гравці його команди бігали фізично швидше усіх інших команд. Але це інколи неможливо в принципі (не вийде бігати швидше за рекордсменів світу з бігу), або можна лише покращити швидкість на якусь величину в окремий період (наприклад, за рахунок великих фізичних навантажень в міжсезоння – відомо, що в період чемпіонатів не можна перевантажувати команду фізичними вправами та забігами).

Але набагато більш складними (і, можливо, більш важливими є питання створення взаємного порозуміння взаємодії гравців саме як одного цілого. Для цього тренер мусить знати, чого він хоче, а також розуміти, що він може змінити в мисленні гравців. Також можна виділити багато окремих підзадач та етапів в реалізації загальної мети.

III. ДО МОДЕЛЮВАННЯ ГРИ У ФУТБОЛ ЗА ДОПОМОГОЮ КОНЦЕПЦІЇ ШТУЧНОГО ЖИТТЯ ТА МОДЕЛЕЙ З АСОЦІАТИВНОЮ ПАМ’ЯТТЮ

Все це потребує підходів до формалізації та до моделювання. Саме підходи з концепції штучного життя можуть бути перспективними для вирішення цих питань.

Почнемо з окремого гравця. Перед грою тренер ставить команді та окремому гравцю завдання на гру. Він окреслює кожному гравцю завдання та типи взаємодії з іншими гравцями. Наприклад, можна строго обмежити рух захисника чітко окресленою зоною або персональну опіку нападника, або зонний захист; або, наприклад, зону відповідальності крайнього півзахисника, його дії – наприклад індивідуальний прорив до карного майданчика, або по можливості подачу у карний майданчик від кромки поля. Таких ‘інструкцій’ може бути дуже багато, і вони зазвичай нагромаджуються на тренуваннях. Це приклад колективної дії. Зазвичай, є індивідуальні завдання для гравців (наприклад, відпрацювання пробиття пенальті). Але саме командна взаємодія є найбільш складним аспектом в моделюванні.

Опишемо тут запропоновані можливості з підходу формалізації тренера і його дій. Досить правдоподібно, що гарний тренер має уявлення про ‘ідеальну’ гру його команди (в різних ситуаціях по ходу гри). Зазвичай, тренер протилежної команди теж має свій ‘ідеальний» план на гру.

Зауважимо, що коли команди починають гру, то, як правило, певний час буде боротьба на полі за встановлення контролю за грою. В основному це займає 5-10-15 хвилин. Також по ходу гри при зміні тактики, зазвичай, за такий же час проходить зміна гри (від захисту до атаки, коли треба забивати при небажаному рахунку).

Значимо, що в «ідеальному» плані на гру тренер має представлення, що мусить робити той чи інший гравець.

Але з тих чи інших причин (скажімо, небажання гравця або гравець – новачок для команди) план порушується. Частіше всього «ідеальний» план порушується через протидію іншої команди з своїм «ідеальним» планом. Зауважимо, що кожний з гравців теж має певне уявлення про персональне завдання на гру, деяке уявлення про завдання команди та можливі сценарії гри та їх зміну. Під час гри він має також уявлення про хід гри та наміри індивідуальних супротивників та команди суперника в цілому. До того ж, ці уявлення можуть бути неповними, або хибними. Всі ці питання вкладаються в загальну схему моделювання великих соціальних систем, що складаються з взаємодіючих індивідумів за допомогою моделей з асоціативною пам'яттю та внутрішньої структурою елементів (агентів) [6, 7].

Але важливим є те, що всі такі ментальні компоненти (уявлення учасників змагань і т.п.), в додаток до фізичних та фізіологічних теж змінюються з часом (як під час гри, так і на протязі сезону, або навіть багаторічного циклу). До речі, додаткове розуміння до поведінки гравців та команди в цілому дає урахування властивості передбачення розвитку подій [7], що дозволяє розглядати багатоваріантність розвитку подій на полі та прийняття рішень гравцями та командою в цілому. Моделі з класів [6, 7] добре пристосовані до врахування деяких аспектів таких змін.

Але аналіз постановок описаних вище проблем та існуючих моделей призводить до висновку, що концепції з галузі штучного життя, досліджені авторами [3, 4] також пристосовані до моделювання еволюції ментальних складових. Особливо корисними є нейропредставлення внутрішніх властивостей учасників гри та, особливо, їх еволюції як у індивідумів, так і командної гри. Зауважимо, що запропоновані представлення є корисними не тільки для моделювання спортивних ігор, але й для моделювання та керування поведінкою команд роботів.

ВИСНОВКИ

Таким чином, у запропонованій роботі обговорюються дослідницькі проблеми, які повинні розглядатись при моделюванні командних ігор. Наведено міркування про урахування металних властивостей учасників гри. Для цього запропоновано застосування клітинних автоматів, штучного життя, моделей з асоціативною пам'яттю та врахування передбачення.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] V.Zavertanyy, A. Makarenko, "Genotype dynamic for agent neuroevolution in artificial life model". *System analysis and informational technologies*, no.1, pp. 75-87, 2017.
- [2] V.Zavertaniy, A. Makarenko, Yaremcha, 2017. *Artificial Life Models in Cellular Resource Space*. Праці міжн. Конф. «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання», Івано-Франківськ-Яремча, травень 2017. С. 394-398
- [3] V.Zavertaniy, A. Makarenko, Aggressive and peaceful strategies in cellular resource space. *Int. J. of Control Systems and Robotics*, 2018. Vol.3. pp.8-21
- [4] Makarenko A., Krushinski D., Musienko A., Goldengorin B. (2010) Towards Cellular Automata Football Models with Mentality Accounting. In: Bandini S., Manzoni S., Umeo H., Vizzari G. (eds) *Cellular Automata. ACRI 2010. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6350. Springer, Berlin, Heidelberg
- [5] *Recent Advances in Nonlinear Dynamics and Synchronization: Theory and applications*. Eds. Kyamakya K., Halang W.A., Unger H., Chedjou J.C., Rulkov N.F. Li Z., Springer, Berlin/Heidelberg, 2009. 404 p. ISBN 978-3-642-04227-0. Chapter: Synchronization of Movement for Large – Scale Crowd. B. Goldengorin, D.Krushinski, A. Makarenko, pp. 277 – 303.
- [6] A. Makarenko, "Neuronet models of global processes with intellectual elements. International business: Innovationa", *Psychology, Economics*, vol.4, no.1(6), pp 65 – 83, 2013.
- [7] A. Makarenko, "Systems and models with anticipation in physics and its applications", *Journal of Physics: Conference series*, vol. 394, 012024, pp.1-6, 2012.

Modeling of Hydrodynamics Processes with Phase Transition

Gennadiy Sandrakov
Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
gsandrako@gmail.com

Моделювання Процесів Гідродинаміки з Фазовими Переходами

Геннадій Сандраков
Факультет комп'ютерних наук та кібернетики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Київ, Україна
gsandrako@gmail.com

Abstract—A new method of modeling for heterogeneous fluid dynamics processes with take of phase transitions like graphite-diamond will be presented. The method is based on a discretization of conservation laws for masses, momentums, and energies in integral and differential forms. The combination of Harlow's particle-in-cell method and Belotserkovskii's large particles method is used for computing by the method simulation.

Анотація—Новий метод моделювання процесів динаміки неоднорідної рідини з урахуванням фазових переходів графіт-алмаз буде представлено. Метод ґрунтується на дискретизації законів збереження маси, моментів і енергії в інтегральній і диференціальній формах. Комбінація методів частинок у комірках Харлоу та методу крупних частинок Білоцерківського використовується при чисельній реалізації цього методу.

Keywords—*modeling; hydrodynamics processes; phase transitions; conservation laws; graphite-diamond transition.*

Ключові слова—*моделювання; процеси гідродинаміки; фазові переходи; закони збереження; перехід графіт-алмаз.*

I. INTRODUCTION

A new method of direct parameter computing for some processes of heterogeneous fluid dynamics with take of phase transitions like graphite-diamond will be presented. It is supposed that the fluids are compressible and inviscid (non-viscous). Heterogeneities of the fluids are considered as small drops or particles of one fluid within other fluid. Total number of the drops may be large enough and the drops may have phase transitions. Thus simulations of the main fluid (or gas) with small transited drops dynamics are discussed. These are dynamics of multiphase flows really. Therefore it is possible

to use general multiphase flow models in the case. However, relevant equations are not complete as a rule. For example, there is a problem as to distribute energies between the phases in the model dynamics. Various physical experiments are necessary for solving of the problem in concrete cases. The situation is more difficult whenever phase transitions like graphite-diamond are possible.

Presented method is based on a discretization of conservation laws for masses, momentums, and energies in integral and differential forms. The discretization is natural and numerical simulations are realized as direct computer experiments for dynamics of main fluid together with transited drops without use multiphase flows approach. The method seems to be much more adequate to the physical and mathematical essence of the dynamics because conservation laws are correct on the discrete level at least.

The presented method is a combination of the Harlow's particle-in-cell method and Belotserkovskii's large particles method (see [1] and [2], for example). Let us recall some background of the methods before to give more details on the method combination.

Euler's and Lagrange's approaches are used simultaneously in the particles in cells method for homogeneous fluid (or gas). The method is based on a discretization of conservation laws for masses, momentums, and energies of the fluid in the following integral forms

$$\int_{V(t)} \rho'_i d\tau = - \int_{S(t)} (\rho W) \cdot N ds, \\ \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho W d\tau = - \int_{S(t)} p N ds, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho E d\tau = - \int_{S(t)} (pW) \cdot N ds,$$

where $V(t)$ and $S(t)$ are volume and surface of some Lagrange's domain in the fluid, N is an exterior normal to the domain, $p = p(\rho, E)$ and ρ, W, E are unknown density, velocity, and full energy. For example, the case of three dimension space may be discussed and therefore by definition ones have $W = (u, v, w)$.

II. MODELING METHOD

It is known [1] that the conservation laws are equivalent to conservation laws for masses, momentums, and energies of the fluid in the following differential forms

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho W) &= 0, \\ \frac{\partial \rho W}{\partial t} + \text{div}(\rho W \otimes W) + \nabla p &= 0, \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(\rho E W) + \text{div}(pW) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

where $W \otimes W$ is the tensor square of vector function $W = W(t, x, y, z)$ and x, y, z is a point of some domain Ω , which is filled by the heterogeneous fluid under consideration.

The time discretization in the method is natural. Simulations are conducted step by step with a small enough time interval Δt that starting from an initial configuration. The space discretization in the method is more complicated and dynamics are taking into consideration. The fluid region Ω is divided into cells with the small size Δx and the fluid filling every such cell is considered as a collection of a few particles or drops. Every such particle have own mass, volume, energy, and coordinates that are specified at an initial moment. In addition the density, velocity, and full energy $\rho^n, u^n, v^n, w^n, E^n$ are specified for every such cell with number i, j, k at the time moment $t = n\Delta t$.

Corresponding time step of the simulation is split up to three stages so the discrete conservation laws are faithful. For example, the total mass of particles under consideration is saved at every time step of such discretization.

On the first stage of the time step, the intermediate velocities $\bar{u}^n, \bar{v}^n, \bar{w}^n$ and the energy \bar{E}^n of particles from the sell with number i, j, k are calculated by the following formulas

$$\bar{u}_{i,j,k}^n = u_{i,j,k}^n - \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^n},$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{i,j,k}^n &= v_{i,j,k}^n - \frac{p_{i,j+1,k}^n - p_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^n}, \\ \bar{w}_{i,j,k}^n &= w_{i,j,k}^n - \frac{p_{i,j,k+1}^n - p_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^n}, \\ \bar{E}_{i,j,k}^n &= E_{i,j,k}^n - \\ &\frac{p_{i+1/2,j,k}^n u_{i+1/2,j,k}^n - p_{i-1/2,j,k}^n u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^n} - \\ &\frac{p_{i,j+1/2,k}^n u_{i,j+1/2,k}^n - p_{i,j-1/2,k}^n u_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^n} - \\ &\frac{p_{i,j,k+1/2}^n u_{i,j,k+1/2}^n - p_{i,j,k-1/2}^n u_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^n}, \end{aligned} \quad (3)$$

where

$$\begin{aligned} p_{i+1/2,j,k}^n &= \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i,j,k}^n}{2}, \quad p_{i-1/2,j,k}^n = \frac{p_{i,j,k}^n - p_{i-1,j,k}^n}{2}, \\ u_{i+1/2,j,k}^n &= \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n}{2}, \quad u_{i-1/2,j,k}^n = \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2}, \\ v_{i,j+1/2,k}^n &= \frac{v_{i,j+1,k}^n - v_{i,j,k}^n}{2}, \quad v_{i,j-1/2,k}^n = \frac{v_{i,j,k}^n - v_{i,j-1,k}^n}{2} \end{aligned}$$

and similar formula is used for $p_{i,j+1/2,k}^n, \dots, w_{i,j,k-1/2}^n$.

This is the Euler's stage for approximations of transport free momentums equations in (1) by the pressure forces for every sell. On the second stage, motions of the particles by the velocities are taking into account. This is the Lagrange's stage for an approximation of masses equation that is modeling of mass transports from a sell to surrounding sells. On the third stage, moving of the momentums and energy are calculated. This is the concluding stage for approximations of pressure free momentums and energies equations in (1) that are modeling of the momentums and energy transports by the dynamics from a sell to surrounding sells.

The approximations are rationale from physical and mathematical point of view since conservation laws are correct on the discrete levels during the courses of corresponding numerical simulations. Therefore the particle-in-cells method is effective enough for numerical evaluations of homogeneous fluid (or gas) dynamics by boundary conditions and external forces. Concrete types of fluid are defined here by a form of state equation $p = p(\rho, J)$, where $J = E - W^2 / 2$ is a notation for interior energy.

An essential problem is only that total number of particles may be very large. Indeed total number of cells must be large enough for best approximations and the number of particles at every cell must be large enough also. Moreover every such particle must have own mass, volume, energy, and coordinates. Thus there is massive data and the data is recalculated from step to step.

In order to avoid the problem it is possibly to use the large particles method. The time discretization in the method is similar to the discretization in the particles in cells method. The space discretization in the method is following. Fluid region is divided into cells with small size and the fluid filling every such cell is considered as a large particle or drop. Every such particle have own mass, volume and energy that are specified at an initial moment. In addition the density, velocity, and full energy are specified for every such cell at the moment. But the volume of particle is coincided with the volume of cell now. Therefore the mass and energy of particle are defined by the density and full energy. Thus the data is not so massive in the method.

Corresponding time step of the simulation is split up to three stages also and so the discrete conservation laws are faithful. The stages are similar to the stages of the particles in cells method, for example, formulas (3) are used on the first stage. Modifications are need only for modeling of the mass and momentums transports by the dynamics. For example, the mass transports are calculated as moving of corresponding share of large particle mass from the cell to corresponding surrounding sell by the following formulas

$$\begin{aligned}
M_{i+1/2,j,k}^n &= \bar{\rho}_{i+1/2,j,k}^n \bar{u}_{i+1/2,j,k}^n \Delta y \Delta z \Delta t, \\
M_{i-1/2,j,k}^n &= \bar{\rho}_{i-1/2,j,k}^n \bar{u}_{i-1/2,j,k}^n \Delta y \Delta z \Delta t, \\
M_{i,j+1/2,k}^n &= \bar{\rho}_{i,j+1/2,k}^n \bar{v}_{i,j+1/2,k}^n \Delta x \Delta z \Delta t, \\
M_{i,j-1/2,k}^n &= \bar{\rho}_{i,j-1/2,k}^n \bar{v}_{i,j-1/2,k}^n \Delta x \Delta z \Delta t, \\
M_{i,j,k+1/2}^n &= \bar{\rho}_{i,j,k+1/2}^n \bar{w}_{i,j,k+1/2}^n \Delta x \Delta y \Delta t, \\
M_{i,j,k-1/2}^n &= \bar{\rho}_{i,j,k-1/2}^n \bar{w}_{i,j,k-1/2}^n \Delta x \Delta y \Delta t,
\end{aligned} \tag{4}$$

where $\bar{u}_{i+1/2,j,k}^n, \bar{u}_{i-1/2,j,k}^n, \bar{v}_{i,j+1/2,k}^n, \dots, \bar{w}_{i,j,k-1/2}^n$ are calculated as in (3) and we use the equalities

$$\begin{aligned}
\bar{\rho}_{i+1/2,j,k}^n &= \begin{cases} \rho_{i,j,k}^n, & \text{if } \bar{u}_{i+1/2,j,k}^n \geq 0, \\ \rho_{i+1,j,k}^n, & \text{if } \bar{u}_{i+1/2,j,k}^n < 0, \end{cases} \\
\bar{\rho}_{i-1/2,j,k}^n &= \begin{cases} \rho_{i-1,j,k}^n, & \text{if } \bar{u}_{i-1/2,j,k}^n \geq 0, \\ \rho_{i,j,k}^n, & \text{if } \bar{u}_{i-1/2,j,k}^n < 0, \end{cases} \\
\bar{\rho}_{i,j+1/2,k}^n &= \begin{cases} \rho_{i,j,k}^n, & \text{if } \bar{v}_{i,j+1/2,k}^n \geq 0, \\ \rho_{i,j+1,k}^n, & \text{if } \bar{v}_{i,j+1/2,k}^n < 0, \end{cases} \\
\bar{\rho}_{i,j-1/2,k}^n &= \begin{cases} \rho_{i,j-1,k}^n, & \text{if } \bar{v}_{i,j-1/2,k}^n \geq 0, \\ \rho_{i,j,k}^n, & \text{if } \bar{v}_{i,j-1/2,k}^n < 0, \end{cases} \\
\bar{\rho}_{i,j,k+1/2}^n &= \begin{cases} \rho_{i,j,k}^n, & \text{if } \bar{w}_{i,j,k+1/2}^n \geq 0, \\ \rho_{i,j,k+1}^n, & \text{if } \bar{w}_{i,j,k+1/2}^n < 0, \end{cases}
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\bar{\rho}_{i,j,k-1/2}^n = \begin{cases} \rho_{i,j,k-1}^n, & \text{if } \bar{w}_{i,j,k-1/2}^n \geq 0, \\ \rho_{i,j,k}^n, & \text{if } \bar{w}_{i,j,k-1/2}^n < 0. \end{cases}$$

On the third stage, moving of the momentums $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$ and the energy E^{n+1} on the step $n+1$ are calculated by the following formulas

$$\begin{aligned}
\rho_{i,j,k}^{n+1} &= \rho_{i,j,k}^n - \\
&\quad - O_{xyz}^{-1} \{ M_{i+1/2,j,k}^n - M_{i-1/2,j,k}^n + M_{i,j+1/2,k}^n - \\
&\quad - M_{i,j-1/2,k}^n + M_{i,j,k+1/2}^n - M_{i,j,k-1/2}^n \}, \\
u_{i,j,k}^{n+1} &= \frac{\rho_{i,j,k}^n}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} u_{i,j,k}^n - \\
&\quad - O_{xyz}^{-1} \{ \bar{u}_{i+1/2,j,k}^n M_{i+1/2,j,k}^n - \bar{u}_{i-1/2,j,k}^n M_{i-1/2,j,k}^n + \\
&\quad + \bar{u}_{i,j+1/2,k}^n M_{i,j+1/2,k}^n - \bar{u}_{i,j-1/2,k}^n M_{i,j-1/2,k}^n + \\
&\quad + \bar{u}_{i,j,k+1/2}^n M_{i,j,k+1/2}^n - \bar{u}_{i,j,k-1/2}^n M_{i,j,k-1/2}^n \}, \\
v_{i,j,k}^{n+1} &= \frac{\rho_{i,j,k}^n}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} v_{i,j,k}^n - \\
&\quad - O_{xyz}^{-1} \{ \bar{v}_{i+1/2,j,k}^n M_{i+1/2,j,k}^n - \bar{v}_{i-1/2,j,k}^n M_{i-1/2,j,k}^n + \\
&\quad + \bar{v}_{i,j+1/2,k}^n M_{i,j+1/2,k}^n - \bar{v}_{i,j-1/2,k}^n M_{i,j-1/2,k}^n + \\
&\quad + \bar{v}_{i,j,k+1/2}^n M_{i,j,k+1/2}^n - \bar{v}_{i,j,k-1/2}^n M_{i,j,k-1/2}^n \}, \\
w_{i,j,k}^{n+1} &= \frac{\rho_{i,j,k}^n}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} w_{i,j,k}^n - \\
&\quad - O_{xyz}^{-1} \{ \bar{w}_{i+1/2,j,k}^n M_{i+1/2,j,k}^n - \bar{w}_{i-1/2,j,k}^n M_{i-1/2,j,k}^n + \\
&\quad + \bar{w}_{i,j+1/2,k}^n M_{i,j+1/2,k}^n - \bar{w}_{i,j-1/2,k}^n M_{i,j-1/2,k}^n + \\
&\quad + \bar{w}_{i,j,k+1/2}^n M_{i,j,k+1/2}^n - \bar{w}_{i,j,k-1/2}^n M_{i,j,k-1/2}^n \}, \\
E_{i,j,k}^{n+1} &= \frac{\rho_{i,j,k}^n}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} E_{i,j,k}^n - \\
&\quad - O_{xyz}^{-1} \{ \bar{E}_{i+1/2,j,k}^n M_{i+1/2,j,k}^n - \bar{E}_{i-1/2,j,k}^n M_{i-1/2,j,k}^n + \\
&\quad + \bar{E}_{i,j+1/2,k}^n M_{i,j+1/2,k}^n - \bar{E}_{i,j-1/2,k}^n M_{i,j-1/2,k}^n + \\
&\quad + \bar{E}_{i,j,k+1/2}^n M_{i,j,k+1/2}^n - \bar{E}_{i,j,k-1/2}^n M_{i,j,k-1/2}^n \},
\end{aligned} \tag{6}$$

where $O_{xyz} = \Delta x \Delta y \Delta z$ is the volume of the cell under consideration and the values $\bar{u}_{i+1/2,j,k}^n, \bar{u}_{i-1/2,j,k}^n, \dots, \bar{E}_{i,j,k-1/2}^n$ are calculated as in formulas (5).

Thus total mass of the fluid under consideration is saved at every time step of such discretization if there are no external mass sources under the simulation of course. For example, the

mass sources may be induced by boundary conditions and external forces that leads to corresponding modifications of conservation laws in (1) and on the discrete level also. The momentums and energy transports are modeling in similar manners. The approximations are rationale also. Thus large particles method is effective enough for numerical evaluations of homogeneous fluid dynamics also and the recalculated data is not very massive as in particle-in-cell method.

Let us return to presented method. The method is designed to numerical modeling of the main fluid with small transited drops dynamics. The time discretization in the method is as in above methods. The space discretization in the method is following. Heterogeneous fluid region is divided into cells with small size. The main fluid filling every such cell is considered as a large particle while the transited drops are considered as the collection of a few "small" particles in the cell. Every large particle have own mass, volume and energy that are specified at an initial moment. Every small particle have own mass, volume, energy, and coordinates that are specified at the moment. In addition the density, velocity, and full energy are specified for every such cell. This is a combination of above methods at the initial moment. Corresponding time step of the simulation is split up to three stages with additional preliminary stage.

On the preliminary stage, energies of large particle and small particles in every cell are distributed between the particles so that a pressure in the cell is uniform. Indeed the large particle induce some pressure by own state equation and the small particles induce some pressure by own state equation and it is natural to distribute energies of the particles so that the first pressure coincides with second pressure. Moreover on the stage, it is possible to observe phase transitions of the small particles by the pressure, for example. The phase transitions are realized if the pressure is more than critical pressure by the corresponding phase diagram. In the case the small particles may change own volume, energy, and state equation. Thus the heterogeneous fluid may have three or more phases. Thus, we use formulas (3) on the stage to calculate the intermediate velocities $\bar{u}^n, \bar{v}^n, \bar{w}^n$ and the energy \bar{E}^n of particles from the sell with number i, j, k at the time moment $t = n\Delta t$. The remaining stages are similar to the stages of above methods. For example, the mass transports are calculated as moving of corresponding share of large particle mass and small particles masses from the cell to corresponding surrounding sell by formulas (5), which are used in (6).

Thus total mass of the heterogeneous fluid under consideration is saved at every time step of such discretization. The momentums $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$ and the energy E^{n+1} on the step $n+1$ are modeling in similar manners by formulas (6). Thus, this is a combination of above methods from step to step during the courses of corresponding numerical simulations. The method seems to be reasonable for numerical evaluations of such heterogeneous fluid (or gas)

dynamics and the recalculated data is not very massive. On the other hand it is possible to use the particles in cells method with the preliminary stages for modeling of the dynamics. But the recalculated data is very massive in the case.

The presented method is designed to numerical modeling of following physical processes. Let consider graphite drops distributing uniformly in some fluid. More exactly, there is heterogeneous medium with graphite particles and the medium may be considered under high pressure as "fluid" with corresponding state equation. For example, we consider a cylinder of the medium that consist of copper with graphite particles. Let the cylinder be in an outside explosive tube device. Inducing detonation shock waves in the outside explosive tube device, we can observe dynamics of such shock waves in computer experiments by the method.

Results of the computer experiments may be found in [3]. The results were in agreement with known results of physical experiments. More details of the presented method and other modifications may be found in papers [4,5].

The presented method was applicable to numerical simulations of plasma dynamics according to [6]. The plasma may be considered as gas with ionized particles. The gas and particles were defined by corresponding state equations. Equations (2) were coupled with Maxwell's equations and on the discrete level also. Inducing motions of the heterogeneous plasma in some region it was possible to observe absorption of the ionized particles on relevant boundaries in computer experiments by the method coupling with appropriate method for Maxwell's equations [3, 6]. Alternative methods and corresponding references for the problem may be found in [7].

Nevertheless, the presented method seems to be perspective for numerical simulations of other absorption and diffusion processes in complex fluid and plasma dynamics.

REFERENCES

- [1] O. M. Belotserkovskij, Yu. M. Davidov, The large particles method in gas dynamics. Nauka, Moscow, 1982. (in Russian)
- [2] G. Shirkov, "Particle-in-cell method for numerical simulation of beam and plasma dynamics," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* no. 1 (558), pp. 317–324, 2006.
- [3] S. V. Boyko, G. V. Sandrakov, "Parameter computing of hydrodynamics processes with phase transitions," *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Series: Physics & Mathematics*, Special no. , pp. 11–16, 2013.
- [4] S. V. Boyko, G. V. Sandrakov, "Mathematical modeling of complex heterogeneous fluid dynamics," *Journal Num. and Appl. Math.*, no. 1 (104), pp. 109–120, 2011. (in Russian)
- [5] S. V. Boyko, G. V. Sandrakov, "Mathematical modeling of phase transitions graphite-diamond dynamics," *Journal Num. and Appl. Math.*, no. 2 (108), pp. 88–109, 2012. (in Russian)
- [6] S. V. Boyko, V. V. Mischenko, G. V. Sandrakov, "The numerical investigation method for evaporated plasma," *Journal Num. and Appl. Math.*, no. 2 (95), pp. 3–12, 2007.
- [7] G. R. Liu, M. B. Liu, Smoothed particle hydrodynamics. A meshfree particle method. World Scientific Publishing, New Jersey, 2003.

Задачі Динаміки Сумісного Руху Резервуару з Рідиною

Олександр Константинов

відділ математичних проблем механіки та теорії керування Інституту математики НАН України
Київ, Україна
akonst.im@ukr.net

Problems of the Dynamics of the Joint Motion of a Reservoir With a Liquid

Oleksandr Konstantinov

Department for Mathematical Methods of Mechanics and Control Theory
Institute of Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine
Kiev, Ukraine
akonst.im@ukr.net

Анотація—В роботі розглянуто дві постановки задачі щодо динаміки руху механічної системи «резервуар – рідина з вільною поверхнею». Перша постановка задачі описує узагальнення задачі Фарадея з можливістю горизонтального переміщення резервуару за рахунок коливань вільної поверхні рідини. Друга постановка задачі описує алгоритм побудови керування системою для забезпечення руху резервуару за заданим законом.

Abstract—Two problems of the dynamics of the mechanical system "reservoir - liquid with free surface" are considered. The first statement describes the generalization of the Faraday problem with the possibility of horizontal displacement of the reservoir due to the fluctuations of the free surface of the liquid. The second statement describes the algorithm for building control of the system to provide the movement of the reservoir according to the prescribed law.

Ключові слова—задача Фарадея, параметричний резонанс, додаткова ступінь вільності, зони нестійкості, зворотний зв'язок, модальне керування

Keywords—Faraday's problem, parametric resonance, added degree of freedom, unstable area, feedback, modal control

I. ВСТУП

Резервуари з рідиною є невід'ємною складовою частиною космічних апаратів з рідинним ракетним двигуном, літаків, гелікоптерів, нафтохранилищ та реакторів, що використовуються у хімічній та нафтохімічній промисловості. Останнім часом поширюється інтерес до задач динаміки та керування обмеженими об'ємами рідини у зв'язку з проблемами транспортування та збереження у складних умовах дії вібраційних, імпульсних, сейсмічних, вітрових та інших навантажень. З практики відомо, що

баки з рідиною у літаках, танкерах, залізничних та автомобільних цистернах суттєво впливають на стійкість та якість керування транспортними засобами. Найменш дослідженими в цій галузі залишаються задачі, пов'язані з динамікою системи «резервуар – рідина з вільною поверхнею», коли система здійснює вертикальні рухи за заданим законом або під дією зовнішніх сил і при цьому має додаткові ступені вільності. Таку задачу ми будемо називати узагальненою задачею Фарадея на відміну від класичної задачі [4], в якій резервуар може рухатись тільки вертикально. Друга постановка, яка описана в роботі, пов'язана з побудовою керування резервуаром, яке забезпечить його рух за заданим законом..

II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ «РЕЗЕРВУАР – РІДИНА З ВІЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ».

Розглянемо циліндричний резервуар, частково заповнений рідиною. Резервуар вважаємо абсолютно твердим тілом, яке може рухатись поступально під дією активних зовнішніх сил. Рідину вважаємо ідеальною, нестисливою, однорідною, а її початковий рух безвихровим. Відповідно до методики роботи О.С. Лимарченко [2], математична модель механічної системи «резервуар – рідина з вільною поверхнею» будується на основі варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського

$$\delta I = 0, \quad I = \int_{t_1}^{t_2} L dt,$$

при цьому функція Лагранжа задається у класичному вигляді Гамільтона - Остроградського як різниця між кінетичною та потенціальною енергією системи

$$L = \frac{1}{2} \rho \int_{\tau} (\bar{\nabla} \varphi + \dot{\bar{\varepsilon}})^2 d\tau + \frac{1}{2} M_T (\dot{\bar{\varepsilon}})^2 - (M_T + M_F) g \varepsilon_z - \frac{1}{2} \rho g \int_S (\xi^2 - H^2) dS + \bar{F} \cdot \bar{\varepsilon},$$

де ρ – щільність рідини; τ – область, яку займає рідина; $dt = r dr d\theta dz$ – циліндричні координати, при цьому вісь Oz має напрямок, протилежний напрямку вектора прискорення вільного падіння \bar{g} , а система координат пов'язана з нерухомим резервуаром; φ – потенціал швидкостей рідини; ξ – збурення вільної поверхні рідини; S – поперечний переріз циліндричного резервуару; M_T та M_F – маса резервуару та рідини відповідно; $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ – вектор переміщення резервуару у поступальному русі; \bar{F} – головний вектор зовнішніх сил, які діють на резервуар, відносно точки O .

Для ефективного застосування варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського поставлено задачу ввести у розгляд мінімальну кількість незалежних змінних, що описують рух резервуару з рідиною, тобто фактично будуються розклади шуканих змінних, які задовольняють наперед усі кінематичні граничні умови. Оскільки безвихровий рух ідеальної однорідної нестисливої рідини відповідно до теореми Лагранжа повністю визначається рухом її границь, то збурення вільної поверхні рідини ξ та радіус-вектор $\bar{\varepsilon}(t)$ повністю характеризують рух самої рідини, і тому потенціал швидкостей φ потрібно вважати залежною змінною.

Відповідно до методики роботи [2], розклади шуканих змінних представимо у вигляді

$$\xi(r, \theta, t) = \sum_i a_i(t) \psi_i(r, \theta), \quad \varphi = \sum_i b_i(t) \varphi_i(r, \theta, z),$$

де $a_i(t)$ – амплітуди форм коливань збуреної вільної поверхні рідини ξ . Системи функцій ψ_i і $\varphi_i = \psi_i \frac{\cosh \kappa_i(z+H)}{\kappa_i \sinh \kappa_i H}$ є розв'язком лінійної спектральної задачі [6] та мають вигляд

$$\psi_n(r, \theta) = J_n \left(\frac{\kappa_n^{(m)}}{R} r \right) \sin(n\theta) \cos(n\theta), \quad n = 0, 1, 2, \dots; \quad m = 1, 2, \dots$$

У роботі [2] розроблено метод виключення кінематичних граничних умов на вільній поверхні рідини, який дозволяє отримати дискретну модель механічної системи “резервуар – рідина з вільною поверхнею” мінімальної розмірності. На основі розробленого методу, варіаційних методів математичної фізики та асимптотичних методів нелінійної механіки у роботі [2] побудована математична модель, яка дозволяє дослідити поступальні та кутові рухи механічної системи “резервуар – рідина з вільною поверхнею” при різних видах кінематичного збурення та динамічного (силового та моментного) збурення. Ця модель представляє собою систему нелінійних звичайних диференціальних рівнянь другого порядку відносно

незалежних параметрів a_i – коефіцієнтів розкладу в ряд збурення вільної поверхні рідини ξ за формами коливань вільної поверхні ψ_i та ε_i – компонент вектора переміщень центру незбуреної вільної поверхні рідини відносно деякої нерухомої системи відліку

$$\begin{aligned} & \sum_i \ddot{a}_i \cdot \{ \beta_{ri}^q + \sum_j a_j \gamma_{ij}^q + \sum_{i,j} a_i a_j \delta_{rijk}^q \} + \\ & + \ddot{\bar{\varepsilon}} \cdot \{ \bar{B}_r^1 + \sum_i a_i \bar{B}_{ri}^2 + \sum_{i,j} a_i a_j \bar{B}_{rij}^3 + \sum_{i,j,k} a_i a_j a_k \bar{B}_{rijk}^4 \} = \\ & = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \dot{a}_i \dot{a}_j (\gamma_{ijr}^q - \gamma_{rij}^q) + \sum_{i,j,k} \dot{a}_i \dot{a}_j a_k (\delta_{ijk}^q - 2\delta_{rijk}^q) - \\ & - \frac{1}{2} g \alpha_r^s - \alpha_r^p \dot{a}_r - g N_r a_r + \dot{\bar{\varepsilon}} \cdot \{ \bar{B}_r^1 + \sum_i a_i (\bar{B}_{ir}^2 - \bar{B}_{ri}^2) + \\ & + \sum_{i,j} \dot{a}_i a_j 2(\bar{B}_{ijr}^3 - \bar{B}_{rij}^3) + \sum_{i,j,k} \dot{a}_i a_j a_k 3(\bar{B}_{ijk}^4 - \bar{B}_{rijk}^4) \}, \\ & \rho \{ \sum_i \ddot{a}_i [\bar{B}_i^1 + \sum_{i,j} a_j \bar{B}_{i,j}^2 + \sum_{i,j,k} a_j a_k \bar{B}_{ijk}^3] \} + (M_T + M_F) \ddot{\bar{\varepsilon}} = \\ & = \bar{F} - (M_T + M_F) g \bar{k} - \rho \{ \sum_{i,j} \dot{a}_i \dot{a}_j \bar{B}_{ij}^2 + \sum_{i,j,k} \dot{a}_i \dot{a}_j a_k \bar{B}_{ijk}^3 \}. \end{aligned} \quad (1)$$

Система (1)–(2) містить $N + 3$ рівнянь (N – кількість форм коливань рідини, що розглядаються) та описує динаміку сумісного руху резервуару та рідини при різних видах кінематичного збурення та динамічного (силового) збурення. Рівняння (1) описують динаміку амплітуд форм коливань вільної поверхні рідини, а рівняння (2) – динаміку резервуару, однак ці рівняння взаємозв'язані та містять сили взаємодії між компонентами механічної системи.

Сукупність коефіцієнтів, які входять до системи рівнянь (1) – (2), у рамках прийнятої моделі визначає властивості механічної системи, яка розглядається, та особливості прояву в ній внутрішніх лінійних та нелінійних механізмів взаємодії. Ці коефіцієнти визначаються через квадратури від розв'язку крайової задачі із визначення форм коливань вільної поверхні рідини. При цьому коефіцієнти $\beta_{ir}^q, \gamma_{ijr}^q, \delta_{ijk}^q, \alpha_r^s, N_r$ відповідають випадку коливань рідини у нерухомому резервуарі, а коефіцієнти $\bar{B}_r^1, \bar{B}_{ri}^2, \bar{B}_{rij}^3, \bar{B}_{rijk}^4$ відображають взаємозв'язок коливань рідини та поступального руху резервуару.

III. УЗАГАЛЬНЕННЯ ЗАДАЧІ ФАРАДЕЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ДОДАТКОВОГО СТУПЕНЯ ВІЛЬНОСТІ.

Розглянемо узагальнення задачі Фарадея, а саме будемо вважати, що резервуар здійснює вертикальні рухи за заданим гармонічним законом $\varepsilon_z = H_z \sin pt$, а також може здійснювати переміщення ε_y в горизонтальній площині вздовж вісі Oy . Як відомо із теорії

параметричних коливань [1], існують області в площині параметрів (p, H_z) , коли розв'язки рівнянь (1) – (2) будуть необмежено зростати, тобто області динамічної нестійкості. Побудова областей нестійкості буде відповіддю на питання: при яких значеннях параметрів зовнішнього силового збурення резервуару (p, H_z) система «резервуар – рідина з вільною поверхнею» при наявності будь-якого малого початкового збурення вільної поверхні рідини вийде на режим параметричного резонансу.

Відомо з теорії параметричних коливань [1], що дослідження нестійкості ведеться на основі лінеаризованих рівнянь руху і, практично для всіх випадків руху, в околі першого (нижчого) резонансу. Тому для побудови зон нестійкості лінеаризуємо систему рівнянь (1) – (2) для першої антисиметричної форми a_1 та переміщення ε_y в горизонтальній площині, доповнивши її параметричним вертикальним збуренням резервуару $\varepsilon_z = H_z \cos pt$, тобто отримуємо систему

$$\ddot{a}_1 + \lambda_1 \dot{\varepsilon}_y + \omega_1^2 (1 - \nu H_z p^2 \cos pt) a_1 = 0, \lambda_2 \ddot{a}_1 + \ddot{\varepsilon}_y = 0 \quad (3)$$

$$\text{де } \nu = \frac{B_{11}^{2z}}{gN_1}, \omega_1 = \frac{gN_1}{\beta_{11}^q}, \lambda_1 = \frac{B_1^{1y}}{\beta_{11}^q}, \lambda_2 = \frac{\rho B_1^{1y}}{M_T + M_F}.$$

Області необмежено зростаючих розв'язків відокремлюються від областей стійкості періодичними рішеннями з періодом T або $2T$. А саме, два розв'язки одного періоду обмежують область нестійкості, два розв'язки різних періодів – область стійкості [1]. Звідси випливає, що визначення границь областей нестійкості може бути зведено до пошуку умов, при яких диференціальні рівняння (3) мають періодичні розв'язки з періодами T або $2T$.

Отже, зони нестійкості для першого резонансу обмежені періодичними розв'язками з частотою $0.5p$, тому періодичні рішення системи рівнянь (3) представимо у вигляді

$$a = A_1 \cos \frac{pt}{2} + B_1 \sin \frac{pt}{2}, \varepsilon_y = A_2 \cos \frac{pt}{2} + B_2 \sin \frac{pt}{2},$$

та з використанням методу Бубнова-Гальоркіна отримуємо рівняння границь зон нестійкості

$$p = \frac{2\omega_1}{\sqrt{1 - 2\omega_1^2 \nu H_z - \lambda_1 \lambda_2}} \text{ та } p = \frac{2\omega_1}{\sqrt{1 + 2\omega_1^2 \nu H_z - \lambda_1 \lambda_2}}.$$

Як можна бачити з рівнянь границь зон нестійкості, наявність додаткового ступеня вільності призводить до підвищення частоти параметричного резонансу, при цьому вона тим вище, чим менше маса резервуару по відношенню до маси рідини, тобто чим більше вплив рухомості рідини. Крім того, чим менше маса резервуару по відношенню до маси рідини, тим ширше стає зона параметричного резонансу при збільшенні амплітуди зовнішнього збурення H_z .

IV. ЗАДАЧА ПОБУДОВИ КЕРУВАННЯ ЗІ ЗВОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГРАМНОГО РУХУ РЕЗЕРВУАРУ.

Якщо зовнішня сила $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$, яка діє на систему «резервуар – рідина з вільною поверхнею», має за мету здійснення необхідного закону руху або мінімізацію заданого функціоналу, то таку силу прийнято називати керуванням. Поставимо задачу побудови керування F_y , яке б забезпечувало програмний рух резервуару з рідиною у

напрямку Oy за заданим законом $\dot{\varepsilon}_y = f(t), \varepsilon_y = \int f(t) dt$. При цьому закон руху рідини задається відповідно до моделі «затверділої» рідини, тобто збурення вільної

поверхні рідини повинні бути відсутні $\xi(t) = \dot{\xi}(t) = 0$. Тоді програмне керування F_p будується відповідно до другого закону Ньютона та має вигляд $F_p = (M_T + M_F) \ddot{\varepsilon}_y$. Однак, оскільки у системі присутні збурення – збурення

початкових умов параметрів руху $\varepsilon_y, \dot{\varepsilon}_y, \xi, \dot{\xi}$ та коливання вільної поверхні рідини, введемо у систему лінійне керування із зворотним зв'язком FB та постійними коефіцієнтами підсилення $l_i, i = 1..4$, у вигляді

$F_{BK} = \sum_{i=1}^4 l_i x_i$, яке буде корегувати існуючі похибки – відхилення наявних значень параметрів руху від заданих програмних значень

$$x_1 = \xi(t), x_2 = \dot{\xi}(t), x_3 = \varepsilon_y - \int f(t) dt, x_4 = \dot{\varepsilon}_y - f(t).$$

Таким чином, повне керування, яке діє на систему, має вигляд

$$F_y = F_p + F_B = (M_T + M_F) \ddot{\varepsilon}_y - \sum_{i=1}^4 l_i x_i,$$

де коефіцієнти підсилення зворотного зв'язку l_i мають позитивні значення, а сам зворотний зв'язок є негативним для забезпечення стійкості системи керування.

Керування зі зворотним зв'язком побудуємо на основі лінеаризованої системи рівнянь руху (1) – (2), в якій буде враховано коливання вільної поверхні рідини ξ по першій антисиметричній формі a_1 з можливістю горизонтального переміщення резервуару по горизонтальній координаті eu . Відповідні рівняння мають вигляд

$$\ddot{a}_1 \beta_{11}^q + B_1^{1y} \ddot{\varepsilon}_y + gN_1 a_1 = 0, \rho B_1^{1y} \ddot{a}_1 + (M_T + M_F) \ddot{\varepsilon}_y = 0,$$

або

$$\ddot{a}_1 + \nu_1 \ddot{\varepsilon}_y + \omega_1^2 a_1 = 0, \nu_2 \ddot{a}_1 + M \ddot{\varepsilon}_y = F_y, \quad (4)$$

де позначено $\nu_1 = \frac{B_1^{1y}}{\beta_{11}^q}, \nu_2 = \rho B_1^{1y}, \omega_1^2 = \frac{gN_1}{\beta_{11}^q}$. Введемо також позначення для фазових змінних $x_1 = a_1(t)$,

$x_2 = \dot{a}_1(t)$, $x_3 = \varepsilon_y - \int f(t)dt$, $x_4 = \dot{\varepsilon}_y - f(t)$, $u = F_B$ та приведемо систему диференціальних рівнянь (3) до нормальної форми Коші

$$\dot{x} = Fx + Gu, \quad (5)$$

де x – вектор фазових змінних $[x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, u – керування, а матриця F та вектор G мають вигляд

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta_1 \\ 0 \\ \beta_2 \end{bmatrix},$$

з позначеннями $\lambda_1 = -\frac{M\omega_1^2}{M - v_1v_2}$, $\lambda_2 = \frac{v_2\omega_1^2}{M - v_1v_2}$, $\beta_1 = -\frac{v_1}{M - v_1v_2}$, $\beta_2 = \frac{1}{M - v_1v_2}$. У системі (5) фазові змінні $[x_1, x_2, x_3, x_4]$ мають сенс збурень, тобто відхилень дійсних значень параметрів руху системи від програмних.

Побудоване керування зі зворотним зв'язком повинне забезпечити асимптотичну стійкість руху системи у збуреннях. Для його побудови будемо використовувати метод, розроблений В.В. Новицьким [3]: рівняння системи у збуреннях (5) перетворюються у форму, канонічну за фазовими змінними. Матриця T для такого перетворення у $= Tx$ має вигляд

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} -\frac{\beta_2}{\beta_1(\beta_1\lambda_2 - \beta_2\lambda_1)} & 0 & \frac{1}{\beta_1(\beta_1\lambda_2 - \beta_2\lambda_1)} & 0 \\ 0 & -\frac{\beta_2}{\beta_1(\beta_1\lambda_2 - \beta_2\lambda_1)} & 0 & \frac{1}{\beta_1(\beta_1\lambda_2 - \beta_2\lambda_1)} \\ \frac{1}{\beta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\beta_1} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{T}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \beta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_1 \\ \beta_1\lambda_2 - \beta_2\lambda_1 & 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & \beta_1\lambda_2 - \beta_2\lambda_1 & 0 & \beta_2 \end{bmatrix},$$

а система (5) після перетворення

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u. \quad (6)$$

У систему (6) підключимо зворотний зв'язок $u = -\sum_i k_i y_i$ та отримаємо рівняння замкненої системи

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 & \lambda_1 - k_3 & -k_4 \end{bmatrix} y. \quad (7)$$

Необхідно знайти значення коефіцієнтів k_i зворотного зв'язку, які б забезпечили асимптотичну стійкість замкненої системи (7). Як відомо [3], коефіцієнтами характеристичного полінома матриці у формі (7) є елементи нижнього рядка, тому характеристичний поліном системи (7) має вигляд

$$f(z) = z^4 + k_4 z^3 + (k_3 - \lambda_1) z^2 + k_2 z + k_1. \quad (8)$$

Якщо задані корені характеристичного полінома (8) є негативними дійсними числами або комплексними числами із негативною дійсною частиною, то система буде асимптотично стійкою.

ВИСНОВОК

Розглянуто узагальнення класичної задачі Фарадея про параметричний резонанс вільної поверхні при вертикальних коливаннях резервуару. Внесення в систему додаткового ступеня вільності (можливість горизонтального руху резервуару) приводить до підвищення частоти параметричного резонансу, причому вона тим вище, чим менше маса резервуару по відношенню до маси рідини. При вертикальному збуренні руху резервуару при наявності можливості горизонтального руху системи на відміну від класичної задачі Фарадея динамічні процеси в системі розвиваються як сукупність параметричного резонансу і вимушених коливань, тому в цьому випадку на будь-якій частоті можливий вихід на нелінійний режим (суттєве зростання амплітуд коливань). Розглянуто також задачу побудови керування системою зі зворотним зв'язком на основі приведення системи у збуреннях до канонічної форми та використання модального підходу для забезпечення асимптотичної стійкості системи.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 600 с.
- [2] Лимарченко О.С., Ясинский В.В. Нелинейная динамика конструкций с жидкостью. – Киев: НТТУ «КПИ», 1997. – 338 с.
- [3] Новицький В.В. Декомпозиція та керування в лінійних системах. – Київ: Інститут математики НАН України, 2008. – 252 с.
- [4] Faraday M. On the forms and states assumed by fluids in contact vibrating elastic surfaces // Phil. Trans. of the Royal Society of London. – 1831. – 121. – P. 319-346 pp.

Синтез Оптимального Керування Динамічними Процесами в Газотранспортних Системах

Назар Притула

відділ розроблення систем оптимального планування і прогнозування режимів роботи ГТС
Філія «Науково-дослідний інститут транспорту газу»
ПАТ «Укртрансгаз»,
Львів, Україна
nazar.prytula1@gmail.com

Мирослав Притула

відділ розроблення систем оптимального планування і прогнозування режимів роботи ГТС
Філія «Науково-дослідний інститут транспорту газу»
ПАТ «Укртрансгаз»
Львів, Україна
myroslav.prytula@gmail.com

Synthesis of Optimal Control of Dynamic Processes in GTS

Nazar Prytula

dept. of designing systems of optimal scheduling and forecasting operating modes of GTS
Research and Design Institute of Gas Transport of PJSC «Ukrtransgaz»
Lviv, Ukraine
nazar.prytula1@gmail.com

Myroslav Prytula

dept. of designing systems of optimal scheduling and forecasting operating modes of GTS
Research and Design Institute of Gas Transport of PJSC «Ukrtransgaz»
Lviv, Ukraine
myroslav.prytula@gmail.com

Анотація—У роботі поставлена проблема синтезу управління газотранспортною системою як складною відкритою динамічною системою із розподіленими параметрами в обмежених просторово-часових областях. Для рішення проблеми розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для моделювання впливу зміни початково-крайових умов на параметри розподілу потоків у залежності від зовнішніх керованих та некерованих динамічних збурень. Поставлені задачі формування параметрів управління газодинамічними процесами активними об'єктами для забезпечення оптимальності потокорозподілу в системі за енергетичним критерієм. Приведені результати апробації розробленого алгоритмічного та програмного забезпечення. Приведено аналіз числових експериментів на розробленому програмному забезпеченні з використанням реальних даних, який підтвердив правильність вибраного напрямку досліджень.

Abstract—The problem of the synthesis of gas transmission system control as a complex open dynamic system with distributed parameters in limited spatio-temporal domains is presented. To solve this problem algorithms and software for modeling the effect of changing the initial boundary conditions on the flow distribution parameters, under conditions of external controlled and uncontrolled dynamic perturbations, have been developed. The tasks of finding parameters of control of gas-dynamic processes by active facilities are stated for ensuring

optimal flow distribution in the system by the energy criterion. The results of approbation of the developed algorithms and software are shown. The analysis of numerical experiments on the developed software using real data is presented, which confirmed the correctness of the chosen research direction.

Ключові слова—Газотранспортна система, оптимальний режим роботи, оптимальне керування, алгоритми оптимізації, програмний комплекс, компресорна станція

Keywords—Gas transmission system; optimal operation mode; optimal control; optimization algorithms; software; compressor station

I. ВСТУП

Існує багато актуальних, в самих різних областях, задач керування об'єктами з розподіленими параметрами, які описуються рівняннями в частинних похідних, наборами емпіричних відношень неперервного та дискретного типів. Вони характеризуються високим рівнем актуальності і значною специфікою, яка породжена просторовою розподіленістю керованих величин, керованих впливів та нескінченною розмірністю просторових станів [1-3].

Тепер отримано багато фундаментальних результатів, які покладені в основу теорії керування системами з розподіленими параметрами [4-6]. Однак залишилися

питання щодо розроблення конструктивних методів й техніки розв'язування конкретних задач керування із врахуванням особливостей предметної області. У роботі розглядаються деякі аспекти розвитку теорії керування конкретними складними системами на прикладі газотранспортної системи (ГТС).

Режими ГТС характеризуються частою зміною точок входу імпортованого газу, непроектними режимами функціонування (реверсне транспортування імпортованого газу на багатьох ділянках газопроводів), коливаннями транзиту та споживання газу в значних об'ємах тощо. А тому ситуація, яка складається, вимагає прийняття швидких та ефективних рішень щодо режимів експлуатації об'єктів та системи в цілому. Аналіз функціонування технологічних об'єктів системи транспортування газу з складною технологічною схемою дозволив визначити особливості її роботи.

В системі відбувається постійна зміна як режимних параметрів об'єктів ГТС, так і їх стану. Постійно проявляється унікальність об'єкту, яка полягає в індивідуальності структури, наборі технологічних об'єктів та їх параметрів, умовах функціонування технологічного обладнання та системи забезпечення їх керованості, постійній зміні складу елементів ГТС і структурних зв'язків між ними в залежності від режиму роботи.

Система може перебудувати в нескінченній кількості станів. Кожен стан, який визначається набором параметрів, повинен задовольняти набору обмежень, або належати певній багатомірній динамічній області. Важливими характеристиками стану є її стійкість до зовнішніх збурень та енергоефективність. Для забезпечення найкращих інтегральних характеристик системи на значних часових інтервалах необхідно забезпечити процес керування наявними обмеженими ресурсами. У такому випадку виникають задачі формування оптимальних параметрів керування.

II. ГАЗОТРАНСПОРТНА СИСТЕМА ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

Всі технологічні об'єкти, які приймають участь в транспортуванні та зберіганні газу об'єднані в єдиний комплекс трубопроводами з довжинами від кількох метрів до ста і більше кілометрів та діаметрами які мають від 100 до 1420 мм. Рельєф траси прокладання трубопроводів є змінним і на десятках кілометрів може мінятися до кількох сотень метрів. Робочий тиск в трубах доходить до 7.5 МПа. Компресорна станція (КС) може складатися із декількох цехів. Досить часто цехи відрізняються типом газоперекачуючих агрегатів (ГПА), як за потужністю (від 4.0 до 27.0 МВт) так і типом приводу (електропривід, газотурбінна установка) для відцентрового нагнітача. На багатьох підземних газосховищах працюють компресори поршневого типу. Технологічні схеми окремих КС можуть забезпечити її роботу в дві – три ступені. На ГТС є присутніми велика кількість різнотипної запірної та регулюючої арматури.

Вибір і підтримка найбільш оптимального режиму газотранспортної системи, при існуючій схемі взаємодії

централізованої і розподіленої схеми керування здійснюється способом зміни режиму роботи системи магістральних газопроводів.

Структура системи керування режимами роботи ГТС та його об'єктів включає підсистеми: актуалізації технологічних схем та даних; прогнозування та формування вхідних даних; ідентифікації параметрів моделей; розрахунку інтегральних параметрів режиму; пошуку оптимального розв'язку та представлення результатів моделювання [8].

Складність ідентифікації параметрів моделей та стану об'єктів пов'язаний із значним рівнем невизначеності режимної інформації, яка, в основному, проявляється у відсутності замірів витрат, тисків і температур в багатьох вузлах газотранспортної системи. Проведений аналіз видів невизначеностей, характерних для газотранспортної системи, показав: недостатню точність і неповноту оперативної інформації яка породжується похибкою вимірювання, малопродуктивною системою передачі даних, асинхронністю вимірювання і поступлення, недоступністю до частини інформації тощо. Крім цього неточність моделей пов'язана із допущенням про однорідність певних підсистем за параметрами гідравлічного стану, спрощенням, яке пов'язане з неврахуванням в повній мірі рельєфу прокладання трубопроводів, введенням нечітких моделей типу термо - гідравлічних еквівалентів, неврахуванням у повній мірі суттєвої не лінійності та часткового використання паспортних характеристик тощо.

III. ЗМІСТОВНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Математична модель задачі оптимізації процесу керування формується на основі моделей газових потоків у технологічних схемах, моделі структури об'єкту та балансових відношеннях на стику декількох об'єктів, початкових та крайових умов [7,10,11]. Крім цього задані технологічні обмеження, обмеження на величину керуючих впливів і на режимні параметри роботи, математичний опис показників ефективності (критерію якості) процесу керування. Вважаємо, що математична задача процесу керування є цілком визначеною (є коректною), тобто з достатнім рівнем адекватності описана математична модель газових потоків у системі.

Математична модель керованого процесу в системі S газопроводів ґрунтується на понятті змінних стану (фазових координат), які в кожен момент часу споглядання $t_i \in [t_0, t_1]$ можуть бути описані скінченним числом дійсних чисел $x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_n(t_i)$. Цей набір чисел можна вважати компонентами деякого вектору $x(t_i) = (x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_n(t_i))^T$ - вектор стану системи. При зміні часу споглядання змінюється і вектор x . Зміна вектору стану змінюється під дією і прикладеного впливу (внутрішнього та зовнішнього). Множина всіх векторів стану в різні моменти часу $t_i \in [t_0, t_1]$ утворює n -вимірний простір станів детермінованої системи $X^n \subset R^n$ (n - вимірний фазовий простір). Питання щодо мінімальності компонент вектору станів не стоїть, навпаки

компонентів (заміри параметрів газу) є недостатньо, з точки зору ідентифікації параметрів моделей кожного об'єкту. В ході розвитку системи число компонент і точність їх вимірювання може змінюватися.

Зміна стану (еволюція) системи S на часовому інтервалі часу $T = \{t, t_0 \leq t \leq t_1\}$ описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних [7] при заданих початкових та крайових умовах, алгоритмічними моделями активних об'єктів (компресорних станцій) і моделями дискретної дії – запірної та регулюючої арматури.

Керована змінна $u = (u_1(t, x), u_2(t, x), \dots, u_m(t, x))$, окремі компоненти якої можуть залежати від однієї змінної - від часу або від стану об'єкту, входить тільки в модель активних об'єктів і не входить в рівняння руху газу на ділянках газопроводів. За керовану змінну можна взяти одну із величин – коефіцієнт стиску газу, обороти відцентрових нагнітачів, потужність ГПА тощо. Між вказаними величинами є однозначний зв'язок за відомих крайових умов на тиски та витрату газу. Керована змінна породжує узгоджені крайові умови на витрату та тиск газу на кінцях ділянок газопроводів, які примикають до активних об'єктів у процесі їх взаємодії.

Величина керуючого впливу визначається на основі вимірювання, чи розрахунку наявного стану системи $x(t)$ в момент часу t . Кожному вибору вектору параметрів керування u і наявного стану відповідає послідовність $x(t, x_0, t_0)$, яка називається фазовою траєкторією системи S . Пара $\{u(t), x(t)\}$ називається процесом керування, чи режимом. Поведінка вектору керування не є довільним. Він має свої допустимі межі $u \in [u_{min}, u_{max}]$, які є змінними і залежать від крайових умов та сформованого режиму роботи КС.

Заданий режим роботи ГТС в момент часу t_0 . Це може бути як стаціонарний, так і нестаціонарний режими. Задання нестаціонарного режиму вимагає знання розподілу режимних параметрів вздовж ділянок газопроводів. Прогнозований оптимальний режим на певний момент часу t_1 буває, в основному, стаціонарним. Крім цього, заданими є крайові умови на витрату газу та, для контрактних умов, на параметри газу для зовнішніх вхідних та вихідних потоків. Відомим ще є інтервали зміни тисків. Можливі додаткові умови на параметри газу, які в роботі не розглядаються - на точку роси та його температуру.

Основна задача – перейти з наявного в прогнозований режим при задоволенні певних критеріїв. Розглянемо проблеми які при цьому виникнуть. Перша проблема – об'єми акумульованого газу в режимах поточному та прогнозованому можуть суттєво відрізнятися. В цьому випадку виникне задача пошуку способу забезпечення зміни об'ємів акумульованого газу у системі. Якщо виявиться, що таких ресурсів немає, то доведеться змінити прогнозований режим. Інша проблема – чи система

встигне за час $\Delta t = t_1 - t_0$ досягнути параметрів прогнозованого режиму використовуючи наявні ресурси за потужністю і не порушуючи технологічних обмежень. На етапі планування прогнозованих режимів відповіді на поставлені запитання проблематично. У цьому можна переконатися тільки в процесі моделювання. Швидкість перехідних процесів бажано синхронізувати зі швидкістю перехідних режимів, щоб не виникало суттєве розбалансування системи.

Автоматизація процесу синтезу керування забезпечується:

- Постійним аналізом, на кожному ітераційному кроці процесу моделювання, зміни контрольованих параметрів та їхньої швидкості.
- Введенням в режим запланованого активного об'єкту шляхом зміни його потужності в таким чином, щоб забезпечити попадання контрольованих параметрів у спланований коридор.
- Регулюванням швидкості зміни значення контрольованих параметрів при їх наближенні до меж заданих коридорів.
- Виводом із режиму активних об'єктів при неможливості підтримки ними контрольованих параметрів у розрахованих коридорах.
- Регулюванням потужністю активних об'єктів для дотримання значень контрольованих параметрів у межах спланованих коридорів.
- Редагуванням технологічних коридорів із використанням балансових показників.
- Можливістю втручатися в процес керування – зупиняти роботу програми моделювання, повертатися в часі назад та редагувати параметри керування.
- Автоматизацією процесу реалізації перехідних режимів, супроводження режимів у технологічних межах.”

Розв'язування таких задач пов'язано з багатьма труднощами, які полягають в:

- просторовій розмірності системи та розмірності за кількістю та різноманітністю об'єктів;
- складності технологічних процесів, систем керування, виконавчих механізмів, метрологічного забезпечення тощо;
- математичному представленні моделей газових потоків в об'єктах системи та складністю їх інтеграції в єдину термо – гідравлічну модель системи;
- алгоритмічному забезпеченні автоматизації процесів розв'язування режимних задач (автоматична побудова математичної моделі системи при зміні вхідних, крайових умов, зміни

топології системи та типів технологічного обладнання).

IV. ЕТАПИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ

Формування параметрів управління починається з аналізу прогнозного режиму на заданому інтервалі часу, який необхідно, за заданим критерієм близькості режимів, розбити на часові підінтервали. Для кожного підінтервалу часу формується режим близький до оптимального за енергетичним критерієм. Сформовані режими дозволяють визначити інтервали зміни (часові коридори) контрольованих параметрів, які служать умовами, при їх порушенні контрольованими параметрами, відбуваються зміни керування активними об'єктами системи. Швидкість зміни параметрів керування вибирається з умови ощадливої технічної експлуатації активних об'єктів.

Систему планування режимів повинна задовольняти певним вимогам. Вона повинна забезпечити: планування прогнозованих режимів за заданими критеріями та із високим рівнем автоматизації процесу планування. В процесі планування повинні враховуватися всі наявні технологічні обмеження.

В області точності вхідних даних існує не єдиність розв'язку задач планування режимів для ГТС з компресорними станціями. Серед близьких режимів за критерієм оптимальності слід вибрати той який буде вимагати мінімальну кількість переключень у перехідних режимах.

Розв'язування оптимізаційних задач дискретними методами цільового перебору вимагають обмеження на критерій оптимальності – виконання властивості адитивності цільової функції. В цьому випадку можна суттєво зменшити складність перебірних методів. Для зменшення переборів та побудови швидких методів пошуку оптимальних режимів запропоновано декілька підходів. У всіх підходах вимагається представлення структури ГТС як об'єднання більш простих структур.

Висновки

У роботі запропоновано один із можливих підходів щодо розв'язування проблеми синтезу оптимального керування. Реалізація оптимального керування в реальному часі у процесі її руху (ситуативне керування) супроводжується фазовою траєкторією динамічної системи, коли керування формується як функція поточних фазових координат та крайових умов. На складність алгоритмів впливає наявність у системі дискретного впливу на крайові умови, структуру системи, на стан активних та пасивних об'єктів. Розривність розв'язків, часта зміна структури системи і відповідно зміна моделі її роботи, поєднання швидких та короткотермінових процесів, слаба прогнозованість зовнішніх та внутрішніх впливів на роботу системи, можлива зміна критерію якості роботи та керуючих впливів вимагають розробки адекватних методів формування параметрів керування таких систем. В умовах нечіткого прогнозу вибрати із

множини параметрів керування оптимальне за заданим критерієм якості керування в більшості випадків є проблематичним. Часто буває достатнім, якщо вдається визначити тільки межі зміни таких параметрів. Розроблене математичне та програмне забезпечення, як складова частина системи прийняття оперативних рішень для керування роботою об'єктами ГТС, включає ефективне розв'язання наступного комплексу задач:

- розрахунок і оптимізацію режимів роботи компресорних станцій,
- розрахунок режимів роботи підземних сховищ газу,
- інтерпретацію результатів розрахунків на технологічних схемах ГТС,
- формування робочих характеристик для кожного елемента із множини варіантів роботи КС для заданої схеми включення агрегатів в роботу із наперед заданою надійністю,
- розрахунок паливно-енергетичних затрат та формування оптимальних режимів роботи КС,
- моделювання й прогнозування роботи системи транспортування газу в умовах стаціонарного й нестаціонарного режимів її роботи,
- формування допустимих оптимальних експлуатаційних режимів роботи системи транспортування газу.

Приведені постановки задач та методи їх розв'язування апробовані на реальних прикладах. Значний ефект отримується від зниження енергетичних затрат та підвищення надійності газотранспортної системи за умов ефективною експлуатації технологічного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко "Математическая теория оптимальных процессов," М.: Наука, 1969, 392 с.
- [2] Р. Беллман "Динамическое программирование," М., 1960, 326 с.
- [3] А. Я. Фридман, О. В. Фридман, А. А. Зуенко "Ситуационное моделирование природно-технических комплексов," СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 436 с
- [4] R. Bellman, L. Zadeh "Decision making in fuzzy environment," *Manag. Sci.*, 1970, no. 4, pp. 141–164.
- [5] H. K. Lam, F. H. F. Leung "Stability Analysis of Fuzzy-Model-Based Control Systems" Berlin: Springer, 2011, p. 246
- [6] А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров "Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования," Рига: Зинатне, 1990, 184 с.
- [7] В. С. Кулик, А. С. Казак, И. Ю. Храбров "Оптимизация режимов функционирования магистральных систем транспорта газа при изменении производительности," *Трубопроводный транспорт: теория и практика*, 2015, №5, С. 38–42.
- [8] N. Prytula "Mathematical modelling of dynamic processes in gas transmission," *Econtechmod. An international quarterly journal*, 2015, Vol.4, no. 3, pp. 57–63

Моделювання Катастрофічних Приземлень Квадрокоптера

Благітко Б.Я., Мочульський Ю.С.

Кафедра радіофізики та комп'ютерних технологій
ЛНУ імені Івана Франка
Львів, Україна
blagitko@gmail.com, mochulsky@ukr.net

Заячук І.М.

Центр математичного моделювання
ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
igorzaj@gmail.com

Simulation Quadrocopter's Catastrophic Landings

Blagitko B., Mochulsky Y.

Department of Radiophysics and Computer Technologies
Ivan Franko Lviv's National University
Lviv, Ukraine
blagitko@gmail.com, mochulsky@ukr.net

Zajachuk I.

Centre of Mathematical Modeling
Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics
and Mathematics Ukrainian Academy of Science
Lviv, Ukraine
igorzaj@gmail.com

Анотація—Шляхом математичного моделювання визначені основні особливості аварійного приземлення безпілотного квадрокоптера. Приведені результати моделювання процесів приземлення безпілотного квадрокоптера у випадках виходу з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт.

Abstract—By means of mathematical modeling, the main features of emergency landing of quadrocopter are determined. The results of simulation of landing of unmanned quadrocopter in cases of failure of one of four pairs of electric motor screw are given.

Ключові слова—квадрокоптер, висотомір, 3-осьовий гіроскоп, 3-осьовий акселерометр, 3-осьовий магнітометр, керування.

Keywords—quadrocopter, altimeter, 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, 3-axis magnetometer, control.

I. ВСТУП

У більшості статей із проблем безпілотного польоту квадрокоптера неявно передбачається, що всі чотири пари електродвигун-гвинт і схема управління ними є справними [1-3]. На практиці нерідко виникають ті чи інші несправності у послідовності ланок: схема управління – електродвигун-гвинт. Коли несправність раптово проявляється в процесі безпілотного польоту квадрокоптера, то виникає аварійна ситуація. Спостерігається повна втрата керованості польотом, в результаті чого квадрокоптер падає на землю.

Ця робота присвячена розгляду особливостей процесу приземлення безпілотного квадрокоптера у випадку виходу з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт.

II. МОДЕЛЮВАННЯ ПРИЗЕМЛЕННЯ КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ВІДМОВІ БУДЬ-ЯКОЇ ПАРИ ДВИГУН-ГВИНТ

Математична модель квадрокоптера в польоті у випадку, коли всі чотири пари електродвигун-гвинт і схема управління ними є справними, розглядається, як дві суттєво різні математичні моделі: власне математичної моделі квадрокоптера, як БПЛА, на вхід якого поступають значення напруг живлення електричних двигунів, а виходами є координати і кути крену, тангажу та ролу; математичної моделі ПД регулятора, на вхід якого від сенсорів поступають виміряні значення, а мікроконтролер реалізує алгоритм ПД регулятора і видає на вихід значення напруг живлення двигунів. Математична модель квадрокоптера в польоті у випадку, коли всі чотири пари електродвигун-гвинт і схема управління ними є справними, описується системою диференціальних рівнянь 16-го порядку у формі Коші [3].

При появі несправності однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт квадрокоптера можливі наступні випадки:

- відмова носової пари електродвигун-гвинт;
- відмова хвостової пари електродвигун-гвинт;
- відмова правої пари електродвигун-гвинт;

- відмова лівої пари електродвигун-гвинт квадрокоптера.

Для розв'язування диференціальних рівнянь математичної моделі квадрокоптера використовувався неявний метод Рунге-Кутта TR-BDF2 (на першому етапі рівняння інтегрують методом трапецій, а на другому етапі застосовують формулу диференціювання назад другого порядку).

III. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРИЗЕМЛЕННЯ КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ВІДМОВІ БУДЬ-ЯКОЇ ПАРИ ДВИГУН-ГВИНТ

Приземлення квадрокоптера відбувається після зависання його на висоті 50 м над точкою з координатами $X=0, Y=0$. Умовний "ніс" квадрокоптера спрямований по осі X в сторону зростання. При цьому початкові значення кутів тангажу і крену дорівнюють нулю, а кут ризику дорівнює 90° . Імітація відмови конкретної пари електродвигун-гвинт проводиться шляхом присвоєння напрузі живлення відповідного електродвигуна значення 0.0В для всіх моментів часу $t \Rightarrow ta$, де ta – момент відмови конкретної пари електродвигун-гвинт квадрокоптера.

У всіх статтях [1-4] математичного моделювання руху квадрокоптера розглядаються як рухи матеріальної точки маси m . Але квадрокоптер має складну просторову структуру з певними розмірами. Для того, щоб побачити не тільки рух центру мас, але й ідею його обертання під час аварійного приземлення, були імітовані рухи двох точок квадрокоптера: центру мас та носового двигуна. Тут і надалі пунктирна лінія показує траєкторію центру мас квадрокоптера а квадрати – траєкторію руху носового двигуна. На цьому рисунку (і на всіх решта) відлік висоти Z ведеться від горизонтальної поверхні. Для кращої візуалізації траєкторії польоту квадрокоптера на рисунках проведені горизонталі та вертикалі.

Результати математичного моделювання процесу приземлення квадрокоптера при появі несправності однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт квадрокоптера приведені у вигляді графіка траєкторій руху на Рис.1. Траєкторія 1 відображає процес приземлення квадрокоптера при відмові носової пари електродвигун-гвинт, а траєкторія 3 – при відмові хвостової пари електродвигун-гвинт.

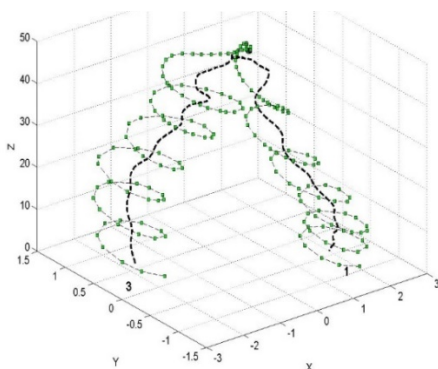


Рис. 1. Траєкторії руху квадрокоптера з регулятором: 1 –при відмові носової пари електродвигун-гвинт, 3 – при відмові хвостової пари електродвигун-гвинт..

Графіки зміни кутів крену (Roll) і тангажу (Pitch) після того, як в момент $ta = 1$ с відмовив носовий двигун , наведені на Рис.2.

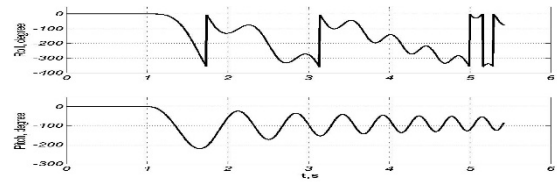


Рис. 2. Графіки зміни кутів крену при відмові носового двигуна. і тангажу

Як видно з Рис.2, після аварійного відключення носового електродвигуна кут тангажу починає зменшуватися (квадрокоптер "опускає" ніс). У той же час, внаслідок некомпенсованих моментів сил відносно вертикальної осі, квадрокоптер починає обертатися проти годинникової стрілки. Гіроскопічний момент сил починає обертати квадрокоптер відносно поздовжньої осі, тобто, виникає крен. Зробивши більш ніж півоберту відносно поперечної осі, квадрокоптер починає обертатися в протилежному напрямку і надалі тангаж коливається в околі -90° . Що стосується поздовжньої осі, то квадрокоптер робить повні три оберти у відємному напрямку і, повернувшись ще на 90° падає на землю лівим двигуном.

Графіки зміни кутів крену (Roll) і тангажу (Pitch) після того, як в момент $ta = 1$ с відмовив хвостовий двигун , наведені на Рис.3.

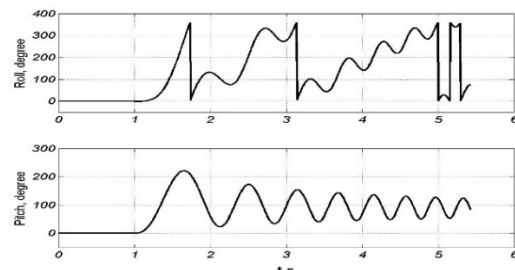


Рис. 3. Графіки зміни кутів крену і тангажу при відмові хвостового двигуна.

Як видно з Рис.3, після аварійного відключення хвостового електродвигуна кут тангажу починає зростати (квадрокоптер "опускає" хвіст). У той же час, внаслідок некомпенсованих моментів сил відносно вертикальної осі, квадрокоптер починає обертатися за годинниковою стрілкою. Гіроскопічний момент сил викликає крен квадрокоптера. Зробивши в додатному напрямку більш ніж півоберту відносно поперечної осі, квадрокоптер починає обертатися в протилежному напрямку і надалі тангаж коливається в околі $+90^\circ$. Що стосується поздовжньої осі, то квадрокоптер робить повні три оберти в додатному напрямку і, повернувшись ще на $+90^\circ$ падає на землю правим двигуном.

Результати математичного моделювання процесу посадки квадрокоптера в разі виходу з ладу однієї з інших

пар електричного моторного гвинтового квадрокоптер відбуваються у вигляді графіка траєкторій руху на Рис. 4. Траєкторія 2 відображає процес приземлення квадрокоптера при відмові правої пари електродвигун-гвинт, а траєкторія 4 – при відмові лівої пари електродвигун-гвинт.

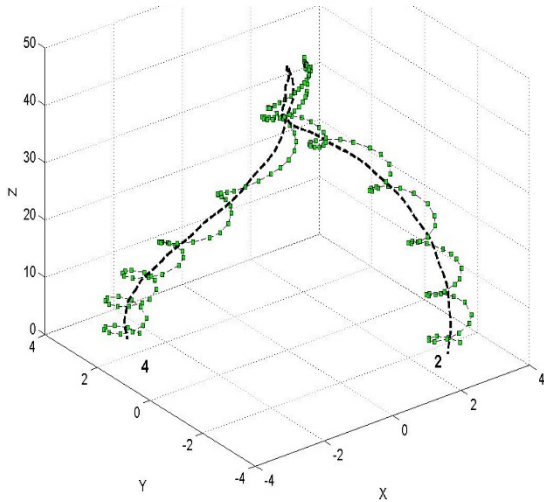


Рис. 4. Траєкторії руху квадрокоптера з регулятором: 2 – при відмові правої пари електродвигун-гвинт, 4 – при відмові лівої пари електродвигун-гвинт.

Графіки зміни кутів крену (Roll) і тангажу (Pitch) після того, як в момент $t_a = 1$ с відмовив правий двигун, наведені на Рис.5.

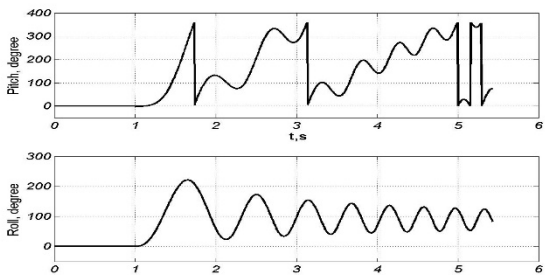


Рис. 5. Графіки зміни кутів крену і тангажу при відмові правого двигуна.

Як видно з Рис.5, після аварійного відключення правого електродвигуна кут крену починає зменшуватися (квадрокоптер "опускається" направо). У той же час, внаслідок некомпенсованих моментів сил відносно вертикальної осі, квадрокоптер починає обертатися проти годинникової стрілки. Гіроскопічний момент сил викликає тангаж квадрокоптера. Зробивши більш ніж півоберту відносно повздовжньої осі, квадрокоптер починає обертатися в протилежному напрямку і надалі крен коливається в околі $+90^\circ$. Що стосується поперечної осі, то

квадрокоптер робить повні три оберти у додатньому напрямку і, повернувшись ще на 90° падає на землю.

Графіки зміни кутів крену (Roll) і тангажу (Pitch) після того, як в момент $t_a = 1$ с відмовив лівий двигун, наведені на Рис.6.

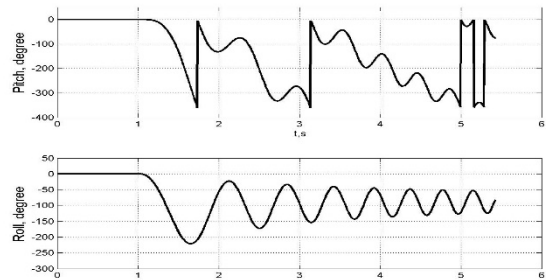


Рис. 6. Графіки зміни кутів крену і тангажу при відмові лівого двигуна.

Як видно з Рис.6, після аварійного відключення лівого електродвигуна кут крену починає зростати (квадрокоптер "опускається" наліво). У той же час, внаслідок некомпенсованих моментів сил відносно вертикальної осі, квадрокоптер починає обертатися за годинниковою стрілкою. Гіроскопічний момент сил викликає тангаж квадрокоптера. Зробивши більш ніж півоберту відносно повздовжньої осі, квадрокоптер починає обертатися в протилежному напрямку і надалі крен коливається в околі -90° . Що стосується поперечної осі, то квадрокоптер робить повні три оберти у від'ємному напрямку і, повернувшись ще на -90° падає на землю

IV. МЕТОД БЕЗПЕЧНОГО ПРИЗЕМЛЕННЯ КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ВІДМОВІ БУДЬ-ЯКОЇ ПАРИ ДВИГУН-ГВИНТ

У цій статті пропонується метод управління безпечним приземленням квадрокоптера з відмовою однієї з чотирьох пар електричний двигун - гвинт. Цей метод використовує ефект парашутування квадрокоптера. Парашутування досягається шляхом примусового відключення живлення електродвигуна, який протилежний до дефектного електродвигуна. У результаті вертикальна швидкість квадрокоптера на момент приземлення значно зменшується в порівнянні зі швидкістю вільного падіння.

На Рис.7 зображений фрагмент безпечного приземлення аварійного квадрокоптера з відмовою носового двигуна та миттєвого відключення хвостового двигуна або з відмовою хвостового двигуна та миттєвого відключення носового двигуна.

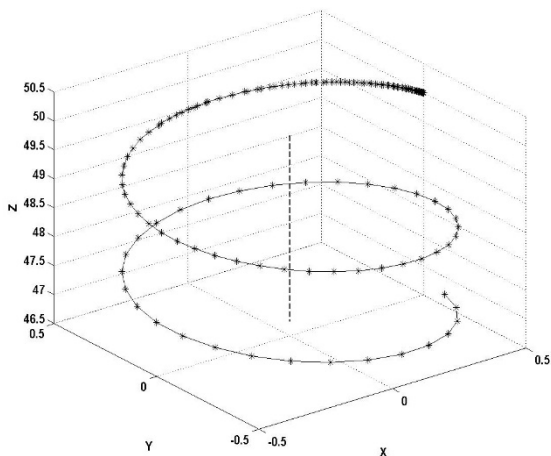


Рис. 7. Траєкторії руху квадрокоптера з регулятором: при відмові носової пари електродвигун-гвинт або при відмові хвостової пари електродвигун-гвинт..

На Рис.8 зображений фрагмент безпечного приземлення аварійного квадрокоптера з відмовою правого двигуна та миттєвого відключення лівого двигуна або з відмовою лівого двигуна та миттєвого відключення правого двигуна.

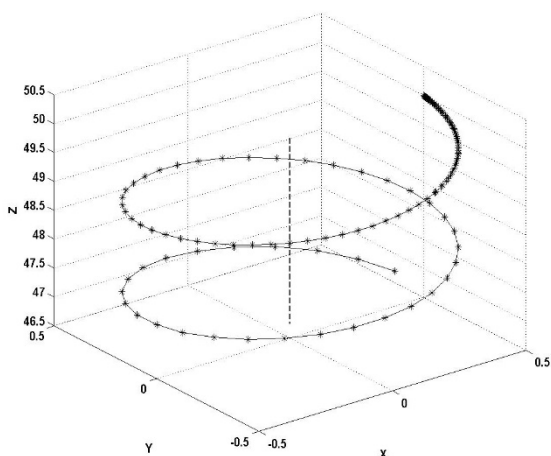


Рис. 8. Траєкторії руху квадрокоптера з регулятором: при відмові правої пари електродвигун-гвинт або при відмові лівої пари електродвигун-гвинт..

V. РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПЕЧНОГО ПРИЗЕМЛЕННЯ КВАДРОКОПТЕРА

Для прикладу проведено моделювання безпечного приземлення аварійного квадрокоптера з висоти 50 м над точкою з координатами $X=0$, $Y=0$. Квадрокоптер при цьому «висить» нерухомо (кути тангажу і крену дорівнюють нулю). Основні параметри квадрокоптера:

маса – 468 г, відстань від центру мас до двигуна – 22,5 см, ЕРС акумулятора – 11,1 В.

При виході з ладу будь-якого одного двигуна квадрокоптер приземлюється за 6 с. При цьому в момент приземлення вертикальна швидкість дорівнює 16 м/с, а горизонтальні складові швидкості не перевищують 0,3 м/с. При приземленні квадрокоптер обертається навколо вертикальної осі із кутовою швидкістю 0,3 рад/с, для якої прискорення на відстані 22,5 см від центра мас дорівнюватиме $0,02 \text{ м/с}^2$.

Якщо одночасно з двигуном, який вийшов з ладу, вимкнути протилежний йому двигун, то час падіння збільшиться до 11,7 с, а вертикальна швидкість приземлення зменшиться до 5,6 м/с. Горизонтальні складові швидкості весь час дорівнюватимуть нулю, тобто, квадрокоптер падатиме вертикально вниз. Крен і тангаж під час падіння дорівнюють нулю, тобто квадрокоптер завжди приземлиться на шасі. В зв'язку з тим, що в цьому випадку не скомпенсовані моменти сил двох протилежних двигунів, швидкість обертання навколо вертикальної осі буде значно більшою, ніж в першому випадку, і в момент приземлення становитиме 4,4 рад/с. Така швидкість створюватиме на відстані 22,5 см від центра мас прискорення $4,4 \text{ м/с}^2$.

ВИСНОВКИ

Результати проведених досліджень визначають ефективність та практичну значимість використання запропонованого методу безпечного приземлення аварійного квадрокоптера у випадку виходу з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт. А саме, метод використовує ефект парашутування квадрокоптера. Парашутування досягається шляхом примусового відключення живлення електродвигуна, який розташований на протилежному кінці тієї ж консолі, що й несправний двигун. У результаті вертикальна швидкість квадрокоптера на момент приземлення значно зменшується в порівнянні зі швидкістю вільного падіння..

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Huang H. Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive manoeuvring / H. Huang, G. M. Hoffmann, S. L. Waslander, and C. J. Tomlin // IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2009, pp. 3277–3282.
- [2] Marcelo Becker. In-Flight Collision Avoidance Controller Based Only on OS4 Embedded Sensors/ R.C.B.Sampaio, S.Bounabdallah, V.de Perrot, R.Siegwart// Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. vol.34 no.3 Rio de Janeiro July/Sept. 2012 – March 2012. – Vol. XXXIV, No.3, July-September 2012– С. 294–107.
- [3] <http://www.robotshop.com/media/files/pdf/datasheet-sen026.pdf>
- [4] Благітко Б. Математичне моделювання впливу особливостей сенсорів на процес польоту безпілотного квадрокоптера / Б.Благітко, І.Заячук, Ю. Мочульський // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2015. – Вип. 21. – С. 22–29.
- [5] Мочульський Ю. Matlab у фізичних дослідженнях: навч. - метод. посіб. — Львів: ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2004. — 121 с.
- [6] Благітко Б. Моделювання процесу керування вертикальним злетом і приземленням безпілотного квадрокоптера /Б.Благітко, І.Заячук, Л.Кіт. Ю.Мочульський// Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології.–2012–Вип.2–С.111–11

Використання Шаблонів для Структур Вхідних Даних в Оптимізаційно-Імітаційних Експериментах

Віра Бігдан, Олена Криковлюк
Інститут кібернетики НАНУ ім.В.М.Глушкова
Київ, Україна
vbigdan@icfest.kiev.ua

Applying of variables templates for input data structures in Optimization Simulation Experiments

Vira Bigdan, Olena Krykovliuk
Institute of Cybernetics after V.Glushkov of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
vbigdan@icfest.kiev.ua

Анотація—досліджується запропонований підхід до уніфікації вхідних даних змішаного типу для оптимізаційно-імітаційних експериментів. Запропоновані шаблони були розроблені для оптимізатора, який використовує еволюційні та мультиагентні стратегії. Тестування проводилося на кластері СКІТЗ.

Abstract—this research analyzes proposed approach to mixed type input data unification in optimization and simulation experiments. The proposed templates were developed for optimizer based on evolutionary and multiagent strategies. Testing and verification was done on cluster SKITZ.

Ключові слова—шаблони даних, стохастичні алгоритми оптимізації, імітаційний експеримент, дискретизація, змішаний тип змінних, кластер

Keywords—data templates, stochastic optimization algorithms, simulation experiment, discretization, mixed-value variables, cluster

I. INTRODUCTION

Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine accumulated certain experience in analyzing complex stochastic systems with the use of the developed NEDISOPT_D system. This system integrates capabilities of simulation methods, optimization and distributed computing technologies. The system optimizer provides directional search in selected optimal modes, using evolutionary and multi-agent strategies. The team also developed parallel versions of optimized strategies which are using cluster architectures [1].

At present further reseach is done on developing the capabilities of the OPTIMIZER module in simulation systems using the architecture similar to NEDISOPT_D.

When choosing methods of optimization, it should be considered that the simulation model of the system being analyzed is a "black box". The input data is a vector of values with a limited set of input factors, and on the output there is a vector containing values of model responses [2,3]. The researcher makes conclusions based on the analysis of output parameters of the model as to which input vector provided more "optimal" functioning of the system according to certain criteria or a set of criteria [3].

Simulation systems are used for modeling diverse range of complex stochastic systems. Therefore, the input data for the created simulation models can be completely different. Firstly, the input data can be quantitatively different, and secondly, the variables themselves can be of a completely different nature: numerical (discrete, continuous, mixed-value variables) or categorical (logical, various categories of devices and equipment with different parameters and properties).

II. UNIFICATION OF INPUT DATA STRUCTURES

The effectiveness of research and design of complex stochastic systems based on technology of optimization-simulation integration can be increased by bringing the original data of simulation model to a unified form using the developed templates. Such template allows to reduce the time of subsequent optimization and provides opportunities for re-use of large data amount due to the possibility of a simple

revision of the data structure and provides a convenient user interface for working with input data. This approach is based on the concepts of optimization and simulation integration and meta-heuristic optimization strategies. Software environment for its support is represented by OPTIMIZER of NEDISOPT-D architecture.

The admissible values for variables of the concrete model (the input data for OPTIMIZER) can be specified in various ways:

- by a finite set of user-defined values;
- by the minimum and maximum values of the numerical interval from which all values are allowable or with some sampling discretization step [4].

Optimization experiments with models use heuristic stochastic algorithms that work with standard built-in data structures for the system [4, 5]. OPTIMIZER of the system assumes that all data that is used in optimization algorithms and is input to these processes is considered as real. Before optimization begins, the process of digitization of real continuous data is performed. At the same time the limit values are determined for the factors values.

Unification of data increases the effectiveness of simulation experiments in case of using an ensemble of optimization algorithms [6]: for the exchange of data processes on a cluster arrays of the same type are used.

Different types of data must be brought to some universal type for the effective use of optimization algorithms [3]. For operation of algorithms of various optimization strategies, it is necessary to specify a set of values of input parameters that can be divided into two groups. The first group of input parameters provides information about factors of the problem, examines their number, maximum number of quantization levels of any factor, type of each factor (integer or real), type of permissible values (continuous, discrete or bounded set of values), range of the allowed range of values, step sampling (for continuous) or multiple values.

The second group of input data sets the values of the control parameters for each algorithm. Common parameters for all algorithms are the size of population (or the number of individuals for multi-strategy strategies) and the limitation on number of sampling levels.

The number of quantization levels and the sampling step are set by a researcher of the model. Input data which is the same for all strategies is provided separately it represents always real numbers (conversion into a valid type occurs automatically) and parameters for the selected strategy are also specified separately.

To enter input data that is intended to be used as variables in optimization simulation experiments, an intermediate template is created to represent the input data. This template provides

- automatic factor number setting;
- selection type of data and the way it is set using the appropriate switches.

After entering the data for all factors of the optimization experiment, an internal data structure of a single format is formed for all optimization strategies that will be used as input by OPTIMIZER for the chosen strategy. In this structure there is a factor number, the number of levels of its quantization, parameters of the quantization level of the factor (maximum, minimum, step).

III. UNIFIED SCHEME FOR IMPLEMENTATION OF OPTIMIZATION-SIMULATION EXPERIMENTS

A specifically developed unified scheme for the implementation of optimization simulation experiments provides necessary flexibility in study of complex systems within the framework of the NEDISOPT_D [7] architecture. The scheme defines the methodology of planning and technology for the implementation of multi-stage optimization-simulation experiments.

In general case, each study with simulation model should include three stages, which are implemented sequentially. At the first stage (modeling), significance of the input data of the model (factors) that were originally introduced and related to the selected meta-heuristic optimization strategy is investigated. Factors are selected in a way to fully describe the simulated system. At this stage, it is possible to simplify the model, by eliminating those factors that are not significant. At the second stage (simulation), tasks of tactical planning of simulation experiments are determined. At the third stage (replication) an estimation of reliability of the results of experiments is carried out.

The development of scenarios for the first stage simulation experiments is determined by strategic planning algorithms, which essentially depend on the adopted strategy for finding optimal solutions. For the meta-heuristic optimization strategies, the main issues are:

- to define evaluated alternatives, characteristics of which form composition and structure of decisions;
- to form the initial population or to identify the number of individuals, taking into account the limits and quantization levels of the factors determined at the first phase of the experiment;
- to determine control parameters for the process of searching for optimal solutions depending on the optimization strategy used;
- to define responses and values of fitness functions that characterize the estimated and optimal alternatives.

Carrying out of researches at the second stage requires to solve the following tasks:

- to classify the response-output of the simulation model and to form the main and additional set of responses. Composition of the main set, as a rule, includes indicators of effectiveness of the functioning of systems which are being analyzed. These indicators are used in strategies for finding optimal solutions. The additional set includes responses containing various sorts of detailed information necessary for more accurate

understanding of the specifics of functioning of system which is being analyzed;

- to identify (allocate) significant (dominant) factors that have the greatest influence on the main responses of the simulation model;
- to determine the initial conditions for experiments;
- to determine the composition of control and input information for purely imitative runs;
- to verify and validate the simulation model. Note that regardless of the optimization strategy being used, the search for optimal solutions can be carried out only on the basis of the model for which the verification and validation procedures are being performed [5-7];
- to analyze sensitivity of the simulation model and to define constraints and to set permissible intervals for responses and factors changing;
- to determine the confidence interval for modeling, the interval of the model overclocking and the step with which the modeling process will be carried out;
- to define formulas for calculation of target functions on the basis of responses of corresponding runs of the simulation model, factors, all sorts of cost and penalty characteristics.

The third stage is the stage of replication runs and is connected with solving the issues of validation of modeling results and is intended to confirm reliability and stability of the obtained results.

IV. OPTIMIZER STRATEGIES

The development of scenarios for simulation experiments for the first stage is determined by algorithms of strategic planning, which essentially depend on the strategy of finding the optimal solutions. OPTIMIZER which is being developed:

- has no permanent connection with the simulation model;
- the target function is set by user and can include both input and output variables;
- the range and step of changing the parameter values is set;
- there is a possibility for user to set the initial plan of the experiment;
- uses both evolutionary and multi-agent optimization strategies;
- the criteria for stopping the optimizer's work is to specify the total number of estimated alternatives or the time limit;
- one simulation session runs with a fixed selected values of input parameters;
- the process of finding optimal solutions is logged;

- the optimization strategies work both under Windows and under Linux;
- the web interface is being developed.

In the first version of OPTIMIZER, meta-heuristic strategies were used, which were based on the classical genetic algorithm [9, 10]. Each generation of population of chromosome solutions has its own vector of fitness values. These values are calculated on the basis of the expression for the fitness function of the formulated optimization task (problem), taking into account the responses of the corresponding simulation model.

Now the evolution strategy is supplemented by new strategies: evolutionary algorithms are extended by the island model of genetic algorithm [11, 12], as well as multi-agent strategies based on the algorithm of ant colony, algorithm of particle swarm and the algorithm of bee colony are added [9]. The iterative process in evolutionary algorithms is based on changing the population of chromosomes by applying the crossover and mutation operators. The function of the first one is to preserve the genetic material – chromosomes accumulated in the population. The size of population is limited, and the mutation operator allows to search for new chromosomes on the whole space of allowed values. The island model of genetic algorithm is based on multi-population models. Each of these optimization strategies has its own specific structure of input data.

To test and evaluate the work of the classical genetic algorithm which was implemented, several test functions with different variables and several local and global minima were created [14]. These functions also included local and global maxima.

During implementation, the characteristics of test functions were to the maximum approximated to the behavior of the complex system model. Therefore, important characteristics of these functions are:

- stochastic nature of fitness value (to the accurately calculated function one or more random variables were added with a normal or even distribution, but with different versions of parameters);
- the presence of one or more global "extremums", the values of which for one function may differ in several runs,
- the presence of several local "extremums";
- all "extremums" are scattered randomly throughout the admissible area, without overlapping in areas of attraction;
- functions are defined (computational) within the entire permissible range, but, depending on the types of their inputs, they can be estimated (calculated) at (on) a finite set of points.

Conducting of experiments to find out the most effective values of the evolution algorithm parameters were carried out in two stages. At the first stage, the mean fitness value for each of the chromosome planes was obtained.

Only an estimate of the best chromosomes found in the population after finishing the work of the algorithm was considered [6], and it was not taken into account whether at least one local minimum was found in the process of optimizing the test function.

At the second stage, all examined chromosomes were sorted out according to their fitness values (from smaller to bigger, and for further analysis, 20 best and 20 worst chromosomes were considered in order to find probable trends in meanings of both individual parameters and their combinations with each other. As a result, conclusions were drawn for each of the parameters under investigation [11].

Experiments conducted to increase the efficiency of search for optimal solutions by changing the values of control parameters, showed that the quality of the algorithm's work greatly depends on values taken by its parameters. The analysis of the above results allowed to identify the range of values for each of the studied parameters, at which the maximum efficiency of the algorithm is achieved.

The cluster complex of Institute of Cybernetics after V.Glushkov of the National Academy of Sciences of Ukraine was used for the study.

To evaluate the effectiveness of the selected chromosome plans, the island model of evolutionary algorithm was used without exchange of chromosomes between the populations [5, 8, 11].

The experiment consisted in the simultaneous launch of 10 and 20 parallel processes (the numbers 10 and 20 were chosen for convenience). In each process an evolutionary algorithm was used with its experiment plan to be evaluated. For better results reliability, 12 replication experiments were conducted for each plan and the arithmetical mean of fitness values of 10 average runs (skipping the best and worst) was used as the final evaluation of the set efficiency.

CONCLUSIONS

In imitation experiments, the number of possible combinations of factors is very large, even if the number of factors is small, because quantization of continuous factors can be done with an arbitrary precision. As a result, a large dimensionality problem arises for optimization tasks. Therefore, the most important task of simulation experiment is to specify key factors that should be identified as quickly and as accurately as possible from the set of possible ones, which can significantly reduce the dimensionality of optimization tasks.

Separation of input data into data for direct optimization algorithms, which are identical for all optimization strategies and bringing them to a unified form and data that are used only in a particular strategy, increases the efficiency of the optimization process. Bringing the input data to a unified form based on the developed template for input data and providing the capability of compositing various methods significantly improves the efficiency of the optimization phase.

The process of studying models of complex systems involves implementation of a large number of simulation

experiments. The output data of each experiment is accumulated for further analysis. The processes of research and design of complex systems are accompanied by generation and accumulation of large volumes of heterogeneous information that forms the basis of practical modeling experience in the relevant applied field. Further analysis of the accumulated data requires the use of methods of intellectual analysis to search for useful trends/patterns and to make feasible forecasts.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] V.A. Pepelyaev, "Planning optimization-simulation experiments, *Kybernetika i Sistemnyi Analiz*, No. 6, November–December 2006, pp. 112–125
- [2] Robert E. Shannon, "Systems Simulation: The Art and Science" *Prentice-Hall*, 1975, P.418
- [3] Nikolay P. Buslenko, "Simulation complex systems", Moscow, *Science* 1978, P.400 (in Russian)
- [4] V.B. Bigdan, O.O. Krykovliuk, V.A. Pepeliaev, "Structure input data unification of Optimization Algorithms in Simulation Experiments," *Computer mathematics*, Kyiv, Ukraine, 2017, No 1, pp. 45 – 55 (in Ukrainian)
- [5] V.B. Bigdan, O.O. Krykovliuk, V.A. Pepeliaev, "Input Data Mixed-value Variables Templates for Optimization Algorithms in Simulation Experiments," in *Modern Computer Science: Problems, Achievements and Prospects of Development: The International Scientific Conference*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 185-187
- [6] I.V. Sergienko, V.P. Shylo , O.V. Shylo "Algorithm Unions In Parallel Optimization," in *Modern Computer Science: Problems, Achievements and Prospects of Development: The International Scientific Conference* , devoted, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 139
- [7] V.B. Bigdan, V.A. Pepeliaev, Yu.M.Tchornyy, "Unified scheme for the implementation of optimization-simulation experiments," *Problems in Programming*. Scientific Journal, Kyiv, Ukraine, No 2-3, pp. 728-733 (in Ukrainian)
- [8] V.B. Bigdan, O.O. Krykovliuk, V.A. Pepelyaev, Yu.M.Tchornyy, "Control of Evolutionary Optimization Algorithms in Simulation Experiments," *Computer mathematics*, Kyiv, Ukraine, 2016, No 6, pp. 102 – 113 (in Ukrainian)
- [9] Subbotin S.O., Oleynik A.O. Oleynik O.O. "Non-iterative, evolutionary, and multi-agent methods for synthesizing indistinct logical and neural network models," Zaporizhia, Ukraine, *ZNTU*, 2009, P. 375 (in Ukrainian)
- [10] V.B. Bigdan, V.A. Pepelyaev Yu.M.Tchornyy, "Applying of genetic algorithm for optimization in simulation experiments," in *Decision making: VII The International school-seminar*, Uzhgorod, Ukraine, 2016, pp.46-47 (in Ukrainian)
- [11] V.B. Bigdan, O.O. Krykovliuk, Yu.M.Tchornyy, "Applying of island model of genetic algorithm for optimization in simulation experiments," in *Decision Theory: VII The International school-seminar*, Uzhgorod, Ukraine, 2016, pp.44-45 (in Ukrainian)
- [12] O.O. Krykovliuk "Applying of island model of genetic algorithm for scheme realization of parallelizing processes of directed search on cluster architectures," in *Problems of decision making under uncertainties*, PDMU: XXIII International conference, Mukachevo, Ukraine, 2014, pp. 120 (in Ukrainian)
- [13] V.B. Bigdan "Models of data flow control by flow of data in distributed search of optimal solutions," *The theory of optimal solutions*, 2009, No 8, pp. 105-113 (in Russian)
- [14] V.I. Pepelyaev, Yu.M.Czornyy, "The principles of fitness functions building for global optimization algorithms testing," *Computer mathematics*, Kyiv, Ukraine, 2017, No 2, pp. 62 – 71 (in Ukrainian) pp.62-71 (in Russian)

Вплив Локального Зміщення Маси на Потенціальне Поле Точкового Заряду у Безмежному Діелектричному Середовищі

Ольга Грицина

відділ математичних методів
обчислювального експерименту,
Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
gryt@cmm.lviv.ua, gryt045@gmail.com

Галина Мороз

відділ математичного моделювання
нерівноважних процесів,
Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
halynamoroz.ua@gmail.com

The effect of Local Displacement of Mass on the Potential Field of a Point Charge in an Infinite Dielectric Medium

Olha Hrytsyna

department for mathematical methods
of computing experiment,
Center of Mathematical Modeling of Pidstryhach Institute
for Applied Problems of Mechanics and Mathematics,
National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
gryt045@gmail.com

Halyna Moroz

department for mathematical modelling
of irreversible processes,
Center of Mathematical Modeling of Pidstryhach Institute
for Applied Problems of Mechanics and Mathematics,
National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
halynamoroz.ua@gmail.com

Анотація—Співвідношення локально градієнтної теорії діелектриків застосовані для визначення потенціального поля точкового електричного заряду. Показано, що згадана теорія дозволила уникнути сингулярності електричного потенціалу точкового заряду у безмежному діелектричному середовищі, що не вдається досягти у межах класичної теорії діелектриків.

Abstract—In order to determine the potential field of a point electric charge, the relations of the local gradient theory of dielectrics was used. It is shown that, on the contrary to the classical theory of dielectrics, the above theory allows to avoid the singularity of the electric potential of a point charge in an infinite dielectric medium.

Ключові слова—локально градієнтна теорія, неферомагнітні діелектрики, зв'язані поля, точковий заряд.

Keywords—local gradient theory, nonferromagnetiv dielectrics, coupling fields, point charge.

I. ВСТУП

Класична теорія діелектриків ґрунтується на локальних визначальних співвідношеннях, які не виконуються в околі вершин тріщин, в ядрах дислокацій, у точках дії зосереджених чинників тощо. Це призвело до сингулярних розв'язків у відповідних крайових задачах математичної фізики. Природно, що така «нефізична» поведінка розв'язків стимулювала вчених до побудови нових узагальнених теорій електромагнітної механіки поляризованих середовищ, які б мали уникнути згадану сингулярність і врахувати неоднорідність стану фізично малих елементів тіл, а також коректно і більш повно описати їх властивості.

У межах континуальної механіки такі теорії будували шляхом:

(i) розширення простору параметрів стану градієнтами тензора деформації, вектора поляризації чи вектора

напруженості електричного поля (так звані градієнтного типу теорії) [1, 3-7];

(ii) постулювання функціональних конститутивних співвідношень (нелокальні теорії) [8];

(iii) введення додаткових ступенів вільності – так звані теорії з неklasичною кінематикою (поляри, мікрополяри, мікроморфні теорії діелектриків та їх різновиди) [9-11].

Упродовж останніх півтора десятка років зусиллями львівської школи механіків розроблено основи локально градієнтної теорії діелектриків [12]. Ця теорія ґрунтується на врахуванні потоку маси неконвективної та недифузійної природи, зумовленого зміною мікроструктури середовища. Цей потік був пов'язаний з процесом, який отримав назву локального зміщення маси [13]. Результатом урахування локального зміщення маси та його взаємозв'язку з рештою процесів стали нелокальні (градієнтного типу) визначальні співвідношення. Локально градієнтну теорію діелектриків було успішно застосовано для опису приповерхневих, приконтактних і масштабних ефектів, а також низки інших явищ, які не вдавалося обґрунтувати виходячи з рівнянь класичної теорії діелектриків [12].

Покажемо, що локально градієнтна теорія неферромагнітних поляризованих середовищ дозволяє також уникнути сингулярності розв'язків у задачах із зосередженими чинниками. З цією метою співвідношення лінійної теорії діелектриків застосуємо для дослідження потенціального поля точкового електричного заряду.

II. СИСТЕМА РІВНЯНЬ МОДЕЛІ

Для ізотропних матеріалів лінійна система рівнянь локально градієнтної теорії діелектриків охоплює [12]:

рівняння Максвелла

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{ef}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e, \quad (2)$$

балансу механічного імпульсу й наведеної маси

$$\nabla \cdot \hat{\sigma} + \rho_0 \mathbf{F} = \rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (3)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_{ms} = 0, \quad (4)$$

визначальні співвідношення для векторів індукцій електричного і магнітного полів

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \rho_0 \boldsymbol{\pi}_e, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (5)$$

нелокальні рівняння стану

$$\hat{\sigma} = 2G\hat{e} + \left[\left(K - \frac{2}{3}G - \frac{K^2\alpha_p^2}{\rho_0 d_p} \right) e - \frac{K\alpha_p}{d_p} \tilde{\mu}'_\pi \right] \hat{\mathbf{I}}, \quad (6)$$

$$\mu'_\pi = \mu_{\pi 0} + d_p \rho_m - \frac{1}{\rho_0} K \alpha_p e, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\pi}_m = -\chi_m \nabla \mu'_\pi + \chi_{Em} \mathbf{E}, \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\pi}_e = \chi_E \mathbf{E} - \chi_{Em} \nabla \mu'_\pi, \quad (9)$$

а також геометричні співвідношення, які пов'язують тензор деформації \hat{e} і вектор переміщення \mathbf{u}

$$\hat{e} = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right]. \quad (10)$$

Тут \mathbf{H} і \mathbf{B} – вектори напруженості та індукції магнітного поля; \mathbf{E} і \mathbf{D} – вектори напруженості та індукції електричного поля; $\boldsymbol{\pi}_e$ – вектор питомої поляризації; $\mathbf{J}_{ef} = \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_{ed} + \mathbf{J}_{es}$ – вектор густини повного електричного струму; \mathbf{J}_e – вектор густини електричного струму, пов'язаного з переміщенням вільних зарядів; $\mathbf{J}_{ed} = \varepsilon_0 (\partial \mathbf{E} / \partial t)$ – струм зміщення; $\mathbf{J}_{es} = \rho_0 \partial \boldsymbol{\pi}_e / \partial t$ – поляризаційний струм; ρ_e – густина вільного електричного заряду; ε_0 і μ_0 – електрична і магнітна сталі; $\hat{\sigma}$ – тензор напружень; $e = \hat{e} : \hat{\mathbf{I}}$; $\hat{\mathbf{I}}$ – одиничний тензор; \mathbf{F} – зовнішня масова сила; \mathbf{J}_{ms} – вектор потоку маси недифузійної і неконвективної природи, пов'язаний зі зміною структури фізично малого елемента тіла (локальним зміщенням маси); $\mathbf{J}_{ms} = \rho_0 \partial \boldsymbol{\pi}_m / \partial t$; $\boldsymbol{\pi}_m$ – вектор питомого локального зміщення маси; $\rho_m = -\nabla \cdot \boldsymbol{\pi}_m$ – питома густина наведеної маси; $\mu'_\pi = \mu_\pi - \mu$; μ_π – міра зміни внутрішньої енергії системи, зумовленої локальним зміщенням маси; μ – хімічний потенціал; $\mu_{\pi 0}$ і ρ_0 – значення потенціалу μ'_π та густини маси у природному стані безмежного однорідного середовища; K – модуль об'ємного стиску за сталої густини наведеної маси; G – модуль зсуву; α_p – коефіцієнт об'ємного розширення, спричиненого локальним зміщенням маси; χ_E – діелектрична сприйнятливість; χ_m і χ_{Em} – коефіцієнти, які характеризують відповідно локальне зміщення маси та поляризованість тіла, зумовлені градієнтом потенціалу μ'_π ; d_p – ізохоричний коефіцієнт залежності потенціалу μ'_π від питомої густини наведеної маси; t – час; ∇ – оператор Гамільтона; « \times » – векторний добуток, крапка означає скалярний добуток [12].

Якщо геометричні співвідношення (10) і рівняння стану (5)-(9) підставити у рівняння Максвелла (1), (2) і балансів рівняння (3), (4), то отримаємо розв'язувальну систему рівнянь локально градієнтної механіки діелектриків, сформульовану відносно векторів переміщення \mathbf{u} , напруженості електричного \mathbf{E} та індукції магнітного \mathbf{B} полів, а також модифікованого хімічного потенціалу $\tilde{\mu}'_\pi$. Для стаціонарного наближення ця система рівнянь є такою [12]:

$$\left(\bar{K} + \frac{1}{3}G \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + G \Delta \mathbf{u} - K \frac{\alpha_p}{d_p} \nabla \tilde{\mu}'_\pi + \rho_0 \mathbf{F} = 0, \quad (11)$$

$$\Delta \tilde{\mu}'_\pi - \lambda_{\mu E}^2 \tilde{\mu}'_\pi = \lambda_{\mu E}^2 K \frac{\alpha_p}{\rho_0} \nabla \cdot \mathbf{u}, \quad (12)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \kappa_E \Delta \tilde{\mu}'_\pi + \frac{\rho_e}{\varepsilon}. \quad (13)$$

Тут

$$\begin{aligned} \bar{K} &= K - \frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p}, \\ \lambda_{\mu E}^2 &= \frac{I}{d_p (\chi_m - \kappa_E \chi_{Em})}, \\ \kappa_E &= \frac{\rho_0 \chi_{Em}}{\varepsilon}, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 + \rho_0 \chi_E. \end{aligned} \quad (14)$$

Параметр κ_E є параметром взаємозв'язку між електричним полем і локальним зміщенням маси, а $\lambda_{\mu E}$ – масштабний параметр, пов'язаний з урахуванням у модельному описі локального зміщення маси. Такий параметр відсутній у класичній теорії діелектриків. Величина $l_* = \lambda_{\mu E}^{-1}$ має розмірність довжини і є характерною віддаллю для приповерхневих явищ [12].

Зазначимо, що порівняно з класичною теорією електропружності, розв'язувальна система рівнянь (11)-(13) містить одне додаткове рівняння (12), пов'язане з локальним зміщенням маси. Модифікації зазнали також рівняння руху (11) і рівняння електростатики (13), які містять доданки, пов'язані з цим процесом.

Якщо у рівняннях (11)-(13) згідно формул [1]

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \nabla \varphi_u + \nabla \times \boldsymbol{\Psi}_u, \quad \nabla \cdot \boldsymbol{\Psi}_u = 0, \\ \mathbf{E} &= -\nabla \varphi_e, \\ \mathbf{F} &= \nabla \Phi + \nabla \times \boldsymbol{\Psi}, \quad \nabla \cdot \boldsymbol{\Psi} = 0. \end{aligned}$$

перейти до скалярних φ_u , φ_e , Φ і векторних $\boldsymbol{\Psi}_u$, $\boldsymbol{\Psi}$ потенціалів векторів переміщення, напруженості електричного поля і масової сили, то для їх визначення отримаємо таку систему рівнянь

$$G \Delta \boldsymbol{\Psi}_u + \rho_0 \boldsymbol{\Psi} = 0, \quad (15)$$

$$\left(\bar{K} + \frac{4}{3} G \right) \Delta \varphi_u + \rho_0 \Phi = K \frac{\alpha_p}{d_p} \tilde{\mu}'_\pi, \quad (16)$$

$$\Delta \tilde{\mu}'_\pi - \lambda_{\mu E}^2 \tilde{\mu}'_\pi = \lambda_{\mu E}^2 \frac{K \alpha_p}{\rho_0} \Delta \varphi_u + \frac{\chi_{Em}}{\varepsilon (\chi_m - \kappa_E \chi_{Em})} \rho_e, \quad (17)$$

$$\Delta \varphi_e + \kappa_E \Delta \tilde{\mu}'_\pi = -\frac{\rho_e}{\varepsilon}. \quad (18)$$

За відсутності дії на тіло масових сил ($\mathbf{F} = 0$) на основі рівнянь (16) і (17) для знаходження модифікованого хімічного потенціалу, маємо неоднорідне рівняння Гельмгольца:

$$\Delta \tilde{\mu}'_\pi - \tilde{\lambda}^2 \tilde{\mu}'_\pi = \frac{\chi_{Em}}{\varepsilon (\chi_m - \kappa_E \chi_{Em})} \rho_e, \quad (19)$$

де

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}^2 &= \lambda_{\mu E}^2 (I + M), \\ M &= \left(K + \frac{4}{3} G - \frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p} \right)^{-1} \frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p}. \end{aligned}$$

Зазначимо, що M – безрозмірний параметр, який описує взаємозв'язок процесів деформування і локального зміщення маси [12].

Якщо тепер на рівняння (18) подіяти оператором $\mathbf{L} = \Delta - \tilde{\lambda}^2$, то для електричного потенціалу одержимо таке диференціальне рівняння четвертого порядку

$$(\Delta - \tilde{\lambda}^2) \Delta \varphi_e = -\frac{I}{\varepsilon} \left(\frac{\chi_m}{\chi_m - \kappa_E \chi_{Em}} \Delta \rho_e - \tilde{\lambda}^2 \rho_e \right). \quad (20)$$

Зазначимо, що у межах класичної теорії діелектриків електричний потенціал підпорядкований неоднорідному рівнянню Лапласа

$$\Delta \varphi_e = -\frac{\rho_e}{\varepsilon}. \quad (21)$$

III. ТОЧКОВИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД У БЕЗМЕЖНОМУ ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Застосуємо рівняння локально градієнтної теорії діелектриків для вивчення поля електричного потенціалу навколо точкового електричного заряду Q , розташованого у початку системи координат. Прийемо, що Q є сталою величиною.

Функція Гріна для рівняння Гельмгольца (19) має вигляд [2]:

$$\tilde{\mu}'_\pi = -\frac{\chi_{Em} Q}{4\pi \varepsilon (\chi_m - \kappa_E \chi_{Em})} \frac{e^{-\tilde{\lambda} R}}{R}, \quad (22)$$

де $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

За врахування формули (22) на основі рівняння (18) одержимо

$$\varphi_e = \frac{Q}{4\pi \varepsilon} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{(I - \Theta)} \frac{e^{-\tilde{\lambda} R}}{R} \right), \quad (23)$$

де $\Theta = \frac{\chi_m}{\kappa_E \chi_{Em}}$.

Оцінімо величину безрозмірного параметра \square . Врахувавши формули (14), маємо:

$$\Theta = \frac{\varepsilon_0 \chi_m (I + \chi)}{\rho_0 \chi_{Em}^2}. \quad (24)$$

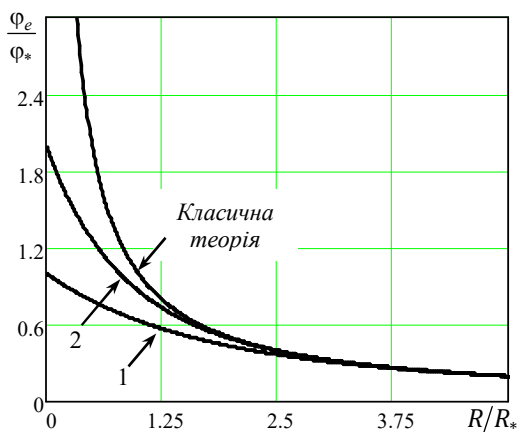


Рис. 1. Нормалізований електричний потенціал Φ_e/Φ_* точкового електричного потенціалу. Криві 1 і 2 відповідають розподілу електричного потенціалу, обчисленому у межах локально градієнтної теорії діелектриків для різних матеріалів ($\tilde{\lambda} = R_*^{-1}, 2 R_*^{-1}$)

Оскільки $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, і для йонних кристалів $\chi_{Em} \sim 10^{-16}$ м²/В, $\rho_0 \sim 10^3$ кг/м², $\chi_m \sim 10^{-23}$ с⁻¹, то, виходячи з формули (24) отримаємо, що $\Theta \ll 1$, а відтак, прийемо:

$$\Phi_e \approx \frac{Q(1 - e^{-\tilde{\lambda}R})}{4\pi\epsilon R}.$$

Залежність електричного потенціалу Φ_e/Φ_* , де $\Phi_* = Q/4\pi\epsilon$, від безрозмірної координати R/R_* для різних матеріалів ($\tilde{\lambda}R_* = 1, 2$) ілюструють криві, наведені на Рис. 1. Зазначимо, що у межах класичної теорії діелектриків потенціал точкового електричного заряду визначається формулою

$$\Phi_e = \frac{Q}{4\pi\epsilon R},$$

а відтак є сингулярною функцією у початку системи координат. Бачимо, що локально градієнтна теорія діелектриків, завдяки взаємозв'язку процесів деформування, поляризації і локального зміщення маси, дозволила уникнути згаданої особливості у розподілі електричного потенціалу Φ_e . У міру збільшення параметра $\tilde{\lambda}$ (характерної віддалі матеріалу [12]), крива, побудована на основі формули (23), наближається до результату класичної теорії.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] В. Новацкий, Электромагнитные эффекты в твердых телах. Москва: Мир, 1984.
- [2] Д. Иваненко, А. Соколов, Классическая теория поля. Москва-Ленинград: Изд-во технико-теоретической литературы, 1951.
- [3] R. D. Mindlin, "Polarization gradient in elastic dielectrics", *Int. J. Solids and Struct.*, vol. 4, pp. 637-642, 1968.
- [4] R. D. Mindlin, "Elasticity, piezoelectricity and crystal lattice dynamics", *J. Elast.*, vol. 2, no. 4, pp. 217-282, 1972.
- [5] С. В. Kafadar, "Theory of multipoles in classical electromagnetism", *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 9, pp. 831-853, 1971.
- [6] Ж. Можен, Механика электромагнитных сплошных сред. Москва: Мир, 1991.
- [7] X. M. Yang, Y. T. Hu, J. S. Yang, "Electric field gradient effects in antiplane problems of polarized ceramics", *Int. J. Solids Struct.*, vol. 41, pp. 6801-6811, 2004.
- [8] A. C. Eringen, Nonlocal continuum field theories. New York: Springer-Verlag, 2002.
- [9] A. C. Eringen, Microcontinuum field theories. 1. Foundation and solids. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [10] J. Chen, "Micropolar theory of flexoelectricity", *Journal of Advanced Mathematics and Applications*, vol. 1, pp. 1-6, 2013.
- [11] M. Romeo, "Micromorphic elastic dielectrics: Linear model and micropolar isotropic thin layers", *Int. J. Sol. Struct.*, vol. 49, pp. 3935-3941, 2012.
- [12] Я. Бурак, В. Кондрат, О. Грицина, Основы локально градиентной теории диелектриков. Ужгород: Поліграфцентр Ліра, 2011.
- [13] Я. Й. Бурак, "Визначальні співвідношення локально-градієнтної термомеханіки", *Доп. АН УРСР, Сер. А.*, № 12, с. 19-23, 1987.

Модель Системної Оптимізації Технологічних Об'єктів

Володимир Безкоровайний
кафедра системотехніки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Ольга Шевченко
кафедра системотехніки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
1375helga@gmail.com

Model of System Optimization of Technological Objects

Volodymyr Beskorovainyi
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radioelectronics
Kharkiv, Ukraine
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Olha Shevchenko
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radioelectronics
Kharkiv, Ukraine
1375helga@gmail.com

Анотація—З урахуванням взаємозв'язку задач структурної, топологічної, параметричної та технологічної оптимізації виконані формалізація системного опису та цілей створення технологічних об'єктів, що відображають показники їх ефекту і витрат ресурсів на їх створення і експлуатацію. Декомпозиція проблеми системної оптимізації технологічних об'єктів дозволила виділити задачі їх аналізу і синтезу, які вирішуються на основних етапах їх життєвих циклів. З урахуванням взаємозв'язку виділених задач за вхідними і вихідними даними запропоновані схема і метод системної оптимізації технологічних об'єктів.

Abstract—Taking into account the interconnection of the tasks of structural, topological, parametric and technological optimization, the formalization of the system description and the objectives of the creation of technological objects, reflecting the indicators of their effect and the cost of resources for their creation and operation, have been performed. Technological objects' system optimization problem decomposition allowed to highlight the problems of their analysis and synthesis, which are solved at the main stages of their life cycles. Taking into account the interrelation of the selected tasks with input and output data, a scheme and method of system optimization of technological objects are proposed.

Ключові слова—технологічні об'єкти, оптимізація, життєвий цикл, структура, топологія, оптимізація

Keywords—technological objects, optimization, life cycle, structure, topology, optimization

I. ВСТУП

Умови конкуренції орієнтують сучасні виробничі компанії на всебічне скорочення термінів освоєння нових видів продукції та підвищення її якості. В рамках системної методології виробничий процес подається у вигляді просторово розподіленого технологічного об'єкту (ТО) або комплексу таких об'єктів. Ефективність технологічних об'єктів багато в чому визначається рішеннями, які приймаються на етапах їх проектування або реінжинірингу. Процеси проектування, модернізації, планування розвитку або реінжинірингу ТО передбачають розв'язання множини взаємопов'язаних задач їх структурної, топологічної та параметричної оптимізації. Оптимізація виробничих ТО полягає у виборі кращого варіанту з множини допустимих, що задовольняють функціональним і вартісним обмеженням за множиною показників (якість, собівартість продукції, продуктивність системи, завантаження устаткування тощо) [1-3]. Однією з першочергових при цьому вважається задача системної оптимізації ТО, що охоплює всі основні етапи їх життєвих циклів.

II. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

Зі зростанням масштабів ТО їх вартісні і функціональні характеристики стають все більш залежними від топології (просторової організації), що наближає їх за властивостями до територіально розподілених та навіть великомасштабних об'єктів [4-5]. У процесах оптимізації розподілених ТО спільно з традиційними задачами

структурного синтезу необхідно вирішувати комплекси задач їх топологічної оптимізації. Структурні, параметричні, вартісні та функціональні характеристики розподілених ТО багато в чому визначаються топологією їх підсистем та елементів. Топологія підсистем і елементів, в свою чергу, визначає топологію зв'язків, що забезпечують функціонування ТО як єдиного цілого, реалізуючи взаємодію між елементами та підсистемами.

Технологічний об'єкт, як система, що подається у традиційному вигляді $s = \langle E, R \rangle$ (де E – множин елементів; R – множина відношень між елементами), може бути реалізований множиною різних топологій G^* . Виходячи з цього кожній з топологічних реалізацій об'єкта $G \in G^*$, буде відповідати оригінальний набір властивостей, що визначаються відображенням φ [6]:

$$\varphi : (E, R, G) \rightarrow P. \quad (1)$$

З урахуванням (1) під час вирішення комплексу задач системної оптимізації опис ТО має відобразити її топологічні властивості:

$$s = \langle E, R, G \rangle, G = \langle G_E, G_R, G_A \rangle \quad (2)$$

де G – топологічна реалізація структури об'єкта $\langle E, R \rangle$, G_E – топологія елементів, G_R – топологія зв'язків, G_A – топологія, яка визначається технологією функціонування об'єкта.

На перших етапах оптимізації шляхом аналізу цілей об'єкта, умов його функціонування та його бажаних властивостей P' визначаються підмножини елементів E' , відношень R' і топологій G' , на яких він може бути реалізований. На наступних етапах визначаються такі підмножини елементів $E^o \subseteq E'$, відношень $R^o \subseteq R'$ і топологій $G^o \subseteq G'$ (2), які забезпечують найбільш ефективне досягнення необхідних властивостей P' .

Метою оптимізації ТО є максимізація його ефективності (співвідношення розміру ефекту від його функціонування Q і витрачених ресурсів C). Ефект від використання ТО розглядається як неубутна функція від витрачених на його досягнення ресурсів $\bar{Q} = F(\bar{C})$ (де \bar{Q} , \bar{C} – узагальнені скалярні оцінки ефекту і витрат; F – оператор, що відображає стратегію використання ресурсів). Узагальнено задача системної оптимізації ТО може бути подана так:

$$s^o = \arg \max_{s \in S^*} \Theta[\bar{Q}(s), \bar{C}(s) : \bar{Q}(s) \geq \bar{Q}^*, \bar{C}(s) \leq \bar{C}^*], \quad (3)$$

де \bar{Q}^* , \bar{C}^* – граничні рівні наведених оцінок ефекту і витрат.

Формалізація цілей створення ТО і задач їх оптимізації (3) є досить загальною та потребує деталізації, що

дозволить встановлювати зв'язок показників ефекту і витрат з його структурними, параметричними, топологічними та технологічними характеристиками (2).

Тісний взаємозв'язок задач структурного, функціонального, параметричного і топологічного синтезу, що вимагає їх спільного розв'язання, призводить до складної проблеми, для розв'язання якої необхідна розробка відповідної системної методології [5-7].

Проведений огляд сучасного стану проблеми системної оптимізації ТО виявив протиріччя, яке вказує на те, що існуючі технології припускають умовно незалежне розв'язання задач їх структурної, топологічної, параметричної та технологічної оптимізації, що не дозволяє забезпечувати ефективність та наступність рішень, які приймаються на різних етапах їх життєвих циклів. Це визначає актуальність завдання розробки методології системної оптимізації ТО, що передбачає коректну декомпозицію проблеми на комплекси задач, які відносяться до різних рівнів опису й етапів їх оптимізації, розробку комплексу відповідних математичних моделей, методів і технологій.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Складні технологічні об'єкти складаються з великої кількості елементів зі складною схемою взаємозв'язків між ними. Створення їх єдиного опису є складною слабоструктурованою проблемою, що складається з сукупності неповністю визначених задач, для яких не сконструйовані моделі та методи розв'язання [5-7]. Будемо розглядати її як метазадачу *MetaTask*, яка складається з множини задач $\{Task^l\}$, $l = \overline{1, n_l}$, $i = \overline{1, n_i}$, що відносяться до різних ієрархічних рівнів, з їх взаємозв'язками за вхідними даними та результатами розв'язання:

$$MetaTask = \{Task^l\}, Task^l = \{Task_i^l\}, l = \overline{1, n_l}, i = \overline{1, n_i}, \quad (4)$$

де n_l – кількість рівнів опису, i_l – кількість задач на рівні l .

Кожну із задач на цьому етапі будемо подавати у вигляді перетворювача даних [8]:

$$Task_i^l : In_i^l \rightarrow Out_i^l, l = \overline{1, n_l}, i = \overline{1, n_i}, \quad (5)$$

де In_i^l , Out_i^l – відповідно вхідні та вихідні дані i -ої задачі l -го рівня.

На метарівні ($l = 0$) проблема розглядається в цілому, аналізується її місце серед інших проблем ТО та надсистеми, до складу якої він входить.

Більшість задач макрорівня ($l = 1$) за своєю суттю є задачами системної оптимізації та відрізняються обмеженнями, які відображають специфіку етапів життєвого циклу ТО [6]:

$$Task^l = \{Task_i^l\}, i = \overline{1, 5}, \quad (6)$$

де $Task_1^1$ – формування вимог і розробка технічного завдання оптимізації, $Task_2^1$ – системне проектування, $Task_3^1$ – планування розвитку, $Task_4^1$ – адаптація; $Task_5^1$ – реінжиніринг.

Комплекс задач метарівня ($l = 2$) охоплює все коло питань системної оптимізації ТО, що виникають на стадіях його передпроектних досліджень, проектування, створення й експлуатації [6]:

$$Task^2 = \{Task_i^2\}, \quad i = \overline{1,6}, \quad (7)$$

де $Task_1^2$ – вибір принципів побудови, $Task_2^2$ – вибір структури, $Task_3^2$ – визначення топології елементів і зв'язків, $Task_4^2$ – вибір технології функціонування, $Task_5^2$ – визначення параметрів елементів і зв'язків, $Task_6^2$ – оцінка ефективності і вибір рішень.

При реалізації системного підходу до проблеми оптимізації ТО необхідно визначити раціональну послідовність розв'язання комплексу виділених задач (6) – (7).

Технологія розв'язання задачі системної оптимізації ТО базується на ідеях агрегативно-декомпозиційного підходу, системного аналізу і системного проектування складних систем [8-9]. На основі формалізації мети створення ТО (3) та її декомпозиції на комплекси взаємопов'язаних задач (6) – (7) може бути обрана мережева модель задачі її системної оптимізації. На основі мережевої моделі може бути створена логічна схема системної оптимізації, що дозволить визначити раціональну послідовність розв'язання комплексу задач системної оптимізації (7).

Для створення схеми системної оптимізації ТО S_{SOS} необхідно визначити п'ятірку множин [6-9]:

$$\Sigma_{SOS} = \langle T\alpha\sigma\kappa, Iv\Delta\alpha\tau, P\epsilon\sigma, \Delta\epsilon\sigma\Delta\epsilon\chi, Proc\Delta\epsilon\chi \rangle, \quad (8)$$

де $Tasks = \langle Task_i^2 \rangle$, $i = \overline{1,6}$ – впорядкована множина задач (7), $InDat$ – множин вхідних даних задач, Res – множин обмежень, $DesDec$ – множин оптимізаційних рішень, $ProcDec$ – вирішальна процедура, що ставить кожній парі вхідних даних і обмежень $\langle InDat_i^2, Res_i^2 \rangle$ непорожню підмножину оптимізаційних рішень $\{DesDec_i^2\}$, $i = \overline{1,6}$.

Усі задачі (7) із множини $Tasks$ (8) є повністю розв'язаними, якщо для всіх задач $Task_i^2$, $i = \overline{1,6}$ існують оптимізаційні процедури $ProcDec_i^2$, $i = \overline{1,6}$ і кожне оптимізаційне рішення $DesDec_i^2$, $i = \overline{1,6}$ є єдиним, $|ProcDec_i^2(InDat_i^2, Res_i^2)| = 1$, $\forall i = \overline{1,6}$.

У процесі аналізу взаємозв'язків моделей задач системної оптимізації (7) кожну з моделей будемо подавати у вигляді:

$$\begin{aligned} \text{Mod}\otimes\alpha\sigma\kappa_i^2 : \{Iv\Delta\alpha\tau_{iE}^2, Iv\Delta\alpha\tau_{iF}^2, P\epsilon\sigma_i^2\} \rightarrow \\ \rightarrow \Delta\epsilon\sigma\Delta\epsilon\chi_i^2, \quad i = \overline{1,6}, \end{aligned} \quad (9)$$

де $InDat_{iE}^2$ – множина зовнішніх по відношенню до комплексу задач (7) вхідних даних, $InDat_{iF}^2$ – множина внутрішніх по відношенню до комплексу задач (7) вхідних даних, Res_i^2 – множина обмежень i -ої задачі, $DesDec_i^2$ – розв'язок i -ої задачі.

За результатами аналізу комплексу задач (7) встановлено, що зовнішні по відношенню до них вхідні дані $InDat_{iE}^2$, для всіх задач $i = \overline{1,6}$ є однаковими [9]. Аналіз вхідних і вихідних даних моделей задач системної оптимізації $ModTask_i^2$, $i = \overline{1,6}$ показав, що всі вони залежні між собою по внутрішнім вхідним і вихідним даним. Виходячи з цього технологію розв'язання загальної задачі системної оптимізації доцільно будувати на основі послідовної ітераційної схеми [8].

При цьому з отриманого оптимізаційного рішення $DesDec_i^2$ чергової задачі $Task_i^2$, $i = \overline{1,5}$ формуватимуться вхідні дані $InDat_{i+1}^2$ і обмеження Res_{i+1}^2 в вирішальних процедурах $ProcDec_{i+1}^2$ для наступних задач $Task_{i+1}^2$. У такий спосіб буде здійснюється «замикання» задач послідовної схеми [8-9]:

$$\begin{aligned} \exists DesDec_i^2 \in DesDec: Tr(InDat_{i+1}^2 \vee Res_{i+1}^2 \in DesDec_i^2), \\ i = \overline{1,5}, \end{aligned} \quad (10)$$

де $DesDec$ – множина оптимізаційних рішень, $Tr(True)$ – істинність висловлювання $(InDat_{i+1}^2 \vee Res_{i+1}^2 \in DesDec_i^2)$.

При визначенні черговості розв'язання задач оптимізації $Task_i^2$, $i = \overline{1,6}$ в рамках послідовної схеми слід прагнути до мінімізації ступеня їх нерозв'язності за вхідними даними і мінімізації складності загальної процедури оптимізації.

З огляду на це задача вибору принципів побудови ТО $Task_i^2$, яка визначає обмеження на множин допустимих варіантів його побудови S^* для всіх інших задач комплексу (7), повинна розв'язуватися раніше за задачі $Task_j^2$, $j = \overline{2,6}$.

Задача оцінки ефективності варіантів і вибору кінцевого оптимізаційного рішення $Task_6^2$ використовує вихідні дані (рішення) всіх інших задач комплексу і тому повинна розв'язуватися в останню чергу.

Визначення топології ТО $Task_3^2$ неможливе без знання його організаційної або функціональної структури, яка визначається в результаті розв'язання задачі $Task_2^2$.

Виходячи з цього, розв'язання задачі $Task_2^2$ має передувати розв'язанню задачі $Task_3^2$.

Виходячи з того, що об'єкт може бути побудований на різнотипних елементах і зв'язках між ними, а елементи можуть використовувати різні алгоритми функціонування, задачі їх визначення $Task_5^2$ і $Task_4^2$ доцільно розв'язувати після розв'язання задачі $Task_2^2$, за результатами розв'язання якої визначається їх кількість.

Остаточний вибір технології функціонування ТО може бути здійснений тільки з урахуванням потокових траєкторій усередині об'єкта, то розв'язання задачі вибору технології $Task_4^2$ доцільно знаходити після розв'язання задачі $Task_3^2$.

Розв'язання задачі вибору технології функціонування $Task_4^2$ можна отримувати як до, так і після вибору параметрів елементів і зв'язків об'єкта $Task_5^2$. В останньому випадку можуть частіше виникати ситуації не виконання обмежень при заданих значеннях параметрів елементів і зв'язків, що вимагають повторного розв'язання попередніх задач. Задачу параметричного синтезу $Task_5^2$ пропонується розв'язувати після розв'язання задачі технологічного синтезу $Task_4^2$, що доцільно здійснювати в умовах максимальних (найменш жорстких обмежень) значень параметрів.

Оптимізаційні рішення задач $DesDec_i^2$, $i = \overline{1,6}$ є такими, що можуть бути подані в категоріях їх моделей $ModTask_i^2$, $i = \overline{1,6}$ (9) і допускають порівняння за множиною часткових критеріїв (показників) $K(s)$ [8].

За результатами аналізу взаємозв'язків комплексу задач (7) запропонована ітераційна схема отримання його загального оптимізаційного рішення, що дозволяє формувати відсутні вхідні дані задач за результатами рішень, отримуваних на попередній ітерації.

Внаслідок невіршеності задач $Task_i^2$, $i = \overline{2,5}$ за вхідними даними в запропонованій схемі формування вхідних даних $InDat_i^2$ і обмежень Res_i^2 , $i = \overline{2,5}$ для них на початковій ітерації буде здійснюватися на основі прогнозних (експертних) оцінок. На інших ітераціях як вхідні дані $InDat_i^2$ і обмеження Res_i^2 , $i = \overline{2,5}$ будуть використовуватися результати розв'язання наступних задач $DesDec_j^2$, $j > i$, $i = \overline{1,5}$.

Елементи запропонованої технології системної оптимізації були використані при розв'язанні задач проектування та реінжинірингу великомасштабних об'єктів [10-12].

З урахуванням взаємозв'язку задач структурної, топологічної, параметричної та технологічної оптимізації виконані формалізація системного опису та цілей створення технологічних об'єктів, що відображають показники їх ефекту і витрат ресурсів на їх створення і експлуатацію. Виконано декомпозицію проблеми системної оптимізації технологічних об'єктів, що дозволила виділити задачі їх аналізу і синтезу, які вирішуються на основних етапах їх життєвих циклів. Це сприяє забезпеченню наступності рішень, прийнятих на всіх етапах життєвих циклів об'єктів. З урахуванням взаємозв'язку виділених задач за вхідними і вихідними даними запропоновані схема і метод системної оптимізації технологічних об'єктів. Практичне використання розробленої технології дозволить підвищити ефективність процедур системної оптимізації технологічних об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] С.В. Илюшина, Методы оптимизации технологических процессов / Илюшина С.В. // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 8. – С. 323–327.
- [2] А.С. Довбыш, Трёхальтернативная обучающаяся система поддержки принятия решений для автоматизации технологического процесса / А.С. Довбыш, О.Б. Берест // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – № 4 (29). – С. 31 – 40.
- [3] В.В. Фролов, Метод комбинаторно-оптимизационного проектирования технологических систем механической обработки / В.В. Фролов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2012. – № 54. – С. 125–131.
- [4] Управление развитием крупномасштабных систем. Современные проблемы. Выпуск 2. / С.Н. Васильев, А.А. Макаров, В.Л. Макаров, Н.А. Махутов и др.; под ред А.Д. Цвиркуна. – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 2015. – 477 с.
- [5] Э.Г. Петров, Территориально распределенные системы обслуживания / Э.Г. Петров, В.П. Пискалова, В.В. Бескоровайный. – Киев: Техника, 1992. – 208 с.
- [6] В.В. Бескоровайный, Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем / Бескоровайный В.В. // Автоматизированные системы управления и приборная автоматика. – 2002. – Вып. 120. – С. 29–37.
- [7] Дж. Клир, Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. / Клир Дж. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.
- [8] А.А. Тимченко, Основы системного проектирования та аналізу складних об'єктів: У 2-х кн. Кн. 1. Основы САПР та системного проектирования складных об'єктів / Тимченко А.А. / За ред. В.И. Бикова. – К.: Либідь, 2000. – 272 с.
- [9] В.В. Бескоровайный Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных систем / Бескоровайный В.В. // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 3. – С. 94 – 96.
- [10] V. Beskorovainyi, Reengineering the topological structure of large-scale monitoring systems / Beskorovainyi V., Podoliaka K. // ECOTECHMOD. – 2015. – Vol. 4 (3). – P. 13–18.
- [11] V. Beskorovainyi, Technology of large-scale objects system optimization / Beskorovainyi V., Imanhulova Z. // ECOTECHMOD. – 2017. – Vol. 06. – №4. – P. 3–8.
- [12] В.В. Бескоровайный, Разработка системологической модели проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга / Бескоровайный В.В., Подольяка К.Е. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №3(75). – С. 37 – 42.

Перегляд Гіпотез при Моделюванні Нелінійних Задач Динаміки Резервуарів з Рідиною

Олег Лимарченко
кафедра механіки суцільних середовищ
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
Київ, Україна
olelim2010@yahoo.com

Revision of Hypotheses on Modeling of Nonlinear of Reservoirs Dynamics Problems with Liquid

Oleg Limarchenko
department of continuum mechanics
The Taras Shevchenko Kiev National University
Kiev, Ukraine
olelim2010@yahoo.com

Анотація—Нові експериментальні дослідження поведінки рідини в резервуарах при вібраційному збудженні в околі резонансу призвели до прояву явищ, які не відображаються широко вживаними моделями нелінійної динаміки резервуарів з рідиною. Аналіз гіпотез, які використовуються при побудові таких моделей, дозволив визначити помилкові припущення і уникнути суперечливих результатів.

Abstract—New experimental studies of behavior of liquid in reservoirs under vibrational excitations in a vicinity of resonance result in manifestation of phenomena, which are not reflected by the widely used models of nonlinear dynamics of reservoirs with liquid. The analysis of hypotheses, used on construction of such models, allows determination of false assumptions and avoid conflicting results.

Ключові слова—математична модель, експериментальні результати, аналіз гіпотез

Keywords—mathematical model, experimental results, analysis of hypotheses

I. ВСТУП

Конструкції з рідиною з вільною поверхнею є широким класом об'єктів машинобудування і транспорту. Складні проблеми в динамічній поведінці таких систем виникають у випадках, коли відносна маса рідини є достатньо великою і визначальним є поведінка рідини. Існують різні типи задач динаміки конструкцій з рідиною: перехідні процеси, резонансні процеси і задачі керування рухом. В

усіх цих задачах (крім короткотривалих перехідних процесів) вирішальним є врахування резонансних властивостей системи.

В останнє десятиріччя з'явилися експерименти, виконані в Норвегії, Індії і Великобританії, які дозволили уточнити характеристики поведінки конструкцій з рідиною в білярезонансному діапазоні частот. В підсумку це дозволило переглянути гіпотези, які використовувалися при моделюванні таких систем. Відмова від необґрунтованих гіпотез дозволила одержати результати, які добре узгоджуються з даними експериментів.

Дослідження останніх років показали, що лінійні моделі динаміки відповідають лише на найпростіші питання динамічної поведінки таких систем. Найбільш повно властивості конструкцій з рідиною описують нелінійні моделі. Нажаль при створенні нелінійних моделей ряд використаних гіпотез, які перейшли з лінійних задач до нелінійних виявилися суперечливими. Нові експериментальні і обчислювальні роботи вільні від таких гіпотез привели до необхідності переглянути вихідні гіпотези.

II. НЕОБґРУНТОВАНІ ГІПОТЕЗИ І ЇХНІ НАСЛІДКИ

В більшості нелінійних моделей динаміки резервуарів з рідиною з вільною поверхнею використовуються такі сумнівні гіпотези.

- За резонансну частоту приймається частота парціальних коливань системи по першій формі коливань

вільної поверхні рідини. Така гіпотеза ігнорує сумісність руху компонент системи (тіло – рідина) і призводить, як правило, до частот, які на 30–100% нижче реальних власних частот коливань. Особливо ця різниця зростає при розгляді похилих рухів резервуара. При цьому важливо, що при сумісних коливаннях зміна відбувається лише для частот форм, які призводять до зміни положення центру мас системи, які стають залежними від співвідношення мас рідини і конструкції. Тому відбувається зміна черговості розташування частот, що змінює характеристики внутрішнього енергообміну.

- В багаточастотній нелінійній системі взаємозалежних коливань необгрунтовано використовується гіпотеза про можливість нехтування коливаннями на власних частотах форм, відмінних від частоти зовнішнього збудження. Така гіпотеза в літературі приймалася лише до задач з одним ступенем вільності і не виконується для нелінійних багаточастотних систем. Як наслідок використання такої некоректної гіпотези в системі розглядаються лише коливання на основній частоті, а також на подвоєній, потроєній і т.д. час-татах, що наперед гарантує періодичність процесу через кратність частот. Якщо ж додати коливання на власних частотах інших форм, то кратність частот зникає, що в підсумку призводить до суттєвого прояву модуляції коливань і аперіодичності.
- Приймається гіпотеза про можливість реалізації заданого руху резервуара. Тобто, фактично знову ігнорується фактор сумісності руху конструкції і рідини.

Якщо впровадити коректну систему гіпотез, то на відміну від результатів теоретичних робіт [1–4] вдається одержати добре якісне узгодження з результатами експериментів і, зокрема, спостерігаються такі суттєві результати:

- Відсутність виходу системи при гармонічному зовнішньому збудженні на режим усталених коливань.
- Суттєвий прояв дрейфу середнього значення коливань і вищих гармонік в дорезонансній зоні і домінуючий прояв модуляції коливань в білярезонансній і зарезонансній зонах частот.
- Суттєва зміна частот і ряду динамічних характеристик в залежності від співвідношення мас конструкції і рідини, прояв внутрішніх резонансів, обумовлених зміною розташування частот при їх розміщенні за зростанням.

Більш строге обгрунтування гіпотез вихідної моделі дозволило підвищити надійність і достовірність математичного моделювання нелінійних динамічних процесів в конструкціях, що несуть рідину з вільною поверхнею, при вібраційних, ударних и керівних діях.

III. ОСНОВНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Наведемо основні експериментальні результати дослідження коливань вільної поверхні рідини при гармонічному збудженні поперечних коливань резервуара. На рис. 1 наведено дослідження роботи [5], де розглядалася поведінка системи на частоті незначно меншій за резонансну. Результат одержано на основі МСЕ. Звернемо увагу на те, що в системі спостерігається суттєва модуляція і вихід на усталену амплітуду не відбувається.

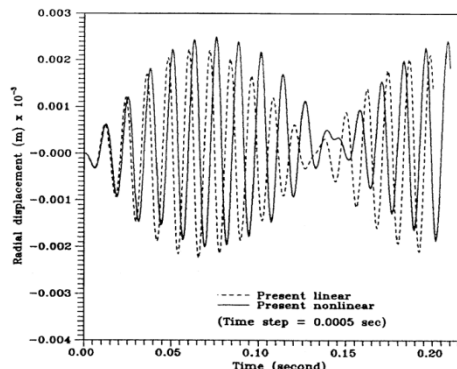


Рис. 1. Амплітуди коливань рідини на стінці бака на основі лінійної і нелінійної моделей

В роботі [6] одержано подібний результат на основі МСЕ для резонансної частоти, проте зазначено, що в рамках лінійної моделі зростання амплітуд необмежене (рис. 2).

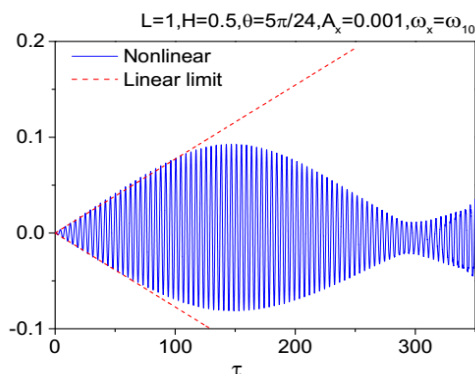


Рис. 2. Амплітуди коливань рідини на стінці бака на основі лінійної (тренд) і нелінійної моделей

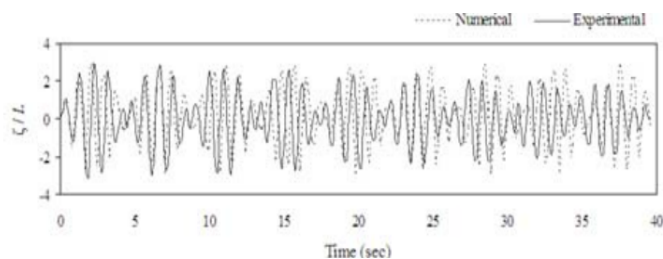


Рис. 3. Амплітуди коливань рідини на стінці бака на основі експерименту і нелінійної моделей

Порівняння теоретичних і обчислювальних результатів для резонансного збудження коливань виконане в роботі [7] (рис. 3). Помітно, що прояв модуляції є домінуючим, з

часом амплітуда хвиль зменшується, вихід на усталений режим коливань не спостерігається.

В роботі [8] проведено експериментальне моделювання поведінки рідини в резервуарі при горизонтальному поперечному збудженні коливань на парціальній частоті, що відповідає основному тону коливань. Виходячи з того, що реальна власна частота більша за парціальну, фактично розглядається дорезонансний режим. Наведені на рис. 4 результати відрізняються від попередніх даних експериментів і розрахунків. Висновок авторів про вихід системи на усталений режим є безумовно помилковим, проте, якщо прийняти, що фактично розглядається дорезонансний режим, то помітний прояв внеску вищих гармонік, дрейф середнього значення амплітуд коливань і слабкий прояв модуляції. В будь-якому разі вихід на усталений режим, на який наполягають автори, не спостерігається.

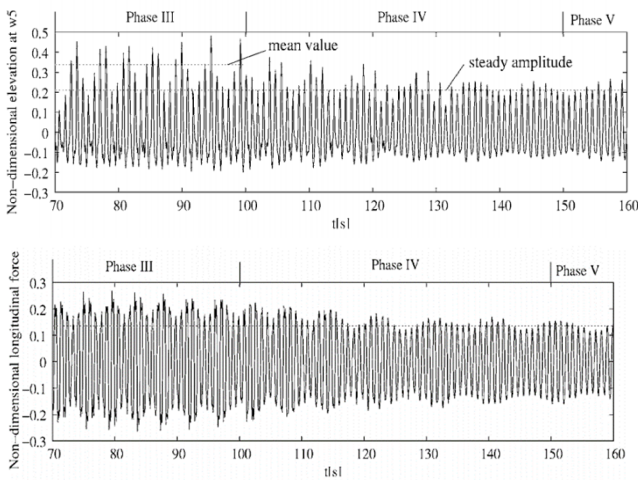


Рис. 4. Амплітуди коливань рідини на стінці бака визначені на основі експерименту

IV. МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ КОРЕКТНОЇ СИСТЕМИ ГІПОТЕЗ

Для випадку резервуару в формі кругового конуса при збудженні його руху на основі моделі нелінійної моделі сумісного руху з відмовою від необґрунтованих гіпотез було одержано такі результати. На рис. 5–7 показано поведінку системи при силовому збудженні руху системи на частотах 0,5; 1,02 і 1,25 від власної частоти коливань системи за першою формою (визначеної не як парціальна частота, а як частота сумісних коливань).

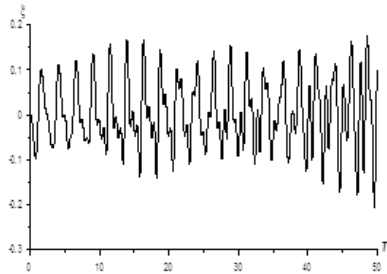


Рис. 5. Коливання вільної поверхні рідини на стінці резервуара в дорезонансному діапазоні збудження

На дорезонансній частоті (рис. 5) вагомо проявляється вплив вищих гармонік, дрейф середнього і слабкий вплив модуляції. При коливаннях в околі резонансу внесок вищих гармонік послаблена, суттєвим є прояв модуляції, дрейф середнього значення відсутній. При коливаннях на зарезонансній частоті частота модуляції зростає, проте основні властивості поведінки системи подібні до випадку коливань на білярезонансній частоті. В усіх випадках виходу системи на режим усталених коливань не відбувається. Тому інтерпретація коливань через амплітудно-частотну характеристику виглядає помилковою

Наведені результати було одержано на основі моделі роботи [9], де описано аналітичний метод визначення динамічної поведінки резервуара з рідиною в рамках нелінійного моделювання з врахуванням сумісності руху конструкції і рідини з вільною поверхнею. Зауважимо, що в цьому методі при побудові моделі не використовуються зазначені вище гіпотези, що в підсумку дозволило одержати результати, які якісно узгоджуються з основними експериментальними і розрахунковими даними.

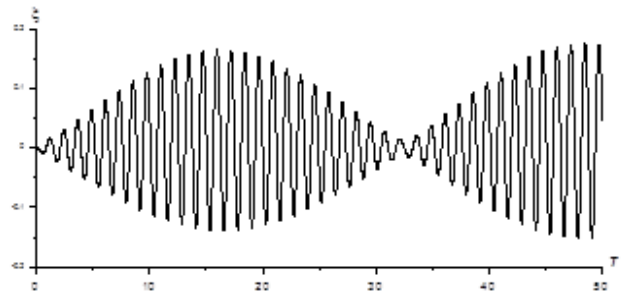


Рис. 6. Коливання вільної поверхні рідини на стінці резервуара в білярезонансному діапазоні збудження

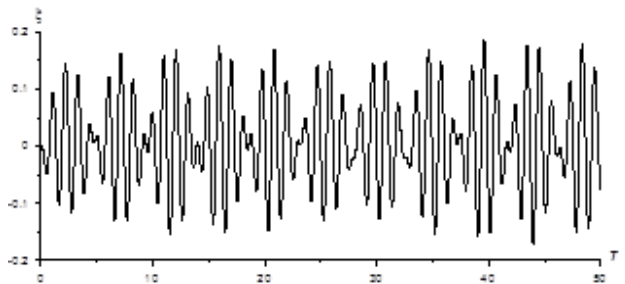


Рис. 7. Коливання вільної поверхні рідини на стінці резервуара в зарезонансному діапазоні збудження

Модель основана на варіаційному формулюванні задачі у вигляді принципу Гамільтона-Остроградського. При цьому, як відомо цей підхід вимагає попереднього виключення всіх кінематичних граничних умов задачі. Виключення цих умов складатиметься з двох етапів. Лінійні граничні умови виключаються на основі вибору координатних функцій у вигляді форм коливань вільної поверхні рідини. Виключення нелінійної кінематичної граничної умови виконується на основі методу Гальоркіна. Перевагою цього прийому була можливість виконати таке

виключення з врахуванням довільної кількості форм коливань рідини. Особливою вимогою для резервуарів нециліндричної форми є вимога збереження об'єму рідини, яка прямо пов'язана з умовою розв'язності задачі Неймана для рівняння Лапласа, яким описується вихідна задача. Вимога виконання збереження об'єму рідини поділяється на два рівні. По-перше, треба щоб форми коливань з високою точністю задовільняли умові неперетікання через стінки резервуара, по-друге, при збудженні форм коливань через нахил стінок відбувається на нелінійному рівні зміна об'єму рідини, яку треба коригувати за рахунок опускання чи підйому рівня відліку цієї форми відносно рівня незбудженої вільної поверхні.

Розклади шуканих змінних збурення вільної поверхні рідини ξ і потенціалу швидкостей φ подаємо у вигляді:

$$\xi = \bar{\xi}(t) + \sum_i a_i \bar{\psi}_i(\alpha) T_i(\theta) \quad \varphi_0 = \sum_i b_i \psi_i(\alpha, \beta) T_i(\theta)$$

$$\text{де } \bar{\psi}_i(\alpha) = \left. \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \right|_{\beta=0} = \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \psi_i}{\partial \beta} - \frac{\alpha f'}{f} \frac{\partial \psi_i}{\partial \alpha} \right) \Big|_{\beta=0}, \text{ а } \psi_i(\alpha, \beta)$$

отримуються з розв'язку лінійної задачі на власні значення. Кут θ відділено як співмножник $T_i(\theta)$ для осесиметричної вихідної області. $\psi_i(\alpha, \beta)$ є гармонічними і згідно вимог умов розв'язності уточнено задовольняють вимогу неперетікання на змоченій границі $\Sigma = \Sigma_0 + \Delta\Sigma$ (бічній границі з границею, куди можуть досягати гребні хвиль). За незалежні змінні обираються параметри ξ та $\bar{\xi}$, а змінна φ вважається залежною.

Сукупність амплітудних параметрів a_i розкладу збудженої вільної поверхні рідини в ряд за формами вільних коливань вважається незалежною, а параметри b_i розкладу в ряд потенціалу швидкостей, вважаються залежними від a_i , тобто $b_i = b_i(a_i, a_k)$. Згідно принципів аналітичної механіки задача вимагає виключення кінематичної крайової умови на вільній поверхні, що зумовлено наявністю вільної поверхні рідини. Виключення кінематичної граничної умови і вимоги збереження об'єму рідини на вільній поверхні дає

$$b_p^{(1)} = \dot{a}_p; b_p^{(2)} = \sum_{i,j} \dot{a}_i a_j \gamma_{ij}^o;$$

$$b_p^{(3)} = \sum_{i,j,k} \dot{a}_i a_j a_k \delta_{ijk}^o; b_p^{(4)} = \sum_{i,j,k,l} \dot{a}_i a_j a_k a_l h_{ijkl}^o.$$

$$\bar{\xi}_1 = 0; \quad \bar{\xi}_2 = -\frac{e_2}{e_1} \sum_{i,j} a_i a_j \beta_{ij}^v; \quad \bar{\xi}_3 = \frac{e_3}{e_1} \sum_{ijk} a_i a_j a_k \gamma_{ijk}^v;$$

$$\bar{\xi}_4 = -\frac{e_4}{e_1} \sum_{ijkl} a_i a_j a_k a_l \delta_{ijkl}^v.$$

Таким чином, параметри $\bar{\xi}$ і b_i як залежні змінні виключаються з розгляду. Це дозволяє перейти до застосування варіаційного принципу Гамільтона–Остроград-

ського для вільної системи, рух якої визначається незалежними параметрами a_i і $\bar{\xi}$. На основі рівнянь Лагранжа II роду одержимо таку математичну модель сумісного руху системи "резервуар-рідина" в амплітудних параметрах a_i та параметрах руху тіла, яке несе $\bar{\xi}$

$$\sum_{n=1}^N p_{rn}(a_k, t) \ddot{a}_n + \sum_{n=N+1}^{N+3} p_{rn}(a_k, t) \ddot{\bar{\xi}}_{n-N} = q_r(a_k, \dot{a}_l, t), r = \overline{1, N+3}$$

Вирази для p_{rn} та q_r , де p_{rn} – квадратна матриця, а q_r – вектор розмірності $N+3$, представляються через алгебраїчні форми від нульового до третього порядків від амплітудних параметрів a_i та узагальнених швидкостей \dot{a}_j . Саме ця модель у формі звичайних диференціальних рівнянь відносно амплітудних параметрів використовувалася для чисельного моделювання біляреонансних процесів, приведених на рис. 5–7, які добре узгоджуються з даними експериментів.

ВИСНОВОК

Перегляд базових гіпотез, які взяті за основу побудови нелінійних моделей динамки конструкцій з рідиною дозволив уникнути суперечностей з новими експериментальними результатами і досягти доброго якісного узгодження експериментальних результатів з результатами чисельного моделювання.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Луковский И.А. Введение в нелинейную динамику твердого тела с полостями, содержащими жидкость. Киев: Наукова думка, 1990. 295 с.
- [2] La Rocca M., Sciortino G., Adduce C., Boniforti M. A., Experimental and theoretical investigation on the sloshing of a two-liquid system with free surface // *Physics of Fluids*, 2005., **17**, 062101. – P. 1-17.
- [3] Faltinsen O. M., Rognebakke O. F., Timokha A.N., Transient and steady-state amplitudes of resonant three-dimensional sloshing in a square base tank with a finite fluid depth // *Physics of Fluids*, 2006, **18**, 112103 – P. 1-14
- [4] Kubenko V.D., Koval'chuk P.S, Modeling the nonlinear interaction of standing and traveling bending waves in fluid-filled cylindrical shells subject to internal resonances // *Int. Appl. Mech.*, 2014, **50**, N 4. – P. 353 – 364.
- [5] Pal N.C., Bhattacharyya S.K., Sinha P.K., Non-linear coupled slosh dynamics of liquid-filled laminated composite containers: A two dimensional finite element approach // *Journak of Sound and Vibration*, April 2003. – P. 1-12
- [6] Zhang Ch., Li Y., Meng Q., Fully nonlinear analysis of second order sloshing resonance in a three-dimensional tank // *Computers&Fluids* 2015, **116**, – P. 88-104
- [7] Pal P. Sloshing of liquid in partially filled container – an experimental study // *International Journal of Recent Trends in Engineering*. 2009. **1**, № 6. – P. 1-5.
- [8] Faltinsen O.M., Rognebakke O.M., Timokha A.N. Transient and steady-state amplitudes of resonant three-dimensional sloshing in a square base tank with a finite fluid depth // *Physics of fluids*, 2006, **1**, № 18. – P. 1-14.
- [9] Лимарченко О.С., Ясинский В.В. Нелинейная динамика конструкций с жидкостью. Киев: НТТУ КПИ, 1997, 338 с.

Спектральні Методи в Прикладних Задачах

Ярослав П'янило

Відділ математичних методів обчислювального експерименту Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
danylo794@gmail.com

Олег Браташ

Відділ математичних методів обчислювального експерименту Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
olebra31@gmail.com

Галина П'янило

Відділ математичних методів обчислювального експерименту Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
danylo794@gmail.com

Spectral Methods in Applied Problems

Yaroslav Pyanylo

Department for Mathematical Methods of Computing
Experiment in Center of Mathematical Modeling
of Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics
and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
danylo794@gmail.com

Oleh Bratash

Department for Mathematical Methods of Computing
Experiment in Center of Mathematical Modeling
of Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics
and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
olebra31@gmail.com

Halyna Pyanylo

Department for Mathematical Methods of Computing
Experiment in Center of Mathematical Modeling
of Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics
and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
danylo794@gmail.com

Анотація—Запропоновано метод розв'язування диференціальних рівнянь у дробових похідних за часом із використанням многочленів Лагерра. Розв'язок визначено з трикутної системи диференціальних рівнянь у звичайних або частинних похідних за координатами. Отримані результати апробовано на модельній задачі.

Abstract—The method for solving differential equations in fractional time derivatives using Laguerre polynomials is proposed. The solution is found from triangular system of

differential equations in ordinary or partial coordinate derivatives. The obtained results are tested on the model problem.

Ключові слова—диференціальні рівняння; дробові похідні; многочлени Лагерра.

Keywords—differential equations; fractional derivatives; Laguerre polynomials.

I. ВСТУП

Математичне моделювання природних процесів базується, як правило, на заміряних даних. При цьому дані можуть бути в довільних точках і з невисокою точністю. Тому для використання цих даних при вирішенні задач математичної фізики необхідна їх попередня обробка. Оброблення даних може проходити в декілька етапів: візуальна обробка, фільтрація отриманої інформації, апроксимація. Адитивні шуми відфільтровуються, в основному, апроксимацією сигналів. Фільтрація мультиплікативних шумів зводиться до вирішення інтегральних рівнянь типу згортки, лінійної або нелінійної. Для оброблення сигналів використовують спектральні методи. До недавнього часу використовувались ортогональні базиси, в яких побудовані швидкі перетворення. Це було пов'язано, в основному, з малою швидкодією обчислювальної техніки. Аналіз цих базисів показав, що вони не всі задовольняють вимоги, які перед ними ставляться. Тому для оброблення цифрової інформації почали використовувати інші відомі базиси або будувати нові.

Спектральні методи дають можливість розв'язувати задачі в тому випадку, коли функції, що входять в математичну модель опису фізичного процесу, зображаються збіжними рядами за даним базисом. Серед спектральних базисів заслуговують на увагу базиси многочленів Якобі $P_n^{(\alpha, \beta)}(x)$ та Чебишева-Лагерра $L_n^\lambda(t)$,

де $\alpha > -1, \beta > -1$ – вільні параметри, n – порядок многочлена, $(\lambda > -1, t \in [0, \infty))$. В теорії ортогональних рядів відомі теореми, в яких сформульовано умови збіжності.

Спектральні методи розв'язування задач зводяться до обчислення узагальнених $f_n (n = 0, \dots, \infty)$ спектрів, а способи їх обчислення залежать від виду вхідної інформації. Якщо апроксимуюча функція $f(t)$ – задається аналітично, то мають місце параметричні зображення узагальнених спектрів.

При заданні вхідних значень в дискретній формі, тобто відомі значення $f(x_j), j = \overline{1, N}$, для знаходження узагальнених спектрів можна використати квадратурні формули для обчислення відповідних інтегральних представлень, метод найменших квадратів або ж інші способи. В деяких випадках у залежності від вхідної інформації можна вказати оптимальні в класі L_2 формули для обчислення узагальнених спектрів.

Нехай многочлени $u_n(x)$ ортогональні на проміжку $[a, b]$ і функція $\varphi(x)$ подається ортогональним рядом за даними многочленами

$$\varphi(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi_n}{r_n} u_n(x). \quad (1)$$

Відомо [1], що $N+1$ -ий ортогональний многочлен має $N+1$ дійсний корінь, який належить до проміжку ортогональності. Тоді для обчислення узагальнених спектрів φ_n має місце оптимальна в L_2 квадратурна формула [2]

$$\varphi_n = \sum_{j=0}^N \rho_j^2 u_n(x_j) \varphi(x_j), \quad (2)$$

де x_j – корені рівняння $u_{N+1}(x_j) = 0$, а

$$\rho_j^{-2} = \sum_{i=0}^N u_i^2(x_j). \quad (3)$$

II. ЗГЛАДЖЕННЯ (УСЕРЕДНЕННЯ) ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИГНАЛІВ

Задано значення функції $F(t)$ в точках t_i . За означенням усереднення функції на проміжку $t \in [0, l]$ задається формулою

$$F_c = \frac{1}{l} \int_0^l F(t) dt. \quad (4)$$

III. АПРОКСИМАЦІЯ СИГНАЛІВ В БАЗИСІ МНОГОЧЛЕНІВ ЧЕБИШЕВА-ЛАГЕРРА

Вибір виду апроксимації функції $f(t)$ відповідним рядом доцільно проводити на основі апріорної інформації. Многочлени Чебишева-Лагерра мають той істотний недолік, що при великих n їхня поведінка наступна [1]

$$L_n^\lambda(t) = O\left(e^{t/2} t^{-(2\lambda+1)/4} n^{(2\lambda-1)/4}\right).$$

Ця властивість многочленів Чебишева-Лагерра значно звужує клас задач, в яких використовується ортогональне перетворення, оскільки виникають обчислювальні труднощі при сумуванні відповідного ряду для великих t . На практиці ця проблема розв'язується введенням масштабного множника. Однак зміна масштабного множника вимагає повторного розв'язку задачі й приводить до нестійкості в обчисленні оригіналу $f(t)$. Тому перетворення Чебишева-Лагерра узагальнено наступним чином [2].

Нехай

$$f_n = \int_0^\infty t^{\nu\lambda+\nu-1} e^{-\mu t} L_n^\lambda(\mu t^\nu) f(t) dt, \quad (5)$$

де $\mu > 0, |\nu| < \infty, \nu \neq 0$. Тоді $f(t)$ буде обчислюватися за формулою

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n! f_n}{\Gamma(n+\lambda+1)} L_n^\lambda(\mu t^\nu). \quad (6)$$

Слід відзначити, що поряд з використанням узагальнених многочленів Чебишева-Лагерра можна застосовувати спектральний розклад в базисі функцій Лагерра

$$\varphi_n(t) = e^{-t/2} L_n^\lambda(t), \quad \lambda > -1, \quad (7)$$

що є ортогональними на проміжку $[0, \infty)$ і зберігають всі основні властивості многочленів Чебишева-Лагерра. При $n \rightarrow \infty$ і $t \rightarrow \infty$ функції Лагерра $\varphi_n(t)$ прямують до нуля.

Нехай функція $f(t)$ апроксимується частковою сумою ряду

$$f(t) = t^\lambda e^{\gamma t} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n}{r_n} \varphi_n(t/h), \quad (8)$$

де $\gamma (|\gamma| < \infty)$ та $h (0 < h < \infty)$ – деякі сталі, r_n – нормуючий множник. Тоді для обчислення коефіцієнтів f_n мають місце формули

$$f_n = \int_0^{\infty} e^{-\gamma h \tau} f(h\tau) \varphi_n(\tau) d\tau, \quad (9)$$

$$f_n \approx \sum_{m=0}^N \frac{\lambda_m e^{-\gamma h \lambda_m} f(h\lambda_m)}{[(N+2)\varphi_{N+2}(\lambda_m)]^2} \varphi_n(\lambda_m).$$

В останній формулі λ_m є коренем функції $\varphi_{N+1}(\tau)$. З формули (7) випливає, що корені функції Лагерра $\varphi_n(t)$ на проміжку ортогональності співпадають з коренями многочленів Чебишева-Лагерра.

IV. ПОБУДОВА ПОЧАТКОВО-ГРАНИЧНИХ УМОВ ПРИ МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДИФУЗІЇ ГАЗУ В НЕОДНОРІДНИХ ПОРИСТИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Фізичні процеси в реальних тілах, як правило, описуються диференціальними рівняннями (системами диференціальних рівнянь) в часткових похідних [3-5]. Причому існуючі методи розв'язування поставлених на їх основі задач математичної фізики вимагають аналітичного вигляду початково-граничних умов. Разом з тим на практиці, зокрема при моделюванні процесів переносу частин природного середовища, існуючі способи експериментального збору інформації вимірювання дають можливість отримувати дані про розподіл шуканих величин (температури, вологості, тиску газу, тощо) у дискретному вигляді з невисокою точністю в нерівновіддалених точках. Тому першим етапом дослідження відповідних математичних моделей процесів переносу є побудова вхідної інформації в параметричній формі.

V. ФІЛЬТРАЦІЯ МУЛЬТИПЛИКАТИВНИХ ШУМІВ

Багато прикладних задач (зокрема обробки інформації, лідарні рівняння і т.п.) зводяться до інтегральних рівнянь типу згортки. При цьому вхідні дані задаються в дискретному виді. Це вимагає використання числових методів розв'язування цих рівнянь. Існує два основних підходи до числового розв'язування інтегральних рівнянь I-го роду типу згортки: використання регуляризованих алгоритмів тихоновського типу або апроксимація безпосередньо вихідного рівняння. Обидва ці методи не позбавлені деяких недоліків [3].

Використання алгоритмів тихоновського типу призводить до втрати вольтерровості, що значно знижує

можливість відновлення шуканих функцій для розглядуваних областей їх застосування і застосування малих кроків сітки.

Головним недоліком другого напрямку є відсутність обліку нестійкості числового розв'язку до похибок вхідної інформації, що виводить розв'язок збуреного рівняння за межі множини коректності. Крім того, не всі квадратурні формули породжують збіжні методи. Побудовано алгоритми розв'язання інтегральних рівнянь

$$\alpha f(t) + \mu \int_0^t k'(t-\tau) f(\tau) d\tau = y(t), \quad (10)$$

$$\mu \int_0^t k(t-\tau) f(\tau) d\tau = y(t). \quad (11)$$

в базисі Чебишева-Лагерра $L_n^\lambda(t)$, $\lambda > -1$. Тут α, μ – деякі сталі, $f(t)$ – шукана функція, $k(t)$ – ядро рівняння. Вважається, що функції, які входять в інтегральні рівняння (10) і (11) задовольняють умови, що дозволяють зобразити їх рядами Фур'є-Лагерра. Відновлення шуканого розв'язку зводиться до визначення невідомих коефіцієнтів f_n . Зокрема, якщо функції, що входять в рівність (10), подати у вигляді рядів Фур'є-Лагерра, то формула для визначення невідомих коефіцієнтів буде мати вигляд

$$f_n = \frac{1}{\alpha + \mu(k_0 - k(0))} \left(y_n - \mu \sum_{m=1}^n k_m f_{n-m} \right). \quad (12)$$

Аналогічна формула отримується і для невідомих коефіцієнтів в рівнянні (11). Тут k_m та f_m – коефіцієнти Фур'є-Лагерра функцій $k(t)$ і $f(t)$. Оскільки коефіцієнти k_n та y_n можна вважати відомими, то за формулою (12) визначається лагеррівський спектр невідомої функції $f(t)$. Таким чином рівняння (10) можна вважати розв'язаним.

VI. ПОХІДНІ ДРОБОВИХ ПОРЯДКІВ В ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧАХ

Під час моделювання багатьох фізичних процесів, зокрема, фільтрації речовини в складному пористому середовищі, необхідно враховувати історію процесу. Математичне моделювання фізичних процесів зводиться, зазвичай, до побудови диференціальних рівнянь (або їх систем) у частинних похідних і формулювання відповідних задач математичної фізики. Моделі такого роду не враховують історії процесу. Тому для дослідження таких процесів все частіше використовується дробове (диференціальне й інтегральне) числення [6, 7]. Аналітичні методи розв'язування задач, які виникають, зазвичай, будуються на базі операційного перетворення Лапласа. Наявні таблиці відповідності між оригіналами та зображеннями або використання контурного інтегрування не завжди приводить до необхідного результату. Використання наближених методів обернення не може гарантувати необхідної точності відновлення оригіналу. Одним із підходів для уникнення цієї проблеми є застосування спектрального методу в базисі многочленів Лагерра до розв'язування задач дробового числення.

У літературі введено декілька видів дробових похідних та інтегралів. Найбільш вживаними є дробові похідні в термінах Капуто та Ріманна-Ліувілля. Оператор дробової похідної у термінах Капуто визначається так [8]:

$${}^c D_t^\alpha = \frac{\partial^\alpha}{\partial t^\alpha} \varphi(t) := \frac{1}{\Gamma(m+1-\alpha)} \int_0^t \frac{\partial^{m+1}}{\partial \xi^{m+1}} \varphi(\xi) (\tau-\xi)^{\alpha-m} d\xi \quad (13)$$

де $m = [\alpha]$, $[\cdot]$ — ціла частина дійсного числа, а в термінах Ріманна-Ліувілля —

$$D_t^\alpha = \frac{\partial^\alpha}{\partial t^\alpha} \varphi(t) := \frac{1}{\Gamma(m+1-\alpha)} \frac{\partial^{m+1}}{\partial \xi^{m+1}} \int_0^t \frac{\varphi(\xi)}{(t-\xi)^{\alpha-m}} d\xi. \quad (14) \quad (2)$$

Однією із задач, де застосування дробових похідних є ефективним, виступає моделювання процесу роботи складних газотранспортних систем, зокрема, фільтрація газу в пористому середовищі. Остання у термінах дробової похідної Ріманна-Ліувілля за часовою змінною описується рівнянням [9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kh}{\mu\chi} \frac{\partial p^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{kh}{\mu\chi} \frac{\partial p^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{kh}{\mu\chi} \frac{\partial p^2}{\partial z} \right) = \\ = 2mh \left(\frac{\partial^\alpha}{\partial t^\alpha} \left(\frac{p}{\chi} \right) + 2qp_{at} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Тут α — степінь дробової похідної; $k = k(x, y, z, t)$, $m = m(x, y, z)$ та $h = h(x, y, z)$ — коефіцієнти проникності, пористості та товщина середовища відповідно; μ — динамічна в'язкість речовини, p_{at} — атмосферний тиск, q — густина відбору, χ — коефіцієнт стисливості газу, для обчислення якого побудовано значну кількість емпіричних формул на основі експериментальних даних, зокрема,

$$\chi = 1/(1 + fp) \quad (16)$$

Тут $f = (24 - 0,21t^\circ C) \cdot 10^4$, а $p(x, y, z, t)$ вимірюється в атмосферах.

Задача полягає у знаходженні розв'язку $p(x, y, z, t)$ рівняння (15) за відомими значеннями тиску $p(x_i, y_i, z_i, t_0)$ у заданих точках середовища й умовою непроникності на контурі середовища.

1. Аналітичний спосіб вирішення задач математичної фізики за наявності похідних дробових порядків базується на інтегральному перетворенні Лапласа. Якщо \mathfrak{Z} оператор перетворення Лапласа-Карсона, то має місце рівність $\mathfrak{Z}(D_{a+}^\alpha f(t)) = s^\alpha [F(s) - f(0)]$, де

$F(s)$ - зображення Лапласа-Карсона оригіналу $f(t)$. Для знаходження оригіналів зображень з параметром

перетворення s^α можна використати теорему Ефроса або функції Міттаг-Леффлера.

2. Основним числовим методом є схема Грюнвальда-Летнікова.

$${}^{GL} D_\tau^\alpha p := \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta t)^{-\alpha} \sum_{j=0}^{\lceil \tau/\Delta t \rceil} (-1)^j \binom{\alpha}{j} p(\tau - j\Delta t)$$

Оператор Грюнвальда-Летнікова (11) апроксимується на проміжку $[0, \tau]$ з підінтервальним кроком Δt як

$${}^{GL} D_\tau^\alpha p(\tau) \approx \sum_{j=0}^{\lceil \tau/\Delta t \rceil} c_j^{(\alpha)} p(\tau - j\Delta t), \quad c_j^{(\alpha)} = (\Delta t)^{-\alpha} (-1)^j \binom{\alpha}{j}.$$

Коефіцієнти $c_j^{(\alpha)}$ обчислюються на базі рекурентного співвідношення $c_j^{(\alpha)} = (\Delta t)^{-\alpha}$, $c_j^{(\alpha)} = [1 - (1 + \alpha)/j] c_{j-1}^{(\alpha)}$.

Для $j = 1$ маємо $c_1^{(\alpha)} = -\alpha(\Delta t)^{-\alpha}$.

До інших методів можна віднести застосування квадратурних формул, метод скінчених різниць та скінчених елементів, тощо.

VII. ЗАСТОСУВАННЯ МНОГОЧЛЕНІВ ЧЕБИШЕВА-ЛАГЕРРА ДО ЛІНЕАРИЗОВАНОГО РІВНЯННЯ

Оскільки в природі пористі середовища є невеликої потужності, то фільтрацією в вертикальному напрямі можна знехтувати. Рішення задачі будемо шукати у вигляді ряду

$$p(x, y, t) = t^{\lambda_k + \lambda_p} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n! p_n(x, y)}{\Gamma(n + \lambda_p + 1)} L_n^{\lambda_k + \lambda_p}(t). \quad (17)$$

Тоді для знаходження коефіцієнтів $p_n(x, y)$ отримується система диференціальних рівнянь відносно $p_n(x, y)$.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Я.Д.П'янило, В.Г.Собко Побудова та дослідження біортогональних поліномів на базі многочленів чебишева. - Прикл. проблеми мех.. і мат. - 2013.-Вип. 11.- С. 181-189.
- [2] Ярослав П'янило, Марія Васюник, Іван Васюник Використання многочленів Лагерра до спектрального методу розв'язування рівнянь у дробових похідних за часом // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. - 2013. - Вип.17. - С. 163-167.
- [3] Нахушева В. А. Некоторые классы дифференциальных уравнений математических моделей нелокальных физических процессов. — Нальчик: КБНЦ РАН, 2002. — 100 с.
- [4] Диткин В. А., Прудников А. П. Операционное исчисление. — Москва: Высшая школа, 1975. — 407 с.
- [5] Диткин В. А., Прудников А. П. Справочник по операционному исчислению. — Москва: Высшая школа, 1965. — 466 с.
- [6] Самко С. Г., Килбас А. А., Маричев О. И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. — Минск: Наука и техника, 1987. — 688 с.
- [7] Васильев В. В., Симак Л. А. Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем. — Киев: Научное издание НАН Украины, 2008 — 256 с.
- [8] Псху А. В. Уравнения в частных производных дробного порядка. — Научно-исследовательский ин-т приклад, математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — Москва: Наука, 2005. — 199 с.
- [9] Нахушев А. М. Дробное исчисление и его применение. — Москва: Физматлит, 2003. — 272 с.

Формування Масиву Вхідних Даних для Класифікації Друкованих Текстів в Технології Багаторівневого Інтелектуального Моніторингу

Марія Голуб

кафедра інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
Черкаський державний технологічний університет
Черкаси, Україна
mas-golub@yandex.ua

Formation of Input Data Array for Classification of Printed Texts in Multilevel Intelligent Monitoring Echnolog

Maria Holub

dept. of Information Security and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University
Cherkasy, Ukraine
mas-golub@yandex.ua

Анотація — В роботі описано процес розв'язання однієї із задач інтелектуального аналізу даних - класифікації текстових повідомлень. Подані результати досліджень процесу перетворення друкованого тексту до типової форми масиву вхідних даних синтезатора моделей. Синтезатор моделей є елементом моніторингової інтелектуальної системи. Він використовується для синтезу моделей-класифікаторів. Вони дозволяють згрупувати тексти за заданими вимогами. За кількістю вірно класифікованих текстів оцінюють ефективність результатів удосконалення процесу формування ознак та побудови точок спостереження. Запропоновано використати в якості показника інформативності ознаки ймовірність її використання у окремому вікні тексту. Експериментально підтверджено доцільність використання такого показника інформативності ознаки.

Abstract — The paper describes the process of solving one of the tasks of the intellectual analysis of data - the classification of text messages. The results of researches of the process of conversion of the printed text into the typical form of the input array of model synthesizer are given. The simulator of the models is an element of the monitoring intellectual system. It is used for the synthesis of modeling classifiers. They allow you to group texts according to the given requirements. The number of correctly classified texts evaluates the effectiveness of the results

of improving the process of forming signs and building points of observation. It is suggested to use as an indicator of the informativity of a sign the likelihood of its occurrence in a separate text box. The expediency of the use of such indicator of the informative nature of the sign has been experimentally confirmed.

Ключові слова— класифікація, текст, модель, МГУА

Keywords— classification, text, model, GMDH

I. ВСТУП

Інтелектуальний аналіз друкованих текстових повідомлень є дієвим засобом забезпечення інформацією процесів прийняття рішень (ППР). З метою розширення можливостей технологій моніторингу, зокрема інформаційного моніторингу, розв'язуються традиційні завдання інтелектуального аналізу даних – класифікація, структурна та параметрична ідентифікація, прогнозування та інші. Перелік цих завдань та їх поєднання залежить від потреб ППР, цілями, що досягає особа, що приймає рішення (ОПР), предметною галуззю, де використовується інформація, яка тримана із друкованих текстовий повідомлень. Найчастіше метою класифікації текстових повідомлень є їх групування за авторством, певними характеристиками стану автора (вік, стать, освіченість,

фізичне та психологічне здоров'я, належність до певної спільноти).

Актуальність досліджень, пов'язаних із класифікацією текстових повідомлень та визначенням характеристик їх авторів визначається потребою у протидії методам та засобам інформаційної війни, яка зараз ведеться проти України. Одним із потужних інструментів, що здатні розв'язувати подібні задачі, є технології інформаційного моніторингу. Значна популярність МІС пов'язана із задоволенням інформаційних потреб військових, бізнесу, народного господарства, медицини, екології та інших галузей.

Інформаційна технологія багаторівневого моніторингу застосовується у випадках, коли необхідно забезпечити процеси прийняття рішень інформацією, яку треба здобувати «по крихтах» із багатьох різномірних джерел [1]. Однією із складових цієї технології є методи інтелектуального аналізу текстів (Text Mining).

На сьогодні існує кілька класів задач, що розв'язуються методами інтелектуального аналізу текстів. Класифікація і кластеризація текстів [2] використовується для здобування ключових слів, реферування, тематичне індексування. Поєднання в єдину технологію методів класифікації та структурно-параметричної ідентифікації дозволяє розв'язати задачі виявлення та аналізу зв'язків між поняттями, пошуку ключових фраз для навігації по текстах. На сьогодні не до кінця усвідомлені можливості використання методів прогнозування в процесі інтелектуального аналізу текстів.

Багаторівневий інформаційний моніторинг реалізується шляхом формування глобальної функціональної залежності – функціонала, який перетворює результати різномірних спостережень у відомості про властивості об'єктів. Властивості описують здатність об'єкта реагувати на зовнішні впливи. Ці властивості враховуються в процесі формування управлінських рішень — послідовності керуючих впливів, що забезпечують перехід об'єкта із даного стану в запланований. Природньо, що кожна МІС будується під індивідуальні потреби особи, що приймає рішення (ОПР).

Процеси пошуку інформації заданого змісту, пошуку текстів, авторами яких є задані категорії осіб, виявлення текстів, що несуть в собі ворожий для України зміст та виконання багатьох інших завдань є функціями технологій інформаційного моніторингу [3].

Результати класифікації текстів залежать від інформативності МВД. Носієм інформації є ознаки. Вдале формування словника ознак забезпечує можливість існуючими інструментами синтезатора моделей побудувати вирішуюче правило у вигляді поліноміальної або іншої подібної моделі, яка дозволяє максимально адекватно класифікувати тексти. При недостатній інформативності МВД збільшують кількість інформативних ознак шляхом обробки текстів до їх

перетворень або після них. Одним із засобів підвищення інформативності МВД є перетворення текстів за словником ознак і побудова точок спостереження шляхом обробки частотних характеристик показників із словника текстових повідомлень. Недостатньо дослідженими залишаються процеси побудови точок спостережень. Невирішеними залишаються завдання виявлення впливу процесу побудови точок спостереження на результати класифікації текстів.

В цій роботі подані результати досліджень, метою яких є доведення ефективності нового підходу до побудови технологій багаторівневого інформаційного моніторингу – поєднання багаторівневого моделювання моніторингових інформаційних систем (МІС) та методів глибинної декомпозиції друкованих текстів для формування словника інформативних ознак та розрахунку їх чисельних характеристик, що входять до масиву вхідних даних (МВД) [4].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для виявлення властивостей автора текстового повідомлення необхідно розв'язати задачу класифікації. У випадку Text Mining математична постановка завдання має такий вигляд.

Нехай відомий початковий перелік текстів, що утворюють множину T :

$$T = f(t_1, t_2, \dots, t_m) \quad (1)$$

і перелік властивостей їх авторів, що утворюють множину класів Z :

$$Z = f(z_1, z_2, \dots, z_n) \quad (2)$$

Яка властивість автора відображена в якому тексті відомо для обмеженої кількості елементів навчальної підмножини T^n :

$$T^n = \{(t_1, z_1), (t_2, z_2), \dots, (t_n, z_n)\} \quad (3)$$

Існує невідома цільова залежність – відображення

$$z^* : T \rightarrow Z \quad (5)$$

значення якої відоме на елементах підмножини T_n . Необхідно побудувати модель

$$a : T \rightarrow Z, \quad (6)$$

що здатна вірно класифікувати невідомий текст із підмножини $\{t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_m\} \in T$.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджувався процес класифікації текстів, який передбачає:

1) декомпозицію текстів на ділянки однакової довжини, що звуться вікнами;

2) формування словника ознак;

3) розрахунок показника інформативності ознак;

4) формування точок спостереження у багатовимірному просторі ознак. Точка спостереження має вигляд строчки у матриці чисельних характеристик (ознак) тексту;

5) формування масиву вхідних даних шляхом поєднання окремих точок спостереження різних текстів у класи;

6) побудова правила групування точок спостереження у класи. Правило групування має вигляд моделі-класифікатора, що отримується шляхом машинного навчання нейромереж, синтезу поліноміальних моделей МГУА та інших еволюційних методів;

7) побудови інформаційної технології класифікації текстів шляхом поєднання методів визначення інформативності ознак, відбір та поєднання у словники сукупності інформативних ознак, методів формування точок спостереження різних текстів та поєднання їх в масив вхідних даних, методів синтезу моделі-класифікатора, методів формування сукупності моделей-класифікаторів та одночасного їх використання в процесі інтелектуального аналізу текстів.

Крім того інформаційна технологія класифікації текстів повинна містити результати розв'язання задачі координації – узгодження взаємодій різних методів, що забезпечує максимальну кількість вірно класифікованих текстів та їх частин.

Для кожного із етапів цієї ІТ необхідно знайти спільну стратегію розв'язку задач параметричної оптимізації локальних процесів перетворення інформації. Параметрична оптимізація кожного із локальних процесів повинна покращувати результати глобального процесу класифікації тексту – збільшувати кількість вірно класифікованих текстів.

Була сформульована гіпотеза про те, що адаптивність МВД забезпечується шляхом оптимізації довжини вектору ознак \vec{X} , довжини вікна, виявлення переліку ознак необхідної інформативності, підвищення інформативності масиву вхідних даних вцілому шляхом побудови точок спостереження. Інформативність ознаки тим вища, чим частіше ця ознака використовується у тексті.

Для розрахунку інформативності окремої ознаки в цій роботі застосовувався імовірнісний критерій [5]:

$$K_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i} 100\%, \quad (7)$$

де K_i – показник інформативності i -ї ознаки; γ_i – частість i -ї ознаки (кількість разів, що використана i -та ознака у окремому вікні), n – кількість ознак у МВД.

Для експериментальної перевірки цієї гіпотези розв'язувалась задача класифікації текстів за гендерною ознакою автора. Було задано 2 класи: 1- жінки; 2- чоловіки.

В якості АСМ використовувався багаторядний алгоритм МГУА [6].

В процесі планування експерименту за критерій якості моделі використовувався показник кількості вірно розпізнаних вікон у тексті. Було сплановано двофакторний експеримент. Досліджувався вплив зміни розміру вікна та мінімальної інформативності ознак, що були відібрані із словника, на результати класифікації текстів. Частість застосування кожної ознаки у одному вікні утворюють строчку в МВД – точку спостереження у багатовимірному просторі ознак. Кількість вікон, перелік ознак та їх частість дозволяють сформувати МВД.

Досліджувались 20 текстів, отриманих із журналістських інтернет-публікацій.

За результатами цього дослідження виявлені залежності зміни кількості вірно класифікованих точок спостереження при зростанні інформативності ознаки, що розрахована за критерієм (7) при декомпозиції тексту на вікна різної довжини. Закономірності зміни кількості вірно класифікованих точок спостереження для вікон різної довжини різні.

Зростання значення показника інформативності приводить до збільшення кількості вірно класифікованих точок тільки на окремих ділянках. Результати класифікації точок спостереження, отримані для значень показника інформативності 5% і 7% дозволяють стверджувати, що підвищення індивідуальної інформативності ознаки не завжди дозволяє отримати підвищення інформативності всього масиву. При зростанні інформативності ознак кількість вірно класифікованих точок зменшується. Це може бути спричинено зростанням впливу на результат моделювання суміщених ознак при зростанні їх інформативності [7] та впливом факторів, які не ввійшли до плану експерименту.

При значенні показника інформативності ознак 1,5% і 3% в умовах експерименту вдалось отримати максимальну кількість вірно розпізнаних точок за умови, що довжина вікна буде 2000 знаків. Але при цьому при застосуванні переліку ознак, що мають імовірність застосування у вікні 1,5 % їх кількість – 151, а при застосуванні переліку ознак із 3% імовірністю застосування, їх кількість 34, тобто зменшується більше ніж в 4 рази. Це дозволяє зменшити кількість комп'ютерних ресурсів, зокрема часу, на побудову окремої моделі, підвищивши таким чином ефективність методу. Оскільки параметрична оптимізація в цій технології реалізується шляхом багаторазового синтезу та випробування моделей, зменшення часу синтезу окремої моделі є показником значимим.

Аналізувались залежності зміни кількості вірно класифікованих точок від довжини вікна тексту при різних показниках імовірності застосування ознаки у вікні, що є показником інформативності цієї ознаки. Виявлено, що оптимальною довжиною вікна для розв'язку задачі класифікації текстів за гендерною ознакою в цих умовах доцільно вважати 2000 знаків. Отриманий результат у 100% вірно класифікованих точок спостереження дозволяє класифікувати текст за однією точкою.

Для підвищення інформативності МВД була сформульована гіпотеза, що закономірність зміни значення дисперсії ознаки при зростання кількості елементів, за якою ця дисперсія розрахована є індивідуальною характеристикою кожного класу.

Для перевірки цієї гіпотези був проведений експеримент.

Точка спостереження формувалась шляхом розрахунку дисперсії ознаки у фіксованій кількості вікон. ПО тексту формувалась шляхом розрахунку частоти використання ознаки у кожному вікні. Послідовне поєднання вікон утворює масив чисельних характеристик. Запропоновано розбити масив даних ПО на ділянки по z вікон (строчок) і розрахувати дисперсію кожної ознаки в цих z вікнах. Результати розрахунків утворюють точку спостереження МВД. Кількість точок спостереження у МВД буде в z разів менше в порівнянні з первинним описом. Після цього розв'язується типова задача синтезу моделі-класифікатора, визначення розділяючої поверхні для класів, та його випробування на тестовій послідовності точок. Тестова послідовність точок спостереження не використовувалась в процесі синтезу моделі-класифікатора.

Для формування МВД була проведена декомпозиція текстів на вікна з розміром 500 знаків. Всі тексти були розділені на 2 класи: 1 – Жінки, 2- Чоловіки. Для дослідження вибрані тексти авторів, що були задіяні в попередніх дослідженнях.. Моделі-класифікатори синтезувались за багаторядним алгоритмом МГУА [6].

Перевага нового методу формування точок спостереження в таблиці 2 розраховувалась за формулою:

$$x_3 = \frac{(x_2 - x_1)}{x_1} 100\%, \quad (6)$$

де x_3 – відносна перевага нового методу, x_2 – нормована до 100% кількість вірно класифікованих вікон із існуючим методом формування точок, x_1 – нормована до 100% кількість вірно класифікованих вікон із новим методом формування точок.

Результати досліджень дозволяють стверджувати, що перевага нового методу побудови точок спостереження забезпечується на кожному рівні експерименту і складає від 19,29% до 161,51%. Це означає, що сформульована гіпотеза експериментально підтверджена.

ВИСНОВКИ

Підвищення інформативності масиву вхідних даних при розв'язанні задачі класифікації текстів досягається шляхом параметричної оптимізації процесу формування МВД та обробкою результатів моделювання кількох ділянок текстів.

Запропоновано новий метод класифікації текстових повідомлень, що передбачає формування словника інформативних ознак, декомпозицію тексту на ділянки однакової довжини, перетворення тексту на масив його характеристик, побудову моделей-класифікаторів, випробування цих моделей на текстах, що не використовувались при їх створенні. На відміну від існуючих методів запропоновано для кожної задачі формувати індивідуальний перелік інформативних ознак і індивідуально підбирати довжину вікон – ділянок, на які розбиваються тексти перед перетворенням.

Для масивів вхідних даних із недостатньою інформативністю запропоновано удосконалити новий метод класифікації текстів шляхом застосування процедури обробки результатів моделювання кількох вікон, на основі яких формуються точки спостереження в МВД. Новий метод побудови точок спостереження переважає існуючий в цих умовах дослідження на (19,29 – 161,51)%.

Недослідженими залишаються випадки, коли система не забезпечує надійного розв'язку поставленої задачі, наприклад на передостанньому рівні експерименту із мінімальною інформативністю ознак 5%.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Голуб С.В. Консолідація моделей в процесі багаторівневого опрацювання даних / С.В. Голуб Інформація, комунікація, суспільство 2014: матеріали 3-ї Міжнар. наук. конференції ICS-2014. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – С. 162-163.
- [2] Плескач В.Л., Затонацька Т.Г. Інформаційні системи і технології на підприємствах. К.: Знання, 2011. –718 с..
- [3] Голуб С.В. Багаторівневе моделювання в технологіях моніторингу оточуючого середовища. Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2007. – 220 с..
- [4] Голуб С.В. Відображення властивостей текстового документа в багатовимірних моделях інформаційних систем комп'ютерного моніторингу / С.В. Голуб // Інформація, комунікація, суспільство 2013: Матеріали 2-ї Міжнародної наукової конференції ICS-2013. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 180-181.
- [5] Голуб С.В. Формування показників масиву вхідних даних для ідентифікації авторства текстових повідомлень / С.В. Голуб, О.В. Константиновська, М.С. Голуб // Системи обробки інформації : збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба, 2014. – Вип. 2 (118). – С. 89-92..
- [6] Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / Ивахненко А.Г. – К.: Наукова думка, 1981. – 296 с..
- [7] Голуб С.В. Зниження суміщеності сигналів в методах синтезу індуктивних моделей / С.В. Голуб // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 1(29). – С.150-152.

Інформаційна Система Короткочасного Прогнозування

Сергій Васильович Голуб
кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень
Черкаський національний університет
ім. Б. Хмельницького
Черкаси, Україна
fpkpk@ukr.net

Світлана Юріївна Куницька
кафедра інформаційної безпеки та комп'ютерної
інженерії
Черкаський державний технологічний університет
Черкаси, Україна
kunitskaya33@gmail.com

Short-term Forecasting Information System

Sergii Golub
dept. of the intellectual systems of making decision
Cherkasy National University them B. Khmelnytsky
Cherkasy, Ukraine
fpkpk@ukr.net

Svitlana Kunytska
dept. of information security and computer engineering
Cherkasy State Technological University
Cherkasy, Ukraine
kunitskaya33@gmail.com

Анотація—В роботі розглянута інформаційна система, завдяки якій відбувся процес автоматизації роботи прогнозуючого фільтру, що побудований як інструмент для обчислюваного та прогнозуючого процесу. Синтезували моделі різної складності завдяки обраному поліному Колмогорова-Габора 2 ступеня. Наведено обґрунтування вибору полінома, створення системи умовних рівнянь та кількості рівнянь в нормалізованій системі за принципом їх формування.

Результати обчислень навчених моделей дозволили не тільки визначити похибки прогнозу, а також проаналізувати поведінку всього процесу в цілому. Завдяки обчисленню середнє квадратичної похибки прогнозу можемо визначити найбільш оптимальну модель, необхідну для перевірки прогнозованої послідовності. І чим менший показник похибки у відсотках, тим краща навчена модель зі всіх прогнозованих послідовностей.

Вся інформація щодо обчислень, обрання масиву вхідних даних, отриманих значень моделей та виду синтезованої моделі, а також обчислення похибки прогнозу зберігається в історичних даних автоматизованої системи. Інформаційна система має об'ємний програмний алгоритм прогнозуючого фільтру у вигляді зручного для користувача інтерфейсу.

Abstract—The paper considers the information system through which the process of automating the work of the prediction filter, which is constructed as a tool for the computational and predictive process, has been considered. Synthesized models of varying complexity due selected Kolmogorov-Gabor polynomial 2 degrees. The reasons for choosing a polynomial, creating a system of conditional equations and the number of equations in a normalized system based on the principle of their formation are given.

The results of calculations trained models allowed not only to determine the forecast error and to analyze the behavior of the

entire process as a whole. By calculating the mean square error of the forecast, we can determine the most optimal model required for checking the predicted sequence. They explained that the lower the percentage error, the better the trained model from all the predicted sequences.

All information on the calculations, the selection of the input array, the obtained values of models and the type of the synthesized model, as well as the calculation of the forecast error, is stored in the historical data of the automated information system. The information system has a comprehensive program algorithm for predictive filter in the form of a user-friendly interface.

Ключові слова—умовні рівняння; експериментальні точки; нормалізована система; модель; похибка; прогнозування.

Keywords—conditional equations; experimental points; normalized system; model; error; forecasting.

I. Вступ

Однією з найважливіших характеристик прогнозування є класифікація (типологія) прогнозів, що базується залежно від класифікаційних ознак. Такими ознаками можуть бути: масштаби об'єкта; час випередження; елементи відтворення; функції прогнозу; джерела прогновної інформації і т. д. За часом випередження (прогнозним горизонтом) прогнози класифікують як оперативні, короткострокові, середньострокові, довгострокові та далекострочкові (рис. 1). Зазначені прогнози відрізняються один від одного не тільки тривалістю прогнозного горизонту, а й характером прогновної інформації (кількісні, якісні параметри) та гіпотезою про можливість зміни певних тенденцій розвитку в межах прогнозного горизонту.

Види прогнозу	Оперативні	Коротко-строкові	Середньострокові	Довгострокові	Далеко-строкові
Прогнозний горизонт	1—3 місяці	До 1 року	1—5 років	5—10 років	10—20 років
Характер інформації	Кількісна		Кількісно-якісна	Якісно-кількісна	Якісна
Гіпотеза про можливість зміни тенденцій	Зміни тенденцій не очікується			Можлива зміна тенденцій	

Рис. 1. Класифікація прогнозів за часом випередження

Методами прогнозування називають сукупність прийомів і оцінок, що дають змогу на підставі аналізу колишніх (ретроспективних) внутрішніх і зовнішніх зв'язків, притаманних об'єкту, а також їхніх змін зробити достатньо вірогідне судження щодо майбутнього розвитку об'єкта. Вибір методів прогнозування здійснюється згідно з характером об'єкта та вимогами, які пред'являються до інформаційного забезпечення прогнозів [1].

До формалізованих методів прогнозування належать методи прогнозу екстраполяції та моделювання. Використання формалізованих методів доцільне за наявності достатньої фактографічної інформації і чіткої тенденції розвитку об'єкта прогнозування.

Методи екстраполяції базуються на припущенні того, що закономірність (тенденція) розвитку об'єкта в минулому буде незмінною протягом певного часу і в майбутньому. Але, оскільки в дійсності тенденція розвитку може змінюватися, то прогнозні результати слід розглядати як імовірнісні.

Залежно від особливостей змін рівнів у динамічних рядах екстраполяції можуть бути простими і складними.

Першу групу становлять методи прогнозування, які базуються на припущенні відносної стійкості в майбутньому абсолютних значень рівнів, середнього рівня ряду, середнього абсолютного приросту, середнього темпу зростання.

Друга група методів базується на визначенні основної тенденції, тобто використанні статистичних формул, які описують тренд. Тренд — це відображення певною функцією тенденції ряду динаміки. Його зображують у вигляді гладкої кривої (траєкторії). Тренд характеризує головну закономірність руху об'єкта в часі. Складні методи екстраполяції можна поділити на два основні типи: адаптивні й аналітичні.

Адаптивні методи прогнозування ґрунтуються на тому, що процес їхньої реалізації полягає у визначенні наступних у часі значень прогнозного показника з урахуванням ступеня впливу попередніх рівнів. До них належать методи ковзної та експоненціальної середніх, метод гармонійних ваг, авторегресія.

В основу аналітичних методів прогнозування (кривих зростання) покладено принцип одержання за допомогою

методу найменших квадратів оцінки детермінованої компоненти, що характеризує основну тенденцію.

Найбільш поширеними є методи прогнозування, засновані на статистичному моделюванні. Методи статистичного моделювання поділяються на дві групи.

1. Метод прогнозування на підставі одиничних рівнянь регресії. Форму взаємозв'язку одного явища з іншими явищами, об'єктами і процесами можна зобразити у вигляді рівняння регресії: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$. Прогноз здійснюється підстановкою в нього значень ознак-факторів і оцінкою очікуваного середнього значення результативної ознаки. Для встановлення області розсіювання визначаються довірчі інтервали. Прогнозування за регресивними моделями може здійснюватися тільки після перевірки моделей на адекватність.

2. Метод прогнозування на підставі системи рівнянь взаємозв'язаних рядів динаміки. Цей метод є найскладнішим, але з його допомогою можна одержати оцінку не тільки результативної, а й факторних ознак, тобто аналіз взаємозв'язаних рядів динаміки виражається за допомогою системи рівнянь регресії. Прогноз у такому разі ліпше піддається змістовій інтерпретації, ніж звичайна екстраполяція.

За означенням, прогнозування — процес передбачення майбутнього стану предмета чи явища на основі аналізу його минулого і сучасного, систематично оцінювана інформація про якісні й кількісні характеристики розвитку обраного предмета чи явища в перспективі. Результатом прогнозування є прогноз — знання про майбутнє і про ймовірний розвиток сьогочасних тенденцій конкретного явища-об'єкту в подальшому існуванні.

Згідно вище описаної інформаційної складової відносно видів прогнозів та методів прогнозування зробимо висновок, що в роботі використовується кількісна характеристика розвитку короткочасного прогнозу, тому що саме ця характеристика базується на математичних моделях та історичних даних використовуючи певні методи прогнозування.

II. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Процес короткочасного прогнозування це водночас і складний і простий процес, який потребує реалізацію певного алгоритму, що розроблено та впроваджено у вигляді автоматизованої інформаційної системи. Тому

головним питанням, що розглядається у роботі є створення та використання інструменту прогнозування, який побудовано на основі полінома Колмогорова-Габора.

Метою роботи є автоматизація процесу прогнозуючого фільтру, який на основі побудованих моделей різної складності полінома 2 ступеня дозволяють не тільки обчислювати похибки, але й проаналізувати поведінку всього процесу в цілому.

Головні задачі, що підлягають розробці:

1. Визначення масиву вхідних даних;
2. Отримання навчених моделей різної складності;
3. Обчислення похибки;
4. Розробка автоматизованої інформаційної системи прогнозуючого фільтра.

Перша поставлена задача полягає у визначенні об'єму експериментальних точок, це означає що відбувається завантаження повного діапазону експериментальних даних, які підлягають обробці інструментом прогнозування. Одразу зауважимо, що набір обраних вхідних даних, необхідний для подальшого прогнозування, не може бути менше ніж 6 значень для найменшого поліному з трьома невідомими. А максимальне значення обирається довільно та завантажувється із Excel, куди попередньо було занесено весь масив даних. Тому діапазон значень може включати в себе різноманітні значення, наприклад A2-A5, A9-A12.

2. Це друга і найважливіша поставлена задача, тому що вона вимагає побудови математичної моделі складного процесу, необхідної для автоматичного оптимального управління в подальшому. Поліном з чотирма невідомими має наступний вигляд (1):

$$y_k = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_{i j} \quad (1)$$

В нашому випадку математична модель має вигляд системи рівнянь, що приведена до нормалізації після того, як було складено систему умовних рівнянь згідно обраного полінома з певною кількістю невідомих [2].

Принцип формування систем нормальних рівнянь наступний: кожне умовне рівняння перемножується на коефіцієнти при першому невідомому, а потім всі умовні рівняння додаються, надалі виникає необхідність створення другого рівняння системи, де кожне умовне рівняння ми вже перемножуємо на коефіцієнти при другому члені і всі умовні рівняння також додаються. Якщо необхідно скласти систему нормалізованих рівнянь для поліному 2 ступеня з чотирма невідомими, то система повинна мати систему з чотирма нормалізованими рівняннями. Тому для побудови кожного наступного рівняння необхідно кожне умовне рівняння перемножити на коефіцієнт при третьому невідомому, потім при четвертому невідомому. Це відбувається до тих пір, доки кількість нормальних рівнянь буде дорівнювати кількості невідомих коефіцієнтів при системі умовних рівнянь [3].

Наступним кроком є отримання розв'язку нормалізованої системи відомим методом Гауса, що дозволяє обчислити систему лінійних алгебраїчних рівнянь за алгоритмом описаним нижче. Зазвичай під цим алгоритмом розуміють деяку послідовність операцій, що виконують над відповідною матрицею коефіцієнтів, для приведення її до трикутного вигляду, з наступним вираженням базисних змінних через небазисні [4].

У методі Гауса для спрощення матриці, використовують послідовні елементарні операції перетворення матриці для модифікації матриці доки нижній лівий кут матриці не буде заповнено нулями, настільки наскільки це можливо. Елементарні перетворення не змінюють множину розв'язків системи лінійних алгебраїчних рівнянь, яку представляє ця матриця.

Існує три типи елементарних перетворень матриці:

- 1) заміна двох рядків;
- 2) множення рядка на не нульове число;
- 3) додавання одного рядка до іншого.

Використовуючи ці операції, матрицю завжди можна перетворити на верхню трикутну матрицю, а фактично і у скорочену рядкову ступінчасту форму. Як тільки всі перші коефіцієнти (ті що знаходяться ліворуч і є не нульовими входженням в кожному рядку) стають рівними 1, і кожен стовпець, який містить перший ненульовий коефіцієнт має в усіх інших місцях нулі, тоді говорять що матриця знаходиться у скороченій рядковій ступінчастій формі.

Тобто, використовуючи описаний алгоритм методу найменших квадратів для обчислення системи нормалізованих рівнянь ми знайшли конкретні значення невідомих $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ при обраному вигляді полінома. Тобто отримали навчену модель на основі полінома Колмогорова-Габора.

Згідно опорного вигляду отриманої навченої моделі, вона має конкретне число експериментальних точок. Наприклад, для поліному (1) навчена модель має аргументи a_0, a_1, a_2, a_3 та використовує для прогнозування 7 точок. Тобто для визначення горизонту прогнозування завжди беруть на 3 точки більше, ніж існує аргументів при навченій моделі [5].

3. Третя задача полягає в обчисленні середнє квадратичної похибки прогнозуючого процесу (2).

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} (y_{\phi i} - y_{\rho i})^2}{\sum_{i=1}^{n_2} y_{\phi i}^2} \quad (2)$$

де $y_{\rho i}$ - прогноз i -го значення для перевірки прогнозованої послідовності; $y_{\phi i}$ - фактичне значення цієї ж послідовності; n_2 - об'єм послідовності.

Визначити найбільш оптимальну модель ми можемо завдяки обчисленню середнє квадратичної похибки прогнозу, необхідної для перевірки прогнозованої послідовності. І чим менший показник похибки у

відсотках, тим краща навчена модель зі всіх прогнозованих послідовностей.

4. Особливістю автоматизованої інформаційної системи є зручна робота користувача з огляду інтерфейсної частини, що має візуальну просту форму з управлінськими кнопками. Кожна кнопка програмно прописана таким чином, що втручання користувача обмежується наступними діями:

- завантаження з Excel необхідного набору експериментальних точок обираючи довільно із масиву даних;
- визначення кількості невідомих при поліномі. Інформаційна система одразу виводить на екран вид обраного полінома 2 ступеня;
- натискання кнопки «Розрахувати» автоматично обчислює поліном за методом найменших квадратів згідно алгоритму, що описано в сформульованій 2 задачі.

Перевагою автоматизованої інформаційної системи є те, що вся інформація щодо обчислень, обрання масиву вхідних даних, отриманих значень моделей та виду синтезованої моделі, а також обчислення похибки прогнозу зберігається в історичних даних, що необхідні для подальшого аналізу прогнозуючого процесу завдяки якому маємо можливість обрати оптимальну модель всього процесу.

Програмний алгоритм обчислювального процесу написано об'єктно-орієнтованою мовою програмування C# з підтримкою інтегрованого середовища розробки Visual Studio Professional 2017 на платформі .NET.

Чому саме обрано цю мову програмування? Опишемо її важливі принципи, які значно допомогли полегшити опис складної деревоподібної структури програмного коду у вигляді ієрархії спадкування. Розробники програм спочатку пишуть клас, а на його основі при виконанні програми створюються конкретні об'єкти (екземпляри класів). На основі класів можна створювати нові, які розширюють базовий клас і таким чином створюється ієрархія класів. Головні принципи:

- все є об'єктами;
- всі дії та розрахунки виконуються шляхом взаємодії (обміну даними) між об'єктами, при якій один об'єкт потребує, щоб інший об'єкт виконав деяку дію. Об'єкти взаємодіють, надсилаючи і отримуючи повідомлення - запити на виконання дії;
- кожен об'єкт має незалежну пам'ять, яка складається з інших об'єктів і є представником (екземпляром) класу, який виражає загальні властивості об'єктів;

Таким чином, програма являє собою набір об'єктів, що мають стан та поведінку. Об'єкти взаємодіють використовуючи повідомлення. Будується ієрархія об'єктів: програма в цілому — це об'єкт, для виконання своїх функцій вона звертається до об'єктів що містяться у ньому, які у свою чергу виконують запит шляхом звернення до інших об'єктів програми. Стійкість та керованість системи забезпечуються за рахунок чіткого розподілення відповідальності об'єктів (за кожен дію відповідає певний об'єкт),

Тобто, як бачимо, автоматизований процес роботи прогнозуючого фільтра досить простий у використанні з огляду користувача, але досить ємка програмна розробка з огляду створення алгоритму реалізації обчислювального та прогнозуючого процесу.

ВИСНОВКИ

Завдяки приведеній класифікації існуючих видів прогнозів ми з'ясували на яких характеристиках базується короткочасний прогноз, що побудовано на математичних моделях та історичних даних. В свою чергу, математична модель — це система рівнянь регресії, які використовуються для одноразового прогнозу майбутнього ходу процесу в складній системі.

Використання інструменту прогнозування, так званого фільтру, допомогло вирішити основні поставлені задачі: синтезували моделі, які побудовані на різних наборах вхідних даних, та визначили оптимальну модель прогнозованої послідовності завдяки обчисленню похибки прогнозу. Довільне обрання діапазону вхідних даних, що необхідне для синтезу моделей, не відображається на об'єктивності прогнозу.

Програмний алгоритм інформаційної системи дозволив повністю автоматизувати процес обчислення математичних моделей, побудованих на основі полінома Колмогорова-Габора 2 ступеня.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] А. Г. Ивахненко «Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем» – Киев : Наук. думка, 1982. 296 с.
- [2] Ю.А. Шрейдер, А.А. Шаров «Системы и модели» – М.: Радио и связь, 1982.
- [3] С.Ю. Куницька «Приведення системи умовних рівнянь до нормалізації» Проблеми інформатизації: тези доп. п'ятої міжнародн. наук.-техн. конф., Черкаси, 13-15 листопада 2017 року. Черкаси: ЧДТУ; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТІГН; Полтава: ПНТУ. 2017. – С. 60.
- [4] Б.М. Ляшенко, О.М. Кривонос, Т.А. Вакалюк «Методи обчислень». Навчально-методичний посібник для студентів фізико-математичного факультету. Житомир: Вид-во ЖДУ ім І. Франка. 2014. с. 37—39.
- [5] В.А. Лисичкин «Теория и практика прогностики». М.: Наука. 1972. 224 с.

Структурна Ідентифікація Класифікаторів в Системах Кризового Моніторингу

Голуб С.В.

кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького
Черкаси, Україна
fpkpk@ukr.net

Авраменко А.С.

кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького
Черкаси, Україна
RedStar929@gmail.com

Structural Identification of Classifiers in Crisis Monitoring Systems

Golub S.V.

Department of intelligent decision support systems
Bogdan Khmelnytsky Cherkassy National University
Cherkassy, Ukraine
fpkpk@ukr.net

Avramenko A.S.

Department of intelligent decision support systems
Bogdan Khmelnytsky Cherkassy National University
Cherkassy, Ukraine
RedStar929@gmail.com

Анотація—Запропоновано вдосконалити метод оптимізації структури інформаційної системи кризового моніторингу. Збільшення точності та якості класифікаторів досягається шляхом кластеризації масивів вхідних даних. Кожен кластер відноситься до свого алгоритму синтезу моделей. Експериментально підтверджено ефективність покращеного методу. Час перебудови структури зменшується на 60%. Похибка моделювання значимо не погіршується.

Abstract—Modernization of a method for optimizing the structure of the crisis monitoring information systems is proposed. Improving of accuracy and quality in classification models achieved by clustering the input data arrays. Best algorithm of model synthesis is selected for each cluster in the input data arrays. Effectiveness of the improved method was experimentally confirmed. Time for restructuring of models reduced by 60%. Errors of modelling is not significantly worse.

Ключові слова—кризовий моніторинг, багаторівневе моделювання, кластеризація, час перебудови системи, похибка моделювання.

Keywords—crisis monitoring, multilevel modeling, clasterisation, system restructuring time, modelling error

I. ВСТУП

Основним завданням технологій моніторингу є не лише збір інформації о характеристиках об'єкту моніторингу але і забезпечення інформацією процесу

прийняття рішень. Інформація отримується в результаті моделювання властивостей об'єкта моніторингу на основі даних, отриманих в процесі вимірювання чисельних характеристик цього об'єкта.

Прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій накладає ряд обмежень на технології, що забезпечують інформацією ці процеси. Так як розвиток надзвичайних ситуацій зазвичай є ланцюговим лавиноподібним динамічним процесом, що полягає в різкому погіршенні стану деякого об'єкта, як правило, представляє собою сукупність території і розташованих на ній об'єктів економіки і житлових комплексів, що призводить до катастрофічних для цього об'єкта і його оточення наслідків. То рішення в даних ситуаціях повинні отримуватися як найшвидше. Також незадовільна прогнозованість та динамічність надзвичайних ситуацій генерує велику кількість параметрів для моделювання, частина з яких може виникнути вперше, що означає велику можливість помилки в попередньо отриманих моделях

Головним завданням моделювання в моніторингових системах є забезпечення інформацією процесу прийняття рішень. Ця інформація здобувається за результатами моделювання властивостей об'єкта моніторингу на основі даних, отриманих в процесі вимірювання чисельних характеристик цього об'єкта.

Саме зараз перспективними системами моніторингу є системи засновані на технології багаторівневого перетворення даних, яка реалізована у вигляді інформаційної системи з ієрархічним поєднанням багатопараметричних моделей [1].

Такі моделі синтезуються за допомогою індуктивних алгоритмів, нейронних мереж, генетичних алгоритмів та інших. В даній технології сценарій вибору алгоритму синтезу багатопараметричних моделей (АСМ) реалізовано шляхом послідовного їх випробування та вибору кращого [1]. Далі з синтезованих моделей формується ієрархія (рис. 1).

Моделі на кожному рівні ієрархії розв'язують локальні задачі з перетворення даних. В таких ієрархічних структурах можливе поєднання великої кількості моделей, а саме, від п'ятдесяти і більше.

В процесі моніторингу кризових ситуацій властивості масиву вхідних даних постійно змінюються. Тому існує висока ймовірність того, що одна або декілька моделей можуть почати видавати не адекватні результати. Для виправлення таких «пошкоджень» проводиться заміна цих моделей з їх повторним синтезом та синтезом усіх моделей, які з ними пов'язані.

Процес синтезу усіх «пошкоджених» моделей та моделей, які з ними пов'язані, займає досить тривалий час. Тривалість процесу синтезу залежить від кількості моделей в структурі.

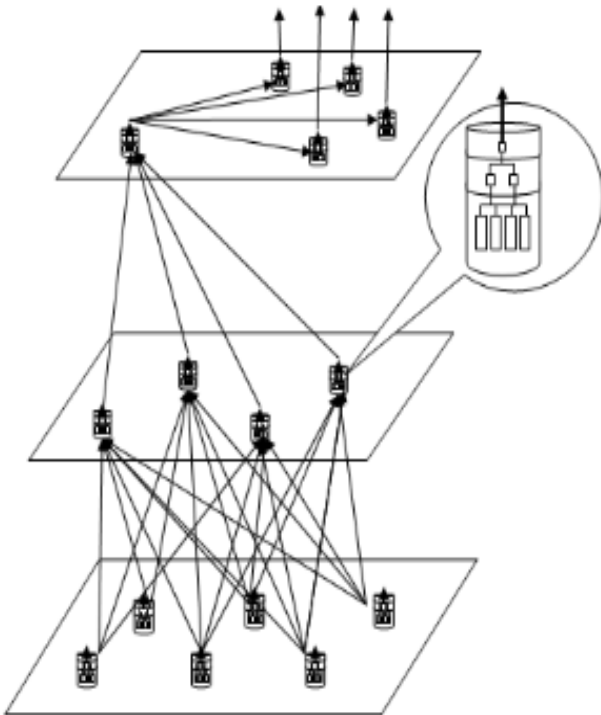


Рис. 1. Структура системи перетворення інформації

Зважаючи на те, що в умовах кризового моніторингу на обґрунтування рішень виділяється не більше 2-3 хвилин, а властивості МВД змінюються динамічно, є необхідність в зменшенні часу перенавчання ієрархічної системи моделей. Ми цього досягаємо шляхом

удосконалення процесу вибору кращого АСМ із існуючого в синтезаторі їх переліку. Процес послідовного випробування АСМ замінюється на процес розпізнавання його кращого варіанта серед присутніх в синтезаторі моделей шляхом застосування вирішуючого правила [3]. Це правило має вигляд поліноміальної моделі, що синтезована одним із алгоритмів МГУА [1]. Дана модель класифікує МВД до відповідного АСМ.

Вибір найбільш придатного АСМ проводиться на основі таких інформативних параметрів таблиць первинного опису [3]:

- кількість спостережень;
- кількість незалежних змінних;
- кількість параметрів максимально суміщених з функцією мети;
- кількість не суміщених параметрів;
- середній коефіцієнт кореляції незалежних змінних;
- середній коефіцієнт кореляції незалежних змінних та функції мети;
- середній коефіцієнт детермінації незалежних змінних;
- середній коефіцієнт детермінації незалежних змінних та функції мети;
- визначник нормованої таблиці первинного опису;
- визначник нормованої матриці значень незалежних змінних;
- власне число нормованої таблиці первинного опису;
- власне число матриці значень незалежних змінних.
- максимальне сингулярне число нормованої таблиці первинного опису;
- максимальне сингулярне число матриці значень незалежних змінних.

Коефіцієнт кореляції обраховується за формулою (Помилка! Джерело посилання не знайдено.), а коефіцієнт детермінації – за формулою (2).

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{s_x^2 \cdot s_y^2}} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{x})} \quad (2)$$

Для розпізнавання найкращого алгоритму синтезу моделей потрібно використовувати модель, побудовану одним із індуктивних алгоритмів – наприклад, методом групового урахування аргументів [2]. Використання

класифікатора на основі моделі, отриманої з допомогою МГУА, складається з двох етапів: знаходження оптимальної структури моделі, та навчання моделі на таблиці, що задає функцію класифікації; використання створеної моделі для розпізнавання найкращого алгоритму синтезу моделей.

Даний метод був запропонований та апробований у [4]. При використанні класифікації швидкість перенавчання системи зростає, але при цьому зростає і похибка моделювання.

Також в результаті дослідження запропонованого в [4] методу було виявлено ряд недоліків. А саме, проблематичність в забезпеченні алгоритму навчання класифікаторів якісними даними. Користувачу потрібно знайти МВД, які добре навчаються представленими в нашому набору АСМ алгоритмами. Проте кожен такий МВД, що може складатися з сотень тисяч спостережень, формує лише одне спостереження при навчанні класифікаторів, а для якісного навчання може бути необхідно сотні або тисячі таких спостережень. Тому це вимагає від користувача великої кількості зусиль для забезпечення достатньої кількості МВД та отриманих з них спостережень.

Для усунення цієї проблеми нами запропоновано подальше покращення методу класифікації АСМ шляхом кластеризації даних, що використовуються для навчання класифікатора.

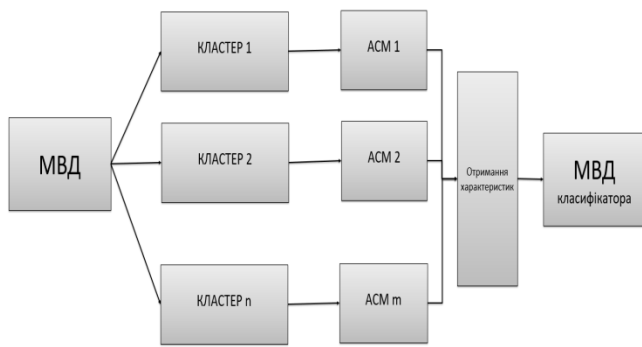


Рис. 2. Схема використання кластерів

Кожен кластер буде мати свій перелік характеристик та свій найкращий АСМ до якого його потрібно буде класифікувати. Отже з кожного МВД буде отримано не одне спостереження, а декілька в залежності від результатів кластеризації. Даний підхід повинен спростити роботу по забезпеченню даними процесу навчання.

II. МЕТА РОБОТИ

Метою цієї роботи є зменшення часу створення структури ієрархії моделей без значної втрати точності результатів моделювання на виході системи.

Для досягнення поставленої мети була сформована гіпотеза про те, що спостереження в МВД можливо кластеризувати та кожен кластер можна навчати окремо. Кожен кластер буде мати свій перелік характеристик та свій найкращий АСМ до якого його буде класифіковано.

Це забезпечить вирішення проблеми з кількістю та якістю даних для навчання класифікаторів.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сформульована гіпотеза була перевірена експериментально. Вирішуюче правило створювалось за допомогою багаторядного алгоритму МГУА [2]. В якості класифікаційних ознак МВД використовувався набір характеристик, запропонований в [3].

Для проведення дослідження в інструменті було реалізовано метод кластеризації К-середніх, мінімального дерева [5]. Відстані між об'єктами визначаються за допомогою відстаней Евкліда, Чебишева та L-норми [5].

Алгоритм починається з отримання ПО та формування МВД з нього. Наступним кроком є використання обраного методу для кластеризації МВД. Далі кожен кластер оброблюється окремо для нього проводиться навчання усіма запропонованими АСМ після чого обирається найбільш придатний АСМ. Далі з кластера отримуються його характеристики [3]. Отриманий набір характеристик поміщається у МВД класифікатора до відповідного АСМ.

Для синтезу моделей даного дослідження використані результати моніторингу захворюваності населення Черкаської області впродовж 2000-2014 років [1].

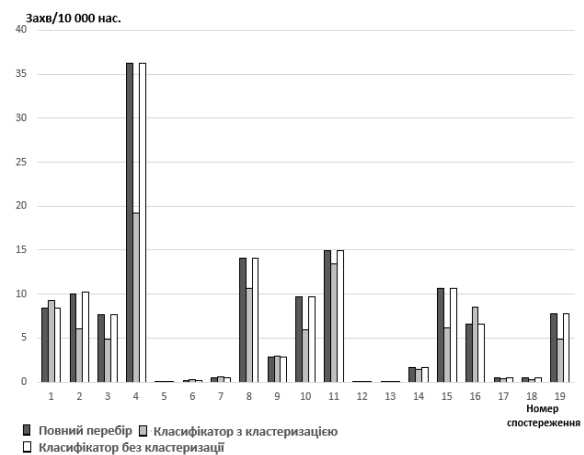


Рис. 3. Порівняння СКО

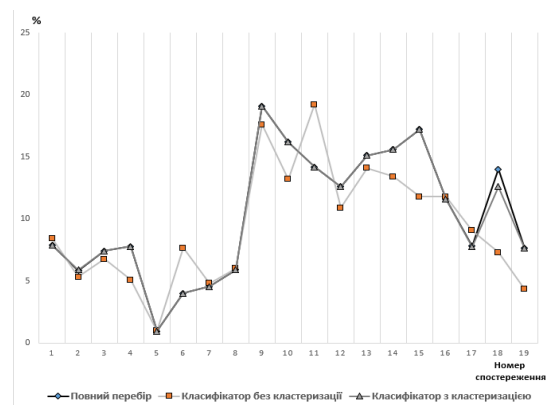


Рис. 4. Порівняння абсолютної похибки

Дослідження абсолютного (рис. 4) та середньо квадратичного (рис. 3) відхилення показало, що застосування процесів кластеризації даних дозволяє знизити похибку моделювання в середньому до 10%.

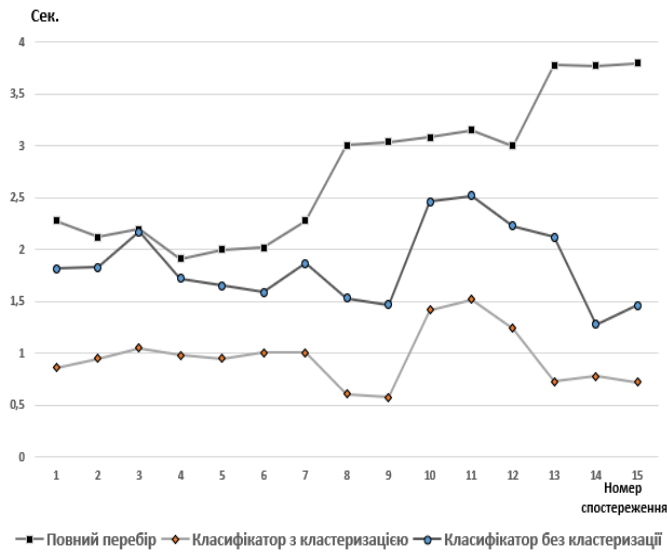


Рис. 5. Порівняння часу навчання/ перенавчання

При дослідженні часу навчання моделей (рис. 5) з використанням кластеризації було виявлено незначне погіршення в порівнянні з стандартним методом класифікації в обсязі до 30%.

Проте даний метод на 60% швидший в порівнянні з повним перебором.

В процесі дослідження було виявлено, що більша точність моделей класифікатора призводить до випадків фальшивого спрацювання. А це в свою чергу призводить до вповільнення алгоритму. Також найкращим методом кластеризації в даних умовах виявився метод мінімального дерева, а найкращою метрикою відстані L-норма.

Наступні дослідження будуть присвячені подальшому процесу параметричної оптимізації описаного методу. Також буде досліджено можливі способи впізнання класифікаторами не тільки придатності але і якості обраних АСМ та їх ранжування.

Висновки

Зростання похибки моделювання в методі [4] є «платою» за скорочення часу синтезу моделей. Зважаючи на те, що в структурі інформаційної системи

багаторівневого перетворення даних міститься від 50 моделей і більше, вдається досягнути значного скорочення часу адаптації структури системи до зміни властивостей МВД. В умовах кризового моніторингу такі результати дають надію на можливість застосування моніторингових інформаційних систем із технологіями багаторівневого перетворення даних для підтримки прийняття рішень із локалізації наслідків надзвичайних ситуацій.

Проте в деяких випадках дана «плата» не допустима і алгоритм повинен враховувати це. Тому запропонована в даній роботі модернізація ціною деякого сповільнення дозволяє наблизити похибку моделювання до результатів повного перебору. В середньому в порівнянні з повним перебором похибка не перевищує 10%. Проте, в порівнянні з попереднім методом, швидкість впала в середньому на 30%.

Таким чином запропонований вдосконалений метод класифікації масиву вхідних даних в інформаційних системах багаторівневого моніторингу.

В даному методі зменшення часу перебудови структури моніторингової інформаційної системи для розв'язку нових задач в умовах надзвичайних ситуацій як і раніше досягається шляхом розв'язку задачі розпізнавання кращого алгоритму синтезу моделей за правилом, що створене за багаторядним алгоритмом МГУА. Проте покращення результатів моделювання досягається завдяки попередній кластеризації даних для навчання класифікаторів, що призводить до збільшення їх якості та кількості, при використанні тих самих наборів даних що і попередній метод.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Багаторівневе моделювання в технологіях моніторингу оточуючого середовища / С.В.Голуб ; Черкас. нац. ун-т ім. Б.Хмельницького. - Черкаси : ЧНУ, 2007. - 218 с.
- [2] Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Наук. Думка, 1981. 296 с.
- [3] Колос П.О. Визначення множини інформативних параметрів таблиці первинного опису об'єкта моделювання./ Вісник Черкаського університету, випуск 173. – Черкаси: Вид. ЧНУ, 2009. – С. 121-128.
- [4] Avramenko A.: Classification models in information systems for social and environmental crisis monitoring / Avramenko A., Golub S. // Engineer of XXI Century – We design the future: Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Bialej - Bielsku-Biala : ATH, 2016. – 928 p.
- [5] J. Kogan, C. Nicholas, M. Tebouille – «Clustering Large and High Dimensional data» (<http://www.csee.umbc.edu/nicholas/clustering/tutorial.pdf>)

Інтелектуальний Моніторинг Температури на Основі Даних Тепловізійної Зйомки

Марія Талах
кафедра комп'ютерних наук
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
Чернівці, Україна
m.talah@chnu.edu.ua

Сергій Голуб
кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького
Черкаси, Україна
fpkpk@ukr.net

Intelligent Temperature Monitoring Based on Thermal Imaging Data

Marii Talakh
Department of Computer Science
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
Chernivtsi, Ukraine
m.talah@chnu.edu.ua

Serhii Golub
Department of intelligent decision support system
Bogdan Khmelnytsky Cherkassy National University
Cherkassy, Ukraine
fpkpk@ukr.net

Анотація—Обґрунтовано застосування методики багаторівневого моніторингу для прогнозування температури на основі даних тепловізійної зйомки супутників та даних з метеостанцій. Отримана модель апробована для території Чернівецької та Івано-Франківської областей та дозволяє прогнозувати температуру на ділянках, де відсутні метеостанції, в середньому з точністю до 1 градуса Цельсія.

Abstract—The application of multilevel monitoring method for forecasting of temperature based on the data of thermal imagery of satellites and data from meteorological stations is substantiated. The obtained model is tested for the territory of Chernivtsi and Ivano-Frankivsk regions and allows to predict the temperature for the areas with sparse net of meteorological stations, on average, with an accuracy of 1 degree Celsius.

Ключові слова—моніторинг, тепловізійна зйомка, Landsat, МГУА, температура.

Keywords— monitoring, thermal imagery, Landsat, MSUA, temperature.

I. ВСТУП

Величезне значення для науки і господарства має вивчення і передбачення погоди, яке можливе лише внаслідок систематичного довготривалого спостереження за нею. Температура, як один з основних кліматичних показників території використовується для аналізу змін клімату та створення кліматичних моделей різного рівня [1,6,11,12]. Усі зміни основних елементів

погоди фіксують на метеорологічних станціях [5]. Однак, за географічним положенням частина території України розташована в умовах складного рельєфу, зокрема гірських, що зумовлює відсутність метеостанцій на цих ділянках. Крім того, більшість наявних метеорологічних станцій знаходяться в урбанізованому середовищі, що спотворює отримувані дані [7]. Одним з варіантів підвищення їх достовірності є поєднання даних з метеостанцій та даних отриманих з використанням інших методів. Зокрема, одним з найбільш сучасних та широковживаних, наразі, є дистанційне зондування. Такий синтез дозволить отримувати температурні дані для кожної точки поверхні (точність буде визначатись лише дозвільною здатністю космоснімків), що є особливо актуальним для територій, де відсутні метеостанції. Для України це, насамперед, Карпатський регіон. Однак, частота проведення космозйомки не є регулярною, та загалом значно поступається частоті отримання даних з метеостанцій. Таким чином, використання космоснімків дозволяє врахувати просторову складову моніторингу, а дані з метеостанцій – часову, а їх поєднання дозволить створити комплексну систему моніторингу температурних показників певної території.

II. МЕТОДИКА ОТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ З КОСМОЗНІМКІВ

Для визначення температури на основі космоснімків найчастіше обирають знімки з космічних супутників Landsat-4, -5, -7 та -8. Вибір супутників обумовлений

наявністю в знімальній апаратурі так званого теплового каналу (діапазон електромагнітних хвиль 10,4–12,5 мкм) та даних з цих супутників, які отримували за довгий період часу. Дані з супутників серії Landsat представлено з 1982 р. Для досліджень найчастіше відбирають знімки з супутників серії Landsat за 1984–2017 р. Ще однією перевагою супутників серії Landsat є те, що дані з цих супутників є безкоштовними і знаходяться у вільному доступі та мають при цьому середню дозвільну здатність (30 м в 1 пікселі) [2].

Починаючи із супутників Landsat-4, -5 у тепловому каналі 6 або в каналах 6.1 й 6.2 для супутника Landsat-7 та -8 можна отримати цифрові значення (DN – digital number), які не мають фізичної розмірності. З метою отримання значень температури за космічними даними, необхідно перевести дані теплових каналів у значення температури. Всі додаткові параметри автоматично отримуються з файлу метаданих, який поставляється разом з супутниковим знімком.

Для супутників серії Landsat такий перерахунок виконується з використанням формул:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{\max_{\lambda}} - L_{\min_{\lambda}}}{Q_{cal_{\max}} - Q_{cal_{\min}}} \right) (Q_{cal} - Q_{cal_{\min}}) + L_{\min_{\lambda}} \quad (1)$$

L_{λ} – спектральна густина енергетичної світності на апертурі сенсора (енергетична світність на супутнику), тобто потужність потоку енергії (Вт) на м² земної поверхні на один стерadian (тривимірний кут від точки на земній поверхні до сенсора) на одиницю довжини хвилі (мікрметри); Q_{cal} – дискретизовані та калібровані значення пікселів стандартного продукту [DN]; $Q_{cal_{\min}}$ – мінімальне дискретизоване каліброване значення пікселя, що відповідає $L_{\min_{\lambda}}$ [DN]; $Q_{cal_{\max}}$ – максимальне дискретизоване каліброване значення пікселя, що відповідає $L_{\max_{\lambda}}$ [DN]; $L_{\min_{\lambda}}$ – максимальна спектральна світність градації сірого на сенсорі; $L_{\max_{\lambda}}$ – мінімальна спектральна світність градації сірого.

Для конвертації даних Landsat 8 застосовується вираз:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (2)$$

L_{λ} – спектральна густина енергетичної світності на поверхні атмосфери (TOA Radiance); M_L – коефіцієнт перемасштабовування; Q_{cal} – дискретизоване каліброване значення пікселя [DN]; A_L – адитивний коефіцієнт перемасштабовування.

Наступним кроком є перерахунок отриманих результатів в абсолютні безрозмірні значення відбиття [11].

Для термальних каналів Landsat перерахунок DN в яскравісну температуру на супутнику відбувається за наступною формулою:

$$T_K = \frac{K_2}{\ln(K_1 / L_{\lambda} + 1)} \quad (3)$$

T_K – яскравісна температура на супутнику [Кельвін]; K_1 – залежна від каналу стала термального перерахунку; K_2 – залежна від каналу стала термального перерахунку

[К]; L_{λ} – спектральна густина енергетичної світності на апертурі сенсора.

Для зручності отриманий результат переводили в градуси:

$$T_C = T_K - 273,15 \quad (4)$$

T_C – яскравісна температура на супутнику, С°; T_K – яскравісна температура на супутнику, К [4].

III. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Незважаючи на достатньо велику кількість програмного забезпечення для роботи з космоснімками, та задоволення великої кількості потреб користувачів в сфері ДЗЗ, важко не звернути увагу на головні мінуси програмного забезпечення.

Недоліками більшості наявного ПЗ для роботи з космоснімками є достатньо складний користувацький інтерфейс, високі вимоги до апаратного забезпечення ПК, а також неможливість автоматичної роботи з серією космоснімків та збереження результатів роботи у базу даних, що слугуватиме МВД для подальшого аналізу.

За таких умов дослідникам потрібна система, що здатна здійснювати автоматизоване отримання та обробку температурних даних з централізованих інформаційних ресурсів і забезпечувати достатньо широкий набір методів для аналізу даних. Для початку роботи в системі користувачу необхідно обрати період та території проведення досліджень. В межах створеної системи для отримання даних використовувався інфрачервоний канал супутника Landsat [2]. Кожний окремий знімок є растровим зображенням, де кожному пікселю відповідає атрибутивне значення, яке з використанням описаної вище методики може бути переведено в показники температури поверхні. Крім атрибутивних значень кожен піксель володіє і географічними координатами, аналізуючи послідовно кожен піксель система відправляє запити на погодні сервери [8,9], які містять дані з показниками температури за необхідний період часу (який співпадає з періодом за який аналізуються космоснімки) а також координати метеостанцій. У випадку наявності на досліджуваній території метеостанцій відбувається автоматичне завантаження зазначених даних. Для дослідження може бути обрана будь-яка територія чи період часу (обмеження обумовлюються виключно наявністю даних на централізованих інформаційних ресурсах). Наразі, система працює таким чином, що дані з метеостанцій беруться лише за ті дні, для яких доступні космоснімки, водночас, з даних, що отримуються на основі космоснімків видаляються значення пікселів, для яких не встановлена наявність метеостанцій. Після того як системою сформовано масив даних, він записується у базу даних та відбувається автоматичне застосування алгоритмів синтезу моделей в рамках технології багаторівневого моніторингу [3].

IV. РЕЗУЛЬТАТИ

Нами була проведена апробація роботи системи для території Чернівецької та Івано-Франківської областей. Зокрема, для аналізу було взято серію космознімків з 2000 до 2017 року включно. Для зіставлення даних отриманих з супутника та на основі космознімків було обрано 4 метеостанції: м. Коломия, смт. Селятин, м. Вижниця та м. Чернівці. База первинних даних містила 205 значень, що характеризували кожен з точок в різні дати за досліджуваних період.

Попередній аналіз МВД свідчить, що графіки ходу температур отримані обома методами практично ідентичні, що дозволяє говорити про доцільність використання даного підходу в подальшому. Однак, абсолютні значення в конкретних точках відрізняються, що може залежати від багатьох факторів. Зокрема, хмарності, яка була врахована в моделі. А також від типу підстилаючої поверхні, що впливає на температуру визначену за знімком, в той час як на метеостанціях показники температури знімають на рівні 2,6 м над поверхнею землі.

Врахування цих розбіжностей можливе за рахунок попередньої класифікації космознімків зі співставленням спектральних та тематичних класів та введенням поправочних коефіцієнтів для кожного з них. Однак, таких підхід не буде універсальним, оскільки при зміні території досліджень всю процедуру треба буде починати з нуля.

В якості більш універсального підходу для вирішення задачі прогнозування температури на основі аналізованих даних запропоновано використовувати методи індуктивного моделювання. Зокрема, при випробування алгоритмів синтезу моделей найкращі показники були отримані з використанням багаторядного алгоритму МГУА.

В результаті моделювання синтезатором моніторингової інтелектуальної системи було побудовано 4 моделі (для кожної з досліджуваних точок). Масив даних для навчання моделей містив одну залежну змінну (Y), в якості якої використовували результати зйомок з конкретної точки. X-ами виступали метеорологічні дані з усіх решта точок. Методані про точку моделювання при побудові моделі не використовувались, а були застосовані для оцінки якості прогнозу температури. При цьому, моделі випробувались на даних, які не приймали участі у створенні моделі, таким чином отримані результати свідчать про характеристики стійкості моделі.

В якості способу зупинки генерації рядів селекції використовували критерій точності ряду селекції, при цьому, в якості останнього застосовували абсолютну похибку найточнішого полінома ряду. Кількість поліномів, що виступали входами для кожного наступного ряду селекції дорівнювала рівна кількості початкових змінних. Базовий поліном при створенні моделей – квадратичний. Вагові коефіцієнти розраховувались як відношення частинної похідної моделі по окремій змінній до суми частинних похідних цієї моделі до всіх змінних.

Отриманий результат дозволяє прогнозувати температуру на ділянках, де відсутні метеостанції, в середньому з точністю до 1 градусу. Результати тестування створених моделей наведені в таблиці I. Найменша абсолютна похибка вимірювань зафіксована для Вижниці, що може бути пов'язано насамперед з близькістю до неї інших двох дослідних точок Селятина і Коломиї, (42км та 33км відповідно), адже у випадку роботи з простороворозподіленими даними точність моделювання спадає з віддаленням від опорних точок.

ТАБЛИЦЯ I. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ

Селятин			Коломия			Вижниця			Чернівці		
Селятин, знімок, град.С	Модель град.С	Похибка абсолютна, град.С	Селятин, знімок, град.С	Модель град.С	Похибка абсолютна, град.С	Селятин, знімок, град.С	Модель град.С	Похибка абсолютна, град.С	Селятин, знімок, град.С	Модель град.С	Похибка абсолютна, град.С
13	12,36	0,6	15,00	15,53	0,53	15,00	15,80	0,8	20,00	16,63	3,4
18	16,83	1,2	21,00	15,41	5,59	21,00	21,13	0,1	18,00	21,57	3,6
9	8,90	0,1	11,00	10,89	0,11	11,00	11,91	0,9	12,00	12,94	0,9
-1	0,61	1,6	2,00	2,27	0,27	2,00	3,77	1,8	3,00	4,78	1,8
-1	2,65	3,7	4,00	4,35	0,35	4,00	4,78	0,8	5,00	6,00	1,0
-1	1,87	2,9	3,00	3,61	0,61	3,00	3,41	0,4	5,00	4,60	0,4
1	0,84	0,2	3,00	3,09	0,09	3,00	4,34	1,3	6,00	5,61	0,4
15	17,58	2,6	19,00	20,47	1,47	19,00	19,08	0,1	21,00	20,05	0,9
10	9,65	0,4	13,00	11,38	1,62	13,00	13,89	0,9	15,00	14,58	0,4
12	11,56	0,4	16,00	14,13	1,87	16,00	15,74	0,3	17,00	16,84	0,2
Середня похибка		1,36			1,25			0,74			1,30

Загальні характеристики отриманих моделей наведено в таблиці II. В загальному, отримані

значення вагових коефіцієнтів можна пояснити насамперед відстанню між досліджуваними точками

та на основі порівняння їх абсолютних висот. Так, на спрогнозоване значення температури в Селятині, отриманої на основі космознімку найбільший вплив має значення температури Вижницької метеостанції, яка знаходиться найближче, серед усіх досліджуваних точок (42 км). В той же час, для спрогнозованого значення температури за космознічком для Коломиї найбільшу вагу має температура метеостанції Чернівецького аеропорту, що може бути пов'язано з зі значно меншим перепадом абсолютних висот для цих двох точок (48м), тоді як перепад висот з Селятином становить 561м. Таким чином, для підвищення точності моделювання слід обирати більшу кількість дослідних точок, які при цьому повинні представляти різні фізико-географічні умови.

ТАБЛИЦЯ II. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ

смт. Селятин		
Ім'я змінної	Ваговий коеф.	Напрямок зміни функції
Коломия, метео, С°	15,38%	Спадає
Вижниця, метео, С°	61,03%	Зростає
Чернівці, метео, С°	22,91%	Зростає
Хмарність, %	0,69%	Зростає
м. Коломия		
Ім'я змінної	Ваговий коеф.	Напрямок зміни функції
Селятин, метео, С°	12,83%	Спадає
Вижниця, метео, С°	16,23%	Зростає
Чернівці, метео, С°	70,58%	Зростає
Хмарність, %	0,36%	Зростає
м. Чернівці		
Ім'я змінної	Ваговий коеф.	Напрямок зміни функції
Селятин, метео, С°	34,95%	Зростає
Коломия, метео, С°	65,05%	Зростає
Вижниця, метео, С°	0,00%	Спадає
Хмарність, %	0,00%	Спадає
м. Вижниця		
Ім'я змінної	Ваговий коеф.	Напрямок зміни функції
Селятин, метео, С°	58,27%	Зростає
Коломия, метео, С°	41,73%	Зростає
Чернівці, метео, С°	0,00%	Спадає
Хмарність, %	0,00%	Спадає

ВИСНОВКИ

В межах роботи подано результати застосування індуктивних принципів моделювання для прогнозування значень температури для територій, з нерозгалуженою мережею метеостанцій на основі тепловізійної зйомки супутників. Система спрямована на автоматизацію формування МВД та застосування аналітичних процедур для

прогнозування значень температури для територій, з нерозгалуженою мережею метеостанцій.

Апробація на основі даних для території Чернівецької та Івано-Франківської областей області показала, що запропонований алгоритм може бути використаний для прогнозування значень температури.

Окрім того, дана моніторингова інформаційна система має перспективи розвитку, зокрема за рахунок додавання нових алгоритмів формування моделей та включення до МВД нових показників, зокрема, вегетаційних індексів, що будуть враховувати характеристики підстилаючої поверхні.

Отримані результати можуть мати широке практичне використання для вирішення як глобальних, так і локальних задач. Зокрема для моніторингу змін клімату й створення кліматичних моделей, або ж виявлення стану рослинності та наявності рубок на досліджуваних територіях.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Балдина Е.А. Изучение сезонной динамики теплового излучения городских ландшафтов по снимкам Landsat-7 ETM+ (на примере Москвы) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: мат-лы VIII Всерос. науч. конф. / Е.А. Балдина, М.Ю. Грищенко – М.: Изд-во ИКИ РАН, 2010. С. 251–252.
- [2] Геологічний сервіс. USGS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.usgs.gov/>.
- [3] Голуб, С.В. Багаторівневе моделювання в технологіях моніторингу оточуючого середовища [Текст] / С.В. Голуб. – Черкаси: Вид. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2007. – 220 с.
- [4] Забелин С. А. Методика атмосферной коррекции снимков Landsat [Текст] / С. А. Забелин, А. Д. Тулегулов // Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилева. – 2011. – № 6. – С. 147-154.
- [5] Клімат України: у минулому... і майбутньому?/ М.І.Кульбіда [та ін.] / за ред. М.І.Кульбіди, М. Б. Барабаш: Монографія. — К.: Сталь, 2009. — 234 с.
- [6] Кривоберець С.В. Аналіз методів і знімальних систем ведення агроекологічного моніторингу / С.В. Кривоберець // Вісник ЧДТУ. Збірник. Серія «Технічні науки». – Чернівці: ЧДТУ, 2012. – 42 (57). – С.166–175.
- [7] Лялько В.И. Влияние урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съемок). Информационный отчет о НИР / В.И. Лялько, В.Е. Филиппович, С.А. Станкевич, А.Г. Мычак, О.В. Титаренко и др. – К.: ЦАКИЗ ИГН НАНУ. 2014. – 21 с.
- [8] Сервіс погоди. RP5 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://rp5.ua>.
- [9] Сервіс погоди. World weather [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.worldweatheronline.com>
- [10] Converting Landsat TM and ETM+ thermal bands to temperature // The Yale Center for Earth Observation, 2010. [Електронний ресурс]. Режим доступу – <http://www.yale.edu/ceo>.
- [11] Niclos R. Land Surface Air Temperature Retrieval From EOS-MODIS Images / Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11, No. 8. P. 1380–1384.
- [12] Sundara Kumar K. Esti-mation of Land surface temperature to study Urban Heat Island effect Using Landsat ETM+ image / Sundara Kumar K., Udayabhaskar P., Padmakumari K. // International journal of en-gineering, science and technology. 2012. № 4 (2). P. 807–814.

Моделювання Процесу Адсорбції Включень на Поверхню Розділу Фаз

Олександр Малько

Кафедра математичних методів в інженерії
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу
Івано-Франківськ, Україна
malko.pochta@gmail.com

Анастасія Малько

Товариство з обмеженою відповідальністю «СЛОТ»
Івано-Франківськ, Україна
malko.pochta@gmail.com

Modeling the Process of Adsorption of Inclusions to the Interface of Phases

Oleksandr Malko

dept. of of Mathematical Methods in Engineering
Iv.-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Ivano-Frankivsk, Ukraine
malko.pochta@gmail.com

Anastasia Malko

Limited Liability Company «SLOT»
Ivano-Frankivsk, Ukraine
malko.pochta@gmail.com

Анотація—Запропонована математична модель динаміки адсорбції включень на поверхню розділу фаз рідина-газ в процесі молекулярної дифузії з метою визначення їх концентрації за капілярно-поверхневим методом

Abstract—The mathematical model of the adsorption of inclusions on the interface surface of the liquid-gas phase in the process of molecular diffusion is proposed in order to determine their concentration by capillary-surface method

Ключові слова—рідинний меніск, капілярна поверхня, адсорбція, дифузія, концентрація, рівняння стану, система

Keywords—liquid meniscus, capillary surface, adsorption, diffusion, concentration, state equation, system

I. ВСТУП

Проблеми визначення якісного та кількісного складу речовин та оперативного контролю наявності мікрровключень у середовищі можуть бути вирішені на основі капілярно-поверхневих методів [1]. У їх основі лежить залежність зміни характеристик поверхні розділу фаз, у процесі її формування, від фізико-хімічних властивостей контактуючих фаз. При цьому, за рахунок вибіркового адсорбційно-десорбційних процесів в результаті молекулярної дифузії, співвідношення концентрацій контрольованого компонента у поверхневому шарі і у об'ємній фазі може складати декілька порядків, що дає можливість виявляти мікрровключення шуканого компонента.

Методологічне обґрунтування запропонованого методу потребує встановлення залежностей між якісним і

кількісним складом контрольованих включень у середовищі та зміною характеристик поверхні розділу фаз рідина-газ. Однією з проміжних задач, що потребує вирішення при встановленні шуканих залежностей, полягає у визначенні відповідностей між концентрацією включень у газовому або рідинному середовищах, їх надлишковою концентрацією у поверхневому шарі і динамікою поверхневих характеристик. Вирішення цієї задачі зводиться до математичного моделювання процесу адсорбції на поверхні розділу фаз у процесі молекулярної дифузії. Дослідження моделей і структур поверхонь розділу фаз проведені у роботі [2] дають основу для визначення квазікрайових умов для моделювання процесів масопереносу включень з об'ємної фази у поверхневий шар, а рівняння Гіббса – Дюгема [3] дає можливість визначити поверхневий надлишок.

II. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МАСОПЕРЕНОСУ

Модель представляється граничною задачею при формуванні якої вводяться наступні припущення:

- надходження і видалення рідини є незначним у порівнянні з об'ємом водоймища, тому припускається ламінарний характер течій;
 - надходження і відтік рідини відбувається в обмежених областях на границі водоймища;
 - є дві граничні поверхні контакту рідини: з дном водоймища - S_1 і з повітрям - S_2 ;
 - припускається, що коефіцієнт молекулярної дифузії D по всьому об'єму є сталою величиною.
- Якщо у деякій просторово-часовій точці (x, y, z, t)

позначити компоненти вектора швидкості руху рідини \vec{V} по осях Ox, Oy, Oz через V_x, V_y, V_z , а коефіцієнти дифузії у

відповідних напрямках через D_x , D_y , D_z , тоді потоки речовини з концентрацією $c(x, y, z, t)$ визначаються виразами

$$V_x c - D_x \frac{\partial c}{\partial x}, \quad V_y c - D_y \frac{\partial c}{\partial y}, \quad V_z c - D_z \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (1)$$

Виходячи з закону збереження маси речовини, рівняння балансу неконсервативної речовини, яка розповсюджується в рідині, можна представити у вигляді диференційного рівняння в часткових похідних [4]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} - V_x c \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} - V_y c \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} - V_z c \right) + f(x, y, z, t), \quad (2)$$

де $f(x, y, z, t)$ – функція, що описує інтенсивність джерела забруднень.

Для визначеності рівняння (2) необхідно задати початкові та граничні умови, які для даної задачі мають вигляд:

$$c(x, y, z, t_0) = c_0(x, y, z) \quad (3)$$

початковий ($t=t_0$) розподіл концентрації по всьому об'єму;

$$c(x, y, z, t) \Big|_{(x,y,z) \in S_{IN}} = c_1(t) \quad (4)$$

концентрація включень у вхідному потоці, що надходить через ділянку границі S_{IN} ;

$$\frac{\partial c}{\partial n} \Big|_{(x,y,z) \in S_{OUT}} = 0, \quad (5)$$

де n – нормаль до ділянки границі через яку рідина виходить S_{OUT} ;

$$\frac{\partial c}{\partial n} \Big|_{(x,y,z) \in S_1} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} \Big|_{(x,y,z) \in S_2} = 0, \quad (6)$$

n – зовнішня нормаль до поверхні ложа і до дзеркала водойми, у випадку відсутності надходження включень.

При поступленні речовини з зовні замість рівності нулю нормальній похідній задається потік речовини, який визначається рівністю:

$$\left[\left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} - V_x c \right) + \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} - V_y c \right) + \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} - V_z c \right) \right] \Big|_{(x,y,z) \in S_1} = c_\phi v_\phi \quad (7)$$

де, v_ϕ – нормальна до S_1 складова вектора швидкості, а c_ϕ – концентрація забруднюючої речовини.

Вважаючи, що у елементарному об'ємі (i, j, k) концентрація включень $c_{i,j,k}(t)$ є однаковою відносно просторових координат і представляється точкою у геометричному центрі елементарного куба. (рис.1). Вектори швидкості притоку і відтоку рідини визначаються складовими V_x , V_y , V_z прикладеними до центру граней куба

і відповідають швидкостям сусідніх до (i, j, k) комірок, завдяки чому в подальшому спрощується застосування граничних умов по швидкості.

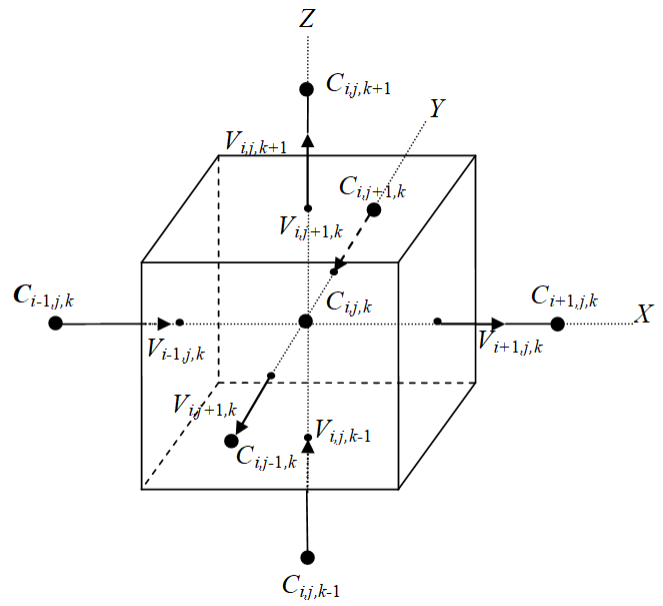


Рис.1 Елементарний куб

Кількість речовини m , що проходить через одиницю площі за одиницю часу в напрямках координатних осей у різницевій апроксимації узагальненого закону Фука має вигляд:

$$m_{i-1,i} = c_{i-1,j,k} V_{i-1,j,k} - D \frac{c_{i,j,k} - c_{i-1,j,k}}{a}, \quad (9)$$

$$m_{i,i+1} = c_{i+1,j,k} V_{i+1,j,k} - D \frac{c_{i+1,j,k} - c_{i,j,k}}{a}$$

у випадку складової масообміну у напрямку осі абсцис (розмірності складових рівняння: $m - [кг/(м^2с)]$, $c - [кг/м^3]$, $V - [м/с]$, $D - [м^2/с]$, $a - [м]$). Співвідношення масообміну у

напрямах інших осей координат $m_{j-1,j}$, $m_{j,j+1}$,

$m_{k-1,k}$, $m_{k,k+1}$ мають аналогічний вигляд.

Для спрощення розв'язку, та зменшення об'єму викладок при ілюстрації запропонованого методу доцільно розглянути одномірний варіант рівняння (2)

В загальному процес масопереносу з об'ємної фази у поверхневий шар за рахунок молекулярної дифузії можна описати одномірним рівнянням дифузії [4]:

$$\frac{\partial c(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x, t)}{\partial x^2} \quad (10)$$

з наступними початковими і граничними умовами:

$$\begin{cases} c(x, 0) = c_N, \\ x \neq 0, \end{cases} \quad c(0, 0) = c_f, \quad c(\infty, t) = c_N, \quad (11)$$

$$\Delta \left. \frac{\partial c(x,t)}{\partial t} \right|_{x=0} = D \left. \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (12)$$

де $c(x,t)$ - функція зміни у просторі і часі концентрації включень у об'ємній фазі, c_N - початкова концентрація включень у об'ємній фазі, x, t - просторова і часова координати, c_f - приведена початкова концентрація включень у поверхневому шарі, D - коефіцієнт молекулярної дифузії у напрямку x у об'ємній фазі, Δ - товщина поверхневого шару. Причому під концентрацією розуміється кількість речовини на одиницю довжини (моль/м). Рівняння (12) описує процес накопичення включень у поверхневому шарі, який може мати як додатний так і від'ємний приріст в залежності від співвідношення початкових концентрацій у об'ємній фазі і поверхневому шарі.

Після апроксимації різницевиими рівняннями по просторовій координаті і приведення до безрозмірної форми згідно [5] рівняння (10) – (12) запишуться у вигляді:

$$\frac{dc_i^*(t)}{dt^*} = [(c_{i-1}^*(t^*) + c_{i+1}^*(t^*)) - 2c_i^*(t^*)], i = 1, \dots, L \quad (13)$$

$$\frac{dc_0^*(t)}{dt^*} = \frac{\alpha}{\Delta} [(c_1^*(t^*) + c_0^*(t^*))] \quad (14)$$

де α - крок просторової дискретизації, $t^* = t/(\alpha^2/D)$ - безрозмірний час, $c^*(t) = c(t)/\rho$ - безрозмірна концентрація (концентрація приведена до густини розчинника), L - кількість кроків дискретизації.

Для моделювання градієнта концентрацій між об'ємною фазою і поверхневим шаром пропонується наступне припущення: так як концентрація у об'ємній фазі і поверхневому шарі в початковий момент часу однакові, а в результаті адсорбції має місце накопичення поверхневого надлишку на величину δ , можна умовно змінити товщину поверхневого шару до величини Δ^* так, щоб приріст кількості речовини δ відповідав встановленню у поверхневому шарі концентрації рівній об'ємній, тобто

$$c_N \Delta^* - c_N \Delta = \delta, \text{ або } \Delta^* = \frac{\delta - c_N \Delta}{c_N}. \quad (15)$$

Виходячи з балансу кількості речовини в початковий момент часу у шарах з товщиною Δ і Δ^* можна записати $c_u \Delta^* = c_N \Delta$, де c_u - уявна концентрація у поверхневому шарі в початковий момент часу і яка задає градієнт концентрацій, звідки:

$$c_u = c_N \frac{\Delta}{\Delta^*} \quad (16)$$

Для спрощення обчислень доцільно взяти крок просторової дискретизації рівний товщині поверхневого шару, тобто $\alpha = \Delta$, тоді рівняння (14) буде мати вигляд:

$$\frac{dc_0^*(t)}{dt^*} = \frac{\Delta}{\Delta^*} [(c_1^*(t^*) + c_0^*(t^*))], \quad c_0^*(0) = c_u^*. \quad (17)$$

Фактично рівняння (13), (17) є системою звичайних лінійних диференціальних рівнянь, які можна представити як рівняння змінних стану [5] у стандартній формі. Взв'язавши у якості змінних стану функції концентрації у вузлових точках $c_i^*(t)$ і позначивши їх сукупність вектором

$$\mathbf{C}(t^*) = (c_0^*(t^*), c_1^*(t^*), \dots, c_{L-1}^*(t^*))^T, \quad (18)$$

і відповідно $\frac{d\mathbf{C}(t^*)}{dt^*} \equiv \dot{\mathbf{C}}(t^*)$:

$$\dot{\mathbf{C}}(t) = \left(\frac{dc_0^*(t)}{dt^*}, \frac{dc_1^*(t)}{dt^*}, \dots, \frac{dc_{L-1}^*(t)}{dt^*} \right)^T, \quad (19)$$

рівняння (13), (17) у матричній формі буде мати вигляд:

$$\dot{\mathbf{C}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C}(t^*) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(t^*), \quad (20)$$

що відповідає рівнянню стану у стандартній формі, при початкових умовах:

$$\mathbf{C}(0) = (c_0^*(0), c_2^*(0), \dots, c_{L-1}^*(0))^T. \quad (21)$$

Крайову умови $c_L^*(t^*) = c_N^*$ можна представити як додатковий вплив у крайніх точках інтервалу L , ввівши їх у вектор вхідного впливу рис.2.

$$\mathbf{U}(t^*) = (0, 0, \dots, 0, c_N^*)^T. \quad (22)$$

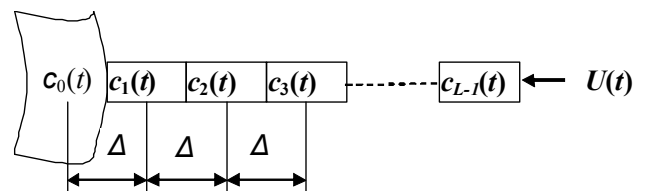


Рис. 2 – Структура взаємодії змінних стану

У даному випадку \mathbf{B} - $L \times 1$ матриця коефіцієнтів вхідного впливу а \mathbf{A} - трьох діагональна $L \times L$ матриця коефіцієнтів змінних:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{\Delta}{\Delta^*} & \frac{\Delta}{\Delta^*} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta}{\Delta^*} & \frac{\Delta}{\Delta^*} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B} = (0, 0, \dots, 1)^T \quad (23)$$

Процес розв'язку системи (11) полягає в наступному [6]:

1. визначається перехідна матриця стану

$$\Phi(t, \tau) = \exp[\mathbf{A}(t - \tau)], \quad (24)$$

для чого необхідно:

1.1 знайти власні числа матриці \mathbf{A} шляхом розв'язку характеристичного рівняння:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{E}) = 0, \quad (25)$$

1.2 знайти власні вектори $\bar{\xi}$ для всіх шляхом розв'язку рівняння:

$$(\mathbf{A} - \lambda_i \cdot \mathbf{E}) \cdot \bar{\xi}_i = 0, \quad (26)$$

1.3 побудувати матрицю власних векторів \mathbf{S} :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \bar{\xi}_1 & \dots & \bar{\xi}_{l-1} & \bar{\xi}_l \\ \downarrow & \dots & \downarrow & \downarrow \end{pmatrix}, \quad (27)$$

1.4 побудувати перехідну матрицю стану:

$$\Phi(t^*) = \mathbf{S} \times \text{diag}(\exp(\lambda_1 t^*), \dots, \exp(\lambda_l t^*)) \times \mathbf{S}^{-1}. \quad (28)$$

2 Шукана функція $\mathbf{C}(t)$ знаходиться з співвідношення:

$$\mathbf{C}(t) = \Phi(t, t_0) \times \mathbf{C}(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) \times \mathbf{B}(\tau) \times \mathbf{U}(\tau) d\tau \quad (29)$$

або при дискретизації по часу з інтервалом T , функція $\mathbf{C}(k+1)$, що відповідає моменту часу $(k+1)T$, визначається з співвідношення:

$$\mathbf{C}(k+1) = \mathbf{F} \times \mathbf{C}(k) + \mathbf{G} \times \mathbf{U}(k), \quad (30)$$

$$\mathbf{F} = \exp(\mathbf{A} \cdot T), \quad \mathbf{G} = \int_0^T \exp(\mathbf{A} \cdot \sigma) \times \mathbf{B} d\sigma. \quad (31)$$

ВИСНОВКИ

На рис 3 наведена графічна залежність адсорбції на поверхні розділу фаз у вигляді зміни концентрації компонента у поверхневому шарі, на рис. 4 наведений приклад графічних залежностей зміни концентрації у вузлових точках в процесі адсорбції на поверхні розділу фаз отримані шляхом розв'язку рівняння стану (20) за алгоритмом (24) – (28), (30), (31).

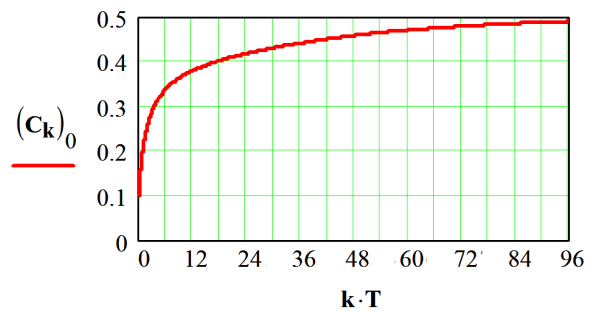


Рис. 3 – Крива адсорбції

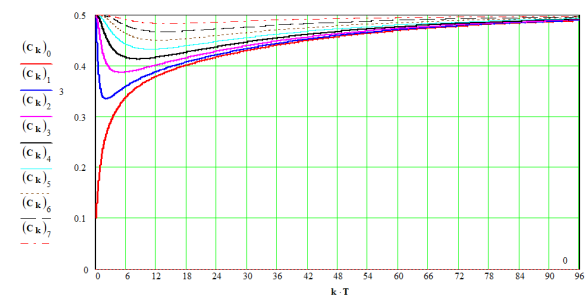


Рис. 4 – Зміни концентрації у вузлових точках в процесі адсорбції

Запропонована математична модель процесу адсорбції включень на поверхню розділу фаз рідина-газ, а також зведення системи диференціальних рівнянь у часткових похідних до рівняння стану у стандартній формі дало можливість отримати швидкий алгоритм визначення динаміки процесу адсорбції, яка безпосередньо зв'язана з зміною характеристик поверхні розділу фаз (поверхневий натяг, поверхневий потенціал та ін.). Таким чином отримані результати можуть бути використані для обробки результатів вимірювання при розробці інтелектуального пристрою для визначення якісного і кількісного речовин та оперативного контролю наявності мікровключень у середовищі.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Малько О. Г., Лугова Л. Р. Моніторинг і прогнозування розподілу включень поверхнево-активних речовин у закритих водних системах. Н.т. журнал Методи та прилади контролю якості, №11, 2003. С.45 – 452
- [2] Малько О. Г., Дранчук М. М. Методологічний підхід щодо якісного і кількісного контролю складу середовища та речовин по зміні між фазного натягу. Н.т. журнал Методи та прилади контролю якості, №8, 2002. С.30 - 34.
- [3] Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. – 568 с.
- [4] Бекман, И. Н., Высшая математика: математический аппарат
- [5] Малько О. Г., Кісіль І. С., Дранчук М. М. Розв'язок рівняння дифузії шляхом його зведення до рівняння стану у стандартній формі при моделюванні процесів розповсюдження включень у середовищі. Н.т. журнал Методи та прилади контролю якості, №12, 2004. С.48 -50
- [6] Директор, Р. Рорер Введение в теорию систем. –М.:Мир, 1974. – 464 с.

Методологія Створення Віртуального Робота

Віталій Веретельник
кафедра інформаційних технологій
Черкаський національний університет ім. Богдана Хмельницького
Черкаси, Україна
veretelnyk.vitaliy@gmail.com

Methodology for Creating a Virtual Robot

Vitalii Veretelnyk
Department of Information Technologies
them Bogdan Khmelnsky University
Cherkasy, Ukraine
veretelnyk.vitaliy@gmail.com

Анотація — Досліджено методологію моделювання, проектування та створення віртуального робота. Автор визначає, що віртуальний робот – це спеціальна програмна система контролю і управління, яка застосовує алгоритми штучного життя з використанням мультиагентних систем разом з нейронними мережами глибокого машинного навчання (віртуальний нейроконтролер), а також взаємодіє з спеціалізованими електронними програмованими пристроями

Abstract — The methodology of modeling, designing and creating a virtual work is explored. The author determines that a virtual robot is a special software control and management system that uses artificial life algorithms using multi-agent systems, along with neural networks of deep machine learning (virtual neurocontroller), and interacts with specialized electronic programmable devices

Ключові слова — віртуальний робот; мультиагентна система; алгоритми штучного життя; нейронні мережі глибокого машинного навчання; нейроконтролер; спеціалізовані електронні програмовані пристрої

Keywords — virtual robot; multiagent system; algorithms of artificial life; neural networks of deep machine learning; neurocontroller; specialized electronic programmable devices

I. ВСТУП

В сучасному світі автоматизація бізнес-процесів різних галузей економіки застосовує велику кількість машин і роботів з жорсткою логікою управління. На відміну від них існує цілий ряд інтелектуальних роботів, які наділені інтелектом, а саме мають здатність до самостійного навчання і організованості, адаптації до різних умов і змін навколишнього оточення, мають здатність аналізувати, застосовувати різні алгоритми взаємодії з іншими системами і самостійно приймати рішення щодо них [1].

Для вирішення складних проблем досить часто використовують мультиагентні системи, що складаються з набору агентів, які виконують окремі функції та

взаємодіють в процесі цього з іншими агентами. Переваги мультиагентної системи – це відносна простота розроблення окремих агентів, інтероперабельність, що дозволяє розширювати систему агентами, створеними незалежно різними розробниками, а також більша здатність системи до адаптації. Агенти, що входять до складу мультиагентної системи, можуть взаємодіяти один з одним не тільки в тих випадках, коли вони створені одним розробником чи групою розробників.

II. ТЕОРЕТИЧНИЙ БАЗИС

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Методологічним обґрунтуванням, розробкою та створенням мультиагентних систем управління та обробки даних займаються такі відомі вчені, як В.М. Гужва, Д.Г. Діденко, Т.В. Ібрагімхалілова, П.В. Ковальський, О.Є. Коноваленко, П.О. Кравець, В.А. Лабжинський, Н.В. Лисак, В.В. Литвин, І.І. Новаківський, Г.В. Рачинська, О.М. Сегеда, А.С. Слюняєв, В.О. Філатов та ін. Представниками другого напрямку є С.В. Голуб, О.Д. Міщенко, А.В. Романюк, Самра Муавія Хассан Хамо, В.С. Скрипник. Методологія створення автоматизованих систем багаторівневого соціоекологічного моніторингу (С.В. Голуб), мультиагентну інформаційну технологію адаптивної маршрутизації в мобільних комп'ютерних мережах (Н.В. Лисак), мультиагентну технологію синтезу розподілених ієрархічних систем оброблення даних (на прикладі СОД екологічного моніторингу) (В.А. Лабжинський), мультиагентні технології інтеграції гетерогенних інформаційних систем і розподілених баз даних.

III. ТЕОРЕТИЧНИЙ БАЗИС

МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО РОБОТА

Метою роботи є узагальнене дослідження методології моделювання, проектування та створення віртуального робота.

Відповідно до мети, в роботі поставлено і вирішено таке завдання.

- З'ясувати сутність елементів мультиагентної системи;
- Дати визначення поняття «агент» та «агент мультиагентної системи»;
- Дослідити особливості функціонування мультиагентної системи;
- Дослідити особливості функціонування нейронних мереж глибинного навчання;
- Сформулювати вимоги до мультиагентної системи;
- Створити модель взаємодії мультиагентної системи з нейромережею глибинного навчання.

Мультиагентна система – згруповані агенти інформаційної мережі, які взаємодіють між собою та досягають визначену розробником мету. Мультиагентна система побудована у вигляді об'єднання окремих агентів. Її формальне визначення виглядає так: AgentNet (Agnt, Env, Rel, Org, Act, Com, Evol), де:

- Agnt є множиною агентів;
- Env – середовищем функціонування агентів;
- Rel – сукупністю допустимих взаємовідносин між агентами;
- Org – визначається як опис правил формування мережі агентів;
- Act є набором індивідуальних і спільних дій, стратегій поведінки і вчинків;
- Com – це набори індивідуальних і спільних дій або комунікаційних взаємо- дій;
- Evol – можливість еволюції системи.

Віртуальний робот - це спеціальна програмна система контролю і управління, яка застосовує алгоритми штучного життя з використанням мультиагентних систем в поєднанні з нейронними мережами глибинного машинного навчання (віртуальний нейроконтролер), а також взаємодіє з спеціалізованими електронними програмованими пристроями (мікроконтролерами). Міжнародна асоціація FIPA розробила стандарти, що підтримують одну з визначальних характеристик агентів - інтероперабельність. Програма є агентом тільки в тому разі, якщо вона спроможна до коректних комунікацій на мові комунікацій агентів [2].

Програмами агенти, населяють мережу Інтернет. Діючи самостійно, агенти виконують корисну роботу в інтересах свого резидента - користувача. Вони стежать

за подіями в світі, добуваючи корисну інформацію, грають на біржі цінних паперів, домагаючись максимальних дивідендів для господаря, повідомляють йому про погрози і запобігають їх, іноді вступаючи в боротьбу з чужими агентами, вивчають і аналізують інші системи, впливають на роботи цих систем. [3].

Подібно до звичайних нейронних мереж, глибинні нейронні мережі можуть моделювати складні нелінійні відносини між елементами. У процесі навчання глибокої нейронної мережі отримувана модель намагається представити об'єкт у вигляді комбінації простих примітивів (наприклад, у задачі розпізнавання осіб такими примітивами можуть бути частини обличчя: ніс, очі, рот і так далі).[4]. Додаткові шари дозволяють будувати абстракції все більш високих рівнів, що і дозволяє будувати моделі для розпізнавання складних об'єктів реального світу. Як правило, глибинні мережі будуються як мережі прямого поширення [5]. Однак останні дослідження показали, як можна застосувати техніку глибинного навчання для рекурентних нейронних мереж. Згорткові нейронні мережі використовуються в області машинного зору, де цей підхід показав себе як ефективний [6]. Також згорткові нейронні мережі були застосовані для розпізнавання мови. Навчання глибинних нейронних мереж може бути здійснено за допомогою звичайного алгоритму зворотного поширення помилки. Існує велика кількість модифікацій даного алгоритму. Таким чином може бути використано кілька правил налаштування ваг. Наприклад навчання вагових коефіцієнтів $\omega_{ij}(t)$ алгоритмом стохастичного градієнтного спуску.

$$\omega_{ij} * (t + 1) = \omega_{ij}(t) + \eta \frac{\partial C}{\partial \omega_{ij}} \quad (1)$$

Де η стала для регулювання величини поточного кроку, C – функція втрат. Вибір функції втрат може бути обумовлений класом завдання машинного навчання (з учителем, без учителя, з підкріпленням) і функції активації. До двох головних проблем глибоких нейронних мереж відносять ті ж проблеми, що виникають і при навчанні звичайних нейронних мереж: час навчання та перенавчання [7]. Глибокі структури сильніше схильні до перенавчання, оскільки, маючи більше шарів, що дозволяють моделювати високорівневі абстракції, мережа може "вивчити" рідкісні ситуації. У цьому випадку можуть допомогти різні види регуляризації. Один з можливих методів регуляризації (dropout) припускає випадковим чином виключені вузли під час навчання. У деяких випадках це допомагає менше запам'ятовувати рідкісні залежності в тренувальних даних [8].

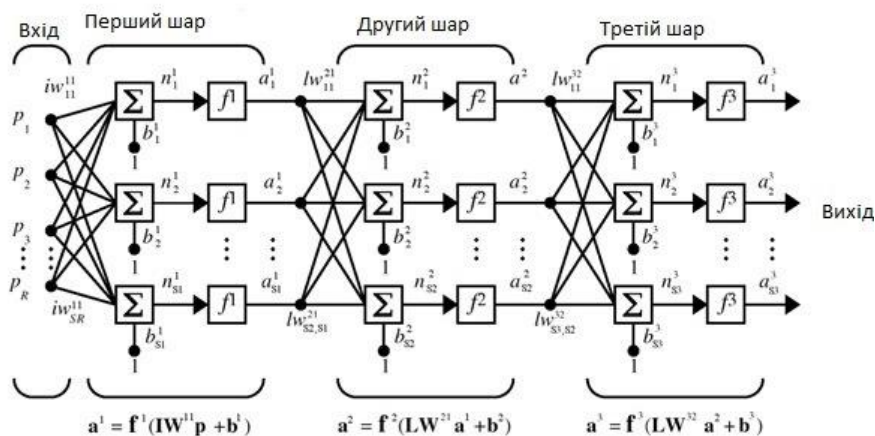


Рис. 1. Нейронна мережа глибокого навчання

У багатьох складних системах необхідно враховувати глибокі властивості системи. Загальним методом розробки схеми управління для гібридної системи є перший дизайн контролерів для динаміки безперервних змінних в кожному режимі системи, а потім для розробки дискретних контролерів на основі дискретної моделі високого рівня [9]. В методологію розробки віртуального робота була введена стратегія MPC для розробки схеми управління для гібридних систем, як безперервні змінні, так і дискретні змінні враховуються одночасно [10].

Щоб зробити підхід ясним, ми розглядаємо оновлення обмежень для одного агента та опускаємо індекс. Оскільки межі сигналів тривоги оновлюються на кожному етапі, рішення агентів залежать від вхідної інформації від інших агентів або, загалом, від будь-якого джерела. Щоб забезпечити правильність прийняття рішень, слід дотримуватися наступних обмежень на оновлену інформацію.

В роботі запропоновано штучну нейронну мережу, як універсальний налаштовуваний елемент може бути використаний в самих різних постановках задач при аналізі і синтезі систем автоматичного регулювання [11]. В теорії автоматичного керування динамічні ланки (об'єкти управління і регулятори) часто описуються передаточною функцією:

$$W(S) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{s^m b_m + s^{m-1} b_{m-1} + \dots + s b_1 + b_0}{s^n a_n + s^{n-1} a_{n-1} + \dots + s a_1 + a_0} \quad (2)$$

де y вихідний сигнал ланки, x вхідний сигнал, a_i і b_j постійні коефіцієнти s^m і s^n – зображення по Лапласа вхідному і вихідному сигналі регулятора $b_m < a_n$. При цифровому моделюванні розглядається дискретне представлення передаточної функції. Процес дискретизації, полягає в заміні операторів диференціальних відношень кінцевих різниць.

$$s\chi = \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta t}, s^2\chi = \frac{x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2}}{\Delta t^2} \quad (3)$$

Δt крок дискретизації по часу k номер моменту часу. Після всіх перетворень і спрощень отримаємо формулу виду:

$$y_n = \sum_{i=1}^n a_i y_{n-1} + \sum_{j=1}^m b_j y_{j-m} \quad (4)$$

де a_i і b_i постійні коефіцієнти, які залежать від кроку дискретизації по часу. Цього ж результату можна добитися з використанням z – перетворення:

$$W(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (5)$$

Еталонна модель управління – це нейронна мережа, яка повинна відслідковувати об'єкт заданого еталонного процесу. При цьому модель керуючого процесу активно використовується на етапі регулювання. необхідний обсяг обчислень можна порівняти з попереднім варіантом. Механізм навчання заснований на динамічному варіанті зворотного розповсюдження помилки і являється досить складним. Перевага регулювання на основі еталонної моделі, являється їх застосування для різних класів керуючих об'єктів. Проектування нейроконтролера з еталонною моделлю відбувається в два етапи: На першому етапі відбувається ідентифікація динамічної системи за допомогою наборів вхідних і відповідних їм вихідних величин, розробка архітектурної нейронної моделі динамічної системи і її параметрів. Отримання заданої точності регулювання задається на етапі роботи гібридної системи контролерів. На другому етапі відбувається пошук архітектури нейрокерування, щоб поведінка системи з заданою точністю відповідала еталонній моделі регулювання. На рис 2. запропоновано модель програмної системи контролю і управління. У нашій роботі ми зосередилися на мультиагентних системах в якості сенсорів, датчиків, виконуючих механізмів та нейронної мережі глибокого навчання, яка складається з трьох шарів, вона виступає в якості контролера керування. На нашій схемі агенти моделюють дії з інших частин системи як порушення. Простий спосіб досягти координації полягає в тому, щоб всі агенти передбачали майбутні доступні набори місцевих змінних станів і передавали ці набори сусіднім агентам, щоб вони могли оцінити межі

взаємодій. Це означає, що агенти оновлюють межі невизначеності у своїй локальній задачі оптимізації таким чином:

$$V^k * (j) = \chi_1 * (k + jjk - 1 * (a^i = f^1(IW^{11}(p + b^1) \dots \chi_{i-1} * (k + jjk - 1) * (a^2 = f^2(LW^{21}(a^1 + b^2) \dots \chi_{i-1} * (k + jjk - 1) * (a^3 = f^3(LW^{32}(a^2 + b^2) (6)$$

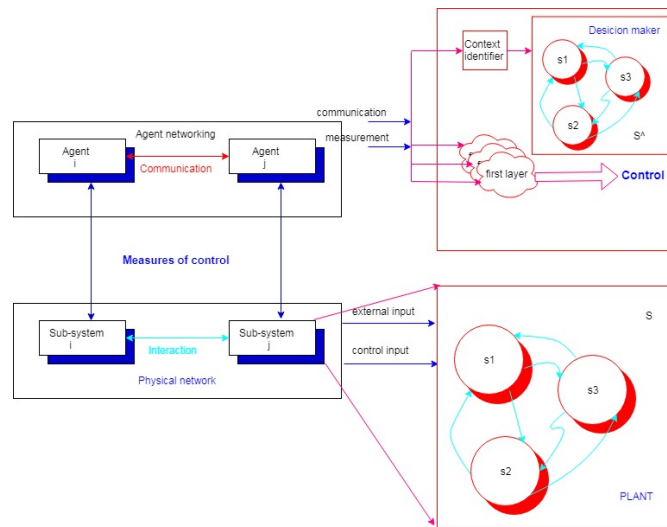


Рис. 2. Модель програмної системи контролю і управління

ВИСНОВКИ

Введено поняття нейроконтролер. За допомогою мікроконтролера, мультиагентної системи і нейронної мережі глибинного машинного навчання відбувається асеміляція в єдину спеціалізовану програмну систему контролю і управління бізнес-процесів. Досліджено методології створення систем управління на базі мультиагентної системи і розроблено математичну модель гнучкої логіки контролю керування і управління процесами.

Побудовано модель програмної системи контролю і управління та розроблено математичний апарат для цієї системи. Основна перевага запропонованого методу – суттєве спрощення системи на відміну систем управління з жорсткою логікою. Запропоноване в якості основної складової нейроконтролера використання нейронних мереж глибинного навчання.

По-перше, основний запропонований підхід суміщення спеціалізованого програмованого електронного пристрою (мікроконтролера), мультиагентної системи і нейронної мережі то головною задачею (нейроконтролера), являється розпізнавання вхідних і вихідних сигналів. По-друге, розробка методу розпізнавання вхідних сигналів є подальшою тематикою для майбутніх наукових досліджень.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

[1] Голуб С.В. Методологія створення автоматизованих систем багаторівневого соціоекологічного моніторингу : дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.13.06 / Голуб Сергій Васильович; НАН України; Ін-т проблем математичних машин і систем. – К. : Вид-во "Либідь", 2008. – 408 арк.

[2] Гужва В.М. Моделювання мультиагентних систем для управління логістичними процесами на підприємствах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук: спец. 08.03.02 / Гужва Володимир Михайлович; КНЕУ. – К., 2002. – 17 с.

[3] Диденко Д.Г. Мультиагентная система дискретно-событийного имитационного моделирования OpenGPSS : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.06 / Диденко Дмитрий Георгиевич; НТУ Украины "Киевский политехнический институт". – К., 2010. – 155 с.

[4] Ібрагімхалілова Т.В. Альтернативні методи моделювання ефективного механізму функціонування логістичної системи інноваційного типу / Т.В. Ібрагімхалілова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2012. – № 1 (172), ч.2. – С. 81-85.

[5] Ковальський П.В. Інформаційна мультиагентна система випробування стійкості алгоритмів шифрування даних / П.В. Ковальський, П.О. Кравець // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2008. – № 610. – С. 159-166.

[6] Коноваленко О.Є. Адаптивні мультиагентні системи управління та зв'язку / О.Є. Коноваленко, В.О. Брусенцев // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2007. – № 1. – С. 84-86.

[7] Кравець П.О. Динамічна координація стратегій мультиагентних систем / П.О. Кравець // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2011. – № 699. – С. 134-144.

[8] Глибокі нейромережі та елементи їх реалізації в ПЛІС FPGA / Т.А. Самолук // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2015. – № 14. – С. 134-140.

[9] Лабжинський В.А. Розроблення мультиагентної системи оброблення даних для забезпечення екологічного моніторингу, Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.8.

[10] Dong Jia. Distributed Coordination In Multi-Agent Control Systems Through Model Predictive Control Department of Electrical and Computer Engineering Carnegie Mellon University

[11] М. В. Бураков Нейронные сети и нейроконтроллеры: Учебное пособие / М. В. Бураков. – СПб.: ГУАП, 2013. – 284 с.

Комп'ютерна Модель Блоку LRU Кеш - пам'яті Процесорного Ядра Архітектури ІА - 32

Вадим Пуйденко

Циклова комісія "Комп'ютерні науки"
Харківський радіотехнічний технікум
vapuydenko@gmail.com
+380503435493

The Computer's Model of the Memory Cache LRU Unit of the Processor's Core of the Architecture IA-32

Vadym Puydenko

The department "Computer's sciences"
Kharkiv radio engineering technical school
vapuydenko@gmail.com
+380503435493

Анотація—в представленій науково-дослідницькій праці автором вирішується задача синтезу функціональної логіки роботи блоку LRU внутрішньої кеш-пам'яті центрального процесора при умовах промахів, влучань та заповнень рядків блоку даних внутрішньої кеш-пам'яті. Аналізується архітектура моделей логіки обрання рядків серед недостовірних певної множини для заповнення та логіки керування заміщенням рядків при повній достовірності обраної множини блоку даних. Проводиться мінімізація неповністю визначених функцій, що перемикаються: $B^+=f(L,B)$ обрання рядків множини серед достовірних та формування значень бітів $B_2^+B_1^+B_0^+$ блоку LRU з урахуванням попереднього стану цих бітів. В результаті синтезу отримані мінімальні логічні рівняння, які описують певну функціональну логіку реальної роботи блоку LRU внутрішньої кеш-пам'яті, як компоненти центрального процесора архітектури IA-32.

Abstract—in the presented scientific research work the author solves the problem of synthesis of the functional logic of the work of the unit of LRU of the internal cache memory of the central processor under the conditions of misses, hits and filling the rows of the data block of the internal cache memory. The architecture of models of the logic of selection of row among the unreliable certain set for filling and the logic of row replacement management with full accuracy of the selected set of data blocks are analyzed. Minimization of completely and not fully defined switching functions is carried out : function of $L=f(B)$ and

function of $B^+=f(L,B)$ selecting of sets of rows among reliable and forming values of bits $B_2^+B_1^+B_0^+$ of the LRU block taking into account the previous state of these bits. As a result of synthesis minimal logical equations that describe a certain functional logic of the actual work of the unit of reliability/LRU of the on-chip cache memory unit as components of the central processor architecture of IA – 32 are obtained.

Ключові слова—алгоритм pseudo-LRU, функціональна логіка, внутрішня кеш-пам'ять, блок LRU.

Keywords—algorithm of the pseudo-LRU, functional logic, on-chip memory cache, LRU unit.

I. ВСТУП

Процесори базису x86 мають досить високу швидкодію виконання операцій всього за один такт циклу. Відомо, що зовнішня пам'ять невзможливо забезпечувати дані у кожному такті, тому для підвищення загальної продуктивності потребується внутрішня кеш-пам'ять, яка гарантує досить швидке звертання до даних. Якщо всі операції програми використовують внутрішні ресурси, тоді досягається її найшвидке виконання, оскільки всі запити задовольняють внутрішні регістри і кеш-пам'ять. Однак при промахах в операціях читання і у всіх операціях запису процесору доводиться звертатися до зовнішньої шини, що знижує продуктивність системи. Зокрема, в операціях запису у внутрішню кеш-пам'ять, процесор

може наштовхнутися з проблемою вибору певного рядка множини блоку даних за умови достовірності всіх рядків. В цьому випадку процесор залучає блок достовірності/LRU, функціональна логіка якого гарантує обрання певного рядка множини для запису даних з використанням алгоритму pseudo-LRU.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ БЛОКУ LRU

Алгоритм pseudo-LRU діє наступним чином. Коли у циклі читання відбувається промах і в кеш-пам'яті необхідно передати з пам'яті новий рядок, приходиться обирати для заповнення один з чотирьох рядків множини. Якщо у множині є недостовірний рядок (його біт достовірності R дорівнює 0), то для заповнення обирається саме цей рядок. Коли ж всі рядки у множині достовірні (всі чотири достовірності біти R місять 1), то рядок, що замінюється, обирається із залученням бітів з блоку LRU. Позначимо рядки у множині через L_0, L_1, L_2 та L_3 . Кожній множині у блоці LRU відповідає три біти B_0, B_1 та B_2 , котрі модифікуються при кожному влучанні або заповненні наступним чином (рис.1) :

- якщо останнє звертання було до рядка L_0 або L_1 , то біт $B_0=1$, а при звертанні до рядка L_2 або L_3 біт $B_0=0$;
- якщо останнє звертання у парі L_0-L_1 було до рядка L_0 , то біт $B_1=1$, а при звертанні до рядка L_1 біт $B_1=0$;
- якщо останнє звертання у парі L_2-L_3 було до рядка L_2 , то біт $B_2=1$, а при звертанні до рядка L_3 біт $B_2=0$;

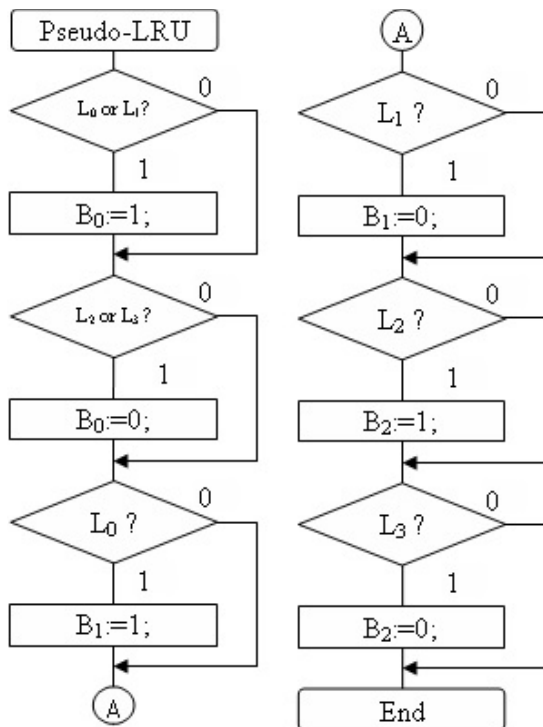


Рис. 1. Блок-схема алгоритму псевдо-LRU

III. СИНТЕЗ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Згідно з логікою функціонування алгоритму створимо повну таблицю істини обрання певного рядка (елемента) відповідної множини блоку даних (табл.1):

ТАБЛИЦЯ I. ОБРАННЯ ПЕВНОГО РЯДКА L_i

Біти LRU			Елемент $L=f(b)$
B_2	B_1	B_0	
0	0	0	L_0
0	0	1	L_2
0	1	0	L_1
0	1	1	L_2
1	0	0	L_0
1	0	1	L_3
1	1	0	L_1
1	1	1	L_3

Спрощена таблиця істини обрання певного рядка (елемента) відповідної множини блоку даних набуде вигляду (табл. 2):

ТАБЛИЦЯ II. ОБРАННЯ ПЕВНОГО РЯДКА L_i

Біти LRU			Елемент $L=f(b)$
B_2	B_1	B_0	
x	0	0	L_0
x	1	0	L_1
0	x	1	L_2
1	x	1	L_3

Складемо відповідні карти Карно з метою отримання МДНФ логічних функцій $L_i=f(b)$, що перемикаються, (де $i \in \{0,1,2,3\}$) (рис. 2).

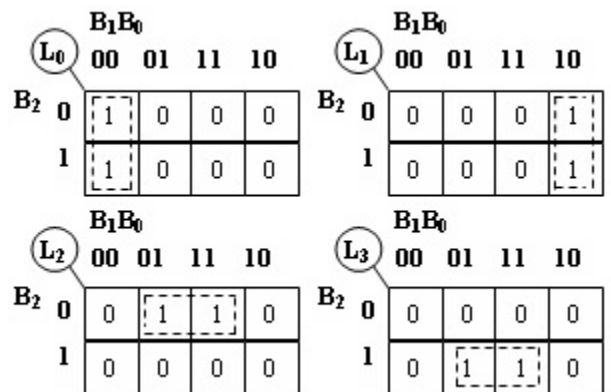


Рис. 2. Мінімізація логіки обрання рядків L_i

Отже, логічні рівняння обрання певного рядка L_i відповідної множини набудуть вигляду (1):

$$L_0 = \overline{B_1} \& \overline{B_0}; \quad L_1 = B_1 \& \overline{B_0}; \quad L_2 = \overline{B_2} \& B_0; \quad L_3 = B_2 \& B_0; \quad (1)$$

З урахуванням отриманих вище логічних рівнянь (1) фрагмент функціональної логіки обрання певного рядка L_i набуде вигляду (рис. 3)

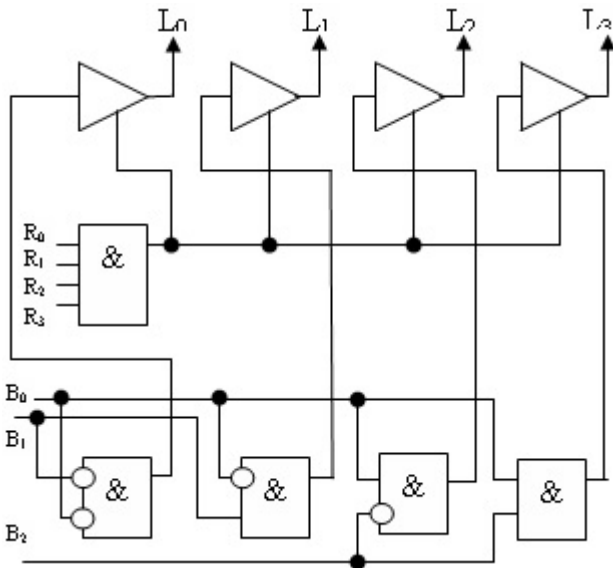


Рис. 3. Логіка обрання певного рядка L_i

Складемо таблиці істини відновлення бітів V_i^+ .
Таблиця істини відновлення біту V_0^+ буде такою (табл. 3):

ТАБЛИЦЯ III. Відновлення біту V_0^+

Рядки множини				Біти блоку LRU	
L_3	L_2	L_1	L_0	V_0	V_0^+
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	1	1
0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	1	1
0	0	1	1	x	x
0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0
0	1	0	1	x	x
0	1	1	0	x	x
0	1	1	1	x	x
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	x	x
1	0	1	x	x	x
1	1	x	x	x	x

Складемо відповідні карти Карно з метою отримання МДНФ логічних функцій $V_i^+=f(L)$, що перемикаються, (де $i \in \{0,1,2\}$) для створення логічних рівнянь відновлення прапорців $V_2^+V_1^+V_0^+$. Карта Карно відновлення біту V_0^+ набуде вигляду (рис. 4):

V_0^+	$L_1L_0B_0$							
L_3L_2	000	001	011	010	110	111	101	100
00	0	1	1	1	x	x	1	1
01	0	0	x	x	x	x	x	x
11	x	x	x	x	x	x	x	x
01	0	0	x	x	x	x	x	x

Рис. 4. Мінімізація логіки відновлення біту V_0

Таким чином, логічне рівняння відновлення значення біта V_0^+ має вигляд (2):

$$V_0^+ = \overline{L_3} \& \overline{L_2} \& B_0 \vee L_1 \vee L_0 = \overline{L_3 \& L_2 \& B_0} \& L_1 \& L_0; \quad (2)$$

Таблиця істини відновлення біту V_1^+ набуде вигляду (табл. 4):

ТАБЛИЦЯ IV. Відновлення біту V_1^+

Рядки множини	Біти блоку LRU		
L_1	L_0	B_1	V_1^+
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	x
1	1	1	x

Відповідна карта Карно буде такою (рис.5):

V_1^+	L_0B_1			
L_1	00	01	11	10
0	0	1	1	1
1	0	0	x	x

Рис. 5. Мінімізація логіки відновлення біту V_1

Логічне рівняння формування значення біта V_1^+ виглядатиме так (3):

$$V_1^+ = \overline{L_1} \& B_1 \vee L_0 = \overline{L_1 \& B_1} \& L_0; \quad (3)$$

Таблиця істини відновлення біту B_2^+ набуде вигляду (таблиця 5):

ТАБЛИЦЯ V. ВІДНОВЛЕННЯ БІТУ B_2^+

Рядки множини		Біти блоку LRU	
L_3	L_2	B_2	B_2^+
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	x
1	1	1	x

Відповідна карта Карно буде такою (рис.6):

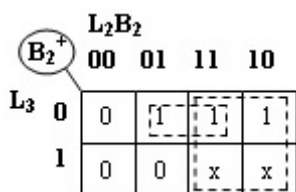


Рис. 6. Мінімізація логіки відновлення біту B_2^+

Таким чином, логічне рівняння відновлення значення біта B_2^+ має вигляд (4):

$$B_2^+ = \overline{L_3} \& B_2 \vee L_2 = \overline{\overline{L_3} \& B_2 \& L_2}; \quad (4)$$

Отже, фрагмент функціональної логіки відновлення бітів $B_2^+ B_1^+ B_0^+$ набуде вигляду (рис. 7):

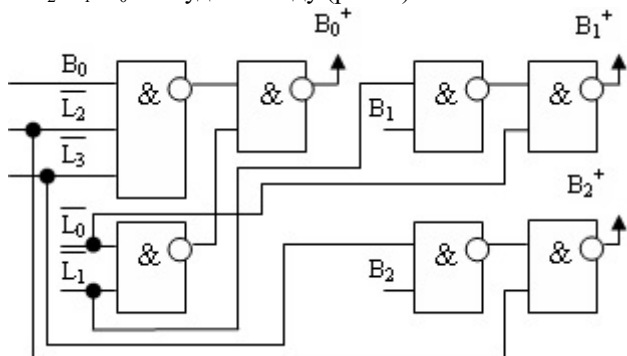


Рис. 7. Логіка відновлення бітів $B_2^+ B_1^+ B_0^+$

Поєднуючи отримані фрагменти функціональних логік обрання певного рядка L_i та відновлення бітів $B_2^+ B_1^+ B_0^+$ в єдиний синхронний цифровий автомат, де в якості синхронних елементів пам'яті для бітів B пропонуються синхронні D-триггери, а в якості синхросигналу – сигнал запису/читання W/R , отримаємо схематехнічне рішення блоку LRU внутрішньої кеш-пам'яті (рис. 8):

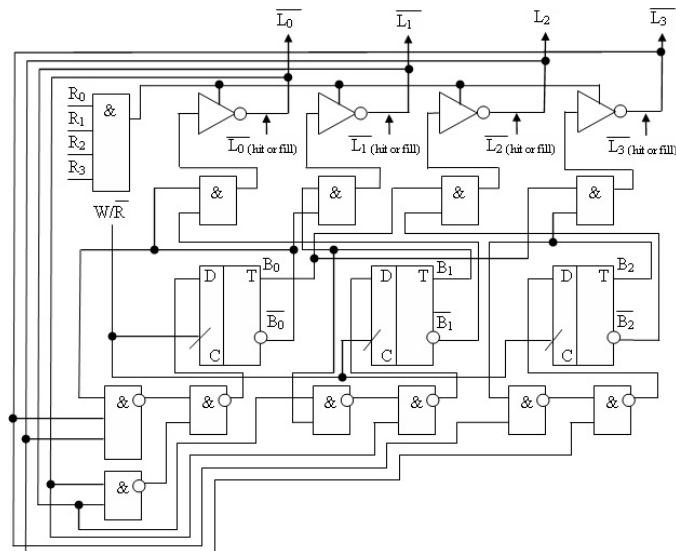


Рис. 8. Схематехнічне рішення блоку LRU

Схематехнічне рішення блоку LRU функціонує наступним чином: процесор, виконуючи свої цикли, в першу чергу адресно звертається до внутрішньої кеш-пам'яті по інструкції та операнди у вигляді послідовних 16 байтів. Фіксуєчи подію промаху у внутрішній кеш-пам'яті, процесор ініціює свій шинний інтерфейс на цикл звертання до сегменту або сторінки коду з метою розташування в адресованому рядку певної множини чергової 16 байтної порції, але наштовхується на факт повної достовірності рядків обраної множини. Процесор вирішує цю проблему, активуючи блок LRU. Активна функціональна логіка блоку LRU, покладаючись на алгоритм псевдо-LRU заміщення рядків, почне приймати рішення про запис у найменш нещодавно використаний рядок множини і першим на черзі стане рядок L_0 , про що свідчитиме вміст бітів $B_2 B_1 B_0 = 000$, оскільки останнім рішенням функціональної логіки блоку достовірності було обрання рядка L_3 . Наступний промах процесора при звертанні до обраної множини блоку даних внутрішньої кеш-пам'яті спричинить рішення функціональної логіки блоку LRU про обрання для запису у рядок L_2 , про що свідчитиме вміст бітів $B_2 B_1 B_0 = 011$, який утвориться на підставі звертання попередньо до рядка L_0 та попереднього стану бітів $B_2 B_1 B_0 = 000$. Далі, у разі промаху, функціональної логіки блоку LRU прийме рішення про обрання для запису рядок L_1 , про що свідчитиме вміст бітів $B_2 B_1 B_0 = 110$, який утвориться на підставі звертання попередньо до рядка L_2 та попереднього стану бітів $B_2 B_1 B_0 = 011$. Промах наступного циклу звертання процесора до обраної множини блоку даних внутрішньої кеш-пам'яті змусить функціональну логіку блоку LRU прийняти рішення про обрання для запису рядка L_3 , про що свідчитиме вміст бітів $B_2 B_1 B_0 = 101$, який утвориться на підставі звертання попередньо до рядка L_1 та попереднього стану бітів

$B_2B_1B_0=110$. Ймовірна асинхронна активність сигналу FLUSH# знову перетворить вміст блоку даних внутрішньої кеш-пам'яті на недостовірний і цикли заповнення та заміщення рядків знову повторяться. Взагалі існує три варіанти очистки внутрішньої кеш-пам'яті, що перетворюють достовірний вміст певного рядка відповідної множини блоку даних в недостовірний:

- вплив вхідного сигналу очистки внутрішньої кеш-пам'яті FLUSH#;
- цикл очистки кеш-пам'яті;
- цикл зворотного запису та очистки кеш-пам'яті;

Слід додати, що цикл очистки кеш-пам'яті виконує дві дії: перетворює увесь вміст внутрішньої кеш-пам'яті в недостовірний і запитує зовнішню кеш-пам'ять оголосити весь її вміст недостовірним. При чому зовнішня кеш-пам'ять не повинна записувати її вміст в основну пам'ять перед очисткою. Цей цикл ініціює команда INVD (INValidDate cache). Цикл зворотного запису та очистки кеш-пам'яті виконує три дії: перетворює увесь вміст внутрішньої кеш-пам'яті в недостовірний, запитує зовнішню кеш-пам'ять записати весь достовірний її вміст в основну пам'ять (здійснити зворотний запис або вивантаження) та запитує зовнішню кеш-пам'ять оголосити весь її вміст недостовірним після зворотного запису. Даний ініціює команда WBINVD (Write-Back INValidDate cache).

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ БЛОКУ LRU

Остаточна комп'ютерна модель блоку LRU внутрішньої кеш-пам'яті процесорного ядра відтворена на рисунку 9.

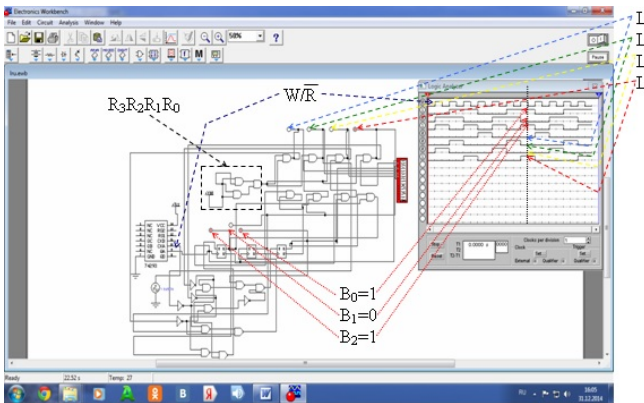


Рис. 9. Комп'ютерна модель блоку LRU

Синтезована модель функціональної логіки блоку LRU внутрішньої кеш-пам'яті процесорного ядра є оригінальним рішенням поставленої задачі. В процесі досліджень отриманої моделі модуля LRU в середовищі комп'ютерного моделювання EWB512 одержані результати у вигляді діаграм часу та значень логічних аналізаторів, де чітко відтворюється певна послідовність

відновлень значень бітів $B_2B_1B_0$: 000,011,110,101 (0,3,6,5) при кожній активності сигналу запису W/R, що відповідає влученню або заповненню рядків L0,L2,L1,L3 відповідної множини блоку даних кеш-пам'яті. У разі промаху, з урахуванням вище наведених відновлень значень бітів $B_2B_1B_0$, на поточному циклі заповнення рядка за умови достовірності всіх рядків ($R_3R_2R_1R_0=1111$), активний модуль LRU вже має рішення про обрання рядка для заповнення даними внаслідок попередніх влучень та заповнень, а його функціональна логіка наприкінці циклу вже готує певний рядок Li для наступних циклів звертання. Слід зазначити, що внаслідок синтезу функціональної логіки модуля LRU, стани бітів $B_2B_1B_0$: 001,010,100,111 (1,2,4,7) математично спростовані апаратом графічного методу мінімізації алгебри логіки, що вдвічі зменшує частоту використання одного й того ж рядка для заповнення.

ВИСНОВКИ

Сучасні джерела комп'ютерної літератури досить стримано висвітлюють апаратні рішення компонент процесорних ядер на рівні комп'ютерних схемотехніки та логіки. Цей факт торкається і такої компоненти, як модуль LRU внутрішньої кеш-пам'яті та асоціативного кеш-буфера сторінкового перетворення. Як правило в літературі ця компонента процесорного ядра описується на рівні архітектури.

Ця обставина надихнула автора, використовуючи математичний апарат комп'ютерної логіки, синтезувати модуль достовірності, блок LRU з алгоритмом pseudo-LRU та на підставі отриманих мінімальних логічних рівнянь отримати певне схемотехнічне рішення.

За схемотехнічним рішенням в середовищі комп'ютерного моделювання EWB512 була побудована комп'ютерна модель та досліджена комп'ютерна логіка її функціонування.

Представлена та досліджена комп'ютерна модель блоку LRU складає альтернативу існуючим блокам LRU реальних процесорів архітектури IA-32 та створює конкретну схемотехнічну уяву про досить абстрактну архітектуру пристрою.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] В.Л. Григорьев Микропроцессор i486. Архитектура и программирование. Книга 2,3,4. Аппаратная архитектура. – М., ГРАНАЛ, 1993. – с. 111, ил. 54
- [2] Б.Э. Смит, М.Т. Джонсон Архитектура и программирование микропроцессора INTEL 80386 – М.:ТОО «Конкорд», 1992. – 334 с.
- [3] Брей Б. Микропроцессоры Intel: 8086/8088, 80186/80188, 80286, 80386, i486, Pentium, Pentium Pro, Pentium 2, Pentium 3, Pentium 4. Архитектура, программирование и интерфейсы. Шестое издание: Пер. с англ. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1328 с.: ил.
- [4] Intel® 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual <http://www.intel.com>
- [5] Гук М. Процессоры P-II, P-Pro и просто Pentium. С-Петербург.: Питер Ком, 1999.- 288 с.
- [6] Гук М., Юров В. Процессоры Pentium 4, Athlon и Duron.- СПб.: Питер, 2001.- 512 с.

Моделювання Дифузії Домішки у Багатокомпонентному Двофазному Випадково Неоднорідному Середовищі з Пастками

Ольга Чернуха

Відділ математичного моделювання
нерівноважних процесів
Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України,
Кафедра обчислювальної математики та програмування
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
zaliznuchna6@gmail.com

Олеся Власій

кафедра інформатики
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені
Василя Стефаника»
Івано-Франківськ, Україна
olesia_vlasii@comp-sc.if.ua

Modeling Admixture Diffusion in a Multicomponent Two-Phases Stochastically Nonhomogeneous Medium with Traps

O. Chernukha

Department of mathematical
modeling nonequilibrium processes
Centre of Mathematical Modeling of Pidstryhach Institute
for Applied Problems of Mechanics and Mathematics,
Ukrainian Academy of Sciences,
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
zaliznuchna6@gmail.com

O. Vlasii

dept. of Computer Science
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
olesia_vlasii@comp-sc.if.ua

Анотація—У статті запропоновано математичну модель дифузії домішкової речовини у багатокомпонентному двофазному середовищі з пастками з випадково розташованим прошарком з урахуванням процесів сорбції-десорбції. Введена природна безрозмірна форма. Із застосуванням інтегральних перетворень побудовано розв'язок крайової задачі для системи диференціальних рівнянь в частинних похідних з випадковими коефіцієнтами. Проведено усереднення аналітичного розв'язку за ансамблем конфігурацій фаз за умови рівномірного розподілу фаз. Отримано розрахункові формули для концентрацій домішкової речовини у двох фізичних станах і проведено чисельний аналіз математичної моделі.

Abstract—In the article the mathematical model of diffusion processes in multicomponent two phases stochastically non homogeneous medium with traps is proposed. The natural dimensionless form is introduced. The mathematical model is described in the form of the boundary value problem for the

system of partial differential equations with stochastic coefficients. The analytical solutions of the model problem are constructed by integral transformations. Averaging the obtained solutions is carried out over the ensemble of phase configurations with the uniform distribution function. The calculation formulas for admixture concentration are arrived and the numeric analysis of the described model is provided.

Ключові слова— математична модель; дифузія; багатокомпонентне двофазне середовище; випадковий прошарок; пастки; домішка

Keywords—mathematical model; diffusion; multicomponent two phases medium; stochastic sublayer; traps; admixture

I. ВСТУП

Дослідження впливу технологічних процесів в різноманітних сферах людської діяльності є актуальною науково-технічною проблемою. Однією із важливих

проблем сучасного українського довкілля є екологічний стан ґрунтів [10]. Проблема дослідження поширення забруднень у ґрунтах не втрачає своєї актуальності у зв'язку із необхідністю враховування різноманітних характеристик як середовища, так і мігруючих домішок у ньому, при побудові адекватних математичних моделей, а також рядом ускладнень, які виникають при дослідженні створених моделей. Важливе значення має вивчення характеру поширення шкідливих речовин в середовищі, геометричної конфігурації досліджуваних областей, фізичних характеристик середовища та їх взаємовпливу. Математичне моделювання з подальшим чисельним аналізом на основі комп'ютерного моделювання дозволяє розробляти засоби опису, вивчення та кількісної характеристики процесів та явищ різної природи, яких об'єднує негативний вплив на довкілля [11].

Важливий практичний інтерес становить випадок повністю зволжених приповерхневих шарів ґрунтів, коли пори середовища майже повністю заповнені водою (ґрунтовим розчином), а домішкові частинки в рамках довільно вибраної малої області перебувають у фізично різних станах, що істотно впливає на перерозподіл цієї речовини (рис. 1).

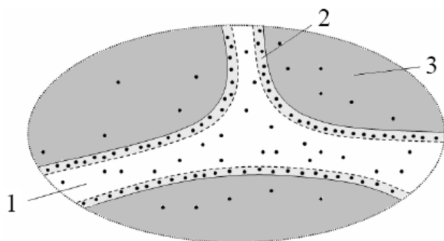


Рис. 10. Характерна структура фізично малого елемента тіла. Область 1 займає водний поровий розчин, 2 – адсорбовані на скелеті ґрунту шари води, 3 – скелет ґрунту. Крапками умовно позначено частинки домішкової речовини.

Внаслідок цього процес просторового перенесення забруднюючих домішок відбувається декількома шляхами та супроводжується локальними переходами з одного шляху міграції на інший (процесами типу сорбції-десорбції). Як правило, коефіцієнт дифузії в поровому розчині є на декілька порядків більшим, ніж в адсорбованих на скелеті шарах води. В свою чергу, коефіцієнт дифузії в адсорбованих шарах є на декілька порядків більшим, ніж в об'ємі скелету ґрунту. Часто коефіцієнт дифузії в елементах скелету є таким малим, що їх вважають пастками для домішки [16], [19].

У роботах [12]-[14] вивчалися математичні моделі міграції домішкових речовин у ґрунтах з урахуванням двох шляхів міграції частинок з різними коефіцієнтами дифузії – у водному поровому розчині та в адсорбованих на скелеті ґрунту шарах води.

У [15], [16] вивчалася проблема гетеродифузного поширення домішки у середовищах з пастками. Варто зауважити, що наявність неоднорідностей у ґрунтах, наприклад, випадково розташованих прошарків, призводить до необхідності постановки адекватних

математичних моделей. Проблеми поширення домішок у випадково неоднорідних середовищах вивчалися, наприклад, у роботах [17], [18].

Однак питання дослідження процесів дифузії у випадково неоднорідних середовищах з пастками залишається недослідженим. Тому метою даного дослідження є побудова математичної моделі дифузії у багатокомпонентному двофазному середовищі з випадково розташованим прошарком. Досліджена математична модель дифузії у випадково неоднорідному середовищі з пастками є практично важливим частковим випадком задачі, розглянутої у [18], який привертає увагу особливостями, що виникають в ході його вивчення.

II. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

A. Об'єкт дослідження. Постановка задачі

Вихідні співвідношення математичної моделі дифузії мігруючих частинок у багатокомпонентному двофазному середовищі з пастками сформульовані з використанням континуально-термодинамічного підходу механіки твердих розчинів. Кожній компоненті ставиться у відповідність континуум, з допомогою якого описуються кінематичні та деформаційні властивості компонент, а також формулюються балансові співвідношення, які відображають закони збереження маси, імпульсу, енергії та ентропії. З використанням концепції локальної термодинамічної рівноваги будуються рівняння стану та кінетичні рівняння. Вибравши в якості розв'язуючих функцій концентрації домішкових компонент, вектор переміщення, густину та температуру тіла, сформульовано ключову систему рівнянь, яка в подальшому лінеаризується [19].

Нехай домішкова речовина дифундує у двофазному середовищі з випадково розташованим прошарком, причому вважатимемо, що довільно вибрана мала область середовища складається з твердої фази, в об'єм якої можуть проникати домішкові частинки, та порового простору, в якому дифундує домішкова речовина, причому коефіцієнт дифузії домішки в об'ємі скелету настільки малий у порівнянні з коефіцієнтом дифузії у поровому просторі, що тверда фаза розглядається як пастка для домішкових частинок [17].

Розглянемо дисперсне шарувате двофазне середовище товщиною z_0 , в якому шар однієї фази Ω_1 містить випадково розташований прошарок другої фази Ω_2 товщиною h . Приймаємо, що фази в тілі розташовані за рівномірним розподілом і об'ємна частка області Ω_1 є набагато більшою за об'ємну частку Ω_2 , тобто $h \ll z_0 - h$. Координату верхньої межі прошарку вважатимемо випадковою величиною.

За ізотермічних умов, нехтуючи конвективними складовими масоперенесення та деформацією, для опису дифузії домішкових частинок отримано наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\rho(z) \frac{\partial c_i(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[d_i(z) \frac{\partial c_i(z,t)}{\partial z} \right] -$$

$$-k_1(z)c_1(z,t) + k_2(z)c_2(z,t),$$

$$\rho(z) \frac{\partial c_2(z,t)}{\partial t} = k_1(z)c_1(z,t) - k_2(z)c_2(z,t), \quad (1)$$

де $c_i = c_i(z,t)$ – випадкові концентрації домішки в станах, що відповідають дифузії у поровому просторі (при $i=1$) та знаходженню частинок у пастках ($i=2$); $\rho(z)$ – випадкова густина середовища; $d_i(z)$ – випадковий кінетичний коефіцієнт дифузії; $k_i(z)$ – випадкові коефіцієнти інтенсивності сорбції (при $i=1$) і десорбції (при $i=2$).

Густину середовища, кінетичний коефіцієнт дифузії та коефіцієнти інтенсивності вважатимемо сталими в об'ємі кожної фази і надалі позначатимемо $\rho^{(j)}$ – густину середовища, $d_i^{(j)}$ – кінетичний коефіцієнт дифузії, $k_i^{(j)}$, $i=1,2$ – коефіцієнти сорбції/десорбції в j -тій фазі.

Нехай в початковий момент часу домішки не було, такому випадку відповідають наступні початкові умови:

$$c_1(z,t)|_{t=0} = 0, \quad c_2(z,t)|_{t=0} = 0. \quad (2)$$

Вважатимемо, що для часу $t > 0$ на верхній межі середовища діє стале джерело домішкової маси і частинки з поверхні можуть попадати лише у поровий простір, а на нижній межі підтримується нульове значення концентрації, тобто виконуються наступні граничні умови:

$$c_1(z,t)|_{z=0} = c_0, \quad c_1(z,t)|_{z=z_0} = 0. \quad (3)$$

Можлива конфігурація середовища зображена на рисунку 2.

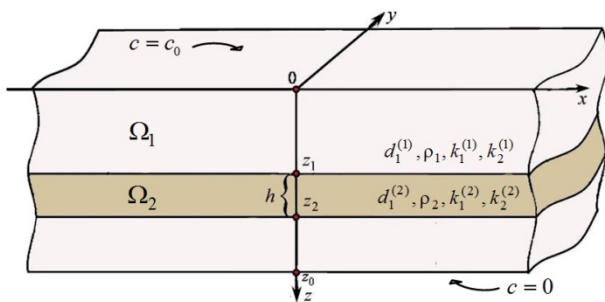


Рис. 11. Можлива реалізація двофазного середовища з випадково розташованим прошарком

В. Загальне рівняння дифузії для середовища в цілому

Перейдемо до безрозмірних змінних, які стискають часову вісь і розтягують вісь координат [19]:

$$\tau = \frac{k_2^{(1)}}{\rho^{(1)}} t, \quad \xi = \left(\frac{k_2^{(1)}}{d_1^{(1)}} \right)^{1/2} z.$$

В такому випадку областям $\Omega_1 = (0; z_1) \cup (z_2; z_0)$ і $\Omega_2 = [z_1; z_2]$ будуть відповідати наступні області

$$\bar{\Omega}_1 = (0; \xi_1) \cup (\xi_2; \xi_0) \quad \text{і} \quad \bar{\Omega}_2 = (\xi_1; \xi_2), \quad \text{де} \quad \xi_1 = \left(\frac{k_2^{(1)}}{d_1^{(1)}} \right)^{1/2} z_1,$$

$$\xi_2 = \left(\frac{k_2^{(1)}}{d_1^{(1)}} \right)^{1/2} z_2, \quad \xi_0 = \left(\frac{k_2^{(1)}}{d_1^{(1)}} \right)^{1/2} z_0. \quad \text{Товщина шару в нових}$$

$$\text{змінних буде} \quad \bar{h} = \left(\frac{k_2^{(1)}}{d_1^{(1)}} \right)^{1/2} h.$$

В безрозмірних змінних задача (1)-(3) матиме наступний вигляд:

$$\bar{\rho}(\xi) \frac{\partial c_i(\xi, \tau)}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\bar{d}_i(\xi) \frac{\partial c_i(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right] -$$

$$- \bar{k}_1(\xi)c_1(\xi, \tau) + \bar{k}_2(\xi)c_2(\xi, \tau)$$

$$\bar{\rho}(\xi) \frac{\partial c_2(\xi, \tau)}{\partial \xi} = - \bar{k}_2(\xi)c_2(\xi, \tau) + \bar{k}_1(\xi)c_1(\xi, \tau), \quad (5)$$

$$c_1(\xi, \tau)|_{\tau=0} = 0, \quad c_2(\xi, \tau)|_{\tau=0} = 0, \quad (6)$$

$$c_1(\xi, \tau)|_{\xi=0} = c_0, \quad c_1(\xi, \tau)|_{\xi=\xi_0} = 0, \quad (7)$$

$$\text{де} \quad \bar{\rho}(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi \in \bar{\Omega}_1 \\ \frac{\rho^{(2)}}{\rho^{(1)}}, & \xi \in \bar{\Omega}_2 \end{cases}, \quad \bar{d}_i(\xi) = \begin{cases} d_i^{(2)}, & \xi \in \bar{\Omega}_1 \\ d_i^{(1)}, & \xi \in \bar{\Omega}_2 \end{cases},$$

$$\bar{k}_1(\xi) = \begin{cases} k_1^{(1)}, & \xi \in \bar{\Omega}_1 \\ k_1^{(2)}, & \xi \in \bar{\Omega}_2 \end{cases}, \quad \bar{k}_2(\xi) = \begin{cases} k_2^{(1)}, & \xi \in \bar{\Omega}_1 \\ k_2^{(2)}, & \xi \in \bar{\Omega}_2 \end{cases}$$

Таким чином, безрозмірні характеристики першої фази мають вигляд $\bar{\rho}^{(1)} = 1, \bar{d}_1^{(1)} = 1, \bar{k}_1^{(1)} = \frac{k_1^{(1)}}{k_2^{(1)}}, \bar{k}_2^{(1)} = 1$, а другої – $\bar{\rho}^{(2)} = \frac{\rho^{(2)}}{\rho^{(1)}}, \bar{d}_1^{(2)} = \frac{d_1^{(2)}}{d_1^{(1)}}, \bar{k}_i^{(2)} = \frac{k_i^{(2)}}{k_2^{(1)}}, i=1,2$.

Введемо “функцію структури” [19]

$$\eta_{ij}(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi \in \bar{\Omega}_{ij}, \\ 0, & \xi \notin \bar{\Omega}_{ij}, \end{cases}$$

де $\bar{\Omega}_{ij}$ – i -тий шар j -тої фази.

За умови суцільності середовища, тобто $\sum_{i,j} \eta_{ij}(\xi) = I$, систему (5) можна записати в операторному вигляді:

$$\begin{aligned} L_1^0 \{c_1(\xi, \tau), c_2(\xi, \tau)\} &= L_1^s \{c_1(\xi, \tau), c_2(\xi, \tau)\}, \\ L_2^0 \{c_1(\xi, \tau), c_2(\xi, \tau)\} &= L_2^s \{c_1(\xi, \tau), c_2(\xi, \tau)\}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $L_j^s \{c_1, c_2\} = (L_j^0 - L_j) \{c_1, c_2\}, j = 1, 2, c_i = c_i(\xi, \tau), i = 1, 2,$

$$L_1^0 \{c_1, c_2\} = \rho^{-1} \frac{\partial c_1}{\partial \tau} - \bar{d}_1^{(1)} \frac{\partial^2 c_1}{\partial \xi^2} + \bar{k}_1^{(1)} c_1 - \bar{k}_2^{(1)} c_2,$$

$$L_2^0 \{c_1, c_2\} = \rho^{-1} \frac{\partial c_2}{\partial \tau} - \bar{k}_1^{(1)} c_1 + \bar{k}_2^{(1)} c_2,$$

$$\begin{aligned} L_1 \{c_1, c_2\} &= \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{n_j} \left[\rho^{-(j)} \frac{\partial c_1}{\partial \tau} - \bar{d}_1^{(j)} \frac{\partial^2 c_1}{\partial \xi^2} + \bar{k}_1^{(j)} c_1 - \bar{k}_2^{(j)} c_2 \right] \eta_{ij} - \\ &= \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{n_j} \left[\rho^{-(j)} \frac{\partial c_1}{\partial \tau} - \bar{d}_1^{(j)} \frac{\partial^2 c_1}{\partial \xi^2} + \bar{k}_1^{(j)} c_1 - \bar{k}_2^{(j)} c_2 \right] \eta_{ij}(\xi) - \\ &\quad - \left(\bar{d}_1^{(2)} - \bar{d}_1^{(1)} \right) (\delta(\xi - \xi_1) - \delta(\xi - \xi_2)) \frac{\partial c_1}{\partial \tau} \end{aligned}$$

$$L_2 \{c_1, c_2\} = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{n_j} \left[\rho^{-(j)} \frac{\partial c_2}{\partial \tau} - c_1 \bar{k}_1^{(j)} + \bar{k}_2^{(j)} c_2 \right] \eta_{ij}(\xi);$$

$\delta(\xi - \xi_q)$ – функція Дірака з носієм в точці $\xi = \xi_q$.

Таким чином, вихідну задачу (1)-(3) зведено до задачі (8), (6)-(7), алгоритм побудови розв'язку якої подано нижче. Алгоритм побудови розв'язку

С. Випадок однорідного середовища

Розв'язок відповідної задачі для «однорідного» середовища (тобто за відсутності випадкового прошарку) шукаємо із застосуванням інтегральних перетворень Лапласа. Таким чином, знаходимо концентрації домішкової речовини на швидкому шляху міграції та в пастках за відсутності випадкового прошарку:

$$\begin{aligned} c_1^{(0)}(\xi, \tau) &= c_0 \left(I - \frac{\xi}{\xi_0} \right) - \\ &\quad - \frac{2c_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(s_1 + \bar{k}_1^{(1)} + \bar{k}_2^{(1)} \right) e^{s_1 \tau} - \left(s_2 + \bar{k}_1^{(1)} + \bar{k}_2^{(1)} \right) e^{s_2 \tau} \right] \frac{\sin y_n \xi}{n(s_1 - s_2)}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$c_2^{(0)}(\xi, \tau) = c_0 \frac{\bar{k}_1^{(1)}}{\bar{k}_2^{(1)}} \left(I - \frac{\xi}{\xi_0} \right) +$$

$$+ 2c_0 \bar{k}_1^{(1)} \bar{d}_1^{(1)} \xi_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{s_1} e^{s_1 \tau} - \frac{1}{s_2} e^{s_2 \tau} \right] \frac{y_n \sin y_n \xi}{s_1 - s_2}, \quad (10)$$

де $y_n = \frac{\pi}{n \xi_0}, s_{1,2}$ – корені рівня $s^2 + \eta_1 s + \eta_2 = 0$, де $\eta_1 = \bar{k}_1^{(1)} + \bar{k}_2^{(1)} + \bar{d}_1^{(1)} y_n^2, \eta_2 = \bar{k}_2^{(1)} \bar{d}_1^{(1)} y_n^2$.

Для знаходження сумарної концентрації домішкової речовини потрібно додати $c_1^{(0)}(\xi, \tau)$ та $c_2^{(0)}(\xi, \tau)$.

Для ілюстрації дослідження впливу параметрів вихідної задачі на рисунку 3 показана залежність сумарної концентрації домішки в однорідному середовищі від коефіцієнта сорбції $k_1 = k_1^{(1)}$, коефіцієнт десорбції прийнятий рівним 1, товщина середовища в безрозмірних координатах рівна 10, безрозмірний час приймався рівним 10, початкова концентрація домішки рівна 1, а також $\rho^{(1)} = 1, d_1^{(1)} = 1, k_2^{(1)} = 1$.

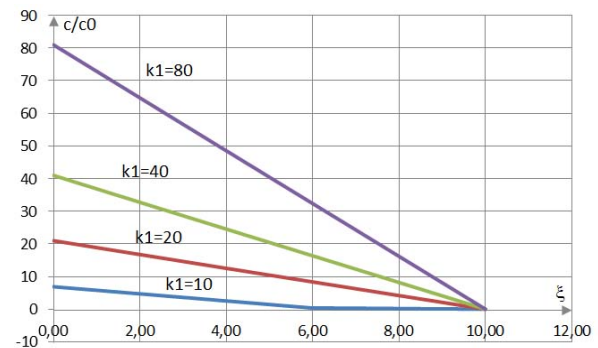


Рис. 12. Залежність сумарної концентрації домішки в однорідному середовищі від коефіцієнта сорбції k_1

Д. Функції Гріна

Розглядаючи праву частину рівнянь (8), (9) як джерело, тобто неоднорідність середовища вважаючи внутрішніми джерелами, задачу (8)-(9), (6)-(7) зводимо до еквівалентної системи інтегро-диференціальних рівнянь зі стохастичними ядрами. Розв'язок отриманої системи побудовано із застосуванням методу послідовних наближень та представлено рядом Неймана.

Отримано структуру функцій Гріна, які задовольняють відповідні рівняння для точкового джерела на швидкому шляху міграції (при $j=1$) і в пастках (при $j=2$) та нульові крайові умови

$$\begin{aligned} G_j(\xi, \xi', \tau, \tau') &= \frac{2}{\xi_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(s_1 + R_j' \right) e^{s_1(\tau - \tau')} - \left(s_2 + R_j' \right) e^{s_2(\tau - \tau')} \right] \times \\ &\quad \times \frac{\sin y_n \xi' \sin y_n \xi}{s_1 - s_2}, \end{aligned} \quad (11)$$

де $R_1' = 2\bar{k}_2^{(1)}, R_2' = 2\bar{k}_1^{(1)} + \bar{d}_1^{(1)} y_n^2$.

Е. Усреднення розв'язку

Процедуру усереднення розв'язку за ансамблем конфігурацій фаз провимо у припущенні рівномірного розподілу фаз:

$$\begin{aligned} \langle c_1(\xi, \tau) \rangle_{conf} &\approx c_1^{(0)}(\xi, \tau) + \\ &+ \frac{v_2}{h} \int_0^{\xi} \int_0^{\bar{h}} G_1(\xi', \tau') \bar{L}_1 \{ c_1(\xi', \tau'), c_2(\xi', \tau') \} \xi' d\xi' d\tau' + \\ &+ v_2 \int_0^{\xi} \int_{\bar{h}}^{\xi_0 - \bar{h}} G_1(\xi', \tau') \bar{L}_1 \{ c_1(\xi', \tau'), c_2(\xi', \tau') \} d\xi' d\tau' + \\ &+ \frac{v_2}{h} \Delta \bar{d}_1 \int_0^{\tau} \left[-\frac{1}{2} \left[G_1(\xi', \tau') \frac{\partial c_1^{(0)}(\xi', \tau')}{\partial \xi'} \right]_{\xi' = \bar{h}} + I_h(\tau) \right] d\tau', \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \langle c_2(\xi, \tau) \rangle_{conf} &\approx c_2^{(0)}(\xi, \tau) + \frac{v_2}{h} \int_0^{\xi} \int_0^{\bar{h}} G_2(\xi', \tau') \bar{L}_2 \{ c_1(\xi', \tau'), c_2(\xi', \tau') \} \xi' d\xi' d\tau' + \\ &+ v_2 \int_0^{\xi} \int_{\bar{h}}^{\xi_0 - \bar{h}} G_2(\xi', \tau') \bar{L}_2 \{ c_1(\xi', \tau'), c_2(\xi', \tau') \} d\xi' d\tau', \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{де } \bar{L}_1 \{ c_1, c_2 \} = \Delta \bar{\rho} \frac{\partial c_1^{(0)}}{\partial \tau} - \Delta \bar{d}_1 \frac{\partial^2 c_1^{(0)}}{\partial \xi^2} + \Delta \bar{k}_1 c_1^{(0)} - \Delta \bar{k}_2 c_2^{(0)},$$

$$I_h(\tau) = \lim_{\substack{X_2 \rightarrow 0+ \\ X_1 \rightarrow h+ X_1}} \int_{X_1}^{X_2} G_1(\xi', \tau') \frac{\partial c_1^{(0)}(\xi', \tau')}{\partial \xi'} d\xi',$$

$$\bar{L}_2 \{ c_1, c_2 \} = \Delta \bar{\rho} \frac{\partial c_j^{(0)}}{\partial \xi} - \Delta \bar{k}_1 c_1^{(0)} + \Delta \bar{k}_2 c_2^{(0)}, j = 1, 2,$$

$$\Delta \bar{\rho} = \bar{\rho}^{(1)} - \bar{\rho}^{(2)}, \Delta \bar{d}_i = \bar{d}_i^{(1)} - \bar{d}_i^{(2)}, \Delta \bar{k}_i = \bar{k}_i^{(1)} - \bar{k}_i^{(2)}, i = 1, 2,$$

v_2 – об'ємна частка включення.

Ф. Отримання розрахункових формул.

Для знаходження розрахункових формул усереднених концентрацій домішкових частинок на швидкому шляху міграції та в пастках, а також сумарної концентрації, в отримані формули (12), (13) підставляємо вирази (9), (10) для концентрації $c_j^{(0)}(\xi, \tau)$, $j = 1, 2$ в «однорідному» середовищі, функції Гріна (11) і виконуємо відповідні процедури диференціювання та інтегрування. На основі розрахункових формул розроблено програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання дифузійних процесів домішкових речовин як для випадку однорідного шару, так і за наявності в тілі випадково розташованого прошарку за рівномірного розподілу фаз.

III. ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано математичну модель дифузії домішкової речовини у багатокомпонентному двофазному середовищі з пастками з випадково розташованим прошарком, що має істотно інші фізико-хімічні характеристики. Введено природну безрозмірну форму, яка не використовує ні розміри середовища чи його неоднорідностей, ні характеристик просторово-часових масштабів змін процесів дифузії. За умови рівномірного розподілу фаз проведено усереднення розв'язку поставленої задачі за ансамблем конфігурацій фаз та отримано аналітичні вирази для концентрацій домішки на швидкому шляху міграції, в пастках та їхньої суми. Отримано відповідні розрахункові формули, на основі яких розроблено програмне забезпечення та проведено комп'ютерне моделювання дифузійних процесів домішкової речовини, яка дифундує у двофазному випадково неоднорідному шаруватому середовищі з пастками.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [10] Y. Dovbush Vid choho strazhdaie ukrainska pryroda: TOP-7 problem in "Velyka epoha", 2014, № 2. Available <http://www.epochtimes.com.ua/ukraine/society/vid-chogo-strazhdaie-ukrayinska-prirodap-7-problem-114174.html>
- [11] A. Oliynyk, A. Moroz Matematychnе modeliuвання protsesiv zabrudnennia hruntiv iak rezultat tehnologichnyh protsesiv in "Vostochno-Evropeiskiy zhurnalпередових технологій". 2015, 1(4), 4-9,- Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2015_1%284%29_2
- [12] V. Goncharuk, Y. Bilushchak, Y. Chaplya, O. Chernukha Mathematical Modelling and Forecasting Spread of Contaminants in Soil in Komunalnoe hoziaistvo horodov, 2016, 120'1: 115-121.
- [13] O. Chernukha, V. Goncharuk, Y. Bilushchak, A. Chuchvara Matematychnе modeliuвання ta prohnozuvannya poshyrennia radioaktyvnyh zabrudnen u pryverhnevnyh sharah nasychenoho hruntu" in Matematychni mashyny i systemy, 2017, 3, pp. 82-101.
- [14] H. Shcherbata Application of finite element method for solving of one-dimensional heterodiffusion problems in "Phisico-matematychnе modeliuвання ta informatsiini tehnologii, 2010, Vyp. 1, pp. 206-215.
- [15] Y. Bilushchak Mathematical Modelling Diffussion in a Medium with Traps under Cascade Decay of Admixture in Iformation Technologies and Computer Modelling: International Scientific and Practical Conference ITCM-2017: Precarpath. Nation. Univ., Ivano-Frankivsk, 2017, pp. 336-341.
- [16] Y. Chaplya, O. Chernukha, V. Goncharuk, V. Pabyrivskii, Y. Bilushchak Modeliuвання procesiv statsionaroi heterodyfuzii rozpadnoi rechovyny u seredovyshchi z pastkamy in Modeliuвання ta informatsiini tehnologii, Kuiv, Instytut problem modeliuвання v enerhetyci im. H. Y. Puhova NAN, 2013, Vyp. 70, pp. 96-108.
- [17] O. Chernukha, Y. Bilushchak, V. Goncharuk Matematychnе modeliuвання rozpodilu concentratsii domishok u stohastychnykh sharuvatykh tilah za neidealnyh umov kontaktu na mizhfaznyh hranytsiah in "Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Myhaila Ostrogradskoho", 2017, Vyp. 3, T. 104, pp.52-61.
- [18] O. Vlasii Matematychnе modeliuвання heterodyfuziinyh procesiv u shari z vypadkovym in "Fizyko-matematychnе modeliuвання ta informatsiini tehnologii", 2014, Vyp. 20, pp. 58-68.
- [19] Y. Chaplya, O. Chernukha Matematychnе modeliuвання heterodyfuznoho masoperenosu, Lviv: SPOLOM, 2003, 128 p.

СЕКЦІЯ 8.

*Прикладні методи дослідження дискретно-неперервних
математичних моделей*

SECTION 8.

*Applied methods of studying discrete-continuous
mathematical models*

Lagrangian Approximations and Collocation Method for Solution of Integral Equations of the First Kind

Olexandr Polishchuk

Laboratory of Modeling and Optimization of Complex Systems

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics National Academy of Sciences of Ukraine

Lviv, Ukraine

od_polishchuk@ukr.net

Abstract—This article is dedicated to research of approximation properties of Lagrangian finite elements in Hilbert spaces of functions defined on surfaces in three-dimensional space. The conditions are determined for convergence of collocation methods for solving Fredholm integral equation of the first kind for simple layer potential that is equivalent to Dirichlet problem for Laplace equation in R^3 . Estimation is determined for the error of approximate solution of this problem obtained using potential theory methods.

Keywords—potential; integral equation; well-posed solvability; Lagrange interpolation; collocation method; convergence

I. INTRODUCTION

Many physical processes (e.g. diffusion, heat flux, electrostatic field, perfect fluid flow, elastic motion of solid bodies, groundwater flow, etc.) are modeled using boundary value problems for Laplace equation [1]. The powerful tools for solving such problems are potential theory methods, especially in the case of tired boundary surface or complex shape surface [2]. In number of cases, application of potential theory methods requires solving Fredholm integral equation of the first kind. In particular, one of the cases is solving Dirichlet problem in the space of functions with normal derivative jump on crossing boundary surface using simple layer potential [3]. The need to solve integral equations of the first kind also arises when the sum of simple and double layer potentials is used to solve the double-sided Dirichlet or Neumann problem [4] or double-sided Dirichlet-Neumann problem [5] in the space of functions that, same as their normal derivatives, have jump on crossing boundary surface. Many systems of integral equations for the simple and double layer potentials that are equivalent to mixed boundary value problems for Laplace equation, also contain integral equations of the first kind [6]. In general, researches of projection methods convergence mainly focus on solving integral equations of the second kind. Defining well-posed solvability conditions for integral equations of the first kind that are equivalent to boundary value problems for Laplace's equation in Hilbert spaces [7, 8] allows us to use projection methods for numerical solution of such equations, thus avoiding resource-consuming regularization procedures. In [9, 10] convergence conditions are defined for the series of projection methods for solving Fredholm integral equation of the first kind for simple layer potential that is equivalent to three-dimensional Dirichlet problem for Laplace equation while approximating desired

potential density with complete systems of orthonormal functions. However, if boundary surface has a complex shape usage of such approximations poses considerable difficulties for practical implementation of numerical methods. In this case, finite elements of different types should be used for approximation of desired potential densities. Derived approximations, among other things, allow us to create effective algorithms for singularities removal in kernels and desired integral equation densities [11].

The purpose of the paper is to define convergence conditions of collocation method for approximate solution of Fredholm integral equations of the first kind by the example of integral equation for the simple layer potential that is equivalent to Dirichlet problem for Laplace equation using approximation of desired potential density with systems of Lagrangian finite elements of different orders.

II. LAGRANGIAN APPROXIMATIONS

Let us $S = [0, a] \times [0, b] \subset R^2$. Construct in the domain S a rectangular grid S_h with the steps $h_1 = a/n$ and $h_2 = b/k$, $n, k = 1, 2, \dots$. Assign to each element of the grid S_h of domain S

$$P_{ij} = [h_1 i, h_1(i+1)] \times [h_2 j, h_2(j+1)],$$

$$i = \overline{0(1)(n-1)}, \quad j = \overline{0(1)(k-1)},$$

a smaller rectangular grid P_{ij}^ε with the steps $\varepsilon_1 = h_1/m$ and $\varepsilon_2 = h_2/m$. Denote $S_{h,\varepsilon} = \bigcup_{i,j} P_{ij}^\varepsilon$ and associate with the set of

nodes $S_{h,\varepsilon}$ a system of piecewise polynomial functions

$$\{L_{pt}(\xi)\}_{p=0}^{mn} \{t=0}^{mk}, \quad (1)$$

satisfying conditions

$$L_{pt}(\xi_{ls}) = \delta_{pl} \delta_{ts}, \quad \text{supp } \{L_{pt}(\xi)\} = \tilde{P}_{pt},$$

$$\tilde{P}_{pt} = \left\{ \bigcup_{i,j} P_{ij} : \xi_{pt} \in P_{ij} \right\}, \quad \xi_{ls} \in \tilde{P}_{pt}, \quad (2)$$

where δ_{pl} is the Kronecker symbol.

Functions (1)-(2) form a system of Lagrangian finite elements of m -th degree in $H^m(S)$. Denote by $U_L^{N_1}$ the linear shell of this system, $N_1 = (1+mn)(1+mk)$. It is obvious

that the restriction of system (1)-(2) onto an arbitrary rectangle P_{ij} of the grid S_h is a basis in the space of polynomials $P^m(P_{ij})$ of degree not higher than m , defined on P_{ij} . Then

$$U_B^N \subset U_L^{N_1}, \quad (3)$$

where U_B^N is the linear shell of the system of B-splines of m -th degree defined on S_h [12].

Choose the extension operator $p_L^{N_1} : V_L^{N_1} \rightarrow U_L^{N_1} \subset H^m(S)$, where $V_L^{N_1} \subset R^{N_1}$, in the form

$$p_L^{N_1} \mathbf{v}_L^{N_1} = \sum_{i=0}^{mn} \sum_{j=0}^{mk} v_{N_1}^{(i,j)} L_{ij}(\xi). \quad (4)$$

Then, by virtue of the embedding (3), there exists a restriction operator $r_L^{N_1} : H^m(S) \rightarrow V_L^{N_1}$ such that approximations $(V_L^{N_1}, p_L^{N_1}, r_L^{N_1})$ of the space $H^m(S)$ are convergent and valid the estimates

$$\|v - p_L^{N_1} r_L^{N_1} v\|_{H^t(S)} \leq \tilde{C} h^{\sigma-t} \|v\|_{H^\sigma(S)}, \quad (5)$$

where $0 \leq t \leq \sigma \leq m+1$, $t \leq m$, and constant $\tilde{C} > 0$ does not depend on v . Thus, it is proved

Lemma 1. There is a restriction operator $r_L^{N_1} : H^m(S) \rightarrow V_L^{N_1}$ such that approximations $(V_L^{N_1}, p_L^{N_1}, r_L^{N_1})$ of the space $H^m(S)$ are convergent and valid the estimates (5).

Assume that surface $\Gamma = \bigcup_{l=1}^M \Gamma_l$ is m -smooth surface in R^3

[13]. Construct in each domain S_l the rectangular grid S_l^h with the steps $h_1^{(l)} = a_l / n_l$ and $h_2^{(l)} = b_l / k_l$ and set on each element P_{ij}^l of the grid S_l^h a smaller grid with the steps $\varepsilon_1^{(l)} = h_1^{(l)} / m$ and $\varepsilon_2^{(l)} = h_2^{(l)} / m$, $l = \overline{1, M}$. Define analogously to (1), (2) in each grid domain $S_l^{h,\varepsilon} = \bigcup_{i,j} P_{ij}^{l,\varepsilon}$ the system of Lagrangian finite elements

$$\{L_{ij}^{(l)}(\xi^{(l)})\}_{i=0}^{n_l m} \{L_{ij}^{(l)}(\xi^{(l)})\}_{j=0}^{k_l m}, \quad \xi^{(l)} \in S_l, \quad l = \overline{1, M}.$$

Assign to the family $S_l^{h,\varepsilon}$ the grid $\Gamma_{h,\varepsilon} = \bigcup_{l=1}^M \tau_l^{-1}(S_l^{h,\varepsilon})$ on the surface Γ , where $\tau_l^{-1}(P_{ij}^{l,\varepsilon})$ are the elements of the grid $\Gamma_{h,\varepsilon}$, $l = \overline{1, M}$. Denote by T_l the set of nodes of the grid $S_l^{h,\varepsilon}$, $l = \overline{1, M}$, $T = \bigcup_{l=1}^M T_l$. We number all elements of the set

T with the cross-cutting index $t = \overline{1, K}$, $K = \sum_{l=1}^M K_l$,

$K_l = (1 + n_l m)(1 + k_l m)$, and put in correspondence to each node x_p of the grid $\Gamma_{h,\varepsilon}$ the set of elements

$$P_p^* = \{P_{ij}^{l,\varepsilon} \in \bigcup_{l=1}^M S_l^{h,\varepsilon} : x_p \in \tau_l^{-1}(P_{ij}^{l,\varepsilon})\},$$

element

$$\tilde{P}_p = \{\bigcup_{i,j} \tau_l^{-1}(P_{ij}^{l,\varepsilon}), P_{ij}^{l,\varepsilon} \in P_p^*, l = \overline{1, M}\},$$

the set of indexes

$$T_p^* = \{t \in T : \tau_l^{-1}(P_{ij}^{l,\varepsilon}) = x_p, \xi_t^{(l)} \in P_l^{h,\varepsilon}, l = \overline{1, M}\},$$

and function

$$\tilde{L}_p(x) = \sum_{t \in T_p^*} L_t^l(\tau_l(x)), \quad x \in \Gamma_l, \quad \text{supp} \{\tilde{L}_p(x)\} = \tilde{P}_p, \quad (6)$$

$$L_t^{(l)}(\xi^{(l)}) \in \{L_{ij}^{(l)}(\xi^{(l)})\}_{i=0}^{n_l m} \{L_{ij}^{(l)}(\xi^{(l)})\}_{j=0}^{k_l m}.$$

Denote by $\tilde{r}_L^{N_L}$ the restriction operator from $H^m(\Gamma)$ into the finite dimensional space $V_L^{N_L}$ and by $\tilde{r}_L^{N_l}$ – its restriction to $H^m(\Gamma_l)$, i.e.

$$\tilde{r}_L^{N_L} = \{\tilde{r}_L^{N_l}\}_{l=1}^M, \quad \tilde{r}_L^{N_l} u_l(x) = r_L^{K_l} v_l(\xi), \quad (7)$$

where $r_L^{K_l}$ is the restriction operator from $H^m(S_l)$ into the corresponding finite dimensional space $V_L^{K_l}$, $l = \overline{1, M}$, and N_L is the number of nodes in the grid $\Gamma_{h,\varepsilon}$.

The extraction operator $\tilde{p}_L^{N_L}$ from $V_L^{N_L}$ into the linear shell $U_L^{N_L}$ of the system $\{\tilde{L}_p(x)\}_{p=1}^{N_L}$, $U_L^{N_L} \subset H^m(\Gamma)$, introduce by formula

$$(\tilde{p}_L^{N_L} \mathbf{u}_L^{N_L})(x) = \sum_{i=1}^{N_L} u_N^{(i)} \tilde{L}_i(x), \quad \mathbf{u}_L^{N_L} \in V_L^{N_L}. \quad (8)$$

From Lemma 1 follows that i.e. approximations $(V_L^{N_L}, \tilde{p}_L^{N_L}, \tilde{r}_L^{N_L})$ of the space $H^m(\Gamma)$ are convergent. Further from estimate (5) we obtain

$$\|u - \tilde{p}_L^{N_L} \tilde{r}_L^{N_L} u\|_{H^t(\Gamma)}^2 \leq \tilde{C}^2 h^{2(\sigma-t)} \|u\|_{H^\sigma(\Gamma)}^2, \quad (9)$$

where $0 \leq t \leq \sigma \leq m+1$, $t \leq m$, and $p_L^{N_l}$ is a similar to (4) extension operator from $V_L^{N_l}$ into $H^m(S_l)$, constant $\tilde{C} > 0$ does not depend on u and $h = \max_{1 \leq l \leq M} \{h_1^{(l)} h_2^{(l)}\}$. Thus, it is proved

Lemma 2. There is a restriction operator $\tilde{r}_L^{N_L} : H^m(\Gamma) \rightarrow V_L^{N_L}$ such that approximations $(V_L^{N_L}, \tilde{p}_L^{N_L}, \tilde{r}_L^{N_L})$ of the space $H^m(\Gamma)$ are convergent and valid the estimates (9).

III. COLLOCATION METHOD

Let us denote $G' = R^3 \setminus \overline{G}$ and introduce in G and G' the Sobolev spaces [13]

$$H^m(G) = \{v \in L_2(G) : \partial^\alpha v \in L_2(G), |\alpha| \leq m\},$$

$$W^m(G') = \{v \in D'(G') : (1+r^2)^{(|\alpha|-1)^2} \partial^\alpha v \in L_2(G'), |\alpha| \leq m\},$$

where $m \geq 0$, and $r = (\sum_{i=1}^3 x_i^2)^{1/2}$, $x = (x_1, x_2, x_3) \in R^3$.

Consider the next boundary value problem: to find function

$$v \in H_{\Gamma, \Delta=0}^{m+1} = \{v \in H^{m+1}(G) \cup W^{m+1}(G') : \quad (10)$$

$$v|_{\Gamma_{\text{int}}} = v|_{\Gamma_{\text{ext}}}, \Delta v(x) = 0, x \in G, G'\}$$

satisfying condition

$$v|_{\Gamma} = f, f \in H^{m+1/2}(\Gamma). \quad (11)$$

In [14] was proved

Theorem 1. Problem (10)-(11) has one and only one solution.

We will search a solution of the problem (10) - (11) in the form of simple layer potential

$$v(x) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} \frac{u(y)}{|x-y|} d\Gamma_y, x \in G, G'.$$

The unknown potential density is determined from the equation

$$(Au)(x) \equiv \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} \frac{u(y)}{|x-y|} d\Gamma_y = f(x), x \in \Gamma. \quad (12)$$

Operator A is an isomorphism of $H^s(\Gamma)$ onto $H^{s+1}(\Gamma)$ [14]. Then from the Banach theorem follows the validity of inequalities

$$\alpha_s \|u\|_{H^s(\Gamma)} \leq \|Au\|_{H^{s+1}(\Gamma)} \leq \beta_s \|u\|_{H^s(\Gamma)}, \quad (13)$$

in which constants α_s and β_s , $0 < \alpha_s \leq \beta_s$, does not depend on $u \in H^s(\Gamma)$.

To simplify the presentation, we assume that for approximation of unknown potential density $u \in H^m(\Gamma)$, $m \geq 0$, of equation (10) a system of linearly independent functions $\{\varphi_i\}_{i=1}^{\infty}$ is chosen, U_N is a linear shell of the system $\{\varphi_i\}_{i=1}^N$, $r_N : H^m(\Gamma) \rightarrow V_N$, $p_N : V_N \rightarrow U_N$ are the restriction and extraction operators. Denote by X_N the set of pairwise different points belonging to the surface Γ

$$X_N = \{x_j\}_{j=1}^N, x_j \in \Gamma, j = \overline{1, N},$$

and introduce in $H^{m+1}(\Gamma)$ restriction operator $s_N : H^{m+1}(\Gamma) \rightarrow \Phi_N$ by formula

$$(s_N f)_j = f(\tilde{y}_j) \quad (14)$$

in which

$$\tilde{y}_j \in \{\tilde{y} \in \delta(y_j) : |f(\tilde{y})| = \min_{y \in \delta(y_j)} |f(y)|, y_j \in X_N\}, \quad (15)$$

$$\delta(y_j) = \{y \in \Gamma : |y - y_j| < \delta\},$$

in particular $\rho(y^*, \delta(y_j)) > 0$ for arbitrary $y^* \in X_N$, $y^* \neq y_j, j = \overline{1, N}$.

If $f \in C(\Gamma)$, then operator s_N can be defined as usual

$$(s_N f)_j = f(y_j), y_j \in X_N, \quad (16)$$

i.e. $\tilde{y}_j = y_j, j = \overline{1, N}$. It is easy to see that, with this choice of operator s_N , a system of linear algebraic equations

$$\mathbf{A}_N^c \mathbf{u}_N = s_N f, \mathbf{A}_N^c = s_N A p_N, \mathbf{u}_N \in V_N, \quad (17)$$

implements the collocation method of solving the equation (12). The set X_N is called a set of collocation points.

Denote $Y_N = \{\tilde{y}_j\}_{j=1}^N$ and consider the system of functions

$$r_j(x) = \frac{1}{|x - \tilde{y}_j|}, \tilde{y}_j \in Y_N, j = \overline{1, N}.$$

From the choice of the set X_N and conditions (15) follows that the functions of system $\{r_j(x)\}_{j=1}^N$ are linearly independent [15].

Define in $L^\infty(\Gamma)$ the family of linear continuous functionals

$$l_j(\varphi) = \int_{\Gamma} \varphi(x) r_j(x) d\Gamma_x, \varphi \in L^\infty(\Gamma), j = \overline{1, N}.$$

Denote by $\text{Ker}(l_j)$ the zero subspace of functional l_j in $L^\infty(\Gamma)$, i.e. $\text{Ker}(l_j) = \{\varphi \in L^\infty(\Gamma) : l_j(\varphi) = 0\}$ and suppose

that $K_N = \bigcap_{j=1}^N \text{Ker}(l_j)$. The degeneracy of matrix \mathbf{A}_N^c is equivalent to the linear dependence of its rows or columns, that is, the existence of such sets $\mathbf{a}_N = \{\alpha_i\}_{i=1}^N \in R^N$ or $\mathbf{\beta}_N = \{\beta_j\}_{j=1}^N \in R^N$, $\sum_{i=1}^N \alpha_i^2 > 0$, $\sum_{j=1}^N \beta_j^2 > 0$, that

$$\int_{\Gamma} (\sum_{i=1}^N \alpha_i \varphi_i(x)) r_j(x) d\Gamma_x = 0, j = \overline{1, N}, \quad (18)$$

or

$$\int_{\Gamma} \varphi_i(x) (\sum_{j=1}^N \beta_j r_j(x)) d\Gamma_x = 0, i = \overline{1, N}. \quad (19)$$

Implementation of equations (18), (19) is only possible if $K_N \cap U_N \neq 0$. From this follows sufficient conditions for the invertibility of matrix \mathbf{A}_N^c , which we formulate in the next statement.

Lemma 3. Let us the system of linearly independent functions $\{\varphi_i\}_{i=1}^N$ is chosen for the approximate solution of

equation (12) and determined the set of collocation points X_N (and, consequently, the set K_N is defined). Then, if

$$K_N \cap U_N = 0, \quad (20)$$

then the matrix \mathbf{A}_N^c of the system of collocation equations (17) is non-degenerate for arbitrary N .

A similar result is obtained if the restriction operator s_N is chosen in the form

$$(s_N f)_j = \frac{1}{mes \delta(y_j)} \int_{\delta(y_j)} f(y) d\Gamma_y \quad (21)$$

$$\text{and } r_j(x) = \frac{1}{mes \delta(y_j)} \int_{\delta(y_j)} \frac{d\Gamma_y}{|x-y|}, \quad j = \overline{1, N}.$$

It is obvious that under conditions of Lemma 3 the operator \mathbf{A}_N^c , where s_N is defined according to (14)-(15) or (21), or in the case of $f \in C(\Gamma)$ according to (16), is stable.

Consider a discrete analog of condition (20). Let us the quadrature formula

$$\int_{\Gamma} \varphi(x) r_i(x) d\Gamma_x \approx \sum_{j=1}^N A_j \varphi(x_j) r_i(x_j), \quad (22)$$

$$x_j \in \Gamma, \quad x_j \neq x_i, \quad \text{if } j \neq i,$$

is used to calculate the integrals

$$\int_{\Gamma} \varphi(x) r_i(x) d\Gamma_x, \quad \varphi(x) \in U_N, \quad i = \overline{1, N},$$

which is exact for integrals

$$\int_{\Gamma} \varphi(x) \psi(x) d\Gamma_x, \quad \varphi(x), \psi(x) \in U_N.$$

Consider the system of functions

$$\psi_i(x) = \sum_{k=1}^N \alpha_k^{(i)} \varphi_k(x), \quad (23)$$

the coefficients $\alpha_k^{(i)}$, $k, i = \overline{1, N}$, of which we define from N systems of linear algebraic equations

$$\sum_{k=1}^N \alpha_k^{(i)} \varphi_k(x_j) = r_i(x_j), \quad i, j = \overline{1, N}. \quad (24)$$

Define the conditions under which the functions $\psi_i(x)$, $i = \overline{1, N}$, are linearly independent. From (23) we obtain that

$$\sum_{i=1}^N c_i \psi_i(x) = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^N c_i \alpha_k^{(i)} \right) \varphi_k(x) = 0$$

if and only if

$$\sum_{i=1}^N c_i \alpha_k^{(i)} = 0, \quad k = \overline{1, N}. \quad (25)$$

Let us the set of collocation points $X_N = \{y_j\}_{j=1}^N \subset \Gamma$ is chosen in such a way that

$$0 < |x_i - y_j| < \varepsilon, \quad d < |x_i - y_j|, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad j \neq i,$$

$$0 < \varepsilon < \frac{d}{N-1},$$

where $\{x_j\}_{j=1}^N$ are the nodes of quadrature formula (22). Then

$$r_i(x_i) > \sum_{i=1, i \neq j}^N r_i(x_j),$$

matrix $\mathbf{R}_N = \{r_i(x_j)\}_{i,j=1}^N$ due to Hadamard condition is nondegenerate and from (24) we obtain that vectors $\alpha_k = \{\alpha_k^{(j)}\}_{j=1}^N$, $k = \overline{1, N}$, are linearly independent. Hence, equality (25) holds if and only if $c_i = 0$, $i = \overline{1, N}$, i.e. the functions of system $\{\psi_i(x)\}_{i=1}^N$ are linearly independent.

Now, if the quadrature formula (22) is used to calculate the integrals in coefficients of matrix \mathbf{A}_N^c , instead of the system of collocation equations (14), we actually solve a system with matrix

$$\tilde{\mathbf{A}}_N^c = \left\{ \int_{\Gamma} \varphi_i(x) \psi_j(x) d\Gamma_x \right\}_{i,j=1}^N,$$

where functions $\psi_i(x)$, $i = \overline{1, N}$, are defined by formulas (23) and (24). The last matrix can be degenerate if and only if there exists a nonzero element $\varphi(x) = \sum_{i=1}^N a_i \varphi_i(x) \in U_N$, orthogonal

to all $\psi_i(x)$, $i = \overline{1, N}$, which is impossible, since the system $\{\psi_i(x)\}_{i=1}^N$ forms a basis in the space U_N .

Let us the system of Lagrangian finite elements of the form (6) is used to approximate the unknown potential density $u \in H^m(\Gamma)$ and U_{N_L} is its linear shell. We choose the operators $\tilde{r}_{N_L} : H^m(\Gamma) \rightarrow V_{N_L}$ and $\tilde{p}_{N_L} : V_{N_L} \rightarrow U_{N_L}$ in the form (7) and (8) respectively and determine the restriction operator $s_{N_L} : H^{m+1}(\Gamma) \rightarrow \Phi_{N_L}$ in the form (14), (15). In this case, the system

$$\mathbf{A}_{N_L}^c \mathbf{u}_{N_L} = \mathbf{f}_{N_L}, \quad \mathbf{A}_{N_L}^c = \tilde{r}_{N_L} A \tilde{p}_{N_L}, \quad \mathbf{f}_{N_L} = r_{N_L} f,$$

implements the collocation method for solution of equation (12). From Lax-Milgram lemma [16] follows that under conditions (20) matrix $\mathbf{A}_{N_L}^c$ is non-degenerate and, accordingly, the definition of operator q_{N_L} in the form $q_{N_L} \mathbf{f}_{N_L} = A \tilde{p}_{N_L} \mathbf{u}_{N_L}$ is correct. Given the left side of inequalities (13), the bijectivity of mapping $\tilde{p}_{N_L} : V_{N_L} \rightarrow U_{N_L}$, the expressions for norms in the spaces V_{N_L} and Φ_{N_L} in the case $U = H^m(\Gamma)$, $F = H^{m+1}(\Gamma)$ and equality $Q_{N_L} A P_{N_L} u = A P_{N_L} u$, we obtain the validity of inequalities

$$\alpha_m \|\mathbf{u}_{N_L}\|_{V_{N_L}} \leq \|\mathbf{A}_{N_L}^c \mathbf{u}_{N_L}\|_{\Phi_{N_L}} \quad (26)$$

for arbitrary $\mathbf{u}_{N_L} \in V_{N_L}$, in which α_m does not depend on \mathbf{u}_{N_L} . Then from the inequalities (13) and (26), Lemmas 2, 3, and basic convergence theorem [17] we obtain the validity of following

Theorem 2. For arbitrary $f \in H^{m+1}(\Gamma)$, $m=0,1,\dots$, the approximate solution $u_{N_L}^L$ of equation (12) obtained by collocation method under approximation of unknown potential density by a system of functions constructed on the base of Lagrangian finite elements of m -th degree and the choice of collocation points that satisfies the condition (20) converges to its exact solution, and there is an estimate

$$\|u - u_{N_L}^L\|_{H^t(\Gamma)} \leq \frac{\tilde{C}(1 + \beta_t / \alpha_t)}{\alpha_\sigma} h^{\sigma-t} \|f\|_{H^{\sigma+1}(\Gamma)}, \quad (27)$$

where $0 \leq t \leq \sigma + 1$, $t \leq m$, and h is the maximum area of the grid element on Γ .

IV. ERROR ESTIMATION OF APPROXIMATE SOLUTION OF THE DIRICHLET PROBLEM FOR THE LAPLACE EQUATION

Denote

$$v_{N_L}^L(x) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} \frac{u_{N_L}^L(y)}{|x-y|} d\Gamma_y, \quad x \in G, G',$$

and estimate the modulus of value

$$\frac{\partial^\alpha}{\partial x^\alpha} (v(x) - v_{N_L}^L(x)) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} (u(y) - u_{N_L}^L(y)) \frac{\partial^\alpha}{\partial x^\alpha} \frac{1}{|x-y|} d\Gamma_y, \quad x \in G, G', \quad \alpha = 0, 1, \dots$$

Let us

$$x \in R^3 \setminus \{\tilde{x} \in R^3 : |\tilde{x} - y| < \delta, y \in \Gamma\}. \quad (28)$$

Using Holder inequality and (24), we obtain

$$\left| \frac{\partial^\alpha}{\partial x^\alpha} (v(x) - v_{N_L}^L(x)) \right| \leq \frac{mes\Gamma}{\delta^{\alpha+1}} \|u - u_{N_L}^L\|_{L_2(\Gamma)}, \quad (29) \quad x \in G, G', \quad \alpha = 0, 1, \dots$$

Then from inequalities (27), (29) and Theorem 2 follow the validity of the next statement.

Theorem 3. For arbitrary $f \in H^{m+1}(\Gamma)$, $m=0,1,\dots$, an approximate solution of the problem (10), (11) obtained by collocation method under approximation of unknown potential density by systems of functions constructed on the basis of Lagrangian finite elements of the m -th degree, converges to its exact solution, and there is an estimate

$$\left| \frac{\partial^\alpha}{\partial x^\alpha} (v(x) - v_{N_L}^L(x)) \right| \leq \frac{C^*(1 + \beta_0 / \alpha_0) h^m}{\alpha_m \delta^{\alpha+1}} \|f\|_{H^{m+1}(\Gamma)}, \quad x \in G, G', \quad \alpha = 0, 1, \dots$$

CONCLUSIONS

The paper describes the conditions and evaluations of convergence of collocation method for solution of Fredholm integral equation of the first kind for the simple layer potential in case of closed boundary surface in a three-dimensional

space. Approximation of potential density was performed using Lagrangian finite elements of various orders on rectangular grids constructed in the desired function definition domain. Estimations were obtained for the error of approximate solution of Dirichlet problem for Laplace equation that is equivalent to the integral equation for the simple layer potential. The approach proposed can be used to define convergence of collocation method for solving potential theory integral equations that are equivalent to the boundary value problems for equations of mathematical physics and other types of finite elements of various orders, constructed on both rectangular and triangular grids in desired potential density definition domain.

REFERENCES

- [1] T. V. Hromadka II and C. Lay, The complex variable boundary elements method in engineering analysis, Berlin: Springer-Verlag, 1987.
- [2] G. C. Hsiao and W. L. Wendland, Boundary integral equations, Berlin: Springer, 2008.
- [3] A. D. Polishchuk, "Simple and double layer potentials in the Hilbert spaces", VIII-th Intern. Seminar "Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory", 2003, pp. 94-97.
- [4] O. D. Polishchuk, "Solution of bilateral Dirichlet and Neumann problems for the Laplacian in R^3 for tired surface by means of the potential theory methods", Applied Problems of Mechanics and Mathematics, vol.2, pp. 80-87, Dec. 2004.
- [5] O. D. Polishchuk, "Solution of the double-sided Dirichlet-Neumann problem for the Laplacian in R^3 by means of the potential theory methods", Mathematical Methods and Physicommechanical Fields, vol. 48 (1), pp. 59-64, March 2004.
- [6] P. R. Baldino, "An integral equation solution of the mixed problem for the Laplacian in R^3 ", Rapport Interne du Centre de Mathematiques Appliquees de l'Ecole Polytechnique, 48, 1979.
- [7] A. D. Polishchuk, "Construction of boundary operators for the Laplacian", X-th International Seminar "Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory", pp. 137-142, 2005.
- [8] A. D. Polishchuk, "Solution of double-sided boundary value problems for the Laplacian in R^3 by means of potential theory methods", XIX-th International Seminar "Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory", pp. 140-142, 2014.
- [9] A. D. Polishchuk, "About numerical solution of potential theory integral equations", Preprint, Computer centre of Siberian Division of AS of the USSR, 743, 1987.
- [10] A. D. Polishchuk, "About convergence the methods of projections for solution potential theory integral equation", Preprint, Computer centre of Siberian Division of AS of the USSR, 776, 1988.
- [11] O. Polishchuk, "Numerical solution of boundary value problems for the Laplacian in R^3 in case of complex boundary surface", Computational and Applied Mathematics Journal, vol. 1 (2), pp. 29-35, June 2015.
- [12] O. Polishchuk, "About convergence of Galerkin and collocation methods for solution of some Fredholm integral equation of the first kind", arXiv preprint 1801.02342 [math.NA], Jan 2018.
- [13] J. L. Lions and E. Magenes, Problemes aux limites non homogenes et applications, Paris: Dunod, 1968.
- [14] J. C. Nedelec and J. Planchard, "Une methode variationnelle d'elements finis pour la resolution numerique d'un probleme exterieur dans R^3 ", R.A.I.R.O., vol. R3 (7), pp. 105-129, July 1973.
- [15] M. A. Aleksidze, Solution of boundary value problems by means of decomposition on orthogonal functions, Moscow: Nauka, 1978.
- [16] W. V. Petryshyn, "Constructional proof of Lax-Milgram lemma and its application to non-K-P.D. abstract and differential operator equations", SIAM Journal Numerical Analysis, vol. 2 (3), pp. 404-420, March 1965.
- [17] J.-P. Aubin, Approximation of elliptic boundary value problems, New York: Wiley-Interscience, 1972.

Дослідження Процесів Теплопереносу у Багатошарових Конструкціях Основних Геометричних Форм з Урахуванням Внутрішніх Джерел Тепла

Роман Тацій, Марта Стасюк

кафедра прикладної математики і механіки
Львівський державний університет безпеки

життєдіяльності

Львів, Україна

roman.tatsiy@gmail.com, marta_stasiuk@yahoo.com

Олег Пазен

кафедра наглядово-профілактичної діяльності
Львівський державний університет безпеки

життєдіяльності

Львів, Україна

opazen@gmail.com

Research of Heat Transfer Processes in Multilayered Structures of Basic Geometric Forms with Internal Heat Sources

Roman Tatsiy, Marta Stasiuk

department of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of Life Safety

Lviv, Ukraine

roman.tatsiy@gmail.com, marta_stasiuk@yahoo.com

Oleg Pazen

Department of Monitoring and Fire Prevention
Lviv State University of Life Safety

Lviv, Ukraine

opazen@gmail.com

Анотація—Запропонована загальна схема дослідження процесу теплопередачі в багатошарових конструкціях основних трьох геометричних форм одночасно, з урахуванням внутрішніх джерел тепла. В зв'язку з цим розв'язується однопараметрична сім'я крайових задач. В основу реалізації цієї схеми покладено: метод редукції, концепція квазіпохідних, сучасна теорія систем лінійних диференціальних рівнянь, метод Фур'є і модифікований метод власних функцій.

Abstract—The general scheme of research of the process of heat transfer in multilayer structures of the three main geometric forms simultaneously, taking into account the internal sources of heat, is proposed. In this connection, a one-parameter family of boundary-value problem is solved. The basis of the implementation of this scheme is laid: the method of reduction, the concept of quasi-derivatives, the modern theory of systems of linear differential equations, the Fourier method and the modified method of eigenfunctions.

Ключові слова—крайова задача; квазіпохідна; матриця Коші; метод Фур'є; метод власних функцій

Keywords—paper; boundary-value problem; quasi-derivative; Cauchy matrix; Fourier method, method of eigenfunctions

I. ВСТУП

У роботах [1]-[4] запропоновано і обґрунтовано конструктивну схему побудови розв'язку мішаної задачі для рівняння теплопровідності з кусково-неперервними коефіцієнтами, залежними від просторової координати на скінченному інтервалі та внутрішніми джерелами тепла. В основу схеми було покладено: метод редукції, концепція квазіпохідних, сучасна теорія систем лінійних диференціальних рівнянь, метод Фур'є та модифікований метод власних функцій.

Одержані результати можуть бути використані, наприклад, при дослідженні процесів теплопередачі в багатошарових плиті та порожнистому циліндрі за умов ідеального теплового контакту між шарами. Ця ідея вже

була реалізована в роботах [1], [2]. Природно виникло питання про об'єднання цієї схеми для випадку багатощарових конструкцій будь-якої канонічної форми.

У загальному випадку диференціальні рівняння теплопровідності у прямокутній, циліндричній та сферичній системах координат (рівняння (1), (2) та (3) відповідно) мають вигляд

$$c(r)\rho(r)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(r)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial r}\right) + q_v(r) \quad (1)$$

$$c(r)\rho(r)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(r)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial r}\right) + q_v(r) \quad (2)$$

$$c(r)\rho(r)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\lambda(r)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial r}\right) + q_v(r) \quad (3)$$

Легко бачити, що ці рівняння відрізняються лише наявністю множника r^l , при $l=0$, $l=1$ та $l=2$. У зв'язку з цим авторами запропоновано об'єднати рівняння (1)-(3) в однопараметричну сім'ю диференціальних рівнянь [1], [2].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ЇЇ МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Розглядається багатощарова конструкція (у прямокутній, циліндричній або сферичній системі координат) область якої обмежена поверхнями $r=r_0$ і $r=r_n$ та поділена на n шарів. Кожен шар виготовлений із ізотропного матеріалу та наділений своїми коефіцієнтом теплопровідності λ , питомою теплоємністю c та густиною ρ . Крім цього, у шарах конструкції закладається наявність внутрішніх джерел тепла q_v . Для конструкції задано початковий розподіл температурного поля $\varphi(r)$, а температура t залежить від координати r та часу τ . На зовнішніх поверхнях існує конвективний теплообмін з навколишнім середовищем, тобто виконуються крайові умови третього роду [6].

У загальному випадку така постановка задачі зводиться до розв'язування однопараметричної сім'ї диференціальних рівнянь

$$c(r)\rho(r)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^l}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^l\lambda(r)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial r}\right) + q_v(r), \quad (4)$$

$$l = 0, 1, 2$$

зокрема, при $l=0$ – багатощарова плоска конструкція; $l=1$ – багатощаровий порожнистий циліндр; $l=2$ – багатощарова порожниста куля.

До рівняння (4) додаються крайові умови третього роду

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial t}{\partial r}(r_0, \tau) = \alpha_0 (t(r_0, \tau) - \psi_0(\tau)), \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial r}(r_n, \tau) = \alpha_n (t(r_n, \tau) - \psi_n(\tau)), \end{cases} \quad (5)$$

та початкова умова

$$t(r, 0) = \varphi(r). \quad (6)$$

Надалі використовуватимемо такі позначення [2], [3]: θ_i – характеристична функція напіввідкритого проміжку

$$[r_i, r_{i+1}), \text{ тобто, } \theta_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо } r \in [r_i, r_{i+1}), \\ 0, \text{ якщо } r \notin [r_i, r_{i+1}), \end{cases} \quad \lambda(r) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i \theta_i,$$

$$c(r) \cdot \rho(r) = \sum_{i=0}^{n-1} c_i \cdot \rho_i \cdot \theta_i, \quad \varphi(r) = \sum_{i=0}^{n-1} \varphi_i \cdot \theta_i, \quad \lambda_i, c_i, \rho_i > 0 \in R,$$

$$\forall i = \overline{0, n-1}, \quad r^l \lambda_t' = t^{[l]}(r, \tau) - \text{квзіпохідна, } q = \frac{t^{[l]}(r, \tau)}{r^l}$$

– густина теплового потоку.

Розв'язок задачі (4)-(6) шукатимемо у вигляді суми двох функцій (метод редукції) [3]

$$t(r, \tau) = u(r, \tau) + v(r, \tau). \quad (7)$$

Будь-яку з функцій $u(r, \tau)$ чи $v(r, \tau)$ можна вибрати спеціальним чином, тоді інша вже визначатиметься однозначно.

III. 2. ВИБІР ФУНКЦІЇ $u(r, \tau)$ ТА МІШАНА ЗАДАЧА ДЛЯ

$$v(r, \tau)$$

A. Задача для функції $u(r, \tau)$.

Розв'язуємо квазістаціонарну крайову задачу [2]-[4]

$$\frac{1}{r^l} (r^l \lambda u')' + q_v = 0, \quad (8)$$

з крайовими умовами (5) для функції $u(r, \tau)$, тобто

$$\begin{cases} \alpha_0 r_0^l u(r_0, \tau) - u^{[l]}(r_0, \tau) = \alpha_0 r_0^l \psi_0(\tau), \\ \alpha_n r_n^l u(r_n, \tau) + u^{[l]}(r_n, \tau) = \alpha_n r_n^l \psi_n(\tau). \end{cases} \quad (9)$$

Введемо вектори $\mathbf{u} = (u, u^{[l]})^T$, $\mathbf{q} = (0, r^l q_v)^T$ та

$$\text{матрицю } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & r^l \lambda \end{pmatrix}.$$

(Квзі)диференціальне рівняння (8) зводиться до еквівалентної системи диференціальних рівнянь 1-го порядку [2]

$$\mathbf{u}' = \mathbf{A}\mathbf{u} + \mathbf{q}. \quad (10)$$

Крайові умови (9) запишемо у векторній формі [3]

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{u}(r_0) + \mathbf{Q} \cdot \mathbf{u}(r_n) = \mathbf{\Gamma}(\tau), \quad (11)$$

де \mathbf{P} , \mathbf{Q} і $\mathbf{\Gamma}(\tau)$ мають вигляд

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \alpha_0 r_0^l & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \alpha_n r_n^l & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{\Gamma}(\tau) = \begin{pmatrix} \alpha_0 r_0^l \Psi_0(\tau) \\ \alpha_n r_n^l \Psi_n(\tau) \end{pmatrix}.$$

На кожному з проміжків $[r_i, r_{i+1})$ система (10) має вигляд

$$\mathbf{u}'_i = \mathbf{A}_i \mathbf{u}_i + \mathbf{q}_i, \quad \mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & r^l \lambda_i \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Матриця Коші $\mathbf{B}_{i,l}(r,s)$ системи (13) має наступний вигляд

$$\mathbf{B}_{i,l}(r,s) = \begin{pmatrix} 1 & K_{i,l}(r,s) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad l=0,1,2, \quad (14)$$

$$\text{де } K_{i,l}(r,s) = \frac{1}{\lambda_i} \int_s^r \frac{dz}{z^l}.$$

Для довільного $k \geq i$ позначимо

$$\mathbf{B}_l(r_k, r_i) \stackrel{df}{=} \mathbf{B}_{k-1,l}(r_k, r_{k-1}) \cdot \mathbf{B}_{k-2,l}(r_{k-1}, r_{k-2}) \cdots \mathbf{B}_{i,l}(r_{i+1}, r_i). \quad (15)$$

Структура (14) матриці $\mathbf{B}_{i,l}(r,s)$ дає можливість встановити структура матриці (15), а саме

$$\mathbf{B}_l(r_k, r_i) = \begin{pmatrix} 1 & \sum_{i=m}^{k-1} K_{i,l}(r,s) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

На кожному з проміжків $[r_i, r_{i+1})$ розв'язок задачі (8), (9) має вигляд вектор-функції $\mathbf{u}_i(r, \tau)$ [2], де першою координатою є шукана нами функція $u_i(r, \tau)$, а другою – її квазіпохідна.

$$\mathbf{u}_i(r, \tau) = \mathbf{B}_i(r, r_i) \cdot \mathbf{B}(r_i, r_0) \cdot \mathbf{P}_0 - \mathbf{B}_i(r, r_i) \times \\ \times \sum_{k=0}^i \mathbf{B}(r_i, r_k) \cdot \mathbf{Z}_k - \int_{r_i}^r \mathbf{B}_i(r, s) \cdot \mathbf{q}_i(s) ds, \quad (17)$$

$$\text{де } \mathbf{P}_0 = (\mathbf{P} + \mathbf{Q} \mathbf{B}_i(r_n, r_0))^{-1} \cdot (\mathbf{\Gamma} - \mathbf{Q} \sum_{k=0}^{n-1} \mathbf{B}_i(r_n, r_k) \cdot \mathbf{Z}_{k,l}),$$

$$\mathbf{Z}_{k,l} = \int_{r_{k-1}}^{r_k} \mathbf{B}_{k-1,l}(r_k, s) \mathbf{q}_{k-1}(s) ds,$$

$$\int_{r_i}^r \mathbf{B}_{i,l}(r, s) \cdot \mathbf{q}_i(s) ds = \int_{r_i}^r \begin{pmatrix} 1 & K_{i,l}(r,s) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ r^l q_{vi} \end{pmatrix} ds.$$

Вираз (17) дозволяє записати розв'язок задачі (8), (9) на проміжку $[r_0, r_n]$ за допомогою характеристичних функцій θ_i у вигляді

$$\mathbf{u}(r, \tau) = \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{u}_i(r, \tau) \theta_i. \quad (18)$$

В. Задача для функції $v(r, \tau)$

На основі зображення (7) перепишемо рівняння (4) у наступному вигляді [2], [5]

$$c\rho \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial \tau} + c\rho \frac{\partial v(r, \tau)}{\partial \tau} = \\ = \frac{1}{r^l} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^l \lambda \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^l} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^l \lambda \frac{\partial v(r, \tau)}{\partial r} \right). \quad (19)$$

Підставивши рівняння (8) в (19) отримуємо неоднорідну мішану задачу (роль неоднорідності грає вираз $-c\rho \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial \tau}$ із вже знайденою функцією $u(r, \tau)$)

$$c\rho \frac{\partial v(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^l} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^l \lambda \frac{\partial v(r, \tau)}{\partial r} \right) - c\rho \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial \tau}, \quad (20)$$

з нульовими крайовими умовами для функції $v(r, \tau)$,

$$\begin{cases} \alpha_0 r_0^l v(r_0, \tau) - v^{[l]}(r_0, \tau) = 0, \\ \alpha_n r_n^l v(r_n, \tau) + v^{[l]}(r_n, \tau) = 0, \end{cases} \quad (21)$$

та початковою умовою

$$v(r, 0) = f(r) = \varphi(r) - u(r, 0). \quad (22)$$

В.1. Відокремлення змінних та задача на власні значення.

Розв'язок однорідного диференціального рівняння

$$c\rho \frac{\partial v(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^l} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^l \lambda \frac{\partial v(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (23)$$

шукатимемо у вигляді [4]

$$v(r, \tau) = e^{-\omega\tau} \cdot R(r), \quad (24)$$

де ω – параметр, а $R(r)$ – невідома функція.

Підставляючи (24) у (23), отримаємо квазидиференціальне рівняння

$$(r^l \lambda R')' + \omega c\rho r^l R = 0, \quad (25)$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} \alpha_0 r_0^l R(r_0) - R^{[l]}(r_0) = 0, \\ \alpha_n r_n^l R(r_n) + R^{[l]}(r_n) = 0. \end{cases} \quad (26)$$

Задача (25), (26) – класична задача на власні значення, у якій необхідно знайти значення параметра ω (власні значення) при яких існують відповідні їм нетривіальні розв'язки (власні функції) $R_k(r, \omega_k)$. Відомо [4], що всі власні значення ω_k є додатними та різними.

Ввівши квазіпохідну $R^{[l]} \stackrel{df}{=} r^l \lambda R'$, вектор $\mathbf{R} = (R, R^{[l]})^T$ і матрицю $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -\omega r^l c \rho & 0 \end{pmatrix}$, зведемо

квазидиференціальне рівняння (25) до еквівалентної йому системи диференціальних рівнянь 1-го порядку

$$\mathbf{R}' = \mathbf{A} \mathbf{R}. \quad (27)$$

На кожному з проміжків $[r_i, r_{i+1})$ система (27) матиме вигляд [1], [3]

$$\mathbf{R}'_i = \mathbf{A}_i \mathbf{R}_i, \quad \mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -\omega r^l c_i \rho_i & 0 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Матриця Коші $\bar{\mathbf{B}}_{i,l}(r, s, \omega)$ системи (28) має наступний вигляд [1], [4]

$$\bar{\mathbf{B}}_{i,l}(r, s, \omega) = \begin{cases} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, l=0, \\ \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}, l=1, \\ \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}, l=2, \end{cases} \quad (29)$$

де позначено, $a_{11} = \cos \beta_i(r-s)$, $a_{12} = \frac{\sin \beta_i(r-s)}{\lambda_i \beta_i}$,

$$a_{21} = -\lambda_i \beta_i \sin \beta_i(r-s), \quad a_{22} = \cos \beta_i(r-s),$$

$$b_{11} = \frac{\pi \beta_i s (J_1(\beta_i, s) Y_0(\beta_i, r) - J_0(\beta_i, r) Y_1(\beta_i, s))}{2},$$

$$b_{12} = \frac{\pi (J_0(\beta_i, s) Y_0(\beta_i, r) - J_0(\beta_i, r) Y_0(\beta_i, s))}{2 \lambda_i},$$

$$b_{21} = \frac{\pi \lambda \beta_i^2 r s (J_1(\beta_i, r) Y_1(\beta_i, s) - J_1(\beta_i, s) Y_1(\beta_i, r))}{2},$$

$$b_{22} = \frac{\pi \beta_i r (J_1(\beta_i, r) Y_0(\beta_i, s) - J_0(\beta_i, s) Y_1(\beta_i, r))}{2},$$

$$c_{11} = \frac{\beta_i s \cos(\beta_i(r-s)) + \sin(\beta_i(r-s))}{\beta_i r}, \quad c_{12} = \frac{\sin(\beta_i \cdot (r-s))}{\beta_i r s \lambda_i},$$

$$c_{21} = \frac{(\omega c_i \rho_i r s + \lambda_i) \sin(\beta_i(r-s)) + (\beta_i \lambda_i (s-r)) \cos(\beta_i \cdot (r-s))}{\beta_i},$$

$$c_{22} = \frac{\beta_i r \cos(\beta_i(r-s)) + \sin(\beta_i(r-s))}{\beta_i s}.$$

Тут J_0 , J_1 и N_0 , N_1 – функції Бесселя і Неймана нульового та першого роду відповідно, а

$$\beta_i = \sqrt{\frac{c_i \rho_i \omega}{\lambda_i}}, \quad i = 0, n-1.$$

Аналогічно як і в (15), позначимо:

$$\bar{\mathbf{B}}_l(r_i, r_0, \omega) \stackrel{df}{=} \prod_{j=0}^i \bar{\mathbf{B}}_{i-j,l}(r_{i-j+1}, r_{i-j}, \omega), \quad (30)$$

$$\bar{\mathbf{B}}_l(r, r_0, \omega) \stackrel{df}{=} \sum_{i=0}^{n-l} \bar{\mathbf{B}}_{i,l}(r, r_i, \omega) \cdot \bar{\mathbf{B}}_l(r_i, r_0, \omega) \cdot \theta_i, \quad (31)$$

Розв'язок системи (27) шукатимемо у вигляді

$$\mathbf{R}(r, \omega) = \bar{\mathbf{B}}_l(r, r_0, \omega) \cdot \mathbf{C}, \quad (32)$$

де, $\mathbf{C} = (C_1, C_2)^T$ – деякий ненульовий вектор.

Застосувавши до рівності (32) крайові умови (26) та після перетворень отримаємо

$$[\mathbf{P} + \mathbf{Q} \cdot \bar{\mathbf{B}}_l(r_n, r_0, \omega)] \cdot \mathbf{C} = 0. \quad (33)$$

Для існування вектора \mathbf{C} в (33) необхідно и достатньо виконання умови

$$\det[\mathbf{P} + \mathbf{Q} \cdot \bar{\mathbf{B}}_l(r_n, r_0, \omega)] = 0. \quad (34)$$

Характеристичне рівняння задачі на власні значення (25), (26) має вигляд (34) [1].

Виходячи з умови (33), ненульовий вектор \mathbf{C} має вигляд

$$\mathbf{C} = \left(\frac{I}{\alpha_0 r_0^l}, I \right)^T. \quad (35)$$

Власні вектори системи диференціальних рівнянь (27) з крайовими умовами (26) мають наступну структуру

$$\mathbf{R}_k(r, \omega_k) = \bar{\mathbf{B}}_l(r, r_0, \omega) \cdot \left(\frac{I}{\alpha_0 r_0^l}, I \right)^T, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (36)$$

Власні функції $R_k(r, \omega_k)$, як перші координати власних векторів $\mathbf{R}_k(r, \omega_k)$, можна зобразити наступним чином

$$R_k(r, \omega_k) = (1, 0) \cdot \tilde{\mathbf{B}}_l(r, r_0, \omega_k) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_0 r_0^l}, 1 \right)^T, \quad (37)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

Оскільки $R_k(r, \omega_k) = \sum_{i=0}^{n-1} R_{ki}(r, \omega_k) \theta_i$, то із (37)

випливає, що

$$R_{ki}(r, \omega_k) = (1, 0) \cdot \tilde{\mathbf{B}}_{i,l}(r, r_i, \omega_k) \cdot \tilde{\mathbf{B}}_l(r_i, r_0, \omega_k) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_0 r_0^l}, 1 \right)^T. \quad (35)$$

В.2. Метод власних функцій.

Розв'язок мішаної задачі (20)-(22) шукатимемо у вигляді

$$v(r, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k(\tau) \cdot R_k(r, \omega_k), \quad (38)$$

де $T_k(\tau)$ – невідомі функції.

Оскільки $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ входить у праву частину рівняння (20), розвинемо її в ряд Фур'є за власними функціями $R_k(r, \omega_k)$.

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \sum_{k=1}^{\infty} u_k(\tau) \cdot R_k(r, \omega_k). \quad (39)$$

Тут слід зауважити, що розвинення деякої функції $g(r)$ в ряд Фур'є за власними функціями $R_k(r, \omega_k)$ задачі (25), (26) має вигляд

$$g(r) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k \cdot R_k(r, \omega_k), \quad (40)$$

де коефіцієнти Фур'є g_k знаходяться за формулою [3]

$$g_k = \frac{1}{\|R_k\|^2} \int_{r_0}^{r_n} c p r^l g(r) R_k(r, \omega_k) dr = \frac{1}{\|R_k\|^2} \sum_{i=0}^{n-1} c_i \rho_i \int_{r_i}^{r_{i+1}} r^l g_i(r) R_{ki}(r, \omega_k) dr. \quad (41)$$

Зауважимо, що $\|R_k\|^2$ – квадрат норми власних функцій $R_k(r, \omega_k)$

$$\|R_k\|^2 = \int_{r_0}^{r_n} c p r^l R_k^2(r, \omega_k) dr = \sum_{i=0}^{n-1} c_i \rho_i \int_{r_i}^{r_{i+1}} r^l R_{ki}^2(r, \omega_k) dr. \quad (42)$$

Підставляючи (38) у (20), враховуючи (24) та після перетворень, приходимо до нескінченної сукупності диференціальних рівнянь

$$T_k'(\tau) + \omega_k T_k(\tau) + u_k(\tau) = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (43)$$

де $u_k(\tau)$ – коефіцієнти розвинення

$$\frac{\partial u(r, \tau)}{\partial \tau} = \sum_{k=1}^{\infty} u_k(\tau) \cdot R_k(r, \omega_k).$$

Загальний розв'язок рівняння (43) має вигляд

$$T_k(\tau) = f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} \cdot u_k(s) ds, \quad (44)$$

де f_k – коефіцієнти розвинення початкової умови

$$f(r) \equiv \varphi(r) - u(r, 0) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k R_k(r, \omega_k) \text{ в ряд Фур'є.}$$

Отже розв'язок мішаної задачі (20)-(22) одержуємо у вигляді ряду [3]

$$v(r, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_k(s) ds \right] \cdot R_k(r, \omega_k) = \sum_{i=0}^{n-1} v_i(r, \tau) \cdot \theta_i, \quad (45)$$

Враховуючи зображення (7) та формули (17) і (45) розв'язок мішаної задачі (4)-(6) отримаємо у вигляді

$$t(r, \tau) = \sum_{i=0}^{n-1} [u_i(r, \tau) + v_i(r, \tau)] \cdot \theta_i. \quad (46)$$

IV. МОДЕЛЬНА ЗАДАЧА

В якості числового прикладу розглянемо конструкцію, яка складається з п'яти різних шарів. На поверхнях конструкції відбувається конвекційний теплообмін з навколишнім середовищем. Необхідно визначити розподіл нестационарного температурного поля п'ятишарової конструкції (для прямокутної, циліндричної та сферичної систем координат), якщо з однієї сторони температура змінюється за законом стандартного температурного режиму пожежі $\psi_n(\tau) = 345 \lg \left(1 + \frac{8\tau}{60} \right) + 20$ [7]. Теплофізичні характеристики матеріалів та закони зміни температур наведено в табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Параметр	Шар 1	Шар 2	Шар 3	Шар 4	Шар 5
Товщина [м]	0,01	0,06	0,03	0,2	0,05
Коеф. теплопров. [Вт/м·К]	0,96	0,7	0,09	1,92	0,76
Питома теплоємність [Дж/кг·К]	880	840	840	840	840
Густина [кг/м ³]	2000	1600	300	2500	1800

Внутрішні джерела тепла [Вт/м ³]	-	200	-	-	-	-	-	-
Закони зміни температур [°C]	$\psi_0(\tau) = 20, \psi_n(\tau) = 345 \lg\left(1 + \frac{\delta\tau}{60}\right) + 10$							
Коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях [Вт/м ² ·К]	$\alpha_0 = 10, \alpha_n = 25$							

Використовуючи вище запропонований авторами метод, та програмне забезпечення Maple 13 [8] одержуємо розв'язок поставленої задачі про розподіл нестационарного температурного багат шарової плоскої, циліндричної та сферичної конструкції у вигляді графіків (рис. 1-3) та табл. II-VII.

Плоска конструкція

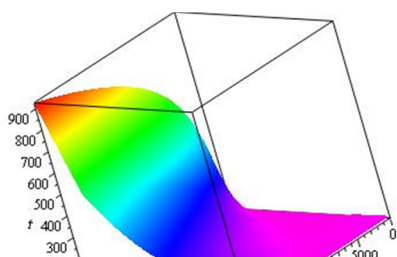


Рис. 1. Об'ємний графік зміни температурного поля по товщині плоскої конструкції

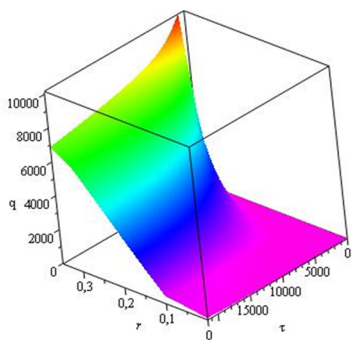


Рис. 2. Об'ємний графік зміни густини теплового потоку по товщині плоскої конструкції

ТАБЛИЦЯ II. ТЕМПЕРАТУРА ПЛОСКОЇ КОНСТРУКЦІЇ

τ, r	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
0	20	18,4	12,7	12,2	11,8	11,4	11	10
3 хв	20	18,4	12,7	12,2	11,8	11,4	11	125,4
5 хв	20	18,4	12,7	12,2	11,8	11,5	11,1	172,9
30хв	20	18,4	12,7	12,2	12,1	16,79	55,2	445,3
1год	20	18,4	12,7	13,4	19,4	46,5	130,8	579,9

2год	20	18,4	21,8	29,7	58,6	124,1	246,7	713,1
6год	29	40,8	171	199,6	263,2	364	502,3	928,1

TABLE II. ГУСТИНА ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ПЛОСКОЇ КОНСТРУКЦІЇ

τ, r	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
0	-27,6	-19,6	-15,6	-15,6	-15,6	-15,6	-15,6	-15,6
3 хв	-27,6	-19,6	-15,6	-15,6	-15,6	-15,6	-15,6	9171,8
5 хв	-27,6	-19,6	-15,6	-15,6	-15,6	-12,7	-11,7	9835,7
30хв	-27,6	-19,6	-15,6	-15,6	27,63	480,5	3039,4	9661,6
1год	-27,6	-19,6	-15,6	76,1	476,3	1840,2	4964,6	8884,1
2год	-27,6	-19,6	24,2	633	1687,2	3485	6026,6	8147,4

Циліндрична конструкція

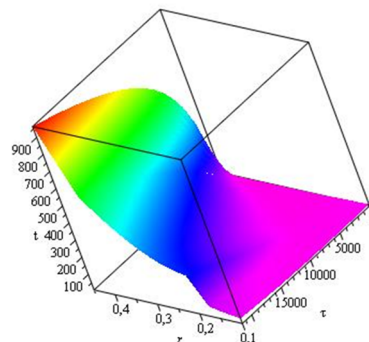


Рис. 3. Об'ємний графік зміни температурного поля по товщині циліндричної конструкції

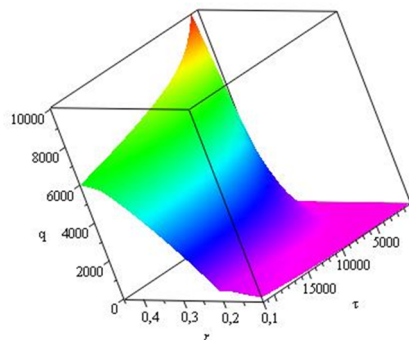


Рис. 4. Об'ємний графік зміни густини теплового потоку по товщині плоскої конструкції

ТАБЛИЦЯ III. ТЕМПЕРАТУРА ЦИЛІНДРИЧНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

τ, r	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
0	20	17,6	11,6	11,2	10,9	10,7	10,5	10
3 хв	20	17,6	11,6	11,2	10,9	10,7	10,5	125,3
5 хв	20	17,6	11,6	11,2	10,9	10,7	10,5	172,9
30хв	20	17,6	11,6	11,2	11,3	16,9	58,5	445,3
1год	20	17,6	11,9	12,8	20,4	51,8	142,4	579,9

2год	20	17,6	24,8	35,6	71	145,1	274,3	713,1
бгод	39,9	59,5	234,7	268,2	339,2	443,9	578,2	928,1

ТАБЛИЦЯ IV. ГУСТИНА ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ЦИЛІНДРИЧНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

τ, г	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
0	-47,2	-24,5	-15,2	-12,1	-10,1	-8,7	-7,6	-6,7
3 хв	-47,2	-24,5	-15,2	-12,1	-10,1	-8,7	-7,6	9154
5 хв	-47,2	-24,5	-15,2	-12,1	-10,1	-8,7	-7,6	9803
30хв	-47,2	-24,5	-15,2	-12,1	42,6	549,8	3209,1	9481
1год	-47,2	-24,5	-11,6	108,3	581,5	2060,2	5184,5	8578,2
2год	-47,2	-24,5	39,3	819,3	1992,8	3812,8	6162,3	7686,2

Сферична конструкція

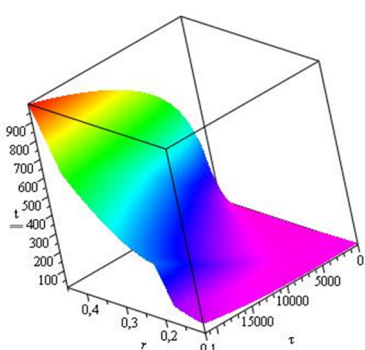


Рис. 5. Об'ємний графік зміни температурного поля по товщині сферичної конструкції

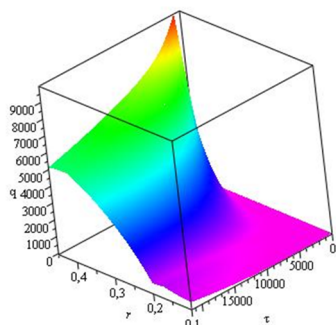


Рис. 6. Об'ємний графік зміни густини теплового потоку по товщині сферичної конструкції

ТАБЛИЦЯ V. ТЕМПЕРАТУРА СФЕРИЧНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

τ, г	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
0	20	16,8	10,9	10,6	10,4	10,3	10,2	10
3 хв	20	16,8	10,9	10,6	10,4	10,3	10,2	126,8
5 хв	20	16,8	10,9	10,6	10,5	10,3	10,2	175,6
30хв	20	16,8	10,9	10,6	10,9	17,5	62,4	459,9
1год	20	16,8	11,3	12,8	22,3	58,2	155,1	603,8
2год	20	16,8	29,8	44	86,4	169,1	304	750,1

бгод	58,6	89,8	310,4	348,6	442,2	528,8	655,9	998,5
------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

ТАБЛИЦЯ VI. ГУСТИНА ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ СФЕРИЧНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

τ, г	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
0	-77,2	-28,3	-13,3	-8,53	-5,9	-4,4	-3,3	-2,6
3 хв	-77,2	-28,3	-13,3	-8,53	-3,7	-4,4	-3,3	9135,4
5 хв	-77,2	-28,3	-13,3	-8,53	24,3	-4,4	-3,3	9768,8
30хв	-77,2	-28,3	-13,3	-8,53	57,8	622,2	3379,2	9296,7
1год	-77,2	-28,3	-8,9	148,1	699,5	2288,6	5392,5	8287,3
2год	-77,2	-28,3	58,7	1034,8	2311,6	4119,6	6254,74	7224

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто можливість зведення мішаних задач теплопровідності (для прямокутної, циліндричної та сферичної систем координат) до однопараметричної сім'ї крайових задач. Запропоновано конструктивну схему розв'язку даних задач, яка базується на основі методу редукції, концепції квазіпохідних, задачі на власні значення та модифікованого методу Фур'є. Розглянуто модельну задачу про розподіл нестационарного температурного поля по товщині п'ятишарової конструкції (прямокутної, циліндричної та сферичної форм) з урахуванням внутрішніх джерел тепла.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] R. Tatsiy, M. Stasiuk, O. Vlasii, O. Pazen "Direct method of research temperature field in a multilayer conduit for fire conditions" in *Information Technologies and Computer Modelling: International Scientific and Practical Conference ITCM-2017: Precarpath. Nation. Univ., Ivano-Frankivsk, 2017*, in press.
- [2] R. M. Tatsii, T.I. Ushak and O. Y. Pazen. "Zahal'na tretya krayova zadacha dlya rivnyannya teploprovodnosti z kuskovo-stalymy koefitsiyentamy ta vnutrishnimy dzherelamy tepla [General third boundary problem for the heat equation with piecewise constant and internal heat sources]". *Zbirnyk naukovykh prats "Pozhezhna bezpeka"*, no. 27, pp. 120-126, 2015. (In Ukrainian).
- [3] O. Y. Pazen and R. M. Tatsii. "General boundary-value problems for the heat conduction equation with piecewise-continuous coefficients". *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 89, no. 2, pp. 357-368, March 2016.
- [4] V.Ya. Arsenin. *Metody matematicheskoy fiziki* [Methods of mathematical physics]. Moscow: Science, 1974. (In Russian).
- [5] R. M. Tatsii and O. Y. Pazen. "Pryamyy metod rozrakhunku nestatsionarnoho temperaturnoho polya v umovakh pozhezhi [Direct method of calculation unsteady temperature field in a fire]" *Zbirnyk naukovykh prats "Pozhezhna bezpeka"*, no 26, pp. 135-141, 2015. (In Ukrainian).
- [6] A. V. Lykov. *Teoriya teploprovodnosti* [Heat Conduction Theory]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1967, p. 559. (In Russian).
- [7] EN 1991-1-2 (2002) (English): Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire.
- [8] O. V. Mahnej and T. P. Goj. *Matematychnye zabezpechennya avtomatyzatsiyi prykladnykh doslidzhen* [Mathematics for the protection of automation applications]. Ivano-Frankivsk: "Simyk", 2013, p. 304. (In Ukrainian).

Загальна Схеми Дослідження Поздовжніх Коливаний Стрижнів Кусково-Сталого Перерізу

Р.М. Тацій

кафедра прикладної математики і механіки
ЛДУ безпеки життєдіяльності
Львів, Україна

О.О. Карабин

кафедра прикладної математики і механіки
ЛДУ безпеки життєдіяльності
Львів, Україна
tosjakarabyn@gmail.com

О.Ю. Чмир

кафедра прикладної математики і механіки
ЛДУ безпеки життєдіяльності
Львів, Україна
o_chmyr@yahoo.com

The General Scheme of Investigation for Longitudinal Oscillations of Rods of a Piecewise-Constant Section

R.M. Tatsij

Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of life safety
Lviv, Ukraine

O.O. Karabyn

Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of life safety
Lviv, Ukraine
tosjakarabyn@gmail.com

O.Yu. Chmyr

Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of life safety
Lviv, Ukraine
o_chmyr@yahoo.com

Анотація—Запропоновано загальну методику дослідження поздовжніх коливаний стрижнів кусково-сталого перерізу. В основу схеми покладено концепцію квазіпохідних, метод зведення вихідної задачі до розв'язування двох простіших, але взаємозв'язаних задач, сучасну теорію систем лінійних диференціальних рівнянь, класичний метод Фур'є та модифікований метод власних функцій.

Abstract—The general method of investigation for longitudinal oscillations of rods of a piecewise-constant section is offered. In the basis of the solving scheme is a concept of quasi-derivatives, a modern theory of systems of linear differential equations, the classical Fourier method and a reduction method. The advantage of this method is a possibility to examine a problem on each

breakdown segment and then to combine obtained solutions on the basis of matrix calculation. Such an approach allows the use of software tools for solving the problem.

Ключові слова—квазидиференціальне рівняння, крайова задача, матриця Коші, задача на власні значення, метод Фур'є та метод власних функцій.

Keywords—kvazidifferential equation, the boundary value problem, the Cauchy matrix, the eigenvalues problem, the method of Fourier and the method of eigenfunctions.

I. ВСТУП

Методи розв'язування нестационарних крайових задач можна поділити на прямі, основу яких становить метод відокремлення змінних, метод джерел (метод функції Гріна), метод інтегральних перетворень, наближені та числові методи.

Запропонована в даній роботі схема належить до прямих методів розв'язування крайових задач. В основу реалізації цієї схеми покладено концепцію квазіпохідних [1], метод зведення вихідної задачі до розв'язування двох простіших, але взаємозв'язаних задач, сучасну теорію систем лінійних диференціальних рівнянь, класичний метод Фур'є та модифікований метод власних функцій.

II. ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ

Нехай L – відкритий інтервал дійсної осі \square , $[x_0; x_n] \subset L$ – відрізок дійсної осі; $0 = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{i-1} < x_i < x_{i+1} \dots < x_{n-1} < x_n = l$ – довільне розбиття відрізка $[x_0; x_n]$ дійсної осі Ox на n частин.

Введемо основні позначення: θ_i – характеристична функція проміжку $[x_i; x_{i+1})$; F_i , $i = \overline{0, n-1}$, E , ρ – сталі.

Покладемо $F(x) = \sum_{i=0}^{n-1} F_i \cdot \theta_i$; $u^{[1]} = F(x) \cdot u_x'$ – квазіпохідна.

Розглянемо поздовжні коливання стрижнів

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \cdot F(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \rho \cdot F(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (47)$$

$$x \in (x_0; x_n), \quad t \in (0; +\infty),$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} p_{11}u(x_0, t) + p_{12}u^{[1]}(x_0, t) = \psi_0(t), \\ q_{21}u(x_n, t) + q_{22}u^{[1]}(x_n, t) = \psi_l(t), \end{cases} \quad t \in [0; +\infty), \quad (48)$$

які вважаються лінійно незалежними, та початковими умовами

$$\begin{cases} u(x, 0) = \varphi_0(x), \\ \frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = \varphi_1(x), \end{cases} \quad x \in [x_0; x_n], \quad (49)$$

де p_{ij} , q_{ij} ($i, j = 1, 2$) – сталі, $\psi_0(t)$, $\psi_l(t) \in C^2(0; +\infty)$, $\varphi_0(x)$, $\varphi_1(x)$ – кусково-неперервні на $(x_0; x_n)$.

Метод редукції відшукання розв'язку задачі детально описаний, наприклад, в [2, 3]. Згідно з цим методом розв'язок задачі (47) - (49) шукаємо у вигляді суми двох функцій

$$u(x, t) = w(x, t) + v(x, t). \quad (50)$$

Одну з функцій, наприклад $w(x, t)$, виберемо спеціальним способом, тоді функцію $v(x, t)$ вже визначимо однозначно.

III. ПОБУДОВА ФУНКЦІЇ $w(x, t)$

Визначимо функцію $w(x, t)$ як розв'язок крайової задачі

$$(F(x) \cdot w_x')_x' = 0, \quad (51)$$

$$\begin{cases} p_{11}w(x_0) + p_{12}w^{[1]}(x_0) = \psi_0(t), \\ q_{21}w(x_n) + q_{22}w^{[1]}(x_n) = \psi_l(t), \end{cases} \quad t \in [0; +\infty). \quad (52)$$

Зауважимо, що змінна t тут вважається параметром.

В основі методу розв'язування задачі (51), (52) лежить концепція квазіпохідних [4].

Введемо вектор $\bar{W} = \begin{pmatrix} w \\ w^{[1]} \end{pmatrix}$, де $w^{[1]} = F \cdot w_x'$. За таких

позначень квазидиференціальне рівняння (51) зводиться до еквівалентної системи диференціальних рівнянь першого порядку

$$\bar{W}_x' = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \bar{W}. \quad (53)$$

Під розв'язком системи (53) розуміємо абсолютно-неперервну вектор-функцію $\bar{W}(x, t)$, що за змінною x справджує її майже скрізь (див. [4]).

Крайові умови (52) запишемо у векторній формі

$$P \cdot \bar{W}(x_0, t) + Q \cdot \bar{W}(x_n, t) = \bar{\Gamma}(t), \quad (54)$$

де $P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix}$, $\bar{\Gamma}(t) = \begin{pmatrix} \psi_0(t) \\ \psi_l(t) \end{pmatrix}$.

Нехай

$$w(x, t) = \sum_{i=0}^{n-1} w_i(x, t) \theta_i, \quad (55)$$

де $w_i(x, t)$, $w_i^{[1]}(x, t)$ визначені на проміжку $[x_i; x_{i+1})$.

На проміжку $[x_i; x_{i+1})$ система (53) набуває вигляду

$$\begin{pmatrix} w_i \\ w_i^{[1]} \end{pmatrix}_x' = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_i \\ w_i^{[1]} \end{pmatrix}. \quad (56)$$

Матриця Коші $B_i(x, s)$ цієї системи має вигляд

$$B_i(x, s) = \begin{pmatrix} 1 & b_i(x, s) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{де } b_i(x, s) = \int_s^x \frac{1}{F_i} dz = \frac{x-s}{F_i}. \quad (57)$$

Для довільного $k \geq i$ позначимо

$$B(x_k, x_i) \stackrel{def}{=} B_{k-1}(x_k, x_{k-1}) \cdot B_{k-2}(x_{k-1}, x_{k-2}) \times \dots \times B_i(x_{i+1}, x_i). \quad (58)$$

Структура (57) матриць $B_i(x, s)$ дає можливість встановити структуру матриці (58)

$$B(x_k, x_i) = \begin{pmatrix} 1 & \sum_{m=i}^{k-1} \frac{x_{m+1} - x_m}{F_m} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ причому } B(x_k, x_k) \stackrel{def}{=} I, \text{ де}$$

I – одинична матриця.

Розв'язок системи (56) на проміжку $[x_i; x_{i+1})$ має вигляд

$$\bar{W}_i(x, t) = B_i(x, x_i) \cdot \bar{P}_i, \quad (59)$$

де \bar{P}_i – поки що невідомий вектор [1].

Аналогічно, на проміжку $[x_{i-1}; x_i)$ матимемо $\bar{W}_{i-1}(x, t) = B_{i-1}(x, x_{i-1}) \cdot \bar{P}_{i-1}$.

В точці $x = x_i$ повинна виконуватись умова неперервності $\bar{W}_i(x_i, t) = \bar{W}_{i-1}(x_i, t)$, в результаті чого одержимо рекурентне співвідношення

$$\bar{P}_i = B_{i-1}(x_i, x_{i-1}) \cdot \bar{P}_{i-1}. \quad (60)$$

Методом математичної індукції, з (60) одержуємо

$$\bar{P}_i = B(x_i, x_0) \cdot \bar{P}_0, \quad (61)$$

де \bar{P}_0 – початковий (невідомий) вектор.

Для знаходження \bar{P}_0 використовуємо крайові умови (54), в яких покладемо $\bar{W}(x_0, t) \stackrel{def}{=} \bar{P}_0$,

$$\bar{W}(x_n, t) \stackrel{def}{=} \bar{W}_{n-1}(x_n, t) = B(x_n, x_0) \bar{P}_0.$$

Тоді $[P + Q \cdot B(x_n, x_0)] \bar{P}_0 = \bar{\Gamma}$, звідки одержуємо

$$\bar{P}_0 = [P + Q \cdot B(x_n, x_0)]^{-1} \cdot \bar{\Gamma}. \quad (62)$$

Обчислимо

$$[P + Q \cdot B(x_n, x_0)]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} q_{21}\sigma_n + q_{22} & -p_{12} \\ -q_{21} & p_{11} \end{pmatrix}, \quad \text{де}$$

$$\sigma_n = \sum_{m=0}^{n-1} b_m(x_{m+1}, x_m) = \sum_{m=0}^{n-1} \frac{x_{m+1} - x_m}{F_m}, \quad \sigma_0 \stackrel{def}{=} 0,$$

$$\Delta = p_{11}(q_{21}\sigma_n + q_{22}) - q_{21}p_{12} \neq 0.$$

Тоді із (62)

$$\bar{P}_0 = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} q_{21}\sigma_n + q_{22} & -p_{12} \\ -q_{21} & p_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_0(t) \\ \psi_l(t) \end{pmatrix}. \quad (63)$$

На основі формул (59), (61), (63), після перетворень, отримаємо зображення вектор - функції $\bar{W}_i(x, t)$ на проміжку $[x_i; x_{i+1})$

$$\bar{W}_i(x, t) = \begin{pmatrix} 1 & b_i(x, x_i) + \sigma_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \bar{P}_0. \quad (64)$$

Перша координата вектора $\bar{W}_i(x, t)$ в (64) і є шуканою функцією $w_i(x, t)$. Отже,

$$w_i(x, t) = \frac{1}{\Delta} ((q_{21}\sigma_n + q_{22})\psi_0(t) - p_{12}\psi_l(t) + (b_i(x, x_i) + \sigma_i) \cdot (-q_{21}\psi_0(t) + p_{11}\psi_l(t))). \quad (65)$$

Підставляючи вираз (65) у (55), отримуємо розв'язок на всьому проміжку $[x_0; x_n]$.

IV. ПОБУДОВА ФУНКЦІЇ $v(x, t)$

Запишемо мішану задачу для функції $v(x, t)$. Підставляючи (50) в (47) та враховуючи, що функція $w(x, t)$ задовольняє (51), одержуємо неоднорідне рівняння

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(F(x) \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \rho \cdot \frac{F(x)}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \rho \cdot \frac{F(x)}{E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (66)$$

$$x \in (x_0; x_n), \quad t \in (0; +\infty).$$

Підставимо (50) в початкові умови (49). Одержимо для функції $v(x, t)$ початкові умови

$$\begin{cases} v(x, 0) = \Phi_0(x), \\ \frac{\partial v}{\partial t}(x, 0) = \Phi_1(x), \end{cases} \quad x \in [x_0; x_n], \quad (67)$$

$$\text{де } \Phi_0(x) \stackrel{def}{=} \varphi_0(x) - w(x, 0), \quad \Phi_1(x) \stackrel{def}{=} \varphi_1(x) - \frac{\partial w}{\partial t}(x, 0).$$

Оскільки функція $w(x, t)$ справджує крайові умови (52), то із (50) випливають крайові умови для функції $v(x, t)$

$$\begin{cases} p_{11}v(x_0) + p_{12}v^{[1]}(x_0) = 0, \\ q_{21}v(x_n) + q_{22}v^{[1]}(x_n) = 0, \end{cases} \quad t \in [0; +\infty). \quad (68)$$

Отже, за умови, що розв'язок $w(x, t)$ задачі (51), (52) є відомим, функція $v(x, t)$ є розв'язком мішаної задачі (66) - (68).

V. МЕТОД ФУР'Є ТА ЗАДАЧА НА ВЛАСНІ ЗНАЧЕННЯ

Для рівняння (66) розглянемо відповідне однорідне рівняння

$$\rho \cdot \frac{F(x)}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(F(x) \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (69)$$

Знайдемо його нетривіальні розв'язки у вигляді

$$v(x, t) = \sin(\omega t + \varepsilon) \cdot X(x), \quad (70)$$

де ω – параметр, ε – константа, $X(x)$ – поки що невідома функція.

Підставимо (70) в рівняння (69). Одержимо квазидиференціальне рівняння

$$(F(x)X'(x))' + \alpha^2 \cdot F(x)X(x) = 0, \quad (71)$$

$$\text{де } \alpha^2 = \frac{\rho}{E} \cdot \omega^2.$$

Підставивши (70) в умови (68), одержимо крайові умови

$$\begin{cases} p_{11}X(x_0) + p_{12}X^{[1]}(x_0) = 0, \\ q_{21}X(x_n) + q_{22}X^{[1]}(x_n) = 0. \end{cases} \quad (72)$$

Як і вище, під розв'язком рівняння (71) розуміємо абсолютно-неперервну на $[x_0; x_n]$ функцію $X(x)$, що справджує його майже скрізь [4].

Ввівши квазіпохідну $X^{[1]} \stackrel{\text{def}}{=} FX'$, вектор $\bar{X} = \begin{pmatrix} X \\ X^{[1]} \end{pmatrix}$

та матриці $A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{F} \\ -\alpha^2 F & 0 \end{pmatrix}$, запишемо задачу (71)-(72) у матричному вигляді

$$\bar{X}' = A \cdot \bar{X} \quad (73)$$

$$P\bar{X}(x_0) + Q\bar{X}(x_n) = \bar{0}. \quad (74)$$

Безпосередньою перевіркою переконуємось, що матриця Коші $\bar{B}_i(x, s, \omega)$ системи (73) на проміжку $[x_i; x_{i+1})$ має вигляд

$$\bar{B}_i(x, s, \omega) = \begin{pmatrix} \cos \alpha(x-s) & \frac{\sin \alpha(x-s)}{\alpha F_i} \\ -\alpha F_i \sin \alpha(x-s) & \cos \alpha(x-s) \end{pmatrix}, \text{ де } \alpha = \omega \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$

Аналогічно, як і в формулі (58), позначимо $\bar{B}(x_i, x_0, \omega) \stackrel{\text{def}}{=} \prod_{j=0}^i \bar{B}_{i-j}(x_{i-j+1}, x_{i-j}, \omega)$. Позначимо також

$$\bar{B}(x, x_0, \omega) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=0}^{n-1} \bar{B}_i(x, x_i, \omega) \cdot \bar{B}(x_i, x_0, \omega) \cdot \theta_i, \quad (75)$$

(аналог матриці Коші на всьому проміжку);

$$\bar{B}(x, x_0, \omega) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} b_{11}(\omega) & b_{12}(\omega) \\ b_{21}(\omega) & b_{22}(\omega) \end{pmatrix}. \quad (76)$$

Нетривіальний розв'язок $\bar{X}(x, \omega)$ системи (73) шукаємо у вигляді $\bar{X}(x, \omega) = \bar{B}(x, x_0, \omega) \cdot \bar{C}$, де $\bar{C} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix}$ – деякий ненульовий вектор.

Вектор - функція $\bar{X}(x, \omega)$ має справджувати крайові умови (74), тобто $[P \cdot \bar{B}(x_0, x_0, \omega) + Q \cdot \bar{B}(x_n, x_0, \omega)] \cdot \bar{C} = \bar{0}$, врахувавши, що $\bar{B}(x_0, x_0, \omega) = I$, прийдемо до рівності

$$[P + Q \cdot \bar{B}(x_n, x_0, \omega)] \cdot \bar{C} = \bar{0}. \quad (77)$$

Для існування ненульового вектора \bar{C} в (77) необхідно і досить виконання умови

$$\det [P + Q \cdot \bar{B}(x_n, x_0, \omega)] = 0. \quad (78)$$

Конкретизуємо вигляд лівої частини характеристичного рівняння (78), врахувавши вигляд матриць P, Q та (76)

$$\begin{aligned} \det [P + Q \cdot \bar{B}(x_n, x_0, \omega)] &= p_{11} \cdot (q_{21}b_{12}(\omega) + q_{22}b_{22}(\omega)) - \\ &- p_{12} \cdot (q_{21}b_{11}(\omega) + q_{22}b_{21}(\omega)). \end{aligned}$$

Сформулюємо наступне твердження.

Твердження 1. *Характеристичне рівняння задачі на власні значення (71), (72) має вигляд*

$$\begin{aligned} p_{11} \cdot (q_{21}b_{12}(\omega) + q_{22}b_{22}(\omega)) - \\ - p_{12} \cdot (q_{21}b_{11}(\omega) + q_{22}b_{21}(\omega)) = 0. \end{aligned} \quad (79)$$

Як відомо (див. [5]), корені ω_k характеристичного рівняння (79), які є власними значеннями задачі (71), (72), є додатними та різними.

Для знаходження ненульового вектора \bar{C} підставимо в рівність (77) ω_k замість ω . Тоді прийдемо до системи рівнянь

$$\begin{cases} p_{11}C_1 + p_{12}C_2 = 0, \\ (q_{21}b_{11}(\omega_k) + q_{22}b_{21}(\omega_k)) \cdot C_1 + \\ + (q_{21}b_{12}(\omega_k) + q_{22}b_{22}(\omega_k)) \cdot C_2 = 0. \end{cases} \quad (80)$$

Оскільки виконується (79), то система (80) зводиться до рівняння $p_{11}C_1 + p_{12}C_2 = 0$, з якого знаходимо координати вектора \bar{C} при певних припущеннях на коефіцієнти матриці P : $p_{11} \neq 0$, то поклавши $C_2 = 1$,

$$\text{маємо } C_1 = -\frac{p_{12}}{p_{11}}, \text{ тобто } \bar{C} = \begin{pmatrix} -\frac{p_{12}}{p_{11}} \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Нехай $\bar{X}_k(x, \omega_k)$ – нетривіальний власний вектор, що відповідає власному значенню ω_k . Справедливим є твердження.

Твердження 2. *Власні вектори системи диференціальних рівнянь (73) з крайовими умовами (74) мають структуру*

$$\bar{X}_k(x, \omega_k) = \bar{B}(x, x_0, \omega_k) \cdot \bar{C}, \quad k \in \square.$$

Наслідок. *Власні функції $X_k(x, \omega_k)$, як перші координати власних векторів $\bar{X}_k(x, \omega_k)$, можна записати у вигляді*

$$X_k(x, \omega_k) = (1 \ 0) \cdot \bar{B}(x, x_0, \omega_k) \cdot \bar{C}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (81)$$

Зокрема, оскільки $X_k(x, \omega_k) = \sum_{i=0}^{n-1} X_{ki}(x, \omega_k) \cdot \theta_i$, то з (75) та (81) випливає, що

$$X_{ki}(x, \omega_k) = (1 \ 0) \cdot \bar{B}_i(x, x_i, \omega_k) \cdot \bar{B}(x_i, x_0, \omega_k) \cdot \bar{C}, \quad (82)$$

$$i = \overline{0, n-1}.$$

VI. ПОБУДОВА РОЗВ'ЯЗКУ $v(x, t)$ МІШАНОЇ ЗАДАЧІ (66) - (68)

Для розв'язання задачі (66) - (68) застосуємо метод власних функцій [3], який полягає в тому, що розв'язок задачі (66) - (68) шукаємо у вигляді

$$v(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k(t) \cdot X_k(x, \omega_k), \quad (83)$$

де $T_k(t)$ – поки що невідомі функції.

Оскільки $\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$ входить в праву частину рівняння (66), то розвинемо її в ряд Фур'є за власними функціями $X_k(x, \omega_k)$ крайової задачі (71), (72)

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \sum_{k=1}^{\infty} w_k(t) \cdot X_k(x, \omega_k). \quad (84)$$

Підставляючи вираз (83) у (66) та враховуючи (84), отримуємо рівність

$$\sum_{k=1}^{\infty} T_k(t) \cdot \left(F(x) X_k'(x, \omega_k) \right)' - \frac{\rho}{E} F(x) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} T_k''(t) \cdot X_k(x, \omega_k) =$$

$$= \frac{\rho}{E} F(x) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} w_k(t) \cdot X_k(x, \omega_k).$$

Враховуючи, що власні функції $X_k(x, \omega_k)$ задовольняють рівняння (71), приходимо до рівності

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left[T_k''(t) + \omega_k^2 \cdot T_k(t) + w_k(t) \right] \cdot \frac{\rho}{E} F(x) \cdot X_k(x, \omega_k) = 0. \quad (85)$$

Помножимо ліву і праву частини (85) на $X_j(x, \omega_j)$ та проінтегруємо за змінною x на проміжку $[x_0; x_n]$, врахувавши ортогональність власних функцій, приходимо до кожного з диференціальних рівнянь

$$T_k''(t) + \omega_k^2 \cdot T_k(t) = -w_k(t), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (86)$$

Загальний розв'язок кожного з диференціальних рівнянь (86) має вигляд

$$T_k(t) = a_k \cos \omega_k t + d_k \sin \omega_k t - \frac{1}{\omega_k} \int_0^t \sin \omega_k(t-s) \cdot w_k(s) ds \quad (87)$$

де a_k, d_k – невідомі сталі [6].

Позначимо
$$I(t) = \frac{1}{\omega_k} \int_0^t \sin \omega_k(t-s) \cdot w_k(s) ds.$$

Зауважимо, що $I(0) = 0, I'(0) = 0$ [7].

Для визначення сталих a_k, d_k розвинемо в ряди Фур'є за власними функціями $X_k(x, \omega_k)$ праві частини початкових умов (67)

$$\Phi_0(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_{0k} \cdot X_k(x, \omega_k), \quad (88)$$

$$\Phi_1(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_{1k} \cdot X_k(x, \omega_k), \quad (89)$$

де Φ_{0k}, Φ_{1k} – відповідні коефіцієнти Фур'є.

З (87) випливає, що

$$T_k(0) = a_k, \quad (90)$$

$$T_k'(t) = -a_k \omega_k \sin \omega_k t + d_k \omega_k \cos \omega_k t - I_k'(t),$$

звідки

$$T_k'(0) = d_k \omega_k. \quad (91)$$

З (83), першої умови в (67), та врахувавши (88), одержуємо
$$\sum_{k=1}^{\infty} T_k(0) \cdot X_k(x, \omega_k) = \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_{0k} \cdot X_k(x, \omega_k).$$

Звідки, використовуючи (90), маємо $T_k(0) = a_k = \Phi_{0k}$.

Аналогічно з (83), другої умови в (67), врахувавши (89) маємо
$$\sum_{k=1}^{\infty} T_k'(0) \cdot X_k(x, \omega_k) = \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_{1k} \cdot X_k(x, \omega_k).$$
 Звідки,

використовуючи (91), знаходимо $d_k = \frac{\Phi_{1k}}{\omega_k}$.

Отже, остаточно отримуємо розв'язок мішаної задачі (66) - (68) у вигляді ряду

$$v(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\Phi_{0k} \cos \omega_k t + \frac{\Phi_{1k}}{\omega_k} \sin \omega_k t - \frac{1}{\omega_k} \int_0^t \sin \omega_k (t-s) \cdot w_k(s) ds \right] \cdot X_k(x, \omega_k).$$

Враховуючи $X_k(x, \omega_k) = \sum_{i=0}^{n-1} X_{ki}(x, \omega_k) \cdot \theta_i$ та те, що

$$v(x, t) = \sum_{i=0}^{n-1} v_i(x, t) \cdot \theta_i, \text{ де } v_i(x, t) \text{ визначені на проміжку } [x_i; x_{i+1}), \text{ одержуємо}$$

$$v_i(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\Phi_{0k} \cos \omega_k t + \frac{\Phi_{1k}}{\omega_k} \sin \omega_k t - \frac{1}{\omega_k} \int_0^t \sin \omega_k (t-s) \cdot w_k(s) ds \right] \cdot X_{ki}(x, \omega_k), \quad (92)$$

де функції $X_{ki}(x, \omega_k)$ обчислюються за формулою (82).

Враховавши (65), (92), отримаємо розв'язок задачі (47) - (49)

$$u(x, t) = \sum_{i=0}^{n-1} [w_i(x, t) + v_i(x, t)] \cdot \theta_i.$$

ВИСНОВКИ

Теорема про розв'язок за власними функціями адаптована для випадку диференціальних рівнянь з кусково-сталими (за просторовою змінною) коефіцієнтами.

Отримано явні формули для обчислення розв'язку та його квазіпохідної для будь-якого підінтервала основного проміжку, які є справедливими для довільної скінченної кількості точок розриву першого роду згаданих вище коефіцієнтів.

Перевагою методу є можливість розглянути задачу на кожному відрізку розбиття, а потім за допомогою матричного числення записати аналітичний вираз розв'язку. Такий підхід дозволяє застосовувати програмні засоби до процесу вирішення задачі та графічної ілюстрації розв'язку.

Зауважимо, що отримані результати мають безпосереднє практичне застосування в теорії коливань стрижнів з кусково-змінним розподілом параметрів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Тацій Р. М. Загальна перша крайова задача для рівняння теплопровідності з кусково-змінними коефіцієнтами / Р. М. Тацій, О. О. Власій, М. Ф. Стасюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Фізико-математичні науки. - 2014. - № 804. - С. 64-69.
- [2] Арсенин В.Я. Методы математической физики. - М.: Наука, 1974. - 432 с.
- [3] Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1977. - 735 с.
- [4] Тацій Р.М. Узагальнені квазідиференціальні рівняння / Р.М. Тацій, М.Ф. Стасюк, В. Мазуренко, О.О. Власій - Дрогобич. Коло, 2011. - 297 с.
- [5] Тацій Р.М., Мазуренко В.В. Дискретно-неперервні крайові задачі для квазідиференціальних рівнянь парного порядку. / Р.М. Тацій, В.В. Мазуренко // Математичні методи та фізико-механічні поля. 2001. - 44. №1 - С. 43-53.
- [6] Каленюк П.І. Диференціальні рівняння: Навч. посібник. / П.І. Каленюк, Ю.К. Рудавський, Р.М. Тацій, І.Ф. Клейник, В.М. Колісник, П.П. Костробій, І.Я. Олексів - Л. Видавництво Львівської політехніки, 2014. - 380 с.
- [7] Мартыненко В.С. Операционное исчисление: Учеб. пособие. - 4 - е изд., перераб. и доп. - К.: Выща школа, 1990. - 359 с.

Застосування Математичних Методів до Контролю Технічного Стану Об'єктів Нафтогазового Комплексу та Стану Довкілля

Андрій Олійник
кафедра математичних методів в інженерії
ІФНТУНГ
Івано-Франківськ, Україна
andrij-olijnyk@rambler.ru

Application of Mathematical Methods to Condition Monitoring Oil and Gas Facility Environment and State

Andrij Olijnyk
department of mathematical methods in engineering
IFNTUOG
Ivano-Frankivsk, Ukraine
andrij-olijnyk@rambler.ru

Анотація—Запропоновано комплексну математичну модель оцінки технічного стану трубопроводів та ризиків при виникненні аварійних ситуацій. Вона передбачає оцінку зміни напруженого стану, швидкості витоку речовин при розгерметизації трубопроводу та поширення їх в довкілля. Всі моделі реалізовані на ПЕОМ, проведено широкий клас розрахунків.

Abstract—The complex mathematical model has been designed to estimate pipeline's technical state both with the accidents appearance risks. It allows to estimate the stress state changing, the velocity of liquid leaks during the pipeline depressurization and one's distribution in the environment. All the models are realized as computer codes, the wide class of calculations have been made.

Ключові слова — модель, напружений стан, малі витоки, фільтрація, дифузія.

Keywords — model, stress state, low leaks, filtration, diffusion.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проблема, що вирішується може бути розділена на три основні задачі:

1. Визначення параметрів напружено-деформованого стану досліджуваних об'єктів за відомою інформацією про зміну їх просторової конфігурації – як правило, такою інформацією є дані про переміщення точок поверхні досліджуваного тіла, на основі якої вдається побудувати

математичне подання [3] радіус-вектор будь якої точки цього тіла в контрольні моменти часу. Для об'єктів, що мають циліндричну форму (трубопроводи різного призначення, свердловини з газорідними потоками тощо), вказане подання може бути записане у вигляді:

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t) = \vec{r}_l(S, \varphi, r, t) + \rho(S, \varphi, r, t)(\cos \omega(S, \varphi, r, t)\vec{b}_l + \sin \omega(S, \varphi, r, t)\vec{n}_l) + \psi(S, \varphi, r, t)\vec{\tau}_l - \frac{D}{2}\vec{n}_l \quad (1)$$

де s, φ, v, t – пов'язані з криволінійним циліндричним тілом координати відповідно вздовж осі тіла $0 < S < L$, по полярному куту $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ та по радіусу об'єкта $R_{\text{внут}} \leq r \leq R_{\text{зовн}}$, L – довжина досліджуваного об'єкта; \vec{r}_l – радіус вектор точки на твірній об'єкта; D – його діаметр; $\rho(s, \varphi, v, t)$; $\omega(s, \varphi, v, t)$; $\psi(s, \varphi, v, t)$ – функції, що характеризують переміщення точок досліджуваного тіла відповідно в радіальному, полярному та повздовжньому напрямках, $\vec{\tau}_l, \vec{b}_l, \vec{n}_l$ – вектори дотичної, бінормалі та нормалі до твірної об'єкта.

Задання функції $\rho(s, \varphi, v, t)$; та $\psi(s, \varphi, v, t)$ на основі даних про переміщення точок поверхні

дозволяє в контрольний момент часу провести розрахунки компонент тензорів деформацій ε_j^i ,

$$\varepsilon_{ij}(s, \varphi, v, t_k) = \frac{1}{2}(g_{ij}(s, \varphi, v, t_k) - g_{ij}(s, \varphi, v, t_0)), \quad (2)$$

де g_{ij} – компоненти матричного тензора, побудовані за (1) [4], а також компоненти тензора напружень – у випадку, коли деформації вважаються пружними, перерахунок вказаних компонент проводиться за законом Гука:

для ізотропного тіла (з використання (2)):

$$\sigma_{ij} = \lambda I_1(\varepsilon)g_{ij}(s, \varphi, v, t_0) + 2\mu\varepsilon_{ij}(s, \varphi, v, t), \quad (3)$$

де $I_1(\varepsilon) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij}(s, \varphi, v, t)g_{ij}(s, \varphi, v, t_0)$ – перший інваріант

тензора деформацій; λ, μ – параметри Ламе матеріалу [5], які пов’язані з модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона σ матеріалу співвідношеннями:

$$\mu = \frac{E}{2(\sigma + 1)}; \lambda = \frac{E\sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}; \quad (4)$$

2. Оцінка інтенсивності витoku речовини при порушенні герметичності об’єкта.

Задача оцінки параметрів течії у трубопроводах та в свердловинних потоках зводиться до необхідності розв’язання системи рівнянь Нав’є-Стокса [6] в двовимірній постановці:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + y \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + y, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

з умовами: $p = p_0 - kx$; k – коефіцієнт перепаду тиску;

$$\begin{aligned} u|_{x=0} &= -\frac{ky^2}{4\mu} + \frac{kRy}{2\mu} \\ u|_{y=0} &= u|_{y=2R} = 0 \\ v|_{x=0} &= v|_{y=0} = 0 \\ v|_{y=2R} &= \begin{cases} 0, & x \leq x_1; x \geq x_2 \\ \pm v_{\text{внт}}, & x \in [x_1, x_2] \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

граничні умови виду (6) дозволяють враховувати як можливі витoki, так і втoki рідини.

Розроблено чисельний метод розв’язання системи (5); (6), доведено його збіжність і стійкість, побудовано та реалізовано розрахунковий алгоритм, виявлено оптимальні

параметри розрахункової сітки. Це дозволяє моделювати поля швидкостей при заданій величині $V_{\text{внт}}$, що не завжди можна визначити практично. Тому для розв’язання системи (5) застосовується методика [6], яка дозволяє звести систему (5) до рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (7)$$

Існують методики розв’язання системи (5), проте, використовуючи результати [7], можна зробити висновок, що

$$\left| 2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right| \ll 1, \quad (8)$$

і, з урахуванням (8), можна запропонувати наступний алгоритм розв’язання:

2.1 На першому кроці розв’язується рівняння (7) з граничними умовами:

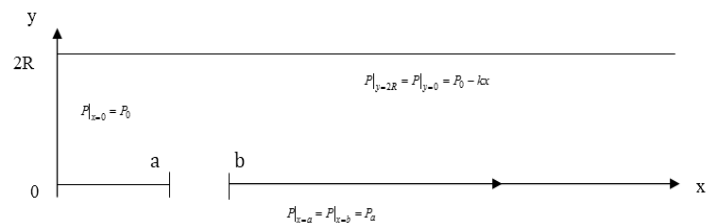


Рис. 7. Граничні умови для рівняння Лапласа (Задача Діріхле)

При цьому використовується метод поверхневої релаксації [6].

2.2 Розв’язується система (5) з умовам (6), причому $V_{\text{внт}}$ визначається за знайденими $P(x, y, t)$ за законом Дарсі:

$$\begin{cases} u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{kg\rho}{\mu} \end{cases} \quad (9)$$

k – проникність середовища; μ – динамічна в’язкість рідини.

2.3 За знайденим розподілом швидкостей рівняння (7) розв’язується з заново перерахованою правою частиною. Процедура повторюється до тих пір, доки розв’язок не збіжиться.

3. Визначення концентрації шкідливих речовин в зоні аварійної ситуації.

Для оцінки концентрації шкідливих речовин розв’язується рівняння дифузії, яке для двовимірної області записується у вигляді:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x, y, t) \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a(x, y, t) \frac{\partial C}{\partial y} \right). \quad (10)$$

Коефіцієнт $a(x, y, t)$ є коефіцієнтом дифузії, який залежить від просторових координат x, y та часу t . Рівняння (10) доповнюється граничними та початковими умовами [8]:

$$C_0(x, y) = C_0(x, y, 0), \quad (11)$$

$$\begin{cases} C|_{x=0} = C_1(y, t) \\ C|_{x=L_1} = C_2(y, t) \\ C|_{y=0} = C_3(x, t) \\ C|_{y=L_2} = C_4(x, t) \end{cases} \quad (12)$$

При визначенні аналітичної структури $C_i(x, t); C_j(y, t)$, $j=1, 2$ використовуються результати розрахунків п.п.1.2 в допущенні про пропорційність концентрації речовини на границі області швидкості витікання речовини.

II. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Розроблені математичні моделі реалізовано у вигляді обчислювальних алгоритмів. На рис.2 зображено потенційно небезпечні ділянки досліджуваного об'єкту (трубопроводу, обв'язки свердловини) з точки зору зміни напружено-деформованого стану та можливого порушення герметичності. Це дозволяє оцінити геометричне розташування можливих дефектів та їх інтенсивність, яку характеризує ширина зони практичних напружень.

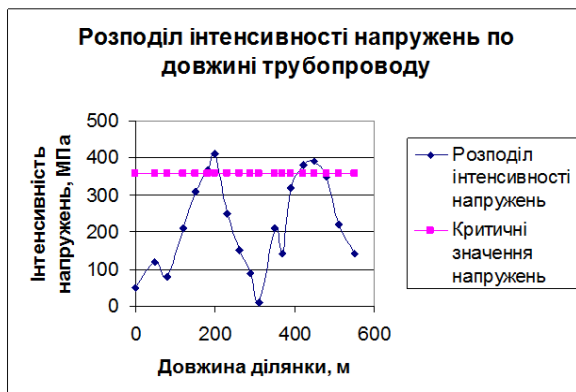


Рис. 8. Розподіл інтенсивності напружень по довжині трубопроводу

На рис.3 наведено розподіл тиску в трубопровідній системі при порушенні її герметичності в залежності від величини зони прориву. Вказана картина спостерігається при порушенні герметичності підземної ділянки при надземному прориві через значний градієнт тиску аварійна ситуація розвивається з катастрофічною швидкістю.

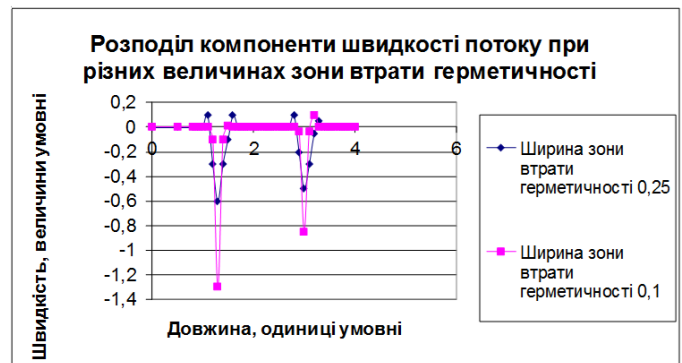


Рис. 9. Розподіл компоненти швидкості потоку при різних величинах зони втрати герметичності

ВИСНОВОК

В ході проведених досліджень одержано наступні результати:

Розроблено методику виявлення потенційно небезпечних ділянок з точки зору зміни напружено-деформованого стану та можливої втрати геометричності об'єктів за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні, яка дозволяє досліджувати як надземні, так і підземні ділянки трубопроводів, а також підземні свердловинні колони труб. Розроблено математичну модель течії в'язкої рідини в трубопровідній системі за наявності витоків або витікання рідини через поверхню на основі чисельного інтегрування системи рівнянь Нав'є-Стокса. Встановлено спосіб визначення швидкості витoku рідини при втраті герметичності в залежності від величини зони витoku. Розроблено математичну модель процесу дифузії шкідливих речовин з визначеними за допомогою моделей 1, 2 граничними умовами. Всі розроблені моделі доведені до чисельної реалізації. Напрями подальших досліджень можуть бути пов'язані з розробкою методики визначення величини $a(x, y, t)$ та їх розподілу в просторі, що суттєво полегшує задачу оцінки зони шкідливих впливів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник/ В.В. Клюев, Р.Ф. Соснин и др. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2003 – 656 с.
- [2] Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем/ И.И. Мазур, О.М. Иванцов – М.:ИЦ «Елима», 2004 – 1104 с.
- [3] Олійник А.П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: Наукове видання / А.П. Олійник – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010 – 320с.
- [4] Седов Л.И. Механика сплошных сред– М.: Наука, 1984 – 572с.
- [5] Заміховський Л.М. Математичний апарат для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів при зміні їх просторового положення /А.П. Олійник .: ІФНТУНГ, 2008 – 306 с.
- [6] Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Теннехилл, Р. Плетчер –. – М.: Мир, 1990 – 776 с.
- [7] Modelling of fluid flow in pipeline with the leaks due to surface/ A.P. Olijnyk, L.O. Shtayer / - Journal of Hydrocarbon Power Engineering, 2014, Vol 1, Issue 1 – pp. 45-52.
- [8] Олійник А.П. Математичне моделювання процесів забруднення ґрунтів як результату технологічних процесів - / А.П. Олійник, А.А. Мороз – Матеріали МНТК «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» - Тернопіль, 2015 – ст.22-24

Математичне Моделювання Процесу Обміну Речовин в Організмі Людини та його Програмна Реалізація

Є.А.Олійник

кафедра інформатики

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

Івано-Франківськ, Україна

madferiteugene@gmail.com

The Human Body Metabolism Process Mathematical Simulation and One's Software Design

Yevhen Oliynyk

dept. of Computer Science

Precarpathian National University

Ivano-Frankivsk, Ukraine

madferiteugene@gmail.com

Анотація—Запропоновано математичну модель обміну речовин в організмі людини яка базується на моделі Лотка-Вольтерра і розглядає такі фактори, як режими харчування та прийому ліків, особливості вироблення інсуліну та засвоєння цукру в організмі людини. Реалізовано чисельний алгоритм з використанням методу Рунгк – Кутта четвертого порядку точності. За результатами проведених розрахунків сформульовано висновки та наведено рекомендації стосовно їх практичного використання, визначено напрямки подальших досліджень.

Abstract—The mathematical model of metabolism process in human organism based on Lotka-Volterra model has been proposed, considering healing regime, nutrition system, features of insulin and sugar fragmentation process in the organism. The numerical algorithm of the model using IV-order Runge-Kutta method has been realized. After the result of calculations the conclusions have been made, recommendations about using the modeling results have been showed, the vectors of the following researches are defined.

Ключові слова—*модель Лотка-Вольтерра, обмін речовин, метод Рунге – Кутта, функції впливу, інсулін, діабет, режим харчування.*

Keywords—*Lotka-Volterra model, metabolism, Runge-Kutta method, influence functions, insulin, diabetes, diet.*

I. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБМІНУ РЕЧОВИН В ОРГАНІЗМІ

Проблема моделювання процесів метаболізму в організмі людини була досліджена багатьма авторами [1-3], зокрема, була створена узагальнена модель діабету [1], що дає можливість дізнатися рівень цукру в організмі, який страждає від діабету і вимагає введення інсуліну. Проте, дані моделі, як правило, характеризуються використанням розривних функцій Хевісайда або Дірака, що робить їх практичну реалізацію достатньо складною. Крім того, ці моделі дозволяють моделювати метаболізм тільки для організмів, що потребують ін'єкційного введення інсуліну (діабет I типу) в той час, коли значна кількість хворих людей страждають від II типу діабету, коли ліки вводяться не шляхом ін'єкцій, а перорально, слідує чітко встановленим графіком, який встановлюється фахівцем. Слід зазначити, що на діабет II типу страждає до 80% пацієнтів, яким діагностовано цукровий діабет. Метою дослідження є створення моделі і реалізація її у вигляді програмного продукту для діабету I-II типу шляхом проведення оцінки інсуліну в крові і рівня цукру з урахуванням швидкості загоєння ран, режиму харчування та прийому ліків з метою оптимізації використовуваної дози ліків. Для реалізації цієї мети використовується модель конкуренції та боротьби за

виживання біологічних видів (модель «хижак-жертва»), яка була опублікована в 1925 році. Ця модель була запропонована двома відомими математиками – Альфредом Лоткою та Віто Вольтерра.

II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЦУКРОВОГО ДІАБЕТУ ТА ПРОЦЕСУ ОБМІНУ РЕЧОВИН В ОРГАНІЗМІ ЛЮДИНИ

Для моделювання цукрового діабету I та II типу та процесу обміну речовин в організмі людини використовується система Лотка-Вольтерра. Вводяться наступні функції: $x(t)$ – рівень цукру (глюкози) в організмі людини, $y(t)$ - рівень інсуліну в організмі. записується у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = -k_1 y(t) + k_2 w(t) \\ \frac{dx}{dt} = -k_3 x(t)y(t) + k_4 z(t) \end{cases} \quad (1)$$

з початковими умовами:

$$\begin{cases} y(0) = y_0, \\ x(0) = x_0, \end{cases} \quad (2)$$

які встановлюють початкові рівні цукру та інсуліну в організмі людини. Головною особливістю цієї моделі є введення додаткових функцій $w(t)$ і $z(t)$ в систему Лотка – Вольтерра., зміст яких буде встановлено нижче. Зміст рівнянь в системі (1) є наступним: рівень інсуліну в організмі змінюється за одиницю, часу, він спадає пропорційно його початковому рівню, проте він може регулюватись шляхом ін'єкцій інсуліну або прийомом відповідних препаратів у формі таблеток, інтенсивність дії яких нижча, ніж інтенсивність дії ін'єкцій; рівень цукру в організмі змінюється в одиницю часу наступним чином: він знижується через зв'язування цукру присутнім в організмі інсуліном з інтенсивністю, яка є різною для різних організмів і підвищується через наявність цукру (глюкози) в продуктах харчування, які протягом доби приймає пацієнт.

Функція $w(t)$ визначає режим введення в організм інсуліну або відповідних медичних препаратів, вона дозволяє моделювати процес надходження інсуліну в організм. Особливістю моделювання $w(t)$ є те, що вона кількісно і якісно описує процес – має кількість максимумів, яка відповідає кількості сеансів прийому медикаментів, можливим є регулювання та моделювання процесу засвоєння інсуліну.

Функція $z(t)$ визначає режим надходження в організм цукру (глюкози) при прийомі їжі, вона дозволяє моделювати кількість цукру, що потрапляє в організм та моменти прийому їжі (сніданок, обід, вечеря, кефір на ніч тощо). Спосіб параметричного подання $z(t)$ та $w(t)$ є

оригінальним, пропонується застосовувати його замість розривних функцій при моделюванні процесу обміну речовин в організмі людини, функцій типу щільності розподілу Гауса, кусково-лінійних апроксимацій [5], що сприяє стійкості та точності розрахунків при моделюванні. В окремих випадках коли симетричність графіка функції $w(t)$ відносно прямих $t = t_i^*$ не відповідає реальній картині процесу що моделюється, форму подання цієї функції може бути представлена наступним чином:

$$w(t) = \sum_{i=1}^k g_i(t), \quad (3)$$

де $g_i(t)$ може бути записана у формі:

$$g_i(t) = \begin{cases} \frac{b_i}{m_i(t-t_i^*)^2 + 1}, & t \leq t_i^* \\ \frac{b_i}{\tilde{m}_i(t-t_i^*)^2 + 1}, & t > t_i^* \end{cases} \quad (4)$$

де t_i^* - момент максимальної дії медикаментів, \tilde{m}_i, m_i - коефіцієнти, які моделюють степінь затухання дії ліків. В загальному випадку $m_i \neq \tilde{m}_i$, але ця умова не порушує неперервність $g_i(t)$ і її похідної $g_i'(t)$ в момент $t = t_i^*$.

III. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ, АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ВИСНОВКИ.

Якщо людина не страждає на цукровий діабет, то в такому випадку система (2) характеризується тим, що коефіцієнти k_1, k_2, k_3, k_4 за абсолютною величиною є набагато меншими за одиницю. Якщо $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 0$, то система (2) з умовами (3) розв'язується аналітично, розв'язок

$$y(t) = y_0, \quad x(t) = x_0 \quad (5)$$

є тривіальним, він встановлює, що в такому ідеальному випадку рівень цукру та інсуліну є сталим. В тому випадку, коли k_1, k_2, k_3, k_4 за абсолютною величиною є набагато меншими за одиницю, розв'язання системи (1) мало відрізняється від (5), що безпосередньо витікає з теорії стійкості для систем звичайних диференціальних рівнянь [6]. Для проведення розрахунків необхідно задавати наступні числові характеристики:

- значення коефіцієнту, який характеризує ступінь розкладу інсуліну (k_1);
- значення коефіцієнту, який характеризує ступінь засвоєння інсуліну, що вводиться в організм (k_2);
- коефіцієнт зв'язування цукру інсуліном (k_3);

- коефіцієнт, який встановлює ступінь засвоєння цукру, що надходить в організм з їжею (k_4);
- числове значення дози інсуліну, що вводиться в організм $b_i, i = \overline{1, k}$, де k – кількість сеансів введення в організм ліків (інсуліну);
- моменти введення ліків (інсуліну) (t_i);
- коефіцієнти, що характеризують час дії ін'єкції (ліків) $m_i, i = \overline{1, k}$;
- числові характеристики вмісту цукру (глюкози) в їжі $c_j, j = \overline{1, n}$, де n – кількість прийомів їжі;
- моменти прийому їжі (t_j);
- ступінь засвоєння цукру, одержаного з їжею (n_j);

- якщо значення коефіцієнтів k_1 та k_3 перевищують наведені вище, то рівень інсуліну в організмі швидко зменшується, а відповідно зростає рівень цукру в крові, що вимагає медикаментозного лікування ($k_2 \neq 0$);
- при фіксованих значеннях k_1 та k_3 досліджено залежність між рівнями цукру та дозами інсуліну та ліків, які вводяться в організм при лікуванні, встановлено граничні значення вказаних доз, які дозволяють протягом доби утримувати рівень цукру в допустимих межах;
- при фіксованих дозах ліків встановлено, яким чином на рівень цукру (глюкози) в крові впливає режим харчування та вміст цукру в продуктах, що споживаються, запропоновано алгоритм оптимізації доз ліків при дотриманні хворим відповідної дієти;
- встановлено, при яких значеннях коефіцієнтів k_2 та k_4 розклад інсуліну відбувається настільки інтенсивно, що можна говорити про необхідність його додаткового введення в організм; Зроблені висновки будуть справедливими також і для системи (1) при умові $k_2, k_4 \ll 1$;
- встановлено, що модель (1) може бути використана для формулювання рекомендацій стосовно режиму харчування здорових людей з метою стабілізації рівня цукру – показано, що для стабільного рівня цукру в організмі протягом дня рекомендується вживати їжу з високим вмістом цукру на сніданок та в обід, а вечеря повинна бути насичена цукром в значно меншій мірі, ніж їжа в попередні прийоми їжі протягом дня, це ж стосується і можливого прийому їжі перед сном. Ілюстрацією цього висновку може служити графік представлений на рис.1 – вміст цукру в їжі представлено у відповідній колонці, інсулін при цьому не вводиться. Якщо режим харчування є не раціональним і особа приймає основну частину цукру в їжі в вечірній та нічний період – це призводить до значного росту рівня цукру в крові;
- Представлені результати стосуються моделювання процесу обміну речовин в організмі протягом доби, але модель (1) може бути адаптованою для дослідження процесів обміну речовин та діабету різних типів протягом значно тривалішого періоду – кілька місяців або років.
- Напрямки подальших досліджень можуть бути пов'язані з реалізацією наступних завдань:
- Розроблення методик визначення коефіцієнтів моделі k_1, k_2, k_3, k_4 на основі обробки статистичних даних, наявних у відповідних медичних закладах, даних про вміст цукру в продуктах харчування. З математичної точки зору мова йде про необхідність розв'язання оберненої коефіцієнтної задачі для системи (1) на основі даних клінічного визначення значень функцій $x(t)$ та $y(t)$ в дискретні моменти часу та використання

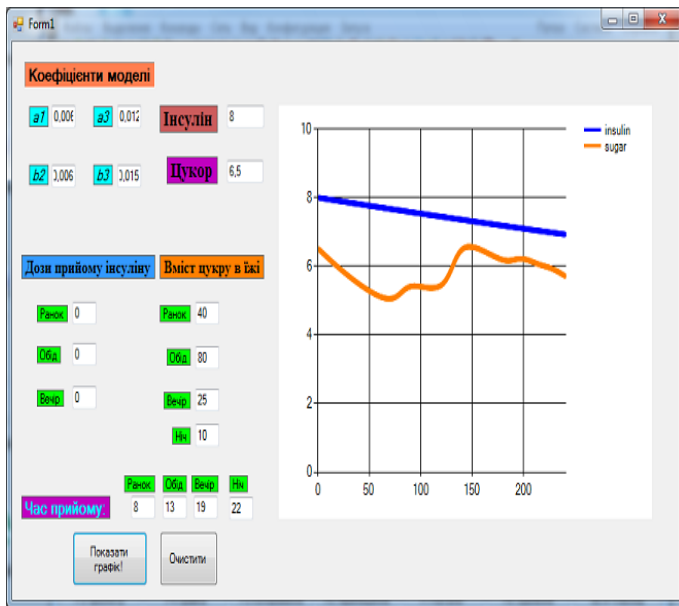


Рис. 10. Інтерфейс програми для обчислення рівнів цукру та інсуліну.

В процесі реалізації чисельного алгоритму знаходяться функції, що характеризують зміну рівнів інсуліну $y(t)$ та цукру $x(t)$ протягом доби. На рис.1 рівень інсуліну зображено синьою, а рівень цукру – червоною лінією. Також на цьому рисунку наведено інтерфейс програми.

ВИСНОВКИ

- модель дозволяє описувати зміну рівнів цукру та інсуліну в організмі з діагностованим цукровим діабетом при ін'єкційному та безін'єкційному способах лікування в залежності від особливостей організму (коефіцієнти k_1 та k_3), а також режиму прийому їжі та ліків, калорійності та вмісту цукру в їжі, дозування ліків, що приймаються. Встановлено, що значення $k_1 \in [0; 0.001]$; $k_3 \in [0; 0.002]$; $k_2 = 0$; $k_4 \in [0; 0.001]$ відповідають випадку здорового організму, коли рівень цукру в крові перебуває в допустимих межах;

апарату інтерполяції або апроксимації для відтворення значень даних функцій в будь-який момент часу;

- дослідження програмного комплексу з точки зору забезпечення стійкості його роботи, встановлення робочих діапазонів даних, які не призводять до втрати стійкості обчислювальних алгоритмів або одержання результатів, які суперечать реальній фізичній, математичній та клінічній картина процесу;
- розробка програмного комплексу реалізації моделей, адаптованого для використання у відповідних медичних закладах; розробка WEB-сайту з програмою для пошуку її потенційних споживачів, створення програмного та апаратного забезпечення, яке було б зручним для використання споживачами з початковим рівнем володіння засобами ЕОМ.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Бабский В.Г. Математические модели в биологии, связанные с учетом последствий / В. Г. Бабский, А. Д. Мышкис. – М. : Мир, 1983. – 383 с.
- [2] Беляков В. Д. Состояние и перспектива математического моделирования в эпидемиологии // В. Д. Беляков, Ю. В. Кравцов, Л. Н. Герасимов / Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии, 1990. – № 6. – С. 109–113.
- [3] Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтерра. – М. : Наука, 1976. – 286 с.
- [4] Марчук И. Г. Математические модели в иммунологии: вычислительные методы и эксперименты / И. Г. Марчук. – М. : Наука, 1991. – 304 с.
- [5] Романюха А. А. Математические модели в иммунологии и эпидемиологии инфекционных заболеваний / А. А. Романюха. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 293 с.
- [6] Самойленко А. М. Дифференциальные уравнения / А. М. Самойленко, М. О. Перестюк, І. О. Парасюк. – К. : Либідь, 2003. – 600 с.
- [7] Фельдман Л. П. Чисельні методи в інформатиці / Л. П. Фельдман, А. І. Петренко, О. А. Дмитрієва / К. : Видавнича група ВНУ, 2006. – 480 с.
- [8] Хусаинов Д. Я. Введение в моделирование динамических систем / Д. Я. Хусаинов, І. І. Харченко, А. В. Шатирко. – К. : КНУ ім. Тарас Шевченка, 2010. – 130 с.
- [9] Шахно С. М. Практикум з чисельних методів / С. М. Шахно, А. Т. Дудикевич, С. М. Левицька. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2013. – 432 с.
- [10] Олійник А.П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: Наукове видання / А.П. Олійник – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010 – 320с.

З М І С Т

СЕКЦІЯ 1. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕХНІЧНИХ ТА СИСТЕМАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	3
SECTION 1. INFORMATION TECHNOLOGIES IN TECHNICAL SYSTEMS AND SYSTEMS OF SPECIAL PURPOSE.....	3
ПРО ОДИН СУБГРАДІЄНТНИЙ АЛГОРИТМ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ СТОХАСТИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ З ОБМЕЖЕННЯМ	4
ФАХРІДДІН МІРЗОАХМЕДОВ	
ФОРМАЛІЗАЦІЯ СЕМАНТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ КОМБІНАТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	6
ТИМОФІЄВА Н.К.	
МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ РІШЕНЬ ПОШУКУ БЕЗПЕЧНОГО МАРШРУТУ ВІЙСЬКОВИХ ОДИНИЦЬ У БОЙОВИХ УМОВАХ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ ТА АЛГОРИТМУ РОЮ ЧАСТОК.....	10
ВАСИЛЬ ЛИТВИН, ДМИТРО УГРИН, ОЛЕКСІЙ ІЛ'ЮК	
РЕОПТИМІЗАЦІЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ ЗАДАЧ ПРО ВИКОНУВАНІСТЬ З ДОПОМОГОЮ ІЄРАРХІЙ РЕЛАКСАЦІЙ ЯК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОБРОБКА ДАНИХ В СИСТЕМАХ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	14
В.О. МИХАЙЛЮК	
A SYSTEM FOR DETERMINING THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MARINE TECHNICAL LIQUIDS	18
VITALII NIKOLSKYI, KYRYLO BEREZHNYI, MARK NIKOLSKYI, OLEG BLOSHENKO	
ВИМІРЮВАННЯ ЛОКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	24
А.С. ДУДНІК	
INFORMATION AND ANALYTICAL TECHNOLOGY FOR CONTROL AND OPERATION MANAGEMENT OF GAS TRANSPORTATION SYSTEMS OPERATION MODES.....	28
A. TEVYASHEV, S. IIEVLIEVA	
ПЕРЕПИСУВАННЯ СЕМАНТИКИ ІСТОРІЙ КОРИСТУВАЧА.....	32
ŚCIBOR SOBIESKI, BARTOSZ ZIELIŃSKI, PAWEŁ MAŚLANKA	
ANALIZA KORELACJI NOTOWAŃ BITCOINA	36
VASYL FEDORIV, JACEK OBRZUD	
CLASSIFICATION OF DERMATOLOGICAL SHAPE ASYMMETRY MEASURES OF SKIN LESION.....	40
PIOTR MILCZARSKI, ZOFIA STAWSKA	
РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ПІДРАХУНКУ ОБ'ЄКТІВ ПРИ СКЛАДНИХ УМОВАХ ОТРИМАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ.....	444
РОМАН КВЕТНИЙ, ВОЛОДИМИР КОЦЮБІНСЬКИЙ, ОЛЕКСАНДР КИРИЛЕНКО, ОЛЕГ БІСКАЛО, РОМАН МАСЛІЙ	
SOME ASPECTS OF FUNCTIONAL PROGRAMMING LANGUAGES APPLICATION IN THE PARALLELIZATION PROBLEMS.....	48
OREST GEIKO, ARTUR MARTSINKOVSKYI	
СЕКЦІЯ 2.ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СОЦІУМІ, ОСВІТІ, МЕДИЦИНІ, ЕКОНОМІЦІ, УПРАВЛІННІ, ЕКОЛОГІЇ ТА ЮРИСПРУДЕНЦІЇ.....	522
SECTION 2.INFORMATION TECHNOLOGIES IN SOCIETY, EDUCATION, MEDICINE, ECONOMICS, MANAGEMENT, ECOLOGY AND JURISPRUDENCE.....	522
ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПОРТАЛ ДЛЯ ОБМІНУ КОНТЕНТОМ МІЖ СОЦІАЛЬНИМИ МЕРЕЖАМИ.....	53
О. ГЛАДКА, Я. БАБИЧ	
МОДЕЛЮВАННЯ ІНТУІЦІЇ НА ЗАСАДАХ ПАРАДИГМИ ГРАНИЧНИХ УЗАГАЛЬНЕНЬ	57
ЮРІЙ ПРОКОПЧУК, ОЛЕКСАНДР БІЛЕЦЬКИЙ	
ДОПОВНЕНА ТА ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНОСТЬ ЯК РЕСУРС НАВЧАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СТУДЕНТІВ	61
ІРИНА МЕЛЬНИК, НАДІЯ ЗАДЕРЕЙ, ГАЛИНА НЕФЬОДОВА	
УПРАВЛІННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ РИЗИКАМИ В ПРОЕКТАХ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ ...	655
ІРАЇДА СТАНОВСЬКА, ОЛЕКСІЙ ТОРОПЕНКО, СЕРГІЙ КОШУЛЯН, ОЛЕСЯ ДАДЕРКО	

ІНТЕГРОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ПІДТРИМКИ SMART-ТУРИЗМУ.....	69
Юрій Тулашвілі, Тетяна Жовтан	
APPLICATION OF OBDII TECHNOLOGY IN THE IOT CONCEPTION	73
J. ROGOWSKI	
ФРАКТАЛЬНА ОБРОБКА ЦИФРОВИХ МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В МЕДИЦИНІ.....	777
Анатолій Поворознюк, Халед Шехна	
АЛГОРИТМ СУГЕНО У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ СУДОВИХ РІШЕНЬ	81
Анна Бакурова, Єліна Терещенко, Марія Пасічник	
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЛЮДИНИ ЗА ЇЇ ЕКГ З ДОПОМОГОЮ ЗРОСТАЮЧОЇ ПІРАМІДАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ.....	85
Лілія Кізуб, Віталій Величко	
МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПЕРЕДБАЧЕННЯ: КОРОТКИЙ ОГЛЯД.....	89
О. Білоконь	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ ПІД НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ АНАЛІЗУ.....	93
Дмитро Бобилев	
ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСІВ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ	977
Марія Семаньків, Богдан Білусяк	
ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ІГРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ	101
Віталій Горєлов, Любомир Петришин	
ІНТЕГРОВАНІ УРОКИ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗНАНЬ УЧНІВ	105
Копильчук Віра, Марія Семаньків	
АЛГОРИТМИ ОХОПЛЕННЯ ДАНИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ Й ЕКСПОРТУ ДЕРЖАВИ ТА ЇЇ РЕГІОНІВ.....	109
Василь Горбачук, Максим Дунаєвський, Сеїт-Бекір Сулейманов	
МОЖЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗМІСТОВОЇ ЛІНІЇ “ПІДПРИЄМЛИВІСТЬ ТА ФІНАНСОВА ГРАМОТНІСТЬ” НА УРОКАХ ІНФОРМАТИКИ	109
Ольга Дудка, Ірина Терешкун	
ІНТЕГРОВАНИЙ ІНТЕРАКТИВНИЙ АЛГОРИТМІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИКЛАДАННЯ ФІЗИКИ	109
Ігор Когутюк, Павло Когутюк	
СЕКЦІЯ 3. ТЕОРІЯ ІНФОРМАЦІЇ, КОДУВАННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ФОРМИ ІНФОРМАЦІЇ.....	120
SECTION 3. INFORMATION THEORY, CODING AND TRANSFORMATION OF INFORMATION FORM	120
ДЕКОДУВАННЯ СТИРАНЬ В ПАРАЛЕЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ КОДАХ	121
Василь Семеренко, Ольга Тарасова, Сергій Луцков	
ВИКОРИСТАННЯ ПАКЕТІВ ТЕСТУВАННЯ ДЛЯ СТАТИСТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ВИПАДКОВИХ ЧИСЕЛ	126
Марія Семаньків, Юрій Іляш, Даріуш Саля	
ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРПІКСЕЛІВ В ЕФЕКТИВНОМУ АЛГОРИТМІ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ГРАФУ.....	130
Дмитро Луп'як, Роман Кветний	
СЕКЦІЯ 4. ЦИФРОВА ОБРОБКА ТА УЩІЛЬНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ	13434
SECTION 4. DIGITAL INFORMATION PROCESSING AND COMPRESSION	134
ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ВІДБОРУ І ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ З ЕЛЕМЕНТАМИ ЗОРОВОГО АНАЛІЗАТОРА ЛЮДИНИ	135
Віталій Боюн, чл.-кор. НАН України	
АНАЛІТИЧНІ МЕРЕЖІ ЯК ЗАСІБ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ	140
Віктор Ровінський, Ольга Євчук	
ENCODING IMAGES WITH FRACTAL GENETIC ALGORITHM.....	144
OLENA OSHAROVSKA, MIKOLA PATLAYENKO	

ПРО ПРОБЛЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ	148
Андрій Фельтов, Наталя Процах, Оксана Чмир, Андрій Мельниченко	
ДИСКРЕТНЕ ТРИКОВЕ СИМЕТРИЧНЕ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ.....	152
Артем Ізмайлов, Любомир Петришин	
СЕКЦІЯ 5.ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	156
SECTION 5.INFORMATION SECURITY IN INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS.....	156
DEVELOPMENT OF A COMPUTER SYSTEM OF TECHNICAL CONDITION FOR THE ELECTRIC PODDED AZIMUTH THRUSTERS.....	1577
VITALII NIKOLSKYI, VITALII BUDASHKO, SERGII KHNIUNIN, MARK NIKOLSKYI	
INVESTIGATION OF THE IMAGES SESSION KEYS LOCATION AT THE HIGHER LEVELS OF HYPER-SPACE DESCRIPTIONS	161
VOLODYMYR GLUSHCHENKO, MYKHAILO PETRYSHYN	
ОЦІНКА ВАГИ ХЕММІНГА ОБЕРНЕНИХ ЧИСЕЛ ВІДНОСНО ОПЕРАЦІЇ ДОДАВАННЯ ЗА МОДУЛЕМ УЗАГАЛЬНЕНИХ ЧИСЕЛ МЕРСЕННА	165
Дарія Ядуча	
ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДЕРЖАВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ.....	169
Надія Казакова, Олексій Фразе-Фразенко, Іван Копиченко	
HARDWARE TOOLS FOR PSEUDONONDETERMINISTIC BLOCK CIPHERING.....	174
YURI BARYSHEV	
РОЗГОРТАННЯ КЛЮЧА ДЛЯ БЛОКОВИХ ШИФРІВ З ПСЕВДОНЕДЕТЕРМІНОВАНОЮ ПОСЛІДОВНІСТЮ КРИПТОПРИМІТИВІВ.....	178
Аліна Остапенко-Боженова, Валентина Каплун	
МЕТОД ЗАХИСТУ БАЗ ДАНИХ ШЛЯХОМ БАГАТОШАРОВОГО КОРИСТУВАЦЬКОГО ДОСТУПУ	182
Олеся Войтович, Іван Микитюк	
МЕТОД ВІЯВЛЕННЯ ТРОЛІНГУ ЯК ІНФОРМАЦІЙНО-ПСИХОЛОГІЧНОЇ ОПЕРАЦІЇ В КІБЕРПРОСТОРІ	186
Вероніка Островська, Олеся Войтович, Леонід Куперштейн	
ВІЯВЛЕННЯ ФЕЙКОВИХ ОБЛІКОВИХ ЗАПИСІВ У СОЦІАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ «FACEBOOK»	190
Олеся Войтович, Андрій Дудат'єв, Віталій Головенько	
ПОБУДОВА ОЦІНОК СТІЙКОСТІ SP-МЕРЕЖ СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ ДО ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО КРИПТОАНАЛІЗУ	194
Олексій Якимчук, Сергій Яковлев	
ІНДЕКСИ РОЗГАЛУЖЕННЯ МАТРИЦЬ НАД КІЛЬЦЯМИ ЛИШКІВ.....	1988
Олег Курінний, Сергій Яковлев	
ІМОВІРНІСТІ ДИФЕРЕНЦІАЛІВ ШИФРУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ІЗ ЧАСТКОВИМ ЗАБІЛЮВАННЯМ КЛЮЧАМИ.....	202
Володимир Полулях, Сергій Яковлев	
АНАЛІЗ РЕАЛІЗАЦІЇ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНИ ВІТРАТИ ДЛЯ КРИПТОСИСТЕМ НА SUZUKI GROUP	206
Геннадій Халімов, Євген Котух	
СЕКЦІЯ 6.АРХІТЕКТОНІКА ТА КОМПОНЕНТИ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ	210
SECTION 6.COMPUTER NETWORKS, SYSTEMS AND COMPONENTS ARCHITECTONICS	210
FUZZY LOGIC POSITIONING SYSTEM OF SHIP'S DIESEL GENERATORS ACTUATING MECHANISMS.....	211
VITALII NIKOLSKYI, YEVGEN OZHENKO, KYRYLO BEREZHNYI, VIKTOR LISENKO	
КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ЛОГІЧНИХ І АРИФМЕТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ БАГАТОЗНАЧНИХ ЛОГІК.....	216
Юрій Гунченко, Вікторія Левчук, Світлана Кузниченко, Олексій Олейник	
СПОСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ	220
Катерина Шевчук, Сергій Захарченко	
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	2255
Віктор Синєглазов, Олена Чумаченко	

СЕКЦІЯ 7.МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ	229
SECTION 7.MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING OF COMPLEX SYSTEMS.....	229
ПРО СПРЯМОВАНЕ ПЕРЕМІЩЕННЯ ГРАФОХІДНОГО АВТОМАТУ БЕЗ КОМПАСА НА ГРАФІ КВАДРАТНОЇ РЕШІТКИ.....	230
САПУНОВ СЕРГІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ	
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СТРИЖЕННЯ З ТРИЛІНІЙНОГО ДВОФАЗНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ РОЗТЯГУВАННІ	234
ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВ	
МОДЕЛЮВАННЯ ОКИСНЕННЯ ЧАДНОГО ГАЗУ НА ПОВЕРХНІ МЕТАЛЕВОГО КАТАЛІЗАТОРА: ТОНКА СТРУКТУРА КОЛИВНОЇ РЕАКЦІЇ.....	238
ПЕТРО КОСТРОБІЙ, ІРИНА РИЖА	
ДИНАМІКА КВАЗІГАРМОНІЧНИХ ХВИЛЬОВИХ ПАКЕТІВ У СЕРЕДОВИЩАХ З ВКЛЮЧЕННЯМИ	242
СКУРАТІВСЬКИЙ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ, СКУРАТІВСЬКА ІННА АНТОНІВНА	
ЗСУВНЕ ПЛАСТИЧНЕ ВІДШАРОВУВАННЯ ПРЯМОКУТНОГО ВКЛЮЧЕННЯ З ВІЛЬНОЮ ВІД КОНТАКТУ ОДНОЮ ПАРОЮ ГРАНЕЙ.....	246
ВАСИЛЬ КРИВЕНЬ, ЛЮБОВ ЦИМБАЛЮК, ВОЛОДИМИР ВАЛЯШЕК, АНДРІЙ БОЙКО	
СХЕМИ ЧИСЕЛЬНОГО ІНТЕГРУВАННЯ ДЛЯ СКІНЧЕННО-РІЗНИЦЕВОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ ДРОБОВОГО ЗА ЧАСОМ РІВНЯННЯ ДИФУЗІЇ З УЗАГАЛЬНЕНОЮ ПОХІДНОЮ КАПУТО .ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКУ НЕ ВИЗНАЧЕНО.	
В.О. БОГАЄНКО	
STUDYING A POSSIBILITY TO APPLY THE CONTROL LAW SYNTHESIZED ON THE BASIS OF THE KINEMATIC MODEL TO CONTROL THE DYNAMIC MODEL OF REVERSE ROAD TRAIN MOTION	254
VOLODYMYR VERBYTSKYI, ANATOLIY BEZVERKHNYI, DMYTRO TATIEVSKYI	
МОДЕЛЮВАННЯ ЕВОЛЮЦІЇ ПОДИНОКИХ ХВИЛЬ В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ	258
ЯРЕМА РУЩИЦЬКИЙ, ВАСИЛЬ ЮРЧУК	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ НАЙБЛИЖЧОЇ ПАРИ В НЕЧІТКИХ УМОВАХ.....	262
СЕРГІЙ НЕСТЕРЕНКО, ІГОР САУХ, ОЛЕСЯ ДАДЕРКО	
СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ МЕТОДОМ КОМПАРАТОРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ.....	266
ВОЛОДИМИР БЕЗКОРОВАЙНИЙ, ОКСАНА ДРАЗ, ВАЛЕРІЙ СЕМЕНЕЦЬ	
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОЇ ЗУПИНКИ.....	270
ЛЕОНІД ФАЙНЗІЛЬБЕРГ, ЮЛІЯ ЯРЕМЕНКО	
MATHEMATICAL MODELING AND SIMULATION OF PROCESSES OF HETERODIFFUSION WITH CASCADE DECAY OF PARTICLES.....	274
YEVGEN CHAPLYA, OLHA CHERNUKHA, YURII BILUSHCHAK	
ФУНКЦІЇ ГРІНА ЗАДАЧ ДИФУЗІЇ ДВОМА ШЛЯХАМИ	284
ОЛЬГА ЧЕРНУХА, ЮРІЙ БІЛУЩАК, ЄВГЕН ЧАПЛЯ	
ОСОБЛИВОСТІ ВАЛІДАЦІЇ КОМПЛЕКСНИХ ГЛОБАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ	289
МИКОЛА ГУСТІ, ІННА ОХРЕМЧУК	
НОВА МОДЕЛЬ ШТУЧНОГО НЕЙРОНУ ДЛЯ ПОБУДОВИ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У ЗАДАЧІ АПРОКСИМАЦІЇ.....	296
ОЛЕНА ЧУМАЧЕНКО, ВЛАДИСЛАВ ГОРБАТЮК	
ДО ДОСЛІДЖЕННЯ КОМАНДНИХ ІГОР НА БАЗІ МОДЕЛЕЙ З АСОЦІАТИВНОЮ ПАМ'ЯТТЮ ТА МОДЕЛЕЙ ШТУЧНОГО ЖИТТЯ	300
МАКАРЕНКО О. С., ЗАВЕРТАНИЙ В.М	
MODELING OF HYDRODYNAMICS PROCESSES WITH PHASE TRANSITION.....	303
GENNADIY SANDRAKOV	
ЗАДАЧІ ДИНАМІКИ СУМІСНОГО РУХУ РЕЗЕРВАРУ З РІДИНОЮ.....	307
ОЛЕКСАНДР КОНСТАНТИНОВ	
СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ	311
НАЗАР ПРИТУЛА, МИРОСЛАВ ПРИТУЛА	
МОДЕЛЮВАННЯ КАТАСТРОФІЧНИХ ПРИЗЕМЛЕНЬ КВАДРОКОПТЕРА	315
БЛАГІТКО Б.Я., МОЧУЛЬСЬКИЙ Ю.С., ЗЯЧУК І.М	
ВИКОРИСТАННЯ ШАБЛОНІВ ДЛЯ СТРУКТУР ВХІДНИХ ДАНИХ В ОПТИМІЗАЦІЙНО-ІМІТАЦІЙНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАХ	319

ВІРА БІГДАН, ОЛЕНА КРИКОВЛЮК	
ВПЛИВ ЛОКАЛЬНОГО ЗМІЩЕННЯ МАСИ НА ПОТЕНЦІАЛЬНЕ ПОЛЕ ТОЧКОВОГО ЗАРЯДУ У БЕЗМЕЖНОМУ ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	323
Ольга Грицина, Галина Мороз	
МОДЕЛЬ СИСТЕМНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	327
Володимир Безкоровайний	
ПЕРЕГЛЯД ГІПОТЕЗ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ НЕЛІНІЙНИХ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ РЕЗЕРВУАРІВ З РІДИНОЮ	331
Олег Лимарченко	
СПЕКТРАЛЬНІ МЕТОДИ В ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧАХ	335
Ярослав П'янило, Галина П'янило, Олег Браташ	
ФОРМУВАННЯ МАСИВУ ВХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ДРУКОВАНИХ ТЕКСТІВ В ТЕХНОЛОГІЇ БАГАТОРІВНЕВОГО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ	339
Марія Голуб	
ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА КОРОТКОЧАСНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ	343
Сергій Голуб	
СТРУКТУРНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ КЛАСИФІКАТОРІВ В СИСТЕМАХ КРИЗОВОГО МОНІТОРИНГУ	347
Голуб С.В, Авраменко А.С	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ ДАНИХ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ЗЙОМКИ	351
Марія Талах, Сергій Голуб	
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АДСОРБЦІЇ ВКЛЮЧЕНЬ НА ПОВЕРХНЮ РОЗДІЛУ ФАЗ	355
Олександр Малько, Анастасія Малько	
МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО РОБОТА	359
Віталій Веретельник	
КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ БЛОКУ LRU КЕШ - ПАМ'ЯТІ ПРОЦЕСОРНОГО ЯДРА АРХІТЕКТУРИ ІА - 32	363
Вадим Пуйденко	
МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ ДОМІШКИ У БАГАТОКОМПОНЕНТНОМУ ДВОФАЗНОМУ ВИПАДКОВО НЕОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ З ПАСТКАМИ	368
Ольга Чернуха, Олеся Власій	
СЕКЦІЯ 8. ПРИКЛАДНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ	373
SECTION 8. APPLIED METHODS OF STUDYING DISCRETE-CONTINUOUS MATHEMATICAL MODELS	373
LAGRANGIAN APPROXIMATIONS AND COLLOCATION METHOD FOR SOLUTION OF INTEGRAL EQUATIONS OF THE FIRST KIND	374
OLEXANDR POLISHCHUK	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ У БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЯХ ОСНОВНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ФОРМ З УРАХУВАННЯМ ВНУТРІШНІХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА	379
Роман Тацій, Марта Стасюк, Олег Пазен	
ЗАГАЛЬНА СХЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЗДОВЖНИХ КОЛИВАНЬ СТРИЖНІВ КУСКОВО-СТАЛОГО ПЕРЕРІЗУ	386
Р.М. Тацій, О.О. Карабин, О.Ю. Чмир	
ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ДО КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ ТА СТАНУ ДОВКІЛЛЯ	386
Андрій Олійник	
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБМІНУ РЕЧОВИН В ОРГАНІЗМІ ЛЮДИНИ ТА ЙОГО ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ	386
Євген Олійник	
ДЛЯ НОТАТОК	405

Наукове видання

**"ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ"**

**матеріали
Міжнародної науково-практичної конференції
14-19 травня 2018 року
Івано-Франківськ**

**"INFORMATION TECHNOLOGIES
AND
COMPUTER MODELLING"**

**proceedings
of the International Scientific Conference
2018, May, 14th to 19th
Ivano-Frankivsk**

Науковий редактор: Л.Б. Петришин
Технічний редактор: В.З. Максимець
Коректор: Ю.Ю. Іляш
Комп'ютерна верстка: О.М. Голіней

Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника
76018, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57,
ПНУ, адміністративний корпус

Формат. Папір офсетний. Ум. Друк арк.
Тираж 150 прим.

Друк: підприємець Голіней О.М.
тел. (0342) 58 04 32

Свідоцтво внесення до державного реєстру
ДК №

Для нотаток

Для нотаток