

Міністерство освіти і науки України  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ПАВЛЕНКО Сергій Віталійович**



УДК 681.5.015.52

**МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ  
ІДЕНТИФІКАЦІЇ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ ВОЛЬТЕРРА**

01.05.02 – «Математичне моделювання та обчислювальні методи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник**

доктор технічних наук, професор  
**Положаєнко Сергій Анатолійович**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих систем  
управління

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАПН України,  
заслужений діяч науки і техніки України,  
**Верлань Анатолій Федорович**,  
Інститут проблем моделювання в енергетиці  
ім. Г. Є. Пухова НАН України,  
завідувач відділу моделювання динамічних систем

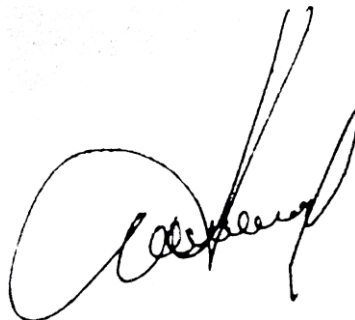
кандидат технічних наук, доцент  
**Гончаров Артем Володимирович**,  
Черкаський державний технологічний університет,  
декан факультету електронних технологій

Захист відбудеться « 31 » січня 2017 року о 12-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.052.11 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка 1, ауд. 400–А.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка 1.

Автореферат розісланий « 30 » грудня 2016 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О. О. Фомін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** В даний час велике значення набувають задачі побудови адекватних математичних моделей (ММ) досліджуваних процесів і систем на основі даних експериментів «вхід – вихід» – задачі ідентифікації, що дозволяють підвищити точність і достовірність результатів моделювання при проектуванні систем управління, а також підвищити достовірність розпізнавання станів при діагностуванні і ефективність функціонування систем на етапі їх експлуатації.

В теорії управління досить давно досліджуються питання використання математичних моделей у вигляді інтегро-степеневих рядів Вольтерра (РВ) для ідентифікації нелінійних динамічних систем (НДС). Однак складність проблеми практичного визначення багатовимірних вагових функцій — ядер Вольтерра (ЯВ) в реальних умовах, з урахуванням похибок вимірів, обумовлює необхідність пошуку нових ефективних засобів ідентифікації НДС, заснованих на застосуванні алгоритмів регуляризації некоректних задач та сучасних обчислювальних методів на основі вейвлет–перетворень.

Істотна роль у розвитку теоретичних засад і практичних застосувань математичного та комп'ютерного моделювання нелінійних динамічних систем на основі РВ належить українським вченим: А. Ф. Верланю, О. Г. Івахненку, Ю. Ю. Коляденко, Я. М. Матвійчуку, В. В. Поповському, О. А. Серкову, та зарубіжним вченим: Я. З. Ципкіну, Ю. С. Попкову, О. М. Кисельову, Б. Л. Шмультяну, М. П. Петрову, К. О. Пупкову, В. І. Капаліну, А. С. Ющенку, М. Д. Єгупову, А. С. Апарцину, Д. М. Сидорову, О. І. Іванову, М. О. Щербакову, Л. В. Данилову, О. Б. Соловійовій, N. Wiener, H. L. Van Trees, M. Schetzen, W. J. Rugh, L. O. Chua, F. J. Doyle, B. A. Ogunnaike, R. K. Pearson, S. A. Billings, A. Borys та ін.

Проте, відомі до теперішнього часу прикладні алгоритми ідентифікації та моделювання НДС на основі РВ, все ще не дозволяють, повною мірою, використовувати можливості цього математичного апарату. Це обумовлено цілим рядом причин, найбільш важливими з яких є: відсутність обліку істотного впливу похибок вимірювань на результат ідентифікації в алгоритмах експериментального визначення ЯВ, що обмежує їх застосування в реальних умовах; недостатня розробленість програмно-алгоритмічного забезпечення задач ідентифікації НДС на основі РВ.

Таким чином підвищення точності і обчислювальної стійкості методів детермінованої ідентифікації НДС у вигляді моделей Вольтерра на основі експериментальних даних «вхід – вихід» з урахуванням похибок вимірювань та створення на основі теоретичних і експериментальних досліджень ефективних обчислювальних алгоритмів та інструментальних програмних засобів оцінки ЯВ у часовій області в умовах неповної апріорної інформації є актуальною науково–практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до пріоритетних напрямків науково–дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ), згідно координаційних планів Міністерства освіти і науки України, зокрема, в рамках держбюджетних наукових досліджень з науково–дослідницьких робіт (НДР) за участю автора: д/б НДР «Алгоритми, програми та пристрої систем контролю, діагностики й управління технологічними об'єктами», ДР № 0105U007208 (2005 – 2008); д/б НДР «Моделі складних технологічних об'єктів і процесів та апаратно–програмні засоби їх реалізації в системах управління», ДР № 0109U008452 (2009 – 2012); д/б НДР «Моделі та інформаційні технології діагностування і управління складними динамічними об'єктами», ДР № 0109U000113 (2013 – 2016) відповідно до Наказу МОН

України і НАН України від 26.11.2009 №1066/609 «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук на 2009 – 2013 роки»: 1.2.1.1. – «Розробка математичних методів та систем моделювання об'єктів та процесів»; 1.2.1.4. – «Дослідження математичних моделей, проблем комп'ютерної алгебри, оптимізації, оцінювання, ідентифікації»; д/б НДР «Методи та інструментальні засоби діагностичного контролю електричних двигунів на основі непараметричних динамічних моделей», ДР № 0110U008198 (2011 – 2012); д/б НДР «Методологічні основи та інструментальні засоби інформаційної технології діагностування станів неперервних об'єктів із застосуванням моделей Вольтерра» ДР № 0115U000402 (2015 – 2017); а також в рамках наукових досліджень по д/б НДР в Національному університеті «Одеська морська академія» (НУ «ОМА») МОН України: «Теорія і методи аналізу нелінійних інерційних систем з використанням інтегро–степеневих рядів Вольтерра», ДР № 0103U006408 (2003 – 2005); «Методологічні основи побудови діагностичних моделей нелінійних динамічних об'єктів та їх застосування в системах телекомунікацій», ДР № 0105U002310 (2005 – 2007); «Теоретичні засади, методи та інструментальні засоби інформаційної технології діагностування динамічних об'єктів на основі моделей Вольтерра» (2015 – 2017).

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є підвищення ефективності методів детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра за рахунок створення нових і розвитку існуючих обчислювальних методів та інструментальних програмних засобів оцінки ядер Вольтерра в умовах неповної апріорної інформації про об'єкт ідентифікації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Здійснити аналіз стану проблеми ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді моделей Вольтерра, обґрунтувати задачі досліджень.
2. Розробити обчислювальні методи детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді моделей Вольтерра у часовій області.
3. Виконати дослідження точності і обчислювальної стійкості методів ідентифікації, провести їх порівняльний аналіз.
4. Розробити інструментальні програмні засоби ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді ядер Вольтерра у часовій області.
5. Застосувати запропоновані методи ідентифікації для розв'язання прикладних задач моделювання та діагностики об'єктів різної природи.

*Об'єктом досліджень* є процес ідентифікації нелінійних динамічних систем різної фізичної природи в умовах неповної апріорної інформації.

*Предметом досліджень* є методи, алгоритмічні і програмні інструментальні засоби детермінованої ідентифікації об'єктів на основі моделей Вольтерра у часовій області.

**Методи досліджень.** При вирішенні задач дисертаційного дослідження використовувались методи теорії непараметричної ідентифікації на основі моделі Вольтерра із застосуванням тестових імпульсних впливів, методи обчислень та чисельні методи обробки емпіричних даних: методи регуляризації некоректних задач і вейвлет–перетворень (при реалізації методів ідентифікації), методи програмної інженерії (при розробці інструментального забезпечення), методи теорії обчислювальних екс-

периментів (при розв'язуванні тестових та прикладних задач, аналізі точності та завадостійкості оцінки ЯВ), засоби імітаційного моделювання (для підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів).

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в наступному.

*Вперше* розроблено робастний метод детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра у часовій області, у якому, на відміну від відомого методу для числового диференціювання, пропонується розв'язувати відповідні інтегральні рівняння Вольтерра першого роду із застосуванням методу регуляризації некоректних задач А. М. Тихонова, за рахунок чого підвищується точність обчислення похідних, а, отже, і точність ідентифікації.

*Набули подальшого розвитку* методи детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра у часовій області з використанням імпульсних тестових сигналів, які відрізняються від існуючих застосуванням методу регуляризації некоректних задач – в якості параметра регуляризації, використовується амплітуда тестових імпульсів, що дозволяє підвищити точність і обчислювальну стійкість процедури ідентифікації.

*Удосконалено* методи детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра у часовій області, які відрізняються від відомих використанням вейвлет-фільтрації для згладжування отримуваних оцінок ядер Вольтерра, що підвищує обчислювальну стійкість методів ідентифікації.

*Удосконалено* апроксимаційний метод ідентифікації нелінійних систем на основі моделей Вольтерра, який полягає в оптимізації амплітуд тестових сигналів та поточного визначення відповідних масштабуючих коефіцієнтів в процедурі обробки сигналів-відгуків, що дозволяє мінімізувати методичні похибки при оцінюванні ядер Вольтерра.

**Практичне значення отриманих у дисертації результатів** полягає у створенні інструментальних програмних засобів, що реалізують обчислювальні алгоритми детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді ЯВ та впровадженні їх в наукові дослідження та навчальний процес.

Запропоновано, для прискорення обчислень процесів ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді моделей Вольтерра, застосування технології транспарентного розпаралелювання на кластерах на основі замовлень та розроблено відповідні інструментальні програмні засоби автоматизованого створення паралельних додатків прикладних програм.

Побудовано, на основі обробки даних імпульсних відгуків, інформаційну модель фотосинтетичного реакційного центру (ФРЦ) у вигляді ядер Вольтерра першого, другого і третього порядку, що дало змогу деталізувати структуру ФРЦ та отримати кількісні оцінки конформаційної «пам'яті» ФРЦ про попередній вплив (фотозбудження). Це дозволяє розробляти нові методи управління біомолекулярними системами та створювати штучні біомолекулярні системи із заданим комплексом властивостей.

Побудовано математичну модель у вигляді ядер Вольтерра для вентильно-реактивного електродвигуна (ВРД) з метою діагностики його поточного стану, при цьому встановлено, що ядра Вольтерра другого порядку можуть використовуватися в якості ефективного джерела первинних даних при побудові діагностичних моде-

лей ВРД.

Прийнято до впровадження у Відділенні гідроакустики Морського гідрофізичного інституту НАН України (м. Одеса) і використовуються при експериментальних наукових дослідженнях за напрямом акустичного моніторингу морського середовища загальна методика та інструментальні програмні засоби її комп'ютерної реалізації, що забезпечують побудову математичної моделі у вигляді ядер Вольтерра у часовій області за експериментальними даними спостережень «вхід – вихід» нелінійних динамічних систем з урахуванням похибок вимірів.

Впроваджено методи та інструментальні засоби ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра в наукові дослідження кафедри «Електричні машини» ОНПУ та застосовано при виконанні прикладної д/б НДР, ДР № 0110U008198.

Використано результати дисертаційної роботи в навчальному процесі кафедри комп'ютеризованих систем управління ОНПУ з дисциплін: «Моделювання процесів та систем», «Ідентифікація систем управління», «Моделювання неперервних систем», «Системи інтелектуальної обробки даних», «Програмне забезпечення сучасних ЕОМ», а також в навчальному процесі кафедри морського радіозв'язку НУ «ОМА» з дисциплін: «Радіоавтоматика», «Інформаційні радіосистеми» та «Радіоелектронні системи», при розробці тем магістерських дипломних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Три статті [1–3] та матеріали доповідей [23–27] написано автором самостійно. У роботах, що опубліковано у співавторстві, в дисертації використано лише ті результати, які отримано здобувачем самостійно: удосконалено апроксимаційний метод ідентифікації та розроблено відповідні інструментальні засоби [6, 10]; розроблено обчислювальні алгоритми та інструментальні програмні засоби, що реалізують інтерполяційний методи ідентифікації [4, 12–14]; виконано дослідження точності та обчислювальної стійкості детермінованих методів ідентифікації з застосуванням тестових поліімпульсних впливів [7, 8, 16]; розроблено інструментальні алгоритмічні та програмні засоби інформаційної оптимізації системи діагностування на основі ЯВ [5, 9, 11, 22]; розроблено засоби програмування паралельних обчислень при реалізації методів ідентифікації на основі РВ [15, 17, 21]; побудовано інформаційну модель ФРЦ у вигляді ЯВ [20]; запропоновано нові підходи щодо застосування на практиці розроблених методів та інструментальних засобів ідентифікації НДС на основі РВ в системах діагностування ріжучого інструменту у технологічному процесі обробки металів [28].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідалися та обговорювалися на: X, XI, XII, XIV, XVI, XVII Міжнародних молодіжних науково–практичних конференціях «Людина і космос» (м. Дніпропетровськ, Україна, 2008–2010, 2012, 2014, 2015); XI, XII Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.» (м. Харків, Україна, 2007, 2008); III Всеукраїнської науково–практичної конференції молодих учених і студентів «Информационные процессы и технологии» Информатика–2010 (г. Севастополь, 2010); Міжнародних наукових конференціях «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» ISDMCI (м. Херсон–Євпаторія, Україна, 2008, 2012); V Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика–2008» (м. Одеса, Україна, 2008); XVI, XXI, XXII Международных конференциях

«Математика. Компьютер. Образование» МСЕ'2009, МСЕ'2015 (г. Пущино, Россия, 2009, 2015), МСЕ'2016 (г. Дубна, Россия, 2016); VIII, X, XI, XIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні та електронні технології», СІЕТ (м. Одеса, Україна, 2007, 2009, 2010, 2012); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології», САІТ-2010 (Київ, Україна, 2010); I Міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» СІ-2011 (м. Черкаси, Україна, 2011); VI Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления», РАСО'2012 (Москва, Россия, 2012); 5-ой Российской мультиконференции по проблемам управления, МКПУ-2012: «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» УТЭОСС-2012 (Санкт-Петербург, Россия, 2012); 10th IEEE East-West Design & Test Symposium EWDTS-2012 (Kharkov, Ukraine, 2012); II Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (м. Чернівці, Україна, 2012); XII та XVI Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми інформатики та моделювання» ПІМ-2012 (Харків-Ялта, Україна, 2012), ПІМ-2016 (Харків-Одеса, Кароліно-Бугаз, Україна, 2016); AASRI Conference on Intelligent Systems and Control (Vancouver, Canada, 2013); 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS'2013 (Berlin, Germany, 2013); Міжнародному науковому семінарі НАН України «Інтегральні рівняння в математичному та комп'ютерному моделюванні» (Київ, Україна, 2014); III Міжнародній науково-технічній конференції студентів, магістрів та аспірантів «Інформатика, управління та штучний інтелект» ІУП-2016 (Харків, Україна, 2016); V Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, Україна, 2016).

**Публікації.** За результатами наукових досліджень опубліковано 28 наукових праць, з яких: 11 опубліковано у наукових виданнях, які включено до Переліку фахових видань України; 1 – у зарубіжному фаховому періодичному науковому журналі; 5 – у зарубіжних виданнях, що входять до наукометричних баз, в т. ч. 1 монографія; 10 – у збірниках матеріалів і тез конференцій; 1 – монографія.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 216 найменувань на 25 окремих сторінках, чотирьох додатків на 15 окремих сторінках, 12 таблиць і 37 рисунків. Повний обсяг дисертації – 187 сторінок, у тому числі 142 сторінки основного тексту.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, наведено основні наукові і практичні результати, що виносяться на захист.

**Перший розділ** містить аналітичний огляд сучасного стану теорії нелінійних динамічних систем на основі інтегродиференціальних РВ і методів її застосування в задачах ідентифікації, моделювання і діагностики.

Співвідношення «вхід—вихід» для неперервної НДС з невідомою структурою

(типу «чорний ящик») з одним входом і одним виходом може бути представлено рядом Вольтерра у вигляді

$$y(t) = w_0(t) + \int_0^t w_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \int_0^t \int_0^t w_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots = w_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} y_n[x(t)], \quad (1)$$

де  $x(t)$  и  $y(t)$  — відповідно вхідний і вихідний сигнали системи;  $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$  — ядро Вольтерра або вагова функція  $n$ -го порядку,  $n=1,2,3,\dots$ , симетрична відносно дійсних змінних  $\tau_1, \dots, \tau_n$  функція;  $w_0(t)$  — вільний член ряду (при нульових початкових умовах  $w_0(t) \equiv 0$ );  $y_n[x(t)]$  —  $n$ -а парціальна складова (ПС) відгуку системи ( $n$ -вимірний інтеграл згортки);  $t$  — поточний час.

Побудова моделі (ідентифікація) НДС у вигляді РВ полягає у виборі виду тестових впливів  $x(t)$  і розробці алгоритму, який дозволяв би з вимірних реакцій  $y(t)$  виділяти парціальні складові  $y_n[x(t)]$  і визначати на основі їх ЯВ  $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ ,  $n=1,2,\dots$  або їх Фур'є-зображення  $W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$  —  $n$ -вимірні передаточні функції (ПФ) (багатовимірні амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики), відповідно до моделювання системи у часовій або частотній області.

Методи математичного моделювання та експеримент є основними засобами дослідження складних НДС. При застосуванні для наближеного опису НДС РВ нелінійні та динамічні властивості системи повністю характеризуються кінцевою послідовністю багатовимірних ЯВ (на практиці — не більше 3–5).

Ідентифікація за своєю суттю належить до зворотних задач, при вирішенні яких виникають серйозні труднощі обчислювального плану, обумовлені некоректністю постановки задачі. Одержувані оцінки ЯВ виявляються нестійкими до похибок вихідних даних вимірювань відгуків НДС. Крім того, при використанні моделей у вигляді РВ виникає проблема поділу відгуку  $y(t)$  досліджуваної НДС на ПС  $y_n(t)$ , що відповідають окремим членам РВ, оскільки вимірюється сумарний відгук  $y(t)$  на тестовий сигнал  $x(t)$ . Тому необхідно застосовувати спеціальні прийоми виділення ПС з відгуку НДС.

Відомий спосіб такої декомпозиції при використанні детермінованих тестових сигналів виду нерегулярних послідовностей імпульсів призводить до великих похибок в одержуваних оцінках діагональних і паралельних їм перетинів ЯВ. Тому для підвищення стійкості обчислювальних алгоритмів методу ідентифікації доцільно застосувати процедури регуляризації некоректних задач А. Н. Тихонова. У зв'язку з цим необхідно виконати дослідження похибок, що виникають при застосуванні регуляризованого методу детермінованої ідентифікації НДС з невідомою структурою (типу «чорний ящик») на основі моделі Вольтерра при різних рівнях похибок вимірювань, провести аналіз ефективності методу по точності та обчислювальної стійкості.

Зазначене, в кінцевому підсумку, складає предмет дисертаційного дослідження та дозволяє сформулювати його задачі.

**У другому розділі** набули подальшого розвитку методи детермінованої іденти-

фікації НДС на основі моделей Вольтерра з використанням тестових нерегулярних імпульсних послідовностей: компенсаційний, апроксимаційний і інтерполяційний методи; пропонується новий робастний метод ідентифікації.

*Модифікований компенсаційний* метод ідентифікації НДС у вигляді ЯВ у часовій області базується на випробуванні досліджуваної системи нерегулярними послідовностями імпульсів з варійованими параметрами: амплітудою, тривалістю тестових імпульсів і інтервалами між імпульсами.

Модель тестового сигналу у вигляді нерегулярної послідовності, що містить не більше ніж  $n$  імпульсів прямокутної форми тривалістю  $\Delta t$  з різними амплітудами  $a_i$ , що діють у моменти часу  $\tau_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \theta_i S_i \delta(t - \tau_i), \quad \tau_i \in [0, t], \quad (2)$$

де  $S_i = a_i \Delta t$  – площа  $i$ -го імпульсу в тестовій послідовності;  $\delta(t - \tau_i)$  – дельта-функція Дірака;  $t$  – поточний час;  $\theta_i$  – параметр, що визначає кількість імпульсів послідовності та інтервали між ними; якщо  $\theta_i = 1$ , то в момент часу  $\tau_i$  у послідовності імпульс є; при  $\theta_i = 0$  – відсутній.

За допомогою введеного в роботі формалізму отримано співвідношення, що задають обчислювальний алгоритм експериментального визначення діагонального та піддіагональних перетинів ЯВ  $n$ -го порядку НДС з одним входом і одним виходом

$$\hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \left( n! \prod_{i=1}^n S_i \right)^{-1} \sum_{\theta_1, \dots, \theta_n=0}^1 (-1)^{n + \sum_{i=1}^n \theta_i} y(t, \theta_1, \dots, \theta_n), \quad (3)$$

де  $\hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n)$  — оцінка перетину ЯВ  $n$ -го порядку;  $y(t, \theta_1, \dots, \theta_n)$  — відгук НДС, вимірюваний у момент часу  $t$ , при дії на вході модульованих дельта-імпульсів площею  $S_i$  відповідно в моменти часу  $\tau_1, \dots, \tau_n$ ; причому  $y(t, 0, \dots, 0) = 0$ .

Вираз (3) отримано за умови, що тривалість  $\Delta t$  і амплітуди  $a_i$  тестових імпульсів доволі малі. В результаті обробки відгуків НДС  $y(t, \theta_1, \dots, \theta_n)$  (3) знаходять наближені значення перетинів ЯВ, точність визначення яких залежить від вибору площі  $S_i$  тестових імпульсів, тобто від значень  $a_i$  та  $\Delta t$ .

При зменшенні амплітуд тестових імпульсів зменшується методична похибка ідентифікації, але зростає відносна похибка вимірювань. Отже, існує оптимальне значення амплітуди  $a^*$ , при якій досягається мінімальна похибка експериментального визначення ЯВ, що дозволяє поставити задачу регуляризації процедури ідентифікації, використовуючи в якості параметра регуляризації амплітуди  $a$  тестових імпульсів.

Запропонований формалізм узагальнює розроблений раніше компенсаційний метод ідентифікації у випадку різноамплітудних імпульсів у тестовій послідовності, що знімає обмеження (рівність амплітуд) на вибір амплітуди тестових імпульсів і дозволяє підвищити точність ідентифікації при практичній реалізації методу.

*Модифікований апроксимаційний* метод ідентифікації НДС (у відомому формулюванні) в часовій області засновано на виділенні у відгуку НДС  $n$ -ої ПС  $y_n[x(t)]$ ,

що відповідає  $n$ -му члену РВ, за допомогою побудови лінійних комбінацій відгуків на тестові сигнали з різними амплітудами.

Якщо на вхід системи по черзі подаються тестові сигнали  $a_1x(t), a_2x(t), \dots, a_Nx(t)$ , де  $N$  — порядок апроксимаційної моделі;  $a_1, a_2, \dots, a_N$  — різні дійсні числа, що задовольняють умові  $|a_j| \leq 1$  для  $\forall j=1,2,\dots,N$ ;  $x(t)$  — довільна функція, то лінійна комбінація відгуків НДС на ці впливи дорівнює  $n$ -ій ПС відгуку на сигнал  $x(t)$  з похибкою  $\Delta$ , тобто

$$\sum_{j=1}^N c_j y[a_j x(t)] = y_n[x(t)] + \Delta, \quad (4)$$

де  $c_j$  — дійсні коефіцієнти, такі що задовольняють системі лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), запис яких у векторно-матричній формі має вигляд

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_N \\ a_1^2 & a_2^2 & \dots & a_N^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1^N & a_2^N & \dots & a_N^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_N \end{bmatrix}, \quad (5)$$

причому,  $b_k = 1$  при  $k = n$  і  $b_k = 0$  при  $k \neq n$ ,  $k = \overline{1, N}$ ;  $\forall n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;

$$\Delta = \sum_{j=1}^N c_j \sum_{k=N+1}^{\infty} y_k[a_j x(t)], \quad (6)$$

При використанні сигналів  $x(t)$ , що представляють собою нерегулярні імпульсні послідовності (2), оцінка піддіагонального перетину ЯВ  $n$ -го порядку НДС

$$\hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \frac{1}{n! (\Delta \tau)^n} \sum_{\theta_1, \dots, \theta_n=0}^1 (-1)^{n + \sum_{i=1}^n \theta_i} y(t, \theta_1, \dots, \theta_n), \quad (7)$$

де  $\hat{y}_n(t, \theta_1, \dots, \theta_n)$  — оцінка  $n$ -ої ПС відгуку НДС у момент часу  $t$ , яку отримано в результаті обробки даних експериментів на основі (4).

Оцінка діагонального перетину ЯВ  $n$ -го порядку

$$\hat{w}_n(t, t, \dots, t) = (\Delta \tau)^{-n} \hat{y}_n(t), \quad (8)$$

де  $\hat{y}_n(t)$  — оцінка  $n$ -ої ПС відгуку НДС на одиночний імпульс у момент часу  $t$ , яку отримано в результаті обробки даних експериментів (4).

Для мінімізації похибки виділення ПС відгуку НДС (7), обумовленої членами РВ порядку вище  $N$ -го, необхідно забезпечити мінімум суми модулів коефіцієнтів  $c_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ), які визначаються із системи рівнянь (5).

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^N |c_j| = \sum_{j=1}^N |a_{jn}^{-1}| = \min, \quad (9)$$

де  $a_{jk}^{-1}$  — елемент матриці, яка є зворотною до матриці  $A$ .

Виконане у дисертаційній роботі удосконалення апроксимаційного методу показало, що відповідно до (9) задача забезпечення мінімуму методичної похибки при використанні апроксимаційного методу ідентифікації зводиться до пошуку глобаль-

ного мінімуму функції багатьох змінних, тобто суми модулів коефіцієнтів  $c_j$ . За допомогою процедури повного перебору різних значень амплітуд, розв'язанням щоразу для них СЛАР (5), обчислюються відповідні їм коефіцієнти. Знаходячи мінімальне значення виразу (9), визначаються оптимальні значення амплітуд  $a_1, a_2, \dots, a_N$  для заданих параметрів  $n$  і  $N$  методу ідентифікації.

В *модифікованому інтерполяційному* методі ідентифікації НДС на основі РВ для розділення відгуку НДС на ПС  $\hat{y}_n(t)$  використовується  $n$ -кратне диференціювання вихідного сигналу за параметром – амплітудою  $a$  тестових впливів.

Якщо на вхід системи подати тестовий сигнал виду  $ax(t)$ , де  $x(t)$  — довільна функція;  $|a| \leq 1$  — масштабний коефіцієнт, то для виділення ПС  $n$ -го порядку  $\hat{y}_n(t)$  з вимірюваного відгуку НДС  $y[ax(t)]$  необхідно знайти  $n$ -у частинну похідну відгуку за амплітудою  $a$  у точці  $a=0$

$$n! \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{k=1}^n x(t - \tau_k) d\tau_k = y_a^{(n)}[ax(t)]_{a=0} \quad (10)$$

За допомогою тестових нерегулярних послідовностей імпульсів тривалістю  $\Delta\tau$  і процедури обробки відгуків (10) обчислюються ПС  $\hat{y}_n(t)$  і  $\hat{y}_n(t, \theta_1, \dots, \theta_n)$ , на основі котрих і виразів (8) і (7) визначаються діагональний і піддіагональні перетини ЯВ.

При такій обробці вихідних сигналів НДС, що ідентифікується, методична похибка стає близькою до нуля, але при цьому значно збільшується похибка, що виникає за рахунок похибок округлення обчислень.

Запропоновано *робастний* метод детермінованої ідентифікації НДС на основі моделей Вольтерра в часовій області. У якості тестових впливів використовуються нерегулярні послідовності імпульсів. Стійкість обчислювального процесу процедури ідентифікації забезпечується використанням методу регуляризації некоректних задач А.Н. Тихонова.

Для реалізації алгоритму ідентифікації (7) і (8) перейдемо до дискретного аналога задачі знаходження регуляризованих наближених розв'язків рівняння (10). Вимірюються відгуки НДС на множині пробних імпульсних впливів, у яких амплітуда імпульсів  $a$  змінюється дискретно на інтервалі  $0 < a \leq a_{\max}$  з кроком  $\Delta a$ . Потім кожний перетин за часом  $t$  отриманої множини відгуків  $y(a_j, t, \theta_1, \dots, \theta_n) = y(j\Delta a)$ , де  $a_j = j\Delta a$  ( $j=1, 2, \dots, L$ ;  $L$  – число рівнів дискретизації за амплітудою  $a$ ) зазнає операції  $n$ -кратного чисельного диференціювання за  $a$ , яка зводиться до розв'язку СЛАР

$$\sum_{i=0}^j \frac{\Delta a}{(n-1)!} (a_j - \xi_i)^{n-1} z(\xi_i) = u(a_j), \quad (11)$$

де  $\xi_i = i\Delta a$ ,  $\Delta a = a_{\max} / L$ ;  $u(a_j) = \sigma(a_j)y(a_j)$ ,  $\sigma(a)$  – деяка функція, для якої виконуються умови:

$$\begin{aligned} \sigma(0) = \sigma'(0) = \dots = \sigma^{(n)}(0) = 0, \quad \sigma(a_{\max}/2) = 1/2, \quad \sigma(a_{\max}) = 1, \\ \sigma'(a_{\max}) = \dots = \sigma^{(n)}(a_{\max}) = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

У якості функції  $\sigma(a)$  можна обрати, наприклад, сигмоїдальну функцію

$$\sigma(a) = \frac{1}{1 + \exp \lambda(-a + a_{\max} / 2)} \quad (13)$$

Систему рівнянь (12) можна записати у векторно-матричній формі

$$A_n \bar{z} = \bar{u}, \quad (14)$$

де

$$A_n = \left\| \alpha_{ji}^{(n)} \right\|_{j=1, \overline{L}; i=0, \overline{(L-1)}}, \quad \alpha_{ji} = k_n (j-i)^{n-1}, \quad \text{для } i = \overline{1, (j-1)};$$

$$\alpha_{j0}^{(n)} = \frac{k_n j^{n-1}}{2}, \quad \text{для } i=0; \alpha_{ji} = 0, \quad \text{для } i>j; \quad k_n = \frac{(\Delta a)^n}{(n-1)!}.$$

$$\bar{z} = (z_1, \dots, z_L)', \quad z_i = z(i\Delta a); \quad \bar{u} = (u_1, \dots, u_L)', \quad u_j = u(j\Delta a) = \sigma(j\Delta a) y(j\Delta a).$$

Таким чином, обчислювальний алгоритм, що реалізує метод ідентифікації багатомірних ЯВ на основі співвідношень (11) – (13) зводиться до розв'язку СЛАР (14) для кожного фіксованого моменту часу  $t$  на інтервалі  $[0, T]$ , де  $T$  – час моделювання.

Для розв'язання задачі використовується метод регуляризації А.Н. Тихонова, заснований на варіаційному способі побудови регуляризуючого оператора. Цей метод зводиться до віднаходження наближеного вектора розв'язку  $z^\alpha$ , який мінімізує деякий функціонал, що згладжує. Єдиний вектор, що задовольняє умові мінімуму згладжуючого функціонала, може бути визначено з розв'язку СЛАР

$$(A^* A + \alpha I) z^\alpha = A^* u \quad (15)$$

де  $A^*$  – матриця, зведена до  $A$ ;  $I$  – одинична матриця;  $\alpha$  – параметр регуляризації.

Для вибору значення параметра  $\alpha$  використовується критерій нев'язки:

$$\|Az - u\| < \varepsilon \quad (16)$$

де  $\varepsilon$  – задана похибка розв'язку.

Наближений розв'язок, що одержується на основі (15) і (16), відповідає нульовому порядку регуляризації (слабка регуляризація). Для підвищення гладкості розв'язків використовується регуляризаційна матриця  $R$  і віднаходиться розв'язок СЛАР при значенні параметра  $\alpha$ , яке забезпечує виконання умови (12),

$$(A^* A + \alpha R) z^\alpha = A^* u \quad (17)$$

Регуляризаційна матриця  $R$  має стрічкову структуру, діагональні елементи якої дорівнюють  $r_{ii} = 1 - (\Delta a)^{-2}$ , а елементи над- і піддіагоналей дорівнюють  $r_{ij} = -(\Delta a)^{-2}, i \neq j; i, j = \overline{1, L}$ .

У **третьому розділі** ефективність розроблених методів, алгоритмів та інструментальних засобів ідентифікації підтверджено за допомогою комп'ютерного моделювання в ППП Matlab-Simulink на тестовому об'єкті, для якого було отримано аналітичні вирази для ЯВ першого, другого і третього порядків (вони використовувалися як еталон при дослідженнях потенційної точності і завадостійкості розроблених методів ідентифікації).

Дослідження залежності похибки методу ідентифікації від амплітуди тестових імпульсів здійснювалося на підставі комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB-SIMULINK (реквізити використаного пакету License number: 21808.

Platform: All. License option: Group Term: Perpetual. Use: Classroom). Для дослідження обрано НДС, яка описується нелінійним диференціальним рівнянням Рікатті.

На рис.1 а) і б) представлено графіки (в логарифмічному масштабі) залежностей СКП ідентифікації ( $\epsilon$ ) від амплітуди  $a$  (площі  $S$ ) імпульсних впливів при визначенні діагональних перетинів ЯВ другого і третього порядку, відповідно, за допомогою виразу (2) для різних рівнів похибки вимірювань відгуків ( $\sigma=1, 3$  і  $5\%$ ).

Для підвищення завадостійкості компенсаційного методу ідентифікації застосовуються процедури шумозаглушення (згладжування) до отримуваних оцінок багатовимірних ЯВ, які засновані на вейвлет-перетворенні.

Шумозаглушення зазвичай досягається видаленням високочастотних складових із спектру сигналу, що представляє адитивну суміш інформаційної складової — перетину ЯВ, що одержано в результаті обробки відгуків, і шуму, обумовленого похибкою вимірювальної апаратури. Стосовно до вейвлетного розкладення це може бути реалізовано безпосередньо видаленням деталізуючих коефіцієнтів високочастотних рівнів. Задаючи певний поріг для їх рівня, і зрізуючи за ним деталізуючі коефіцієнти, зменшується рівень шумів в оцінках ЯВ.

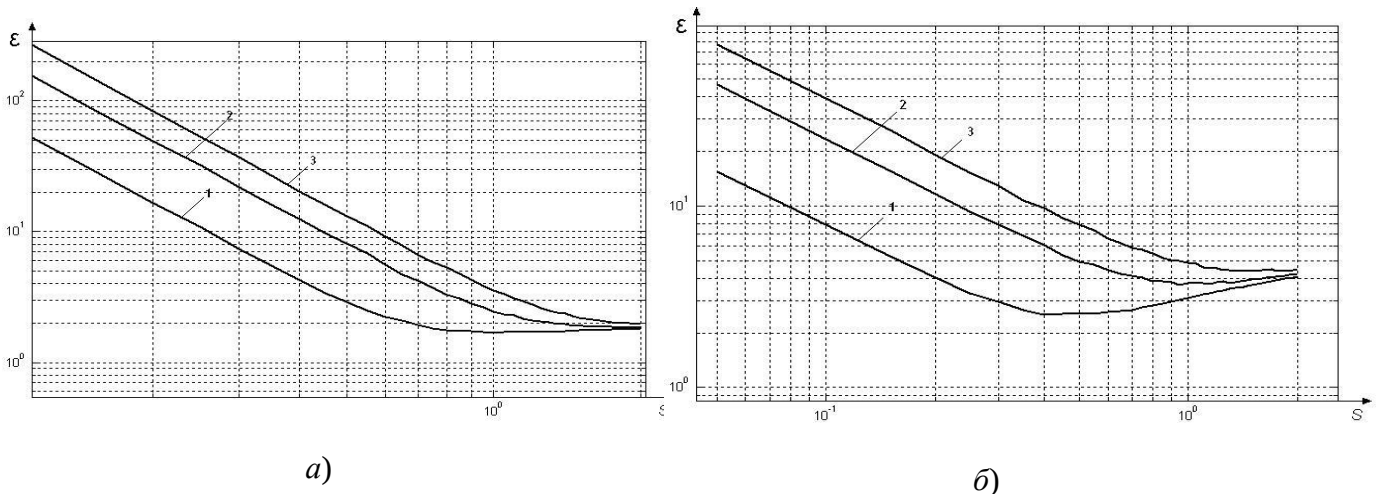


Рисунок 1 – Залежності СКП ідентифікації ЯВ 2-го (а) і 3-го (б) порядку від площі тестових імпульсів  $S$  при похибках вимірювань: 1–1%, 2–3%, 3–5%

Для згладжування результатів ідентифікації використовувалася утиліта *wden* з пакета розширення Wavelet Toolbox системи Matlab з материнським вейвлетом *coiflet – coif4* при наступних значеннях параметрів: параметр установки правила обчислення граничного значення для обмеження коефіцієнтів розкладання  $TPTR='minimaxi'$  (за мінімаксною оцінкою); параметр встановлення типу порога очищення  $SORH='s'$  (гнучкий); параметр, що визначає спосіб перерахування порога  $SCAL='one'$  (використання порога, єдиного для всіх рівнів розкладання, без перемасштабування); глибина розкладання даних: 3–5.

У дослідженнях модель одержуваної зашумленої оцінки перетину ЯВ приймається, як адитивна:  $\hat{w}_n(t, t, \dots, t) + \xi(t)$  з рівномірним кроком за аргументом  $t$ , де  $w_n(t, t, \dots, t)$  – корисна інформаційна складова,  $\xi(t)$  – завада, білий гаусів шум з дисперсією  $D$  і середнім нульовим значенням.

Проведено порівняння результатів детермінованої ідентифікації в часовій області трьома методами (модифікованими): компенсаційним, апроксимаційним та інте-

рполяційним за допомогою нерегулярних послідовностей імпульсів для тестової НДС при похибках вимірювань відгуків  $\sigma=1, 3$  і  $5\%$  без застосування та із застосуванням вейвлет-фільтрації. Отримано процентні нормовані середньоквадратичні похибки (ПНСКП) оцінок діагональних перетинів ЯВ другого порядку (табл. 1), де наведено також кількість тестових експериментів ( $K$ ) і кількість використовуваних операцій додавання і віднімання ( $P$ ), що характеризують обчислювальну складність алгоритмів ідентифікації. Мінімальна ПНСКП ідентифікації досягається при використанні материнського вейвлету *coiflet* – *coif4* з рівнем глибини розкладання  $L=4$ . При цьому отримуються згладжені рішення, а похибка ідентифікації зменшується в 1,5 – 2,5 рази.

Порівняння результатів ідентифікації показує, що найбільш високу точність і завадостійкість забезпечує інтерполяційний метод ідентифікації; найменш точним з розглянутих методів детермінованої ідентифікації є компенсаційний метод; апроксимаційний метод має високі показники ефективності, хоча і поступається по точності інтерполяційному методу ідентифікації.

Таблиця 1 – ПНСКП ідентифікації ЯВ 2-го порядку для тестової НДС

| Параметри методів | Кількість експериментів             | Кількість операцій | Мінімальне ПНСКП $\epsilon_n$ (%) при похибках вимірів $\sigma$ (%) |              |              |                                    |              |              |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|------------------------------------|--------------|--------------|
|                   |                                     |                    | Без використання вейвлет-фільтрації                                 |              |              | З використанням вейвлет-фільтрації |              |              |
|                   |                                     |                    | $\sigma=1\%$                                                        | $\sigma=3\%$ | $\sigma=5\%$ | $\sigma=1\%$                       | $\sigma=3\%$ | $\sigma=5\%$ |
|                   | Модифікований компенсаційний метод  |                    |                                                                     |              |              |                                    |              |              |
|                   | 2                                   | 4                  | 44,0                                                                | 66,5         | 77,1         | 30,1                               | 43,7         | 53,7         |
| $N$               | Модифікований апроксимаційний метод |                    |                                                                     |              |              |                                    |              |              |
| 2                 | 2                                   | 4                  | 12,6                                                                | 25,9         | 37,0         | 10,8                               | 15,0         | 18,3         |
| 3                 | 3                                   | 6                  | 11,9                                                                | 24,5         | 33,5         | 9,08                               | 13,3         | 16,9         |
| 4                 | 4                                   | 8                  | 15,7                                                                | 40,3         | 63,3         | 11,2                               | 18,1         | 24,5         |
| 5                 | 5                                   | 10                 | 15,2                                                                | 38,0         | 58,7         | 11,1                               | 17,0         | 22,7         |
| 6                 | 6                                   | 12                 | 18,7                                                                | 50,4         | 80,5         | 11,9                               | 20,5         | 29,3         |
| $r_1=r_2$         | Модифікований інтерполяційний метод |                    |                                                                     |              |              |                                    |              |              |
| 1                 | 2                                   | 5                  | 13,0                                                                | 26,3         | 37,5         | 10,9                               | 15,5         | 19,2         |
| 2                 | 4                                   | 9                  | 14,7                                                                | 36,5         | 58,1         | 11,2                               | 16,8         | 23,6         |
| 3                 | 6                                   | 11                 | 19,6                                                                | 54,1         | 88,1         | 11,6                               | 20,8         | 31,5         |
| 4                 | 8                                   | 12                 | 25,6                                                                | 77,3         | 126,0        | 13,1                               | 25,1         | 44,0         |
| $\Delta a$        | Робастний метод                     |                    |                                                                     |              |              |                                    |              |              |
| 4                 | 50                                  | –                  | 6,8                                                                 | 18,4         | –            | 3,0                                | 5,8          | –            |

Результати ідентифікації тестової НДС – оцінки діагонального перетину ЯВ 2-го порядку  $w_2(t,t)$  при похибках вимірювань  $1\%$  на основі розв'язку СЛАР (11) представлено на рис. 2а – без регуляризації та на рис. 2б – за допомогою робастного методу при  $\Delta a=4$  і  $L=50$ . При цьому ПНСКП складає  $244,2$  і  $2,95\%$ , відповідно (точність підвищено в  $82,8$  разів).

У четвертому розділі розроблено інструментальні засоби ідентифікації на основі рядів Вольтерра і наводяться результати виконаних прикладних експериментальних досліджень «вхід – вихід» об'єктів різної природи з метою побудови моделей Вольтерра.

Висока обчислювальна складність задач ідентифікації та моделювання НДС на

основі інтегродиференціальних РВ зумовлює принципове значення проблеми використання для їх розв'язання паралельних обчислювальних технологій. Процес ідентифікації при використанні нерегулярних послідовностей тестових імпульсів полягає в послідовному і незалежному визначенні діагональних і паралельних їм перетинів ЯВ, які представляють собою функції однієї змінної  $t$  (поточного часу). Такий процес ідентифікації можна легко розпаралелити і використовувати для визначення ЯВ паралельні обчислювальні технології.

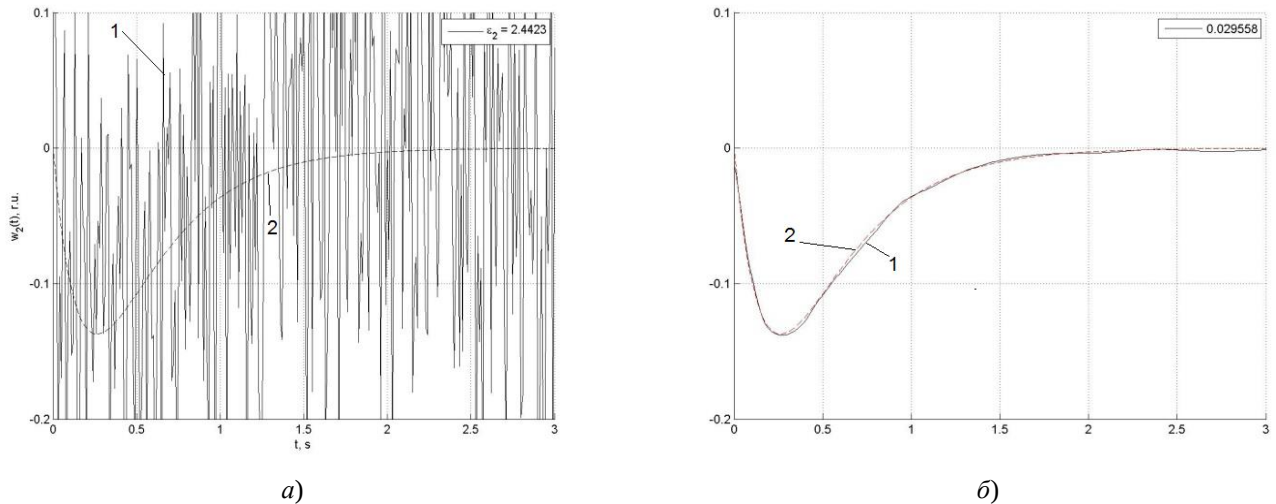


Рисунок 2 – Оцінка (1) діагонального перетину ЯВ 2-го порядку тестової НДС на основі розв'язку СЛАР (11) при похибках вимірювань 3 % : а) – без регуляризації; б) – після регуляризації і вейвлет-фільтрації; еталонна функція (2)

Запропоновано в задачах ідентифікації НДС у вигляді РВ використовувати технологію програмування високопродуктивних обчислень на кластерах та багатоядерних процесорах на основі транспарентного розпаралелювання, яка дозволяє для розроблених в дисертації алгоритмів обробки експериментальних даних переходити від існуючих послідовних реалізацій до паралельних без істотних змін алгоритму і вихідного коду програми, забезпечує високу ефективність розпаралелювання і низьку трудомісткість розробки паралельних додатків прикладних програм.

На основі розроблених алгоритмів в системі Matlab/Simulink створено інструментальне середовище ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів (ІСІНДО) – комплекс програм ідентифікації НДС на основі моделей Вольтерра у часовій області. Створений комплекс складається з трьох основних частин: головний візуальний модуль керування методами ідентифікації (Main Graphical User Interface), модулів реалізації методів ідентифікації (Identification), та модулів візуалізації (Visualisation). Модуль ідентифікації в свою чергу складається з чотирьох модулів другого рівня (Compensation, Approximation, Interpolation та Robust) до призначення яких входить контроль коректності параметрів ідентифікації за допомогою розроблених візуальних модулів, проведення процесу ідентифікації та регуляризації за обраним методом. Наведену функціональність реалізовано у вигляді бібліотеки функцій (GUI\_parameters, Data\_load, Identification, Regularization, Wavelet), що входять до кожного модуля і виконують: налаштування параметрів, завантаження вхідних даних, обчислювальні алгоритми обробки даних імпульсних відгуків (процедуру ідентифікації), оптимізацію амплітуд тестових імпульсних сигналів (регуляризацію) та

вейвлет-фільтрацію, відповідно. Модуль візуалізації даних дозволяє будувати дво- (Sections) та тривимірні (Surface) графіки – моделі НДС, що ідентифікуються.

Досліджено ефективність застосування інформаційної моделі Вольтерра для розпізнавання поточного технічного стану вентиляно-реактивного двигуна (ВРД). В процесі експлуатації ВРД необхідно періодично контролювати величину повітряного зазору між ротором і статором, використовуючи дані непрямих вимірювань за допомогою побудови інформаційних моделей. Отримані ЯВ першого порядку практично не залежать від зміни величини контрольованого параметра, однак ЯВ другого порядку істотно змінюється за величиною і, отже, можуть використовуватися як джерело первинних даних при побудові діагностичних моделей.

Побудовано математичну модель фотосинтетичного реакційного центру (ФРЦ) у вигляді ЯВ. Проведено серію вимірювань коефіцієнта оптичного поглинання адаптованих до темряви і попередньо опромінених світлом зразків ФРЦ — реакцій на зондувальні світлові імпульсні впливи різної інтенсивності. Тривалість імпульсів була фіксованою і становила кілька десятків мілісекунд, амплітуда (інтенсивність) підбиралася експериментально з умови забезпечення мінімуму похибки оцінки ЯВ. В якості вихідного сигналу розглянуто зміну поглинання світла в зразках ФРЦ —  $\Delta A(t)$  в області  $\lambda=860-870$  нм, яка відповідає числу фотозбуджених ФРЦ. Отримано оцінки ЯВ першого, другого і третього порядків. Таким чином, деталізовано структуру ФРЦ, який розглядається як нелінійний інерційний об'єкт з невідомою структурою.

Встановлено, що ЯВ першого порядку (рис. 3) для різних зразків ФРЦ практично збігаються з точністю до похибок експерименту, тобто, в лінійному наближенні, електрон-транспортні реакції ФРЦ не залежать від тривалості фотозбудження. Водночас ЯВ другого порядку (рис. 4) кардинально відрізняються і зберігають ці властивості протягом тривалого часу. Таким чином, вперше отримано кількісні оцінки конформаційної «пам'яті» ФРЦ про попереднє фотозбудження.

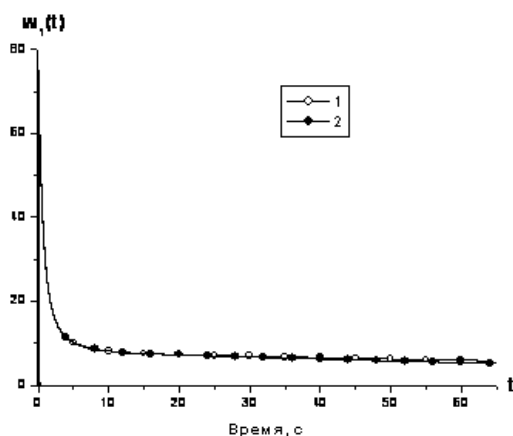


Рисунок 3 – ЯВ 1-го порядку: 1 – для об'єкта без попередньої фотоекспозиції; 2 – для об'єкта, витриманого після фотоекспозиції в темряві протягом 500 с і 1000 с.

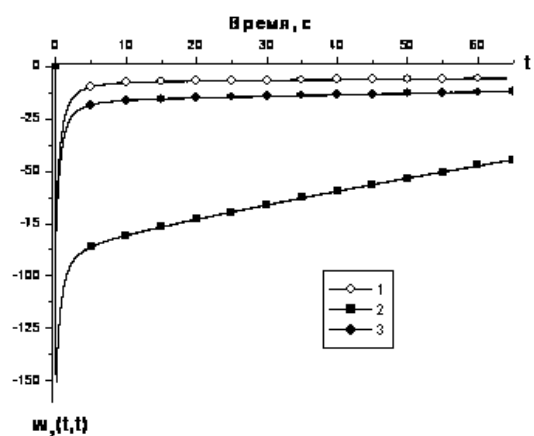


Рисунок 4 – Діагональні перетину ядра Вольтерра 2-го порядку: 1 – для об'єкта без попередньої фотоекспозиції; 2 – для об'єкта, витриманого після фотоекспозиції в темряві протягом 500 с; 3 – протягом 1000 с.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У роботі вирішено важливу науково–практичну задачу, яка полягає в підвищенні точності і обчислювальної стійкості методів детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді моделей Вольтерра на основі експериментальних даних спостережень «вхід – вихід» з урахуванням похибок вимірювань, у створенні на основі теоретичних і експериментальних досліджень ефективних інструментальних алгоритмічних та програмних засобів оцінки ядер Вольтерра у часовій області в умовах неповної апріорної інформації про систему, що досліджується.

1. Набули подальшого розвитку методи детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра з використанням нерегулярних імпульсних послідовностей, які полягають у застосуванні методу регуляризації, при цьому, як параметр регуляризації, використовується амплітуда тестових імпульсів і застосовується вейвлет–фільтрація для згладжування оцінок ядер Вольтерра, що дозволяє підвищити точність і завадостійкість процедури ідентифікації.

2. Удосконалено апроксимаційний метод ідентифікації НДС на основі моделей Вольтерра, який полягає у виборі амплітуд тестових сигналів і відповідних масштабуючих коефіцієнтів у процедурі обробки сигналів–відгуків. Удосконалення зводиться до мінімізації методичної похибки при виділенні парціальних складових з відгуку об'єкта ідентифікації, що дозволяє отримувати більш точні оцінки ядер Вольтерра. Для підвищення обчислювальної стійкості розроблених алгоритмів ідентифікації застосовується шумозаглушення до отримуваних оцінок багатовимірних ядер Вольтерра, засноване на вейвлет–перетворенні, що дозволяє отримати згладжені розв'язки і зменшити похибку ідентифікації в 1,5 – 2,5 рази.

3. Розроблено новий робастний метод детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра у часовій області, який, на відміну від інтерполяційного методу, де для чисельного диференціювання використовуються формули в кінцевих різницях з наперед визначеною кількістю експериментальних досліджень об'єкта ідентифікації, пропонується розв'язувати відповідні інтегральні рівняння Вольтерра першого роду, для чисельної реалізації яких може використовуватися необмежене зверху число експериментів, що дає можливість підвищити точність обчислення похідних, а отже, і точність ідентифікації.

4. Запропоновано, для прискорення обчислень процесів ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді моделей Вольтерра, застосування технології транспарентного розпаралелювання на основі замовлень на багатоядерних процесорах і кластерах, та розроблено відповідні інструментальні програмні засоби автоматизованого створення паралельних додатків прикладних програм.

5. Створено інструментальні програмні засоби на платформі системи Matlab, що реалізують розроблені обчислювальні алгоритми детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді ядер Вольтерра.

6. Побудовано математичну модель у вигляді ядер Вольтерра вентильно-реактивного електродвигуна з метою діагностики його поточного стану. При цьому отримані ядра першого порядку практично не залежать від зміни величини контролюваного параметра, однак діагональні перетини ядра другого порядку істотно змінюється за величиною, і, отже, можуть ефективно використовуватися, як джерело

первинних даних при побудові діагностичних моделей.

7. Отримано математичну модель фотосинтетичного реакційного центру у вигляді ядер Вольтерра. Встановлено, що ядра першого порядку для різних зразків ФРЦ практично збігаються з точністю до похибок експерименту, тобто в лінійному наближенні електрон–транспортні реакції ФРЦ не залежать від тривалості фотозбудження, в той же час ядра другого порядку істотно відрізняються і зберігають ці властивості протягом тривалого часу. Таким чином вперше отримано кількісні оцінки конформаційної «пам'яті» ФРЦ про попереднє фотозбудження.

8. Результати дисертаційних досліджень прийнято до впровадження у Відділенні гідроакустики Морського гідрофізичного інституту НАН України (м. Одеса), впроваджено у наукові дослідження кафедри «Електричні машини» ОНПУ, у навчальний процес і наукові дослідження кафедри морського радіозв'язку Національного університету «Одеська морська академія» МОН України та кафедри «Комп'ютеризовані системи управління» ОНПУ.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

Всього за темою дисертації було надруковано 30 наукових праць, з них [14] проіндексовано у світових наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore, [12] – у ScienceDirect, [1, 3–9, 13, 15–17] – у Google Scholar, [5–10, 15, 16] – у РІНЦ.

#### **Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації**

1. Павленко С. В. Робастный метод идентификации нелинейных динамических систем на основе моделей Вольтерра / С. В. Павленко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ : «Техніка». – 2013. – Вип. 09(85). – С. 84 – 88.

2. Павленко С. В. Робастное оценивание ядер Вольтерра нелинейных систем по данным измерений импульсных откликов / С. В. Павленко // Информатика и математические методы в моделировании. – Одесса: ОНПУ. – 2012. – Том 2. – №4. – С. 380 – 387.

3. Павленко С. В. Применение вейвлет–фильтрации в процедуре идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра / С. В. Павленко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков. – 2010. – №6/4 (48). – С. 65 – 70.

4. Pavlenko V. Noise Immunity Research for Nonlinear Dynamical Systems Identification Based on Volterra Model in Frequency Domain / Vitaliy Pavlenko, Sergei Pavlenko, Viktor Speransky // International Journal of Computing. – Vol. 13. – Issue 1. – Ternopil: [Ternopil National Economic University], 2014. – P. 34-41. – DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26310>

5. Григоренко С. Н. Информационная технология диагностирования состояний электродвигателей на основе моделей Вольтерра / С. Н. Григоренко, С. В. Павленко, В. Д. Павленко, А. А. Фомин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т.4. – №11 (70). – С. 38-43. (DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26310>)

6. Павленко С. В. Оптимизация вычислительных алгоритмов аппроксимационного метода идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра / С. В. Павленко, С. А. Положаенко // Информатика и математические методы в моделировании. – Одесса : ОНПУ. – 2013. – Том 3. – №2. – С. 102-112.

7. Павленко С. В. Методы идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра с помощью тестовых полиимпульсных воздействий / С. В. Павленко, В. Д. Павленко, С. А. Положаенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – № 62 (968) – С.155-161.
8. Павленко В. Д. Исследование эффективности методов детерминированной идентификации нелинейных систем в виде ядер Вольтерра / В. Д. Павленко, С. В. Павленко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2011. – Вып. 2 (36). – С. 195–203.
9. Павленко В. Д. Эффективность методов извлечения диагностической информации из данных идентификации объектов контроля в виде ядер Вольтерра / В. Д. Павленко, С. В. Павленко, В. М. Ильин // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ : «Техніка». – 2011. – Вип. 04(80). – С. 154 – 161.
10. Павленко В. Д. Исследование погрешностей аппроксимационного метода идентификации нелинейных динамических объектов в виде ядер Вольтерра / В. Д. Павленко, С.В. Павленко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ : «Техніка». – 2010. – Вип. 01(77). – С. 102–108.
11. Метод диагностики непрерывных систем на основе моделей в виде ядер Вольтерра / В. Д. Павленко, А. А. Фомин, С. В. Павленко, В. М. Ильин // Моделювання та керування станом еколого–економічних систем регіону: Збірник праць. – Київ : МННЦІТІС, 2008. – Вип. 4. – С. 180 – 191.
12. Identification Accuracy of Nonlinear System based on Volterra Model in Frequency Domain / V. Pavlenko, A. Fomin., S. Pavlenko, Y. Grigorenko // AASRI Procedia [American Applied Sciences Research Institute]. – 2013. – Vol. 4. – P. 297-305 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.aasri.2013.10.044>).
13. Pavlenko V. Identification of systems using Volterra model in time and frequency domain / Vitaliy Pavlenko, Sergei Pavlenko, Viktor Speransky // In book: «Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing». Chapter 10. V. Haasz and K. Madani (Eds.) – River Publishers, 2014. – P.233-270. – ISBN 978-87-93102-73-6
14. Pavlenko, V. Interpolation Method of Nonlinear Dynamical Systems Identification Based on Volterra Model in Frequency Domain / V. Pavlenko, S. Pavlenko and V. Speransky // Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2013), 15-17 September 2013, Berlin, Germany. – 2013. – Vol. 2. – P.138-142.
15. Pavlenko V. D. Application of parallel computing with using of orders based transparent parallelizing technology for the modeling and simulation [Internet resource] / V. D. Pavlenko, V. V. Burdejnyj, S. V. Pavlenko // VI Международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления» (РАСО'2012), 24–26 октября 2012 г., Россия, Москва, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – С. 224-230.
16. Павленко В. Д. Эффективность методов детерминированной идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра [Интернет ресурс] / В. Д. Павленко, С. В. Павленко // Материалы конференции “Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах” (УТЭОСС–2012) в рамках 5-ой Российской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ–2012), 9–11 октября 2012 г., Санкт–Петербург, Россия. – СПб : ГНЦ РФ ОАО ”Концерн” ЦНИИ “Электроприбор”, 2012. – С. 455 – 458.

17. Pavlenko V. D. Method of Implementation of Technology of Orders Based Transparent Parallelizing for Solving Computationally Complex Problems on Cluster / V. D. Pavlenko, V. V. Burdejnyj, S. V. Pavlenko // 10th IEEE East–West Design & Test Symposium (EWDTS 2012), Kharkov, Ukraine, September 14–17, 2012.- P. 353-355.

**Опубліковано праці апробаційного характеру**

18. Кравченко Є. І. Апаратно-програмні засоби ідентифікації каналів зв'язку на основі моделі Вольтерра в частотній області / Є. І. Кравченко, С. В. Павленко, В. Д. Павленко // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей V міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016), Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2016. – Т. II. – С. 60-61.

19. Romanov D. Yu. Software Engineering for Deterministic Identification of Non-linear Dynamical Systems in the Form Volterra Kernels / D. Yu. Romanov, S. V. Pavlenko, V. D. Pavlenko // Інформатика, управління та штучний інтелект: Матеріали III міжнар. наук.-техн. конф. студентів, магістрів та аспірантів «ІУП-2016», 23 – 25 листопада 2016, Харків. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – С. 74.

20. Павленко В. Д. Построение информационной модели реакционного центра фотосинтетических бактерий в виде ядер Вольтерра / В. Д. Павленко, С. В. Павленко // Проблемы информатики и моделирования: тезисы XII междунар. науч.–техн. конф., Ялта, НТУ “ХПИ”, 24–30 сентября 2012 г. – Харьков–Ялта : НТУ «ХПИ», 1012. – С. 69.

21. Pavlenko V. D. Organization of intelligent computations in clusters using transparent parallelizing principles / V. D. Pavlenko, V. V. Burdeinyi, S. V. Pavlenko // Computational Intelligence (Results, Problems and Perspectives): Proceedings of thy First International Conference (10-13 May 2011, Cherkasy). – Cherkasy : McLaut, 2011. - P. 71-72.

22. Павленко С. В. Информационная оптимизация системы диагностического контроля нелинейных динамических объектов / С. В. Павленко, В. Д. Павленко // Информационные процессы и технологии «Информатика – 2010»: Материалы III Всеукр. науч.–практ. конф. молодых ученых и студентов, 26–30 апреля 2010. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2010.–С. 34-37.

23. Павленко С. В. Применение вейвлет-фильтрации при идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра с помощью компенсационного метода / С. В. Павленко // Современные информационные и электронные технологии: Труды XI международной научно–практической конференции СИЭТ–2010, 24—28 мая 2010, Одесса. – Одесса: Изд-во “Политехперіодика”, 2010. – Т. 1. – С. 40.

24. Павленко С. В. Методы редукции диагностических моделей объектов контроля, формируемых на основе ядер Вольтерра [Интернет–ресурс] / С. В. Павленко // Математика. Компьютер. Образование: Тез. XVI Междунар. конф. МКО’2009, г. Пушкино Московской обл., 19–24 января 2009. – М. : МГУ, 2009. –<http://www.mce.su/rus/program/>.

25. Павленко С. В. Анализ эффективности методов детерминированной идентификации нелинейных систем с помощью многомерных весовых функций / С. В. Павленко // «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Материалы 10–го Международного молодежного форума, г. Харьков, 10–12 апреля 2006 г. – Харьков : ХНУРЕ, 2006. – С. 516.

26. Павленко С. В. Погрешности идентификации нелинейных систем в виде рядов Вольтерра с помощью импульсных тестовых сигналов / С. В. Павленко // «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Материалы 9-го Международного молодежного форума, г. Харьков, 19–21 апреля 2005 г. – Харьков : ХНУРЭ, 2005. – С. 485.

27. Павленко С. В. Исследование эффективности методов сжатия при построении диагностических моделей объектов контроля на основе ядер Вольтерра / С. В. Павленко // «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Материалы 8-го Международного молодежного форума, г. Харьков, 13–15 апреля 2004 г. – Харьков : ХНУРЭ, 2004. – Ч. 2. – С. 146.

### **Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

28. Интеллектуальные системы распознавания состояний режущих инструментов: Монография / А. Г. Деревянченко, В. Д. Павленко, А. А. Фомин, С. В. Павленко. – Одесса : Астропринт, 2013. – 300 с. – ISBN 978-966-190-658-6

## **АНОТАЦІЯ**

**Павленко С. В. Методи та інструментальні засоби ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2016.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено нові ефективні методи і обчислювальні алгоритми детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у часовій області, та відповідні інструментальні програмні засоби, які забезпечують побудову моделей об'єктів ідентифікації у вигляді послідовності ядер Вольтерра за експериментальними даними спостережень «вхід – вихід» з урахуванням похибок вимірювань.

Розроблено новий робастний метод детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра у часовій області, для чисельної реалізації якого може використовуватися необмежена зверху кількість експериментів з системою «вхід – вихід», а застосування методу регуляризації, при обробці зашумлених експериментальних даних, дозволяє підвищити точність і завадостійкість процедури ідентифікації.

Отримали подальший розвиток методи детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра у часовій області з використанням нерегулярних імпульсних послідовностей: компенсаційний, апроксимаційний і інтерполяційний, в яких для підвищення точності і завадостійкості ідентифікації використовується процедура оптимізації амплітуди тестових імпульсів і застосовується вейвлет-фільтрація для згладжування оцінок ядер Вольтерра.

Встановлено ефективність розроблених методів та відповідних інструментальних засобів при їх впровадженні в практику діагностичних досліджень технічних і біологічних об'єктів в промисловості і науково-дослідних організаціях.

**Ключові слова:** нелінійні динамічні системи, математичне моделювання, комп'ютерне моделювання, моделі Вольтерра, ядра Вольтерра, ідентифікація, інструментальні обчислювальні засоби ідентифікації, технологія програмування паралельних обчислень, модельна діагностика.

## АННОТАЦИЯ

**Павленко С. В. Методы и инструментальные средства идентификации нелинейных динамических систем на основе моделей Вольтерра. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2016.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые эффективные методы и вычислительные алгоритмы детерминированной идентификации нелинейных динамических систем во временной области, и соответствующие инструментальные программные средства, которые обеспечивают построение модели объектов идентификации в виде последовательности ядер Вольтерра по экспериментальным данным наблюдений «вход-выход» с учетом погрешностей измерений.

Получили дальнейшее развитие методы детерминированной идентификации нелинейных динамических систем на основе моделей Вольтерра с использованием нерегулярных импульсных последовательностей, которые заключаются в применении метода регуляризации, при этом, в качестве параметра регуляризации, используется амплитуда тестовых импульсов и применяется вейвлет-фильтрация для сглаживания оценок ядер Вольтерра, что позволяет повысить точность и помехоустойчивость процедуры идентификации.

Усовершенствован аппроксимационный метод идентификации объектов контроля на основе моделей Вольтерра, который заключается в выборе амплитуд тестовых сигналов и соответствующих масштабирующих коэффициентов в процедуре обработки сигналов–откликов, основанный на минимизации методической погрешности выделения парциальных составляющих из отклика объекта идентификации, что позволяет получать более точные оценки ядер Вольтерра. Для повышения вычислительной устойчивости разработанных алгоритмов идентификации применяются процедуры шумоподавления к получаемым оценкам многомерных ядер Вольтерра, основанные на вейвлет-преобразовании, что позволяет получить сглаженные решения и уменьшить погрешность идентификации в 1,5–2,5 раза.

Впервые предложен робастный метод детерминированной идентификации нелинейных динамических систем на основе моделей Вольтерра во временной области. Данный метод, в отличие от интерполяционного метода, где для численного дифференцирования используются формулы в конечных разностях с предопределенным количеством экспериментальных исследований объекта идентификации, предлагается решать соответствующие интегральные уравнения Вольтерра первого рода, для численной реализации которых может использоваться неограниченное сверху число экспериментов, что дает возможность повысить точность вычисления производных, а следовательно, и точность идентификации.

Построена математическая модель в виде ядер Вольтерра вентильно-реактивного электропривода с целью диагностики его текущего состояния. Полученные ядра первого порядка практически не зависят от изменения величины контролируемого параметра, однако диагональные сечения ядра Вольтерра второго порядка существенно изменяется по величине, и, следовательно, могут использоваться в качестве источника первичных данных при построении диагностических моделей.

Построена математическая модель фотосинтетического реакционного центра в виде ядер Вольтерра. Установлено, что при различной длительности фотовозбуждения, ядра первого порядка для различных образцов ФРЦ практически совпадают с точностью до ошибок эксперимента, т.е. в линейном приближении электрон-транспортные реакции РЦ не зависят от длительности фотовозбуждения. В то же время ядра второго порядка существенно отличаются и сохраняют эти свойства в течении длительного времени.

Предложено, для ускорения вычислений процесса идентификации нелинейных динамических систем в виде моделей Вольтерра, применение технологии транспарентного распараллеливания в кластерных системах на основе заказов, что, в отличие от других технологий программирования параллельных вычислений на кластерах и многоядерных процессорах, обеспечивает высокую эффективность распараллеливания и уменьшает трудоемкость разработки параллельных приложений прикладных программ.

**Ключевые слова:** нелинейные динамические системы, математическое моделирование, компьютерное моделирование, модели Вольтерра, ядра Вольтерра, идентификация, инструментальные вычислительные средства, технология программирования параллельных вычислений, модельная диагностика.

## ABSTRACT

**Pavlenko V. D. Methods and tools for identification nonlinear dynamical systems with using Volterra models.** – Manuscript.

Thesis for degree the candidate in technical sciences, speciality 01.05.02 – mathematical modelling and computing methods. – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2016.

On the basis of theoretical and experimental studies developed by the new effective methods and computational algorithms for the identification of nonlinear dynamic systems in the time domain, and the corresponding software tools, which provide building models of objects identification in the form of a sequence of Volterra kernels on the experimental data of observations of «input - output» to account for any variations in measurements.

A new robust method of deterministic identification of non-linear dynamic systems on the basis of model Volterra in time region, for the numerical realization of which can be used unlimited top number of experiments with the «input-output», and the application of the method of regularization, the processing of noisy experimental data allows to increase the accuracy and noise immunity of the procedure for identification.

Received further development of the methods of the identification of non-linear dynamic systems on the basis of model Volterra in the time domain using irregular pulse sequences: a compensation, approximated and interpolation in which to improve the accuracy and immunity of identification is used procedure of optimization of the amplitude test pulse and apply the wavelet filtering for smoothing estimates of Volterra kernels.

Set the effectiveness of the developed methods and appropriate tools for their introduction in the practice of diagnostic studies of technical and biological objects in the industry and scientific research organizations.

**Keywords:** nonlinear dynamic systems, modeling and simulation, Volterra models, Volterra kernels, identification, instrumental computing means, technology programming parallel computing, diagnostics model.

