

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАСРІ Моханад Махмуд



УДК 681.5.015.52

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ
НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ДІАГНОСТИКИ**

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання
та обчислювальні методи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Павленко Віталій Данилович,
Одеський національний політехнічний університет,
професор кафедри комп'ютеризованих систем
управління

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Атаманюк Ігор Петрович,
Миколаївський національний аграрний університет,
завідувач кафедри вищої та прикладної математики;

доктор технічних наук, доцент
Палагін Володимир Васильович,
Черкаський державний технологічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки та інформаційно-
телекомунікаційних систем.

Захист відбудеться 29 жовтня 2015 року о 15-30 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: м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

Автореферат розіслано 28 вересня 2015 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. О. Фомін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З науково-технічним прогресом нерозривно пов'язано як зростання складності технічних систем і пристроїв, які проектуються та (або) досліджуються, так і підвищення вимог до ефективності їх функціонування. У зв'язку з цим особливого значення набувають задачі побудови адекватних математичних моделей (ММ) досліджуваних систем і процесів на основі даних експериментів «вхід-вихід» — задачі ідентифікації (що дозволяє для технічних систем підвищити: точність і достовірність результатів моделювання — при проектуванні, достовірність розпізнавання технічного стану — при діагностуванні, а також ефективність функціонування — на етапі експлуатації).

Методи математичного моделювання та експеримент є основними засобами дослідження складних нелінійних динамічних систем (НДС). Для опису НДС, які розглядаються як «чорний ящик», часто використовується апарат інтегродиференціальних рівнянь Вольтерра (РВ). При цьому нелінійні та динамічні властивості системи повністю характеризуються послідовністю багатовимірних вагових функцій — ядер Вольтерра (ЯВ). Задача ідентифікації, у вигляді моделі Вольтерра, полягає у визначенні багатовимірних вагових функцій на основі даних вимірювань «вхід-вихід» НДС.

У розвиток теорії ідентифікації та моделювання НДС на основі ММ Вольтерра та її практичні додатки значний вклад внесли українські вчені: О. Г. Івахненко, А. Ф. Верлань, Ю. Ю. Коляденко, Б. Р. Марченко, Я. М. Матвійчук, В. Д. Павленко, В. В. Поповський, А. О. Серков та зарубіжні вчені: Я. З. Цыпкин, Ю. С. Попков, О. Н. Киселёв, Б. Л. Шмульян, Н. П. Петров, К. А. Пупков, В. И. Капалин, А. С. Ющенко, А. С. Апарцин, Д. Н. Сидоров, Л. В. Данилов, А. А. Ланнэ, Е. Б. Соловьёва, N. Wiener, H. L. Van Trees, M. Schetzen, L. O. Chua, W. J. Rugh, G. B. Giannakis, E. Serpedin, D. T. Westwick та інші.

Однак, існуючі на даний час прикладні алгоритми ідентифікації та моделювання нелінійних систем на основі РВ все ще не дозволяють повною мірою використовувати можливості цього математичного апарату. Це обумовлено цілим рядом причин, найбільш важливими з яких є: недоврахування істотного впливу похибок вимірювань на результат ідентифікації в алгоритмах експериментального визначення ЯВ (що обмежує їх застосування в реальних умовах), а також недостатній рівень розробки програмно-алгоритмічного забезпечення задач ідентифікації НДС на основі моделей Вольтерра.

Удосконалення методів та засобів математичного і комп'ютерного моделювання неперервних НДС на основі моделей Вольтерра, призначених для використання з метою всебічного дослідження об'єктів різної фізичної природи, створення інформаційних технологій та інтелектуальних обчислювальних систем діагностування є **актуальною** науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з пріоритетними напрямками науково-дослідних робіт (НДР) Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ), згідно координаційних планів МОН України, зокрема, в рамках наукових досліджень за держбюджетними НДР за участю автора: по темі №18-63 «Моделі складних

технологічних об'єктів і процесів та апаратно-програмні засоби їх реалізації в системах управління», ДР № 0109U008452 (2009 – 2012); по темі № 671-51 «Методи та інструментальні засоби діагностичного контролю електричних двигунів на основі непараметричних динамічних моделей», згідно з бюджетною програмою «Прикладні дослідження і розробки за напрямками науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ» (КПКВ 2201040), ДР № 0110U008198 (2011 – 2012); по темі № 80-63 «Моделі та інформаційні технології діагностування і управління складними динамічними об'єктами» у відповідності з Наказом 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, ДР №0113U007625 (2013 – 2016); по темі № 697-63 «Методологічні основи та інструментальні засоби інформаційної технології діагностування станів неперервних об'єктів із застосуванням моделей Вольтерра» згідно з Законом України від 12.10.2010 №2519-17: «3.1. Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України та сталого розвитку суспільства і держави» (2015 – 2017).

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності побудови математичних моделей нелінійних динамічних систем у вигляді інтегростепеневих рядів і поліномів Вольтерра шляхом розробки ефективних методів і обчислювальних алгоритмів та інструментальних програмних засобів ідентифікації, орієнтованих на використання в діагностичних дослідженнях.

Основними **задачами** дисертаційної роботи є:

- здійснити аналіз існуючих методів ідентифікації НДС з використанням ММ у вигляді рядів Вольтерра, та їх застосування в діагностичних дослідженнях;
- розробити методи побудови моделей Вольтерра на основі даних активного експерименту «вхід-вихід» з використанням тестових поліімпульсних і багатоступінчастих сигналів;
- розробити обчислювальні алгоритми методів ідентифікації, стійкі до похибок вимірювань, і програмні засоби, що їх реалізують;
- здійснити аналіз похибок побудови моделей для тестових об'єктів при використанні алгоритмів детермінованої ідентифікації за допомогою тестових поліімпульсних і багатоступінчастих сигналів;
- застосувати розроблені методи ідентифікації при створенні інтелектуальної системи діагностування об'єктів різної фізичної природи.

Об'єктом дослідження є процес ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі математичних моделей у вигляді інтегростепеневих рядів та поліномів Вольтерра.

Предметом дослідження є методи, обчислювальні алгоритми та програмні інструментальні засоби ідентифікації систем на основі моделей Вольтерра.

Методи досліджень. При розв'язанні поставлених в дисертаційній роботі задач використовуються методи: теорії автоматичного управління (непараметричної ідентифікації на основі рядів і поліномів Вольтерра), теорії випадкових процесів і

математичної статистики; методи обчислень: найменших квадратів та регуляризації некоректних задач, вейвлет-фільтрації; а також методи імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному.

Вперше запропоновано і теоретично обґрунтовано формальне співвідношення, яке представляє універсальний вираз для оцінки перетинів багатовимірних перехідних характеристик (n -вимірних інтегралів від ядер Вольтерра) у вигляді лінійної комбінації відгуків системи, яка ідентифікується, на багатоступінчасті тестові впливи, що дало змогу алгоритмізувати і спростити програмну реалізацію процедури ідентифікації.

Отримав подальший розвиток метод побудови апроксимаційної моделі Вольтерра НДС у часовій області з використанням поліімпульсних і багатоступінчастих тестових сигналів, який відрізняється від відомого застосуванням методу найменших квадратів з регуляризацією та вибором оптимальної величини кроку по амплітуді тестових сигналів, що дозволяє підвищити точність і обчислювальну стійкість процедури ідентифікації.

Удосконалено метод побудови апроксимаційної моделі Вольтерра НДС у часовій області, який відрізняється застосуванням вейвлет-фільтрації для згладжування експериментальних даних і оцінок ядер Вольтерра, що підвищує точність і забезпечує гладкість результатів ідентифікації.

Отримала подальший розвиток інформаційна технологія використання моделей Вольтерра для діагностики складних систем, що дозволяє підвищити точність моделювання об'єктів контролю і, як наслідок, підвищити достовірність діагностування в просторі ознак, сформованих на основі ядер Вольтерра апроксимаційної моделі.

Практичне значення отриманих в дисертації результатів полягає у створенні інструментальних програмних засобів, що реалізують обчислювальні алгоритми детермінованої ідентифікації НДС у вигляді багатовимірних ядер Вольтерра і багатовимірних перехідних функцій та у впровадженні їх у наукові дослідження і навчальний процес.

В пакеті прикладних програм (ППП) Matlab (реквізити використовуваного пакету License number: 21808. Platform: All. License option: Group Term: Perpetual. Use: Classroom) створено комплекс програм ідентифікації НДС на основі моделей Вольтерра у часовій області — «Tools of Identification Nonlinear Dynamic Objects» (TINDO), застосування якого дозволяє підвищити точність оцінювання динамічних характеристик у 2–4 рази.

За допомогою розроблених обчислювальних алгоритмів та програмних засобів обробки експериментальних даних (відгуків на тестові багатоступінчасті сигнали) отримано непараметричну динамічну модель око-рухового апарату (ОРА) людини з урахуванням його нелінійних та інерційних властивостей у вигляді перехідної і двовимірної перехідної функцій. Отримані результати ідентифікації ОРА надають можливість ранньої діагностики нейродегенеративного процесу при хворобі Паркінсона і синдрому паркінсонізму, і можуть використовуватися в діагностичних дослідженнях при встановленні стадій захворювання, а також при апаратній

корекції зору, в людино-машинних системах при професійному відборі операторів швидкоплинних технологічних процесів.

Побудовано апроксимаційну модель у вигляді ЯВ вентильно-реактивного двигуна (ВРД) з метою діагностики його поточного стану. При цьому встановлено, що моменти ЯВ другого порядку характеризуються найбільшою стійкістю показника якості діагностування – ймовірності правильного розпізнавання (ЙПР) – до похибок вимірювань відгуків порівняно із результатами класифікації на основі відліків ЯВ другого порядку з заданою дискретністю. Це дозволяє рекомендувати для практичного використання моменти ЯВ, як ефективного джерела первинних даних при побудові діагностичних моделей ВРД.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено в ТОВ «Одеське спеціальне конструкторське бюро спеціальних верстатів» (ОСКБ СВ) і використовуються для непрямого контролю і діагностики електроприводів.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри комп'ютеризованих систем управління ОНПУ в дисциплінах: «Ідентифікація систем управління», «Моделювання неперервних систем», «Системи інтелектуальної обробки даних», «Програмне забезпечення сучасних ЕОМ», а також при розробці тем магістерських дипломних робіт.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно та опубліковані в 11 наукових працях. Статті [1, 2] опубліковано без співавторів. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: розробка і реалізація інструментальних алгоритмічних і програмних засобів підвищення точності та обчислювальної стійкості оцінювання ЯВ на основі даних експериментів «вхід-вихід», виконання досліджень ефективності методів ідентифікації [6, 7, 9–11]; теоретичне обґрунтування методу побудови апроксимаційної моделі Вольтерра НДС з застосуванням поліімпульсних тестових сигналів, проведення експериментальних досліджень за допомогою засобів комп'ютерного моделювання [3]; розробка інформаційної технології отримання експериментальних даних для побудови нелінійної динамічної моделі ОРА, створення програмних засобів ідентифікації НДС на основі моделей Вольтерра у часовій області та їх застосування для побудови моделі ОРА [5]; застосування моментів ЯВ при формуванні простору діагностичних ознак для розпізнавання станів ВРД та дослідження їх діагностичної вартості [4, 8].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідалися і обговорювалися на: 50-й Ювілейній науково-технічній конференції студентів та молодих дослідників ОНПУ (Одеса, 2015); The 9th International Middle Eastern Simulation Multiconference, MESM'2008 (Amman, Jordan, 2008); The 16th International Conference «Mathematics. Computing. Education», MCE'2009 (Pushchino, Russia, 2009); Першій міжнародній науковій конференції студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології», МІТ-2011 (Одеса, 2011); 3th Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано– та мікроелектроніки», PREDT-2013 (Чернівці, 2013); Міжнародному науковому семінарі НАН України «Інтегральні рівняння в математичному та комп'ютерному моделюванні» (Київ,

2014); XVII Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції "Людина і Космос" (м. Дніпропетровськ, Україна, 2015); The 11th International scientific conference "Intellectual Systems of Decision Making and Problems of Computational Intelligence", ISDMCI'2015 (Zaliznyj Port, Ukraine, 2015); The 9th International Conference on Computer Engineering and Applications, CEA-2015 (Dubai, United Arab Emirates, 2015).

Публікації. Результати дисертаційних досліджень опубліковано в 11 наукових роботах, з яких: 5 – у наукових журналах і збірниках наукових праць, включених до Переліку фахових видань України; 2 – у зарубіжних виданнях, які входять до наукометричних баз; 4 – у збірниках матеріалів і тез конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел із 178 найменувань на 22 окремих сторінках, чотирьох додатків на 24 сторінках, 10 таблиць і 72 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 179 сторінок, у тому числі 133 сторінок основного тексту. Таблиць і рисунків, що займають повну сторінку – 13.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дається загальна характеристика роботи, обґрунтовується тема дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, наведено основні наукові та практичні результати, які виносяться на захист.

Перший розділ — «*Моделі Вольєрра та методи ідентифікації нелінійних динамічних систем*» — містить огляд сучасного стану методів побудови ММ НДС у вигляді рядів Вольєрра на основі даних експериментів «вхід–вихід», застосування моделей Вольєрра для розв’язання практичних задач, обґрунтовано постановки задач дисертаційної роботи.

Співвідношення «вхід–вихід» для неперервної НДС з одним входом і одним виходом може бути представлено РВ

$$y(t) = w_0(t) + \int_0^t w_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \iint_{00}^{tt} w_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 + \\ + \iiint_{000}^{ttt} w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1d\tau_2d\tau_3 + \dots = w_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t), \quad (1)$$

де $x(t)$ і $y(t)$ — вхідний і вихідний сигнали системи, відповідно; $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ — вагова функція або ядро Вольєрра n -го порядку ($n=1,2,3,\dots$), симетрична щодо дійсних змінних τ_1, \dots, τ_n функція; $y_n(t)$ — парціальна складова (ПС) відгуку системи n -вимірний інтеграл згортки); $w_0(t)$ — вільний член РВ (при нульових початкових умовах $w_0(t) \equiv 0$); t — поточний час.

В загальному випадку для НДС з багатьма входами і багатьма виходами модель Вольєрра має вигляд

$$\begin{aligned}
y_j(t) = & \sum_{i_1=1}^v \int_0^t w_{i_1}^j(\tau) x_{i_1}(t-\tau) d\tau + \sum_{i_1=1}^v \sum_{i_2=1}^v \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2}^j(\tau_1, \tau_2) x_{i_1}(t-\tau_1) x_{i_2}(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \\
& + \sum_{i_1=1}^v \sum_{i_2=1}^v \sum_{i_3=1}^v \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2 i_3}^j(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x_{i_1}(t-\tau_1) x_{i_2}(t-\tau_2) x_{i_3}(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots,
\end{aligned} \tag{2}$$

де $y_j(t)$ — відгук НДС на j -му виході ($j=1,2,\dots,\mu$) в поточний момент часу t при нульових початкових умовах; $x_1(t), \dots, x_v(t)$ — вхідні впливи; $w_{i_1 \dots i_n}^j(\tau_1, \dots, \tau_n)$ — ядра Вольтерра n -го порядку по i_1, \dots, i_n входам і j -му виходу, симетричні відносно дійсних змінних τ_1, \dots, τ_n функції; v, μ — кількість входів і виходів НДС відповідно.

На практиці РВ замінюють поліномом і, зазвичай, обмежуються кількома першими членами ряду. Побудова моделі НДС у вигляді РВ полягає у виборі виду тестових впливів $x(t)$ і розробці алгоритму, який дозволяв би за вимірними реакціями $y(t)$ виділяти ПС $y_n(t)$ і визначати на їх основі 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 передавальні функції, відповідно для моделювання системи у часовій або частотній області.

Ідентифікація, за своєю суттю, належить до обернених задач, при розв'язанні яких виникають труднощі обчислювального плану, обумовлені некоректністю постановки задачі. Одержувані розв'язки виявляються нестійкими до похибок вхідних даних — вимірювань відгуків НДС, що ідентифікується. При використанні моделей Вольтерра необхідно також розв'язати задачу 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 $x(t)$.

У другому розділі — «Обчислювальні методи оцінки ядер Вольтерра на основі даних експерименту «вхід-вихід» — отримали подальший розвиток інтерполяційний метод оцінки ядер Вольтерра НДС на основі даних вимірювань імпульсних відгуків, метод побудови апроксимаційної моделі Вольтерра на основі регуляризованого методу найменших квадратів з використанням поліімпульсних і багатоступінчастих тестових сигналів.

Розвинуто метод побудови апроксимаційної моделі Вольтерра НДС. Метод ідентифікації НДС на основі РВ у часовій області ґрунтується на апроксимації відгуку НДС $y(t)$ на довільний детермінований сигнал $x(t)$ у вигляді інтегростепеневого полінома N -го порядку (N — порядок апроксимаційної моделі):

$$\hat{y}_N(t) = \sum_{n=1}^N \hat{y}_n(t) = \sum_{n=1}^N \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t-\tau_i) d\tau_i. \tag{3}$$

Нехай на вхід НДС по черзі подаються тестові сигнали $a_1 x(t), a_2 x(t), \dots, a_L x(t)$; де a_1, a_2, \dots, a_L — різні дійсні числа, що задовольняють умові $0 < |a_j| \leq 1$ для $\forall j=1,2,\dots,L$, тоді

$$\hat{y}_N[a_j x(t)] = \sum_{n=1}^N \hat{y}_n[a_j x(t)] = \sum_{n=1}^N a_j^n \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i = \sum_{n=1}^N \hat{y}_n(t) a_j^n. \quad (4)$$

ПС в апроксимаційній моделі визначаються за допомогою МНК, який дозволяє отримати такі їх оцінки при яких сума квадратів відхилень відгуків НДС, що ідентифікується, від відгуків моделі мінімальна, тобто забезпечує мінімум середньоквадратичного критерію

$$J_N = \sum_{j=1}^L \left(y[a_j x(t)] - \hat{y}_N[a_j x(t)] \right)^2 = \sum_{j=1}^L \left(y_j(t) - \sum_{n=1}^N a_j^n \hat{y}_n(t) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

де $y_j(t) = y[a_j x(t)]$. Мінімізація критерію (5) зводиться до розв'язання системи нормальних рівнянь Гауса, яку, у векторно-матричній формі, можна записати у вигляді

$$A' A \hat{y} = A' y, \quad (6)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_1^2 & \dots & a_1^N \\ a_2 & a_2^2 & \dots & a_2^N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_L & a_L^2 & \dots & a_L^N \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_L(t) \end{bmatrix}, \quad \hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1(t) \\ \hat{y}_2(t) \\ \dots \\ \hat{y}_N(t) \end{bmatrix}.$$

З (6), отримуємо

$$\hat{y} = (A' A)^{-1} A' y. \quad (7)$$

Застосування тестових поліімпульсних сигналів. Якщо тестовий сигнал $x(t)$ являє собою одиничний імпульс (функцію Дірака) з вагою s , то розв'язком СЛАР (7) є вагова функція 1-го порядку $\hat{w}_1(t)$ і діагональні перетини вагових функцій n -го порядку. Оскільки при $x(t) = s\delta(t)$

$$\hat{y}_n(t) = \int_0^t \dots \int_0^t \hat{w}_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n s\delta(t - \tau_i) d\tau_i = s^n \hat{w}_n(t, \dots, t), \quad (8)$$

то

$$\hat{w}_n(t, \dots, t) = \frac{\hat{y}_n(t)}{s^n}. \quad (9)$$

Пропонується метод визначення піддіагональних перетинів вагових функцій n -го порядку ($2 \leq n \leq N$) НДС, формалізм якого ґрунтується на наступному твердженні.

Твердження 1. Нехай тестові впливи являють собою суму n імпульсних сигналів зі зсувом за часом t на τ_1, \dots, τ_n , тоді оцінка піддіагонального перетину вагової функції n -го порядку

$$\hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \frac{1}{n!s^n} \sum_{\xi_{\tau_1}, \dots, \xi_{\tau_n}=0}^1 (-1)^{n + \sum_{i=1}^n \xi_{\tau_i}} \hat{y}(t, \xi_{\tau_1}, \dots, \xi_{\tau_n}), \quad (10)$$

де $\hat{y}_n(t, \xi_{\tau_1}, \dots, \xi_{\tau_n})$ — оцінка n -ої парціальної складової відгуку НДС в момент часу t , яку отримано в результаті обробки даних експериментів на основі (7) при дії на вході системи поліімпульсного сигналу з вагою s , причому якщо $\xi_{\tau_i} = 1$, то тестовий вплив містить імпульсний сигнал зі зсувом на τ_i , у протилежному випадку, при $\xi_{\tau_i} = 0$ — не містить.

Таким чином, обчислювальний алгоритм, що реалізує метод ідентифікації багатовимірних вагових функцій на основі співвідношення (10), зводиться до розв'язання СЛАР (6) для кожного фіксованого моменту часу t на інтервалі $[0, T]$, де T — час моделювання.

Застосування тестових багатоступінчастих сигналів. Якщо тестовий сигнал $x(t)$ являє собою одиничну функцію $\theta(t)$ (функцію Хевісайда), то розв'язком СЛАР (7) є перехідна функція першого порядку і діагональні перетини n -го порядку $\hat{h}_n(t, \dots, t)$ ($n = 2, N$).

Для визначення піддіагональних перетинів перехідних функцій n -го порядку ($n \geq 2$) НДС випробовується за допомогою n тестових ступінчастих сигналів з заданими амплітудою і різними зсувами за часом. При відповідній обробці відгуків отримуємо піддіагональні перетини n -вимірних перехідних функцій $h_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n)$, які являють собою n -вимірні інтеграли від ядер n -го порядку $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$

$$h_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty w_n(t - \tau_1 - \lambda_1, \dots, t - \tau_n - \lambda_n) d\lambda_1 \dots d\lambda_n. \quad (11)$$

Пропонується метод визначення перетинів n -вимірних перехідних функцій для НДС з одним входом і одним виходом, формалізм якого ґрунтується на наступному твердженні.

Твердження 2. Нехай тестові впливи являють собою суму k ($k=1,2,\dots,n$) ступінчастих сигналів $x_i(t) = a\theta(t - \tau_i)$ ($i=1,2,\dots,k$), зі зрушенням за часом t на τ_1, \dots, τ_k , тоді, для НДС з одним входом і одним виходом, оцінка перетину перехідної функції n -го порядку

$$\hat{h}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \frac{1}{n!a^n} \sum_{\delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n}=0}^1 (-1)^{n + \sum_{i=1}^n \delta_{\tau_i}} \hat{y}(t, \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n}), \quad (2)$$

де $\hat{y}_n(t, \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n})$ — оцінка n -ої ПС відгуку НДС в момент часу t при дії на її вході багатоступінчастого сигналу з амплітудами a , яку отримано в результаті обробки даних експериментів на основі (7); причому якщо $\delta_{\tau_i} = 1$ ($i=1,2,\dots,n$), то тестовий вплив містить ступінчастий сигнал зі зсувом на τ_i , у протилежному випадку, при $\delta_{\tau_i} = 0$ — його не містить.

Пропонується метод визначення перетинів n -вимірних перехідних функцій для НДС з багатьма входами і багатьма виходами, формалізм якого ґрунтується на наступному твердженні.

Твердження 3. Нехай тестові впливи являють собою суму k ($k=1,2,\dots,n$) ступінчастих сигналів $\{x_k(t) = \theta(t - \tau_k)\}$ зі зсувом у часі на τ_1, \dots, τ_k , ($\tau_k \geq 0$) тоді, для НДС з ν входами і μ виходами, оцінка перетину перехідної функції n -го порядку:

$$\hat{h}_{i_1 \dots i_n}^j(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \frac{1}{n! \prod_{k=1}^n a_{i_k}} \sum_{\delta_{\tau_1}^{i_1}, \dots, \delta_{\tau_n}^{i_n} = 0}^{n + \sum_{i=1}^n \delta_{\tau_i}^{i_i}} (-1)^{\sum_{i=1}^n \delta_{\tau_i}^{i_i}} \hat{y}_j(t, \delta_{\tau_1}^{i_1}, \dots, \delta_{\tau_n}^{i_n}), \quad (13)$$

$\hat{y}_j(t, \delta_{\tau_1}^{i_1}, \dots, \delta_{\tau_n}^{i_n})$ — оцінка n -ої ПС відгуку НДС на j -му виході ($j=1,2,\dots,\mu$) в момент часу t при дії на входах i_1, \dots, i_n багатоступінчастих сигналів з амплітудами a_{i_k} , яку отримано в результаті обробки даних експериментів на основі (7); причому якщо $\delta_{\tau_k}^{i_k} = 1$, то тестовий вплив на i_k -му вході містить ступінчастий сигнал зі зсувом на τ_k , в іншому випадку, при $\delta_{\tau_k}^{i_k} = 0$ — його не містить.

Регуляризація процедури ідентифікації на основі методу найменших квадратів. Система нормальних рівнянь Гауса (6) дає хороші результати апроксимації функцій, якщо число вимірювань L досить велике (багато більше, ніж ступінь апроксимуючого полінома N) або помилки вимірювань малі. В іншому випадку визначник системи виявляється близьким до нуля і система стає погано обумовленою. При цьому можливі великі похибки в оцінці параметрів апроксимуючого полінома.

Для отримання стійкого до похибок вимірювань розв'язку СЛАР (6) використовується метод регуляризації А. Н. Тихонова, заснований на варіаційному способі побудови регуляризуючого оператора. Цей метод зводиться до визначення наближеного вектора розв'язку, що мінімізує деякий згладжуючий функціонал. Єдиний вектор, що задовольняє умові мінімуму згладжуючого функціоналу, визначається на підставі розв'язку СЛАР

$$(A'A + \alpha I) \hat{y}_\alpha = A' y, \quad (14)$$

де A' — транспонована матриця; I — одинична матриця; α — параметр регуляризації Тихонова.

Наближений розв'язок, який одержано на основі (14), відповідає нульовому порядку регуляризації. Для підвищення гладкості розв'язку використовується регуляризаційна матриця R і знаходиться розв'язок СЛАР

$$(A'A + \alpha R) \hat{y}_\alpha = A' y \quad (15)$$

при вибраному значенні параметра α . Регуляризаційна матриця R має стрічкову структуру, діагональні елементи якої дорівнюють $r_{pp} = 1 - (\Delta a)^{-2}$, а елементи над- і піддіагоналей дорівнюють $r_{pq} = -(\Delta a)^{-2}$, $p \neq q$; $p, q = \overline{1, L}$; $\Delta a = a_L / L$.

При реалізації даного алгоритму параметр регуляризації α вибирають досить малим (з аналізу наявної інформації про похибки вхідних даних і похибки обчислень). В роботі відповідне значення параметра регуляризації α визначається шляхом підбору, тобто багаторазовими обчисленнями \hat{y}_α , для різних значень α . Квазіоптимальне значення $\alpha = \alpha_0$ вибирається з умови

$$\| \hat{y}_{\alpha_{i+1}} - \hat{y}_{\alpha_i} \| \rightarrow \min, \quad (16)$$

де $\alpha_{i+1} = \mu\alpha_i$, $0 < \mu < 1$, $i = 0, 1, 2, \dots$. Необхідно відзначити, що різні способи визначення параметра регуляризації можуть дати різні результати і, як наслідок, відрізняються один від одного регуляризовані розв'язки.

У **третьому** розділі — «Підвищення точності та обчислювальної стійкості методів ідентифікації» — проводиться аналіз точності та обчислювальної стійкості методів ідентифікації нелінійних систем за допомогою засобів комп'ютерного моделювання, досліджується ефективність застосування вейвлет-фільтрації для згладжування результатів ідентифікації.

Виконано дослідження точності та обчислювальної стійкості методу ідентифікації. Чисельні експерименти проводилися за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab–Simulink. Критерієм якості ідентифікації (адекватності моделі) є нормована середньоквадратична похибка (НСКП) оцінки вагових функцій при різних рівнях похибок вимірювань відгуків НДС

$$\varepsilon_n = \sqrt{\sum_{l=1}^m (w_{nl} - \hat{w}_{nl})^2 \cdot \left(\sum_{l=1}^m w_{nl}^2\right)^{-1}}, \quad (17)$$

де m — кількість відліків на інтервалі часу спостереження; w_{nl}, \hat{w}_{nl} — еталонні значення і оцінки вагової функції n -го порядку, отримані в результаті обробки експериментальних даних (відгуків системи) в дискретні моменти часу t_l , відповідно.

Для підвищення обчислювальної стійкості методу ідентифікації застосовуються процедури шумозаглушення (згладжування) до одержуваних оцінок вагових функцій, що базуються на вейвлет-перетворенні.

Шумозаглушення досягається видаленням високочастотних складових з спектру сигналу, що являє собою адитивну суміш інформаційної складової — вагової функції, яку одержано в результаті обробки відгуків і шуму, обумовленого похибкою вимірювальної апаратури. Стосовно до вейвлетного розкладання це реалізується безпосередньо видаленням деталізуючих коефіцієнтів високочастотних рівнів. Задаючи певний поріг для їх рівня, і зрізуючи по ньому деталізуючі коефіцієнти, зменшується рівень шумів.

Для згладжування результатів ідентифікації використовується утиліта `wden` з пакета розширення Wavelet Toolbox системи Matlab з материнським вейвлетом `coiflet – coif4` при наступних значеннях параметрів: параметр встановлення правила обчислення порогового значення для обмеження коефіцієнтів розкладання `TPTR='minimaxi'` (мінімаксного оцінювання); параметр установки типу порогу очищення `SORH='s'` (гнучкий); параметр, який визначає спосіб перерахунку порогу `SCAL='one'` (використання порога, єдиного для всіх рівнів розкладання, без перемасштабування); глибина розкладання даних – 3.

У дослідженнях модель одержуваної зашумленої оцінки перетину вагової функції приймається адитивною $w_n(t, \dots, t) + \zeta(t)$: з рівномірним кроком по аргументу t , де $w_n(t, \dots, t)$ — корисна інформаційна складова, $\zeta(t)$ — перешкода (білий гаусовий шум з дисперсією σ^2 і нульовим середнім значенням).

В табл. 1 наведено значення НСКП ідентифікації тестової НДС у вигляді апроксимаційної моделі Вольтерра третього порядку з використанням тестових імпульсів різної полярності при різних рівнях похибок вимірювань (1%, 3%, 5%) та застосуванні регуляризації 0-го порядку (14).

Результати ідентифікації тестової НДС з використанням імпульсних сигналів ($\Delta a=10$, $L=10$) і застосуванням регуляризованого МНК при точних вимірах відгуків — оцінки вагових функцій $\hat{w}_2(t,t)$, $\hat{w}_3(t,t,t)$ представлено на рис. 1 і рис. 2, відповідно. На рис. 3 і рис. 4 наведено оцінки діагональних перетинів вагових функцій другого і третього порядків тестової НДС без регуляризації (а) та після регуляризації і вейвлет-фільтрації (згладжування) (б) при похибках вимірювань відгуків 5 і 1%, відповідно.

Таблиця 1 – НСКП оцінки ядер Вольтерра n -го порядку при поліімпульсних сигналах для різної похибки (σ) вимірювань відгуків тестового об'єкта і різних параметрах алгоритму ідентифікації з регуляризацією 0-го порядку (R_0) і при використанні вейвлет-фільтрації (W)

Параметри алгоритма			Похибки вимірювань, σ %						
Δa	L	n	0	1		3		5	
			R_0	R_0	W	R_0	W	R_0	W
4	50	1	0,0083	0,0084	0,0084	0,0092	0,0089	0,0099	0,0085
		2	0,1141	0,1078	0,1078	0,0982	0,0979	0,0924	0,0927
		3	0,2226	0,2231	0,2222	0,2299	0,2226	0,2401	0,2226
10	20	1	0,0082	0,0084	0,0082	0,0099	0,008	0,0131	0,0096
		2	0,1212	0,1208	0,1207	0,1225	0,1219	0,1239	0,1223
		3	0,2364	0,2389	0,2365	0,2625	0,2393	0,3158	0,2665
20	10	1	0,0082	0,0097	0,0086	0,0181	0,0105	0,0277	0,0163
		2	0,1317	0,1322	0,1318	0,1335	0,1303	0,1456	0,13
		3	0,2522	0,2623	0,2452	0,3514	0,2393	0,525	0,3042
10	10	1	0,0089	0,0103	0,0091	0,0188	0,0125	0,0281	0,0141
		2	0,0365	0,0422	0,036	0,0786	0,0405	0,1236	0,0466
		3	0,0599	0,3887	0,1146	1,1185	0,3721	1,7448	0,5068

При похибках вимірювань $\sigma=5\%$ ($\Delta a=10$, $L=10$) в результаті ідентифікації виникають похибки в оцінках ЯВ — похибка оцінки збільшується порівняно з результатом ідентифікації при точних вимірах більш ніж у 6, 14 і 11 разів для $n=1$, 2 і 3, відповідно. Точність оцінювання ЯВ за рахунок застосування регуляризації 0-го порядку підвищується в 2–4 рази. Застосування вейвлет-перетворення до оцінок ЯВ, які отримано за допомогою регуляризованого алгоритму ідентифікації, підвищує точність ідентифікації в 2–3,4 рази. Похибки ідентифікації за рахунок послідовного застосування процедури регуляризації та вейвлет-перетворення зменшуються в 4 – 7,4 рази.

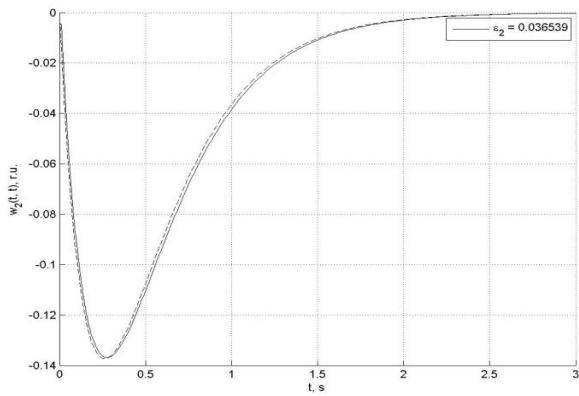


Рисунок 1 – Оцінка діагонального перетину ЯВ 2-го порядку тестової НДС при точних вимірах і еталонна функція (пунктиром)

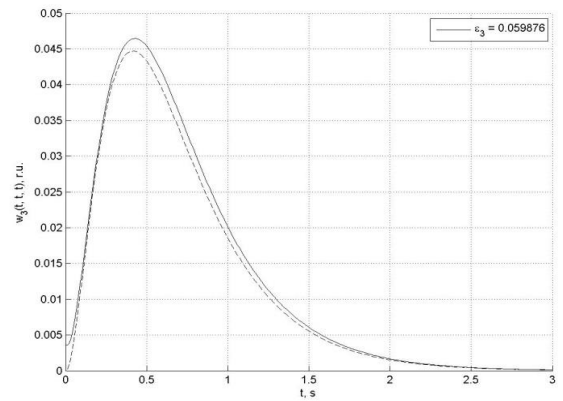
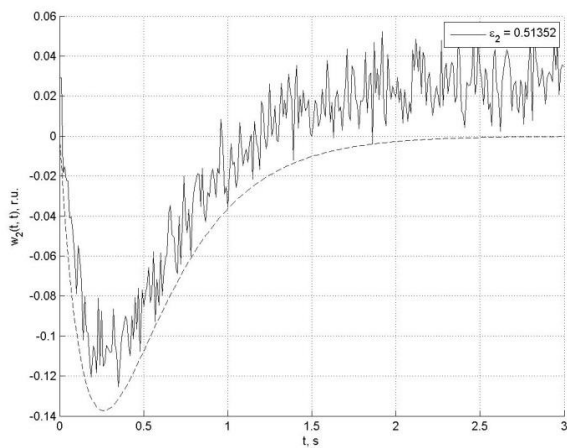
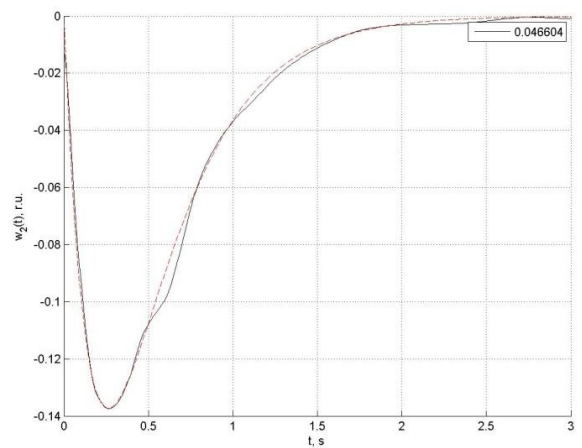


Рисунок 2 – Оцінка діагонального перетину ЯВ 3-го порядку тестової НДС при точних вимірах і еталонна функція (пунктиром)

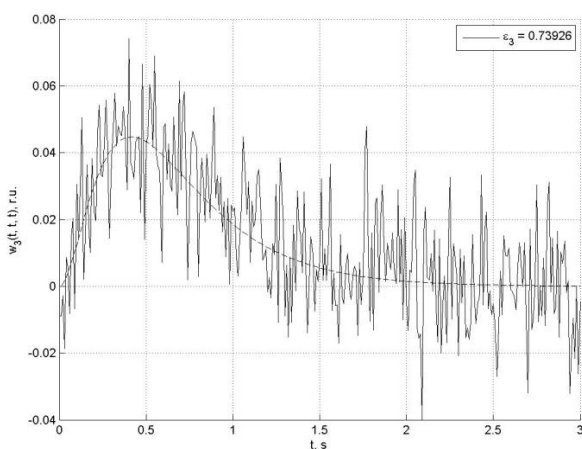


а)

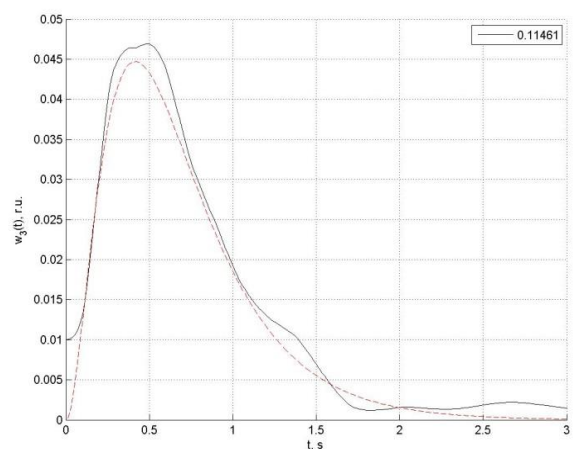


б)

Рисунок 3 – Оцінки діагонального перетину ЯВ 2-го порядку тестової НДС при похибках вимірювань 5 % і еталонна функція (пунктиром): а) – без регуляризації; б) – після регуляризації і вейвлет-фільтрації



а)



б)

Рисунок 4 – Оцінки діагонального перетину ЯВ 3-го порядку тестової НДС при похибках вимірювань 1 % і еталонна функція (пунктиром): а) – без регуляризації; б) – після регуляризації і вейвлет-фільтрації

У четвертому розділі — «Інструментальні програмні засоби детермінованої ідентифікації динамічних систем на основі моделей Вольтерра і розв'язання прикладних задач» — розроблено інструментальні програмні засоби ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра, які застосовуються в діагностичних дослідженнях при побудові інтелектуальної обчислювальної системи (для діагностики вентильно-реактивного двигуна та при побудові непараметричної динамічної моделі око-рухового апарату людини).

Розроблено інструментальні програмні засоби детермінованої ідентифікації. В ППП Matlab створено комплекс програм ідентифікації НДС на основі моделей Вольтерра у часовій області — «Tools of Identification Nonlinear Dynamic Objects» (TINDO). Для управління процесами моделювання та ідентифікації в середовищі MATLAB розроблено інтерфейс користувача (GUI). Структурну схему комплексу програм TINDO представлено на рис. 5. Інтерфейс складається з окремих незалежних модулів: модуля моделювання — «Modeling»; модуля ідентифікації — «Identification»; модуля управління параметрами процесів ідентифікації та моделювання — «Configurator»; модуля згладжування шумів «Denoising».

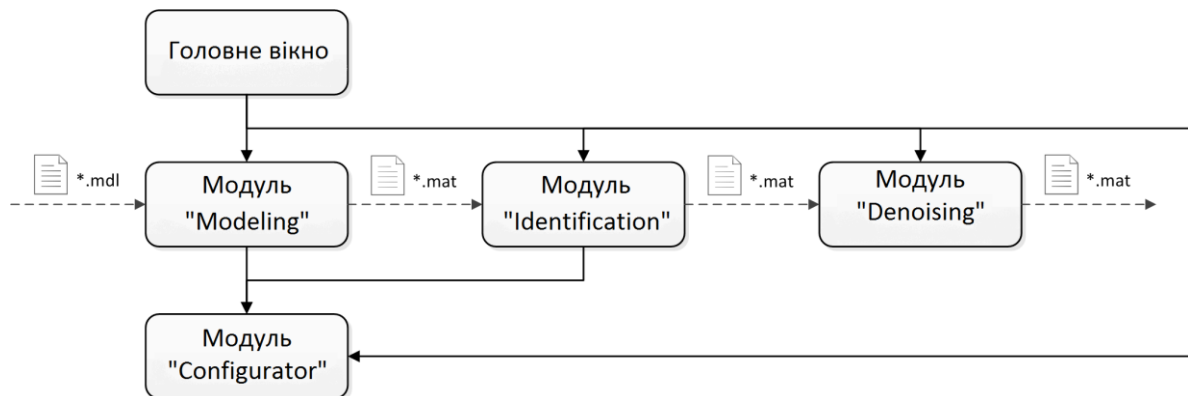


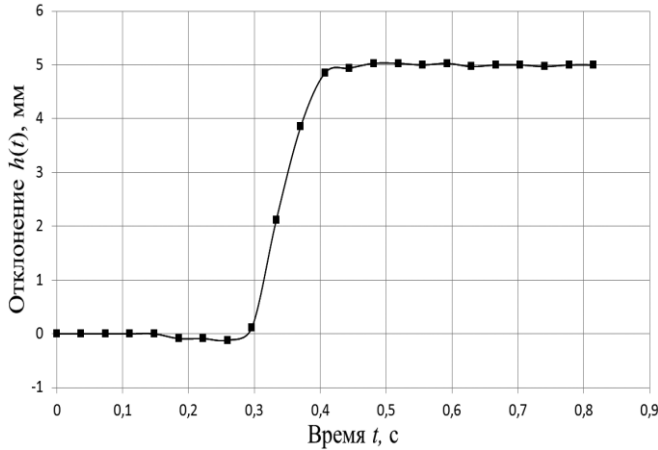
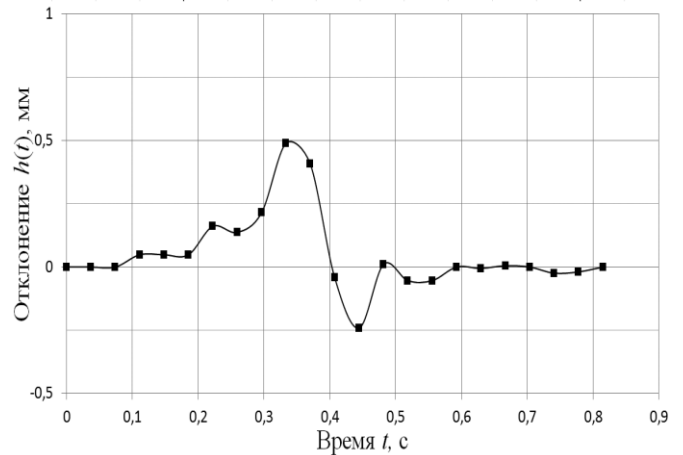
Рисунок 5 – Структурна схема комплексу програм ідентифікації TINDO

На основі даних натурного експерименту «вхід–вихід» з використанням тестових багатоступінчастих сигналів і розроблених обчислювальних алгоритмів та програмних засобів обробки експериментальних даних побудовано непараметричну динамічну модель ОРА людини у вигляді перехідних функцій першого $\hat{h}_1(t)$ і другого $\hat{h}_2(t,t)$ порядків, що представляють собою інтегральні перетворення ЯВ відповідних порядків (рис. 6 і 7). Верифікація побудованої моделі показала адекватність її досліджуваному об'єкту — практичний збіг (в межах прийнятної похибки) відгуків ОРА і моделі при одному і тому ж тестовому сигналі.

При цьому отримала подальший розвиток інформаційна технологія отримання експериментальних даних для ідентифікації ОРА за допомогою відео реєстрації руху (реакції) зіниці на збурення у вигляді світлової плями з різним віддаленням від центру екрану експериментального стенду, дозволяє визначати динамічні характеристики ОРА.

Досліджено ефективність застосування інформаційної технології на основі апроксимаційних моделей Вольтерра на прикладі створення інтелектуальної системи розпізнавання поточного стану ВРД. Для оцінки величини повітряного

зазору між ротором і статором ВРД використовуються дані непрямих вимірювань «вхід–вихід», на основі яких будується інформаційна модель — обчислюються ЯВ $w_k(\tau_1, \dots, \tau_k)$. Розпізнавання станів ВРД проводиться за допомогою його опису в просторі вторинних діагностичних ознак, отриманих на основі ЯВ: $\{w_k(\tau_1, \dots, \tau_k)\}_{k=1, \dots, N} \Rightarrow x=(x_1, \dots, x_n)'$ (N — порядок моделі Вольтерра; n — розмірність простору ознак).

Рисунок 6 – Перехідна функція $\hat{h}_1(t)$ Рисунок 7 – Перехідна функція $\hat{h}_2(t, t)$

Пропонується метод побудови простору діагностичних ознак, який полягає у використанні так званих моментів ядер Вольтерра $\mu_r^{(k)}$, що визначаються як

$$\mu_{ij\dots l}^{(k)} = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \tau_1^i \tau_2^j \dots \tau_k^l w_k(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_k, \quad (18)$$

де $i, j, \dots, l=0, 1, 2, \dots$; $i+j+\dots+l=r$ — порядок моменту.

Діагностична цінність ознак, отриманих на основі ЯВ, визначається за допомогою критерію максимальної ймовірності правильного розпізнавання P_{\max} , що реалізується побудованою системою розпізнавання на підмножині X' із заданої множини ознак X ($X' \subset X$) в обраній системі ознак.

Досліджується діагностична цінність систем ознак, отриманих як вибірка відліків ЯВ першого $w_1(\tau_1)$ (V_1) і діагональних перетинів другого $w_2(\tau_1, \tau_2)$ (V_2) порядків з заданою дискретністю і їх моментів $\mu_r^{(k)}$ різних порядків r (M_k)

$$\mu_r^{(k)} = \int_0^\infty t^r w_k(t, t, \dots, t) dt. \quad (19)$$

За допомогою використання засобів комп'ютерного моделювання встановлено найбільш цінні, в значенні показника ефективності діагностування (ЙПР станів об'єктів контролю), ознаки. Діагностична цінність ознак встановлюється за результатами розв'язання задачі класифікації методом статистичних рішень.

На основі даних навчальних вибірок, отриманих за допомогою засобів імітаційного моделювання ВРД для трьох класів образів за величиною повітряного зазору А, В і С (А – норма, В – середня, С – велика), послідовно обчислюються дискримінантні функції $d_1(x)$ і $d_2(x)$ такі, що функція $d_1(x)$ відокремлює об'єкти

першого класу А від другого і третього класів; $d_2(x)$ — відокремлює об'єкти другого класу В від третього класу С. Для поділу двох класів образів (випадок дихотомії) використовується дискримінантна функція

$$d(x) = \frac{1}{2} x'(S_2^{-1} - S_1^{-1})x + (S_1^{-1}m_1 - S_2^{-1}m_2)'x + \frac{1}{2}(m_1'S_1^{-1}m_1 - m_2'S_2^{-1}m_2 + \ln \frac{|S_2|}{|S_1|}) + \lambda_{\max}, \quad (20)$$

де $x=(x_1, \dots, x_n)'$ — вектор ознак, n — розмірність простору ознак, $S_i=M[(x-m_i)(x-m_i)']$ — коваріаційна матриця для i -го класу ($M[]$ — операція математичного очікування), S_i^{-1} — матриця обернена до S_i , $|S_i|$ — визначник матриці S_i , m_i — вектор математичних очікувань ознак i -го класу, $i=1,2$; λ_{\max} — поріг класифікації, який забезпечує найбільшу ЙПР для об'єктів навчальної вибірки.

Аналіз діагностичної цінності різних систем ознак засновано на обчисленні усередненого критерію ЙПР. Ефективність обраної сукупності ознак з розглянутої системи ознак оцінюється за результатами класифікації об'єктів екзаменаційної вибірки за допомогою побудованих в процесі навчання визначальних правил на основі дискримінантних функцій $d_1(x)$ і $d_2(x)$. Для кожного визначального правила обчислюються ЙПР, на основі яких визначається максимальне значення усередненої оцінки

$$\bar{P}_{\max} = \max_k \left\{ \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} P_{ik} \right\}, \quad (21)$$

де m — кількість класів образів; k — порядковий номер комбінації ознак в процедурі їх повного перебору. В результаті здійснення процедури повного перебору діагностичних ознак, що досліджуються, визначається найбільш цінна, а також найкраща комбінація з двох, трьох і т.д. ознак.

Отримано усереднені значення ЙПР \bar{P}_{\max} трьох класів станів ВРД. Найбільш інформативною сукупністю ознак з множини V_1 є поєднання $x_1=w_1(t_1)$, $x_2=w_1(t_2)$ і $x_3=w_1(t_3)$ ($\bar{P}_{\max} = 0.993$); з множини V_2 — поєднання $x_1=w_2(t_1, t_1)$, $x_2=w_2(t_2, t_2)$ і $x_3=w_2(t_3, t_3)$ ($\bar{P}_{\max} = 1.0$); з множини M_1 — це моменти ЯВ: μ_0^1 , μ_1^1 і μ_2^1 ($\bar{P}_{\max} = 0.994$); з множини M_2 — моменти ЯВ μ_0^2 , μ_1^2 і μ_2^2 ($\bar{P}_{\max} = 1.0$).

Досліджено стійкість показника інформативності ознак з множин V_1 , M_1 , V_2 , M_2 до похибок оцінки ЯВ. Результати досліджень при різних похибках в оцінках ЯВ: 1, 3, 5 і 10 % наведено на рис. 8. Високу завадостійкість — мінімальне відхилення \bar{P}_{\max} , мають моменти ЯВ другого порядку.

На підставі отриманих результатів досліджень можна зробити висновок про доцільність використання в якості інформативного опису об'єктів контролю невідомої структури (типу «чорний ящик») нелінійні непараметричні динамічні моделі на основі ядер Вольтерра, які характеризують стан НДС. Застосування моментів ядер дозволяє більш повно і точно врахувати нелінійні та інерційні властивості об'єктів контролю, робить процедуру діагностики більш універсальною, підвищує надійність діагнозу.

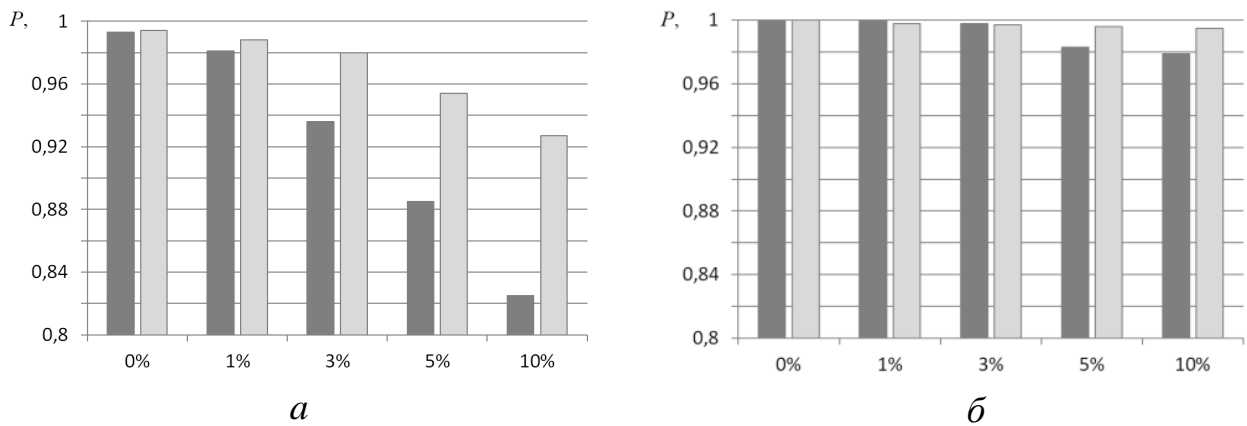


Рисунок 8 – Інформативність систем ознак V_1, V_2 (стовпці зліва); M_1, M_2 (праворуч) при різних похибках оцінок ядер: 1-го порядку (а) і діагональних перетинів ядер 2-го порядку (б)

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано нове рішення актуальної науково-технічної задачі – удосконалення методів та засобів математичного і комп'ютерного моделювання нелінійних неперервних динамічних систем на основі моделей Вольтерра, призначених для використання з метою всебічного дослідження об'єктів різної фізичної природи, створення інформаційних технологій та інтелектуальних обчислювальних систем діагностування.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень за допомогою засобів комп'ютерного моделювання отримали подальший розвиток методи і обчислювальні алгоритми детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у часовій області, а також відповідні інструментальні програмні засоби, що забезпечують побудову моделі у вигляді послідовностей багатовимірних ядер Вольтерра і багатовимірних перехідних функцій на основі даних експериментів «вхід–вихід» з урахуванням похибок вимірювань.

1. Модифіковано метод побудови апроксимаційної моделі Вольтерра нелінійної динамічної системи у часовій області з використанням поліімпульсних і багатоступінчастих тестових сигналів, який відрізняється від відомого застосуванням регуляризованого методу найменших квадратів та вибором оптимальної величини кроку по амплітуді тестових сигналів, що дозволяє підвищити точність в 2–4 рази і обчислювальну стійкість процедури ідентифікації, а також застосуванням вейвлет-фільтрації для згладжування експериментальних даних і оцінок ядер Вольтерра, що підвищує точність в 2–3,4 рази і забезпечує гладкість результатів ідентифікації.

2. Запропоновано і теоретично обґрунтовано формалізм, який представляє універсальний вираз для експериментального визначення багатовимірних перехідних функцій (n -вимірних інтегралів від ядер Вольтерра) у вигляді лінійної комбінації відгуків системи, яка ідентифікується, на багатоступінчасті тестові впливи, що дозволяє спростити алгоритмізацію і програмну реалізацію процедури ідентифікації.

3. Вдосконалено інформаційну технологію модельної діагностики складних систем на основі моделей Вольтерра за рахунок використання апроксимаційних моделей, що дозволяють підвищити точність моделювання об'єктів контролю і, як наслідок, підвищити достовірність діагностування в просторі ознак, сформованих на основі багатовимірних ядер Вольтерра або перехідних функцій в апроксимаційній моделі.

4. Розроблено інструментальні програмні засоби, що реалізують обчислювальні алгоритми детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді багатовимірних ядер Вольтерра і багатовимірних перехідних функцій, в середовищі Matlab створено комплекс програм ідентифікації на основі моделей Вольтерра у часовій області — «Tools of Identification Nonlinear Dynamic Objects» (TINDO).

5. Отримано, за допомогою розроблених обчислювальних алгоритмів та програмних засобів обробки експериментальних даних, непараметричну динамічну модель око-рухового апарату людини з урахуванням його нелінійних та інерційних властивостей у вигляді перехідної та двовимірної перехідної функцій. Дану модель призначено для використання в медичних діагностичних дослідженнях.

6. Побудовано апроксимаційну модель вентиляно-реактивного двигуна у вигляді ядер Вольтерра першого і другого порядків з метою діагностики його поточного стану. При цьому встановлено, що моменти ядер другого порядку мають найбільшу стійкість показника достовірності діагностики (ймовірності правильного розпізнавання) до похибок оцінки ядер порівняно з результатами класифікації на основі відліків ядер другого порядку з заданою дискретністю. Це дозволяє рекомендувати для практичного використання моменти ядер Вольтерра як ефективне джерело первинних даних при побудові діагностичних моделей ВРД.

7. Результати дисертаційних досліджень впроваджено в ТОВ «Одеське спеціальне конструкторське бюро спеціальних верстатів» (ОСКБ СВ), а також у наукові дослідження та навчальний процес кафедри комп'ютеризованих систем управління Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) МОН України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Всього за темою дисертації було надруковано 11 наукових праць, з них проіндексовано у світових наукометричних базах: [7] – у Scopus, [1, 4–6] – у Google Scholar, [3, 5] – у Ulrich, EBSCO, Index Copernicus; [3, 5, 6] – у РІНЦ.

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації

1. Масри, М. М. Построение аппроксимационной модели Вольтерра нелинейной системы с помощью многоступенчатых тестовых сигналов / М. М. Масри // Математичне та комп'ютерне моделювання Серія: Технічні науки: зб. наук. праць [Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка]. – Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2014. – Вип. 11. – С. 107-116.

2. Масри, М. М. Вычислительные методы идентификации нелинейных систем в виде полиномов Вольтерра / М. М. Масри // Зб. наук. праць «Вісник Черкаського

державного технологічного університету». Серія : технічні науки.– 2015 – № 2. – С. 116-122.

3. Масри, М. М. Построение аппроксимационной модели Вольтерра нелинейной системы с помощью полиимпульсных тестовых сигналов / М. М. Масри, С. В. Павленко, В. Д. Павленко // Информатика и математические методы в моделировании. – Одесса : ОНПУ. – 2015. – Том 5. – №2. – С. 142-151.

4. Fomin Oleksandr. Method of Building an Intelligent Computing Systems for Diagnostics using Volterra Kernels Moments / Oleksandr Fomin, Mohannad Masri, Vitaliy Pavlenko // Advances in Information Science and Computer Engineering. – Dubai, U.A.E., 2015 (WSEAS Support). – P. 52-56.

5. Фомин, А. А. Метод и информационная технология построения непараметрической динамической модели глазо-двигательного аппарата / А. А. Фомин, М. М. Масри, В. Д. Павленко, А. Н. Фёдорова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №2/9(74). – С. 64-69. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.41448

6. Павленко, В. Д. Интерполяционный метод идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра с использованием тестовых полиимпульсных сигналов / В. Д. Павленко, М. М. Масри // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Вып. 3 (42) – Одесса : [ОНПУ], 2013. – С.132-137.

7. Pavlenko, V. Computing of the Volterra Kernels of a Nonlinear System Using Impulse Response Data / V. Pavlenko, M. Massri, V. Ilyin // Proc. of 9th International Middle Eastern Simulation Multiconference MESM'2008, August 26-28, 2008, Philadelphia University, Amman, Jordan. – 2008. – P. 131-138.

Опубліковані твори апробаційного характеру

8. Pavlenko, V. D. Construction Intelligent Computing Systems for Diagnostics Complex Dynamical Object Using Volterra Kernels / V. D. Pavlenko, O. A. Fomin, M. M. Masri // Intellectual Systems of Decision Making and Problems of Computational Intelligence: International Conference ISDMCI'2015, May 18-22, 2015, Zaliznyj Port, Ukraine. – Kherson : KNTU, 2015. – P. 241-243.

9. Pavlenko, V. D. Identification of Communication Channel Based on Volterra Model in Frequency Domain / V. D. Pavlenko, V. A. Speranskyu, M. M. Massri // Proc. of 3th International scientific-practical conference «Physical and technological problems of wireless devices, telecommunications, nano- and microelectronics» (PREDT-2013), October 24-26, 2013, Chernivtsi, Ukraine. – P. 114-115.

10. Масри, М. М. Исследование точности и помехоустойчивости методов идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра во временной области / М. М. Масри, Ю. Н. Назаренко, В. Д. Павленко // Сучасні інформаційні технології (MIT-2011): Матеріали Першої Міжнародної конференції студентів і молодих науковців, 12-13 травня 2011, Одеса, Україна. – Одеса : ОНПУ, 2011. – Т.2 – С. 36-37.

11. Pavlenko, V. Identification of nonlinear systems on Volterra kernels with using impulse response data / V. Pavlenko, M. Massri, Y. Chernov // Mathematics. Computing. Education: Proc. 16th International Conference MCE'2009, Pushchino, Russia, January 19-24, 2009. – М. : МГУ, 2009. – <http://www.mce.su/archive/doc35450/doc.pdf>

АНОТАЦІЯ

Масрі М. М. Методи та засоби побудови інформаційних моделей нелінійних динамічних об'єктів для цілей діагностики. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Одеський національний політехнічний університет МОН України, Одеса, 2015.

У дисертаційній роботі запропоновано нове рішення актуальної науково-технічної задачі – удосконалення методів та засобів математичного і комп'ютерного моделювання нелінійних неперервних динамічних систем на основі моделей та поліномів Вольтерра, призначених для використання з метою всебічного дослідження об'єктів різної фізичної природи, створення інформаційних технологій та інтелектуальних обчислювальних систем діагностування.

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень за допомогою засобів комп'ютерного моделювання отримали подальший розвиток методи та обчислювальні алгоритми детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у часовій області, а також відповідні інструментальні програмні засоби, що забезпечують побудову моделі у вигляді багатовимірних ядер Вольтерра і багатовимірних перехідних функцій на основі даних експериментів «вхід–вихід» з урахуванням похибок вимірювань.

Ключові слова: нелінійні динамічні системи, математичне та комп'ютерне моделювання, апроксимаційні моделі Вольтерра, ядра Вольтерра, багатовимірні перехідні функції, ідентифікація, обчислювальна стійкість, регуляризація, вейвлет-фільтрація.

АННОТАЦИЯ

Масри М. М. Методы и средства построения информационных моделей нелинейных динамических объектов для целей диагностики. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Одесский национальный политехнический университет МОН Украины, Одесса, 2015.

В диссертационной работе предложено новое решение актуальной научно-технической задачи – усовершенствование методов и средств математического и компьютерного моделирования нелинейных непрерывных динамических систем на основе моделей Вольтерра, предназначенных для использования в информационных технологиях при создании интеллектуальных вычислительных систем диагностирования объектов разной физической природы.

На основе теоретических и экспериментальных исследований с помощью средств компьютерного моделирования получили дальнейшее развитие методы и вычислительные алгоритмы построения моделей в виде многомерных ядер Вольтерра и многомерных переходных функций нелинейных систем на основе данных экспериментов «вход–выход» с учетом погрешностей измерений. В среде Matlab разработаны соответствующие инструментальные программные средства, реализующие разработанные методы идентификации – «Tools of Identification Nonlinear Dynamic Objects» (TINDO).

Развит метод построения аппроксимационной модели Вольтерра нелинейной

динамической системы во временной области с использованием полиимпульсных и многоступенчатых тестовых сигналов, который отличается от известного применением регуляризованного метода наименьших квадратов и выбором оптимальной величины шага по амплитуде тестовых сигналов, что позволяет повысить точность в 2–4 раза и вычислительную устойчивость процедуры идентификации.

Усовершенствован метод построения аппроксимационной модели Вольтерра нелинейной динамической системы во временной области с использованием полиимпульсных и многоступенчатых тестовых сигналов, отличающийся применением вейвлет-фильтрации для сглаживания экспериментальных данных и оценок ядер Вольтерра, что повышает точность в 2–3,4 раза и обеспечивает гладкость результатов идентификации.

Предложен и теоретически обоснован формализм, представляющий универсальное выражение для экспериментального определения многомерных переходных функций (n -мерных интегралов от ядер Вольтерра) в виде линейной комбинации откликов идентифицируемой системы на многоступенчатые тестовые воздействия, позволяющий упростить алгоритмизацию и программную реализацию процедуры идентификации.

Усовершенствована информационная технология модельной диагностики сложных систем на основе моделей Вольтерра за счет использования аппроксимационных моделей, позволяющих повысить точность моделирования объектов контроля и, как следствие, повысить достоверность диагностирования в пространстве признаков, сформированных на основе многомерных ядер Вольтерра или переходных функций в аппроксимационной модели.

С помощью разработанных инструментальных средств обработки экспериментальных данных построена непараметрическая динамическая модель в виде переходной и двумерной переходной функций глазо-двигательного аппарата человека с учетом его нелинейных и инерционных свойств, предназначенная для использования в медицинских диагностических исследованиях.

Построена аппроксимационная модель вентильно-реактивного двигателя (ВРД) в виде ядер Вольтерра первого и второго порядков для использования с целью диагностирования его состояний. При этом установлено, что моменты ядер второго порядка обладают наибольшей устойчивостью показателя достоверности диагностирования (вероятности правильного распознавания) к погрешностям оценки ядер. Это позволяет рекомендовать для практического применения моменты ядер Вольтерра в качестве эффективного источника первичных данных при построении диагностических моделей ВРД.

Результаты диссертационных исследований внедрены в ООО «Одесское специальное конструкторское бюро специальных станков» (ОСКБ СС), а также в научные исследования и учебный процесс кафедры компьютеризированных систем управления Одесского национального политехнического университета (ОНПУ) МОН Украины.

Ключевые слова: нелинейные динамические системы, математическое и компьютерное моделирование, аппроксимационные модели Вольтерра, ядра Вольтерра, многомерные переходные функции, идентификация, вычислительная устойчивость, регуляризация, вейвлет-фильтрация.

ABSTRACT

Masri M. M. Methods and Toolkit of Building Information models of nonlinear dynamic objects for diagnostic purposes. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences. Specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Odessa National Polytechnic University Ministry of education of Ukraine, Odessa, 2015.

In the thesis the new solution of urgent scientific and technical objectives is proposed – the improvement of methods and means of mathematical and computer modeling of nonlinear continuous dynamic systems based on Volterra models. These models are intended for use for studying the objects of different physical nature, the creation of information technology and intelligent computing systems diagnosis.

On the basis of theoretical and experimental studies using computer simulation tools have been further developed the methods and computational algorithms of deterministic identification of nonlinear dynamical systems in time domain. The corresponding software tools are applied for building models as the sequences of multidimensional Volterra kernels and multidimensional transition functions on the basis of the «Input–Output» experiments taking measurement errors into account.

The modified approximation method allow increasing the accuracy of identification in 2–4 times. The wavelet filtering application for smoothing the data of experiments allow the increasing of accuracy in 2–3,4 times having the results of identification smooth.

Key words: nonlinear dynamical systems, mathematical and computer modeling, Volterra model approximation, Volterra kernels, multidimensional transition function, identification, computational stability, regularization, wavelet filtering.