МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СИТНИК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 519.87:004.94:621.314](043)

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Вінниця – 2018

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі електротехнічних систем Черкаського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант	доктор технічних наук, професор **Верлань Анатолій Федорович** Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України, головний науковий співробітник
Офіційні опоненти:	доктор технічних наук, професор **Лежнюк Петро Дем'янович** Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних станцій і систем
	доктор технічних наук, професор **Мислович Михайло Володимирович** Інститут електродинаміки НАН України, завідувач відділу теоретичної електротехніки № 12
	доктор технічних наук, професор **Олійник Андрій Петрович** Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри прикладної математики

Захист відбудеться «20» грудня 2018 р. о 14.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «07» листопада 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради С.М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вимірювальні перетворювачі (ВП) є невід'ємною складовою частиною сучасних систем контролю, управління, моніторингу, діагностики, проектування технічних засобів. Ефективні методи і засоби прямих і непрямих вимірювань у поєднанні з комп'ютерними технологіями проектування та інтерпретації результатів вимірювань (спостережень) забезпечують інформаційну основу для досягнення високої якості функціонування технологічних об'єктів промислових виробництв, сучасних технічних систем і об'єктів в цілому. Завдяки широкомасштабному виробництву та використанню вимірювальних перетворювачів в різних галузях науки і техніки протягом багатьох років інтенсивно ведуться роботи по їх вдосконаленню. Суттєве вдосконалення отримують конструктивні елементи перетворювачів завдяки появі нових технологій (зокрема нанотехнологій) і матеріалів з унікальними характеристиками. Таким чином, сучасні вимірювальні перетворювачі і системи становлять значну частку засобів нової техніки, для яких характерний стрімкий розвиток і значне поширення в різних галузях застосування, що вимагає вирішення нових задач на функціональному, схематичному, елементному й інформаційному рівнях.

Виникає необхідність розробки швидкодіючих і високоточних приладів, які повинні адаптуватися до мінливих у часі умов функціонування, допускати роботу при значних рівнях завад, працювати в умовах віддаленого доступу тощо. Проектування зазначених пристроїв супроводжується вирішенням таких практичних проблем, як всебічний аналіз динамічних режимів роботи, проведення різних випробувань, розв'язання складних обчислювальних задач синтезу і оптимізації характеристик ВП. На особливу увагу при цьому заслуговує той факт, що вимірювальні перетворювачі є об'єктами і компонентами активної інформатизації та комп'ютеризації. При аналізі динамічних властивостей вимірювальних перетворювачів слід враховувати їх фізичну і структурну неоднорідність і, найчастіше, шаруватий характер чутливого матеріалу, що свідчить про принципову складність математичного опису відповідних фізичних процесів. Таким чином, сучасні вимірювальні перетворювачі в загальному випадку відносяться до класу складних динамічних об'єктів (ДО), ефективним шляхом дослідження яких є використання методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання.

Існуючі наукові досягнення в галузі математичного моделювання динамічних об'єктів (систем) базуються в основному на застосуванні апарату диференціальних рівнянь. Створені на основі цього підходу програмні засоби отримали значне поширення і увійшли в більшість серійних пакетів комп'ютерного моделювання. Проте є певні обмеження при вирішенні деяких класів задач моделювання. Зокрема, це відноситься до забезпечення стійкості обчислювального процесу за наявності значних рівнів завад у вигляді шумів із високочастотними спектрами у вихідних даних, врахування досить поширеного ефекту Гіббса при моделюванні об'єктів як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами, застосування ітераційних алгоритмів аналізу, формування математичних описів за експериментальними даними та ін.

Досвід показує, що для подолання зазначених труднощів доцільно як доповнення до існуючих створювати нові способи побудови і чисельної реалізації математичних моделей. Ефективним переходом в цьому напрямку є застосування певних видів інтегральних рівнянь і операторів, які мають ряд таких позитивних властивостей, як висока універсальність (структура моделі є незмінною для різних класів динамічних об’єктів, а властивості яких задаються однією функцією – ядром інтегрального оператора), потенційно висока адекватність процесів моделювання, властивість згладжування при виконанні обчислень і обробки сигналів із високочастотними шумами, висока збіжність ітераційних процесів вирішення обчислювальних задач, можливість ефективної побудови моделі за експериментальними даними тощо. Підхід до моделювання динамічних об’єктів на основі інтегральних рівнянь вбачається перспективним у рамках розроблюваної теми.

Таким чином, у зв’язку з інтенсивним технологічним розвитком, ускладненням структур і суттєвим розширенням сфери застосування вимірювальних перетворювачів має місце актуальна **науково-технічна проблема** підвищення ефективності методів і засобів математичного та комп’ютерного моделювання динамічних процесів даного класу технічних об’єктів при вирішенні задач аналізу, синтезу, проектування, побудови, конструювання та функціонування в системах вимірювання, контролю, діагностики та управління.

Одним із шляхів успішного **вирішення** зазначеної проблеми може бути розширення класу математичних моделей для врахування особливостей завдань моделювання розглянутих пристроїв, зокрема на основі застосування інтегральних динамічних моделей (в тому числі макромоделей), створення швидкодіючих алгоритмів реалізації моделей, підвищення рівня адекватності відтворення досліджуваних процесів, структурно-алгоритмічної організації програмних засобів комп’ютерного моделювання. При **вирішенні** цієї проблеми необхідно враховувати як зростаючу складність задач моделювання, так і зростаючі можливості засобів обчислювальної техніки.

У розвиток методів і засобів математичного і комп’ютерного моделювання процесів в інформаційно-вимірювальних системах (ІВС), в тому числі на основі інтегрального підходу, вагомий внесок було зроблено завдяки роботам: А.С. Апарцина, Г.І. Василенко, Г. Ван-Тріса, Е. Вашни, А.Ф. Верланя, Є.Т. Володарського, В.М. Дубового, Б.Г. Кадука, Р.Н. Квєтного, П.С. Малачівського, Б.І. Мокіна, В.С. Сизикова, П.М. Таланчука, P.I. Van der Houwen, H. Brunner, V. O'Neil Peter A.K. Miller, R. Kress та інших вчених.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті. Дослідження проводились в рамках науково-дослідних робіт:

«Синтез та аналіз надширокополосних багатопозиційних систем зв’язку з використанням неперервних шумових сигналів» (номер державної реєстрації 0109U001881), (виконавець);

«Створення високоефективного інтелектуального комплексу для розробки та дослідження п’єзоелектричних компонентів для приладобудування, медицини та робототехніки» (номер державної реєстрації 0117U000936), (виконавець);

«Моделювання процесу технічної експлуатації силових трансформаторів з урахуванням закону дифузійно-немонотонного розподілу їх відмов» (номер державної реєстрації 0117U003070), (керівник роботи).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності методів і засобів математичного моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах на основі застосування динамічних моделей у вигляді інтегральних рівнянь і операторів Вольтерри, створення алгоритмічних основ і програмних засобів їх комп’ютерної реалізації.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються такі науково-технічні задачі:

– аналіз сучасного стану проблеми дослідження і вдосконалення вимірювальних перетворювачів на основі математичних методів і комп’ютерних засобів;

– розвиток методів математичного опису динамічних процесів в стаціонарних вимірювальних перетворювачах на основі динамічних моделей у вигляді інтегральних рівнянь та операторів, одержуваних за допомогою апріорних даних, представлених динамічними характеристиками;

– розробка способів формування інтегральних математичних моделей динаміки вимірювальних перетворювачів як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами, що застосовуються до вирішення задач аналізу динамічних процесів;

– розробка алгоритмічних основ аналізу динаміки вимірювальних перетворювачів за інтегральними моделями (прямі задачі) на основі чисельної реалізації базового квадратурного методу розв’язання інтегральних рівнянь Вольтерри ІІ роду;

– розробка та дослідження методів і алгоритмів ідентифікації інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів за експериментальними даними;

– розробка методу і алгоритмів відновлення сигналу на вході вимірювального перетворювача за допомогою обробки вихідного сигналу на основі розв’язання оберненої задачі для рівняння Вольтерри І роду з орієнтацією на задачу динамічної корекції вимірювального перетворювача;

– розробка комплексу програм розв’язання прямих і обернених задач моделювання вимірювальних перетворювачів на основі інтегральних рівнянь, вирішення модельних і прикладних задач.

Об’єктом дослідження є динамічні процеси у вимірювальних перетворювачах.

Предметом дослідження є методи і засоби математичного та комп’ютерного моделювання процесів у вимірювальних перетворювачах на основі інтегральних динамічних моделей (ІДМ).

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі задач використані:

– аналітичні та чисельні методи математичного моделювання динамічних систем, які необхідні для отримання характеристик ВП;

– елементи теорії інтегральних рівнянь, а саме: методи розщеплення та еквівалентних перетворень, дозволяють отримати інтегральні рівняння динамічних моделей ВП за заданими диференціальними рівняннями; метод інтегральних перетворень для отримання ІДМ вимірювальних перетворювачів на підставі застосування перетворення Лапласа; структурний метод отримання ІДМ при заданій структурі об’єкта, динамічних характеристиках та нелінійних залежностях;

– методи чисельного розв’язання інтегральних рівнянь Вольтерри ІІ і І роду: метод сплайнів для розв’язання задач аналізу ВП при необхідності дослідження їх моделей, побудованих за експериментальними даними, і реалізації моделей в реальному часі; ітераційні методи для аналізу процесів як в лінійних, так і в нелінійних вимірювальних перетворювачах; метод квадратур для розрахунку параметрів (задачі ідентифікації) та у задачах відновлення сигналів вимірювальних перетворювачів; метод колокацій, заснований на застосуванні кусково-гладких поліномів для розв’язання рівнянь Вольтерри І роду;

– методи розв’язання обернених задач динаміки на основі інтегральних рівнянь: метод обернених матриць для розв’язання системи інтегральних рівнянь Вольтерри І роду у задачах відновлення і динамічної корекції сигналів ВП; метод регуляризації при розв’язанні сингулярних інтегральних рівнянь; квадратурний багатокроковий метод високої точності для розв’язання інтегральних рівнянь Вольтерри І роду; декомпозиційний метод регуляризації ВП, що дозволяє більш ефективно зменшити шумові перешкоди при розв’язанні задачі відновлення сигналу;

– методи програмної інженерії при комп’ютерній реалізації інтегральних динамічних моделей: об’єктно-орієнтований метод для організації моделювальної системи та розв’язання прикладних задач вимірювальних перетворювачів; структурний метод для створення загальної структури інтелектуального середовища моделювання динамічних моделей.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше запропоновані:

– аналітичний метод «розщеплення з частковим оберненням» для заданих диференціальних рівнянь, що описують вимірювальні перетворювачі з зосередженими параметрами, який, на відміну від відомих способів побудови інтегральних динамічних моделей, дозволяє отримати не одну, а ряд еквівалентних інтегральних моделей, що розширює можливість побудови високостійких чисельних алгоритмів аналізу вимірювальних перетворювачів;

– метод формування інтегральних динамічних моделей нестаціонарних вимірювальних перетворювачів із зосередженими та розподіленими параметрами, який, на відміну від існуючих, базується на використанні заданої імпульсної перехідної функції, представленої у сепарабельному вигляді, що надає можливість переходу до еквівалентної інтегральної моделі;

– прямий (неоптимізаційний) метод ідентифікації інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів на основі експериментальних даних, який, на відміну від відомих, передбачає формування розрахункових виразів на основі рішення алгебраїчної системи, отриманої шляхом апроксимації інтегрального оператора;

– метод «внутрішньої регуляризації» для розв'язання слабосингулярного інтегрального рівняння Вольтерри I роду в задачі відновлення вхідного сигналу вимірювального перетворювача, який, на відміну від існуючих, передбачає введення малого регуляризуючого параметра β у знаменник функції ядра, що забезпечує стійкість обчислювального процесу;

вдосконалені:

– методи прямого чисельного розв'язання лінійних і нелінійних інтегральних рівнянь вимірювальних перетворювачів на основі сепарабельного представлення ядер, які забезпечують можливість суттєвого прискорення обчислювальних процесів;

– методи ітераційного чисельного розв'язання нелінійних інтегральних рівнянь, які, на відміну від існуючих, базуються на застосуванні модифікації методу Ньютона–Канторовича, що дозволяє підвищити збіжність ітераційного процесу;

– структурно-алгоритмічний метод організації засобів комп'ютерного моделювання стосовно задач дослідження основних типів вимірювальних перетворювачів, який забезпечує візуальну побудову програм відповідно до принципу декомпозиції об'єкта, що моделюється, або його моделі;

набули подальшого розвитку:

– підхід до математичного і комп'ютерного моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах на основі застосування апарату інтегральних рівнянь та операторів;

– принцип альтернативності (множинності різних форм) математичних моделей у задачах динаміки вимірювальних перетворювачів, для якого доведено, що для конкретного випадку вимірювань існує деяка вдало підібрана модель, яка за певних вимог до точності вимірювань дозволяє врахувати особливості конкретної розв'язуваної задачі стосовно певного критерію якості процесу моделювання;

– структурні методи отримання явних (у вигляді інтегрального оператора типу Вольтерри) і неявних (у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерри II роду) інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів;

– метод формування одновимірних інтегральних моделей вимірювальних перетворювачів із розподіленими параметрами на основі динамічних характеристик.

Практичне значення отриманих результатів

1. Створені засоби алгоритмічного і програмного забезпечення процесів моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів з використанням структурно-орієнтованого підходу забезпечують ефективну комп'ютерну реалізацію інтегральних динамічних моделей з можливістю доцільного вибору алгоритмів відповідно до властивостей конкретного завдання, можливість виконання швидких стійких рекурентних і високоточних ітераційних процедур чисельного розв'язання використовуваних видів інтегральних рівнянь.

2. Запропоновані методи моделювання та комп'ютерні засоби дозволяють забезпечити якісне відтворення властивостей, характеристик і параметрів широкого класу вимірювальних перетворювачів. Розроблений пакет прикладних програм реалізований в моделюючому середовищі MATLAB і призначений для дослідження

динаміки вимірювальних перетворювачів як в лабораторних дослідженнях, так і в умовах застосування в реальних системах вимірювання, контролю та управління.

3. Розроблено набір комп'ютерних моделей ряду найбільш широко застосовуваних на практиці видів вимірювальних перетворювачів: тиску, швидкості потоку, кута повороту, вологості газу, температури, витрат, прискорення та ін.

4. Розроблені моделі, алгоритми і програми, методики розрахунку і моделювання можуть знайти застосування в навчальному процесі технічних вузів.

5. В роботі вирішено наступні прикладні задачі: побудови моделей градієнтних приймачів теплових потоків; дослідження динаміки тактильного матричного сенсора; формування непараметричних інтегральних динамічних моделей датчиків у системах вимірювання випробувального устаткування; побудова інтегральної динамічної моделі датчика сигналів акустичної емісії.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблені методи знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України: Черкаський міський РЕМ ПАТ «Черкасиобленерго» (м. Черкаси), ДП «Черкасистандартметрологія» (м. Черкаси), ПАТ «АЗОТ» (м. Черкаси), ПАТ «Тернопільський радіозавод «Оріон» (м. Тернопіль), ТОВ «Навіс-Україна» (м. Сміла), ТОВ «СІКАМ Україна» (м. Київ), а також впроваджені у навчальний процес Черкаського державного технологічного університету.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи, що винесені на захист, отримані автором самостійно. Роботи [3, 4, 5, 20, 30, 31, 32, 33, 47, 62] написані самостійно. В опублікованих роботах у співавторстві особисто дисертанту належить наступний особистий внесок: монографія [50] – розділи 1, 3 і підрозділи 2.1, 2.2, 2.2.1, 4.1, 4.2; [1] – метод формування явних інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів як з розподіленими, так і з зосередженими параметрами; [2] – запропоновано алгоритми чисельної реалізації інтегральних рівнянь для проведення обчислювальних експериментів; [6] – інтегральний метод в задачі моделювання динаміки ВП; [7] – метод ідентифікації параметрів електричних ланцюгів із застосуванням інтегральних рівнянь Вольтерри II роду; [8] – метод наближеного аналізу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами з використанням операторного методу; [9] – аналіз двох алгоритмів калмановського типу, що застосовуються для оцінювання параметрів систем; [10] – метод розв'язання оберненої динамічної задачі отримання «істинного» вхідного сигналу теплового датчика стрижневого типу; [11] – метод оцінки похибки одержуваного рішення інтегрального рівняння Вольтерри II роду зі слабосингулярним ядром; [12] – швидкодіючий алгоритм моделювання вимірювальних перетворювачів з розподіленими параметрами; [13] – метод інтегральних рівнянь для дослідження електричних ланцюгів, включаючи ланцюги, що містять елементи зі змінними параметрами; [14] – методи отримання інтегральних динамічних моделей ВП за даними фізичних експериментів; [15] – алгоритм реалізації інтегрального методу вирішення лінійних диференціальних рівнянь; [16] – квадратурно-різницеві методи для чисельної реалізації інтегродиференціальної моделі пристрою регулювання живлення; [17] – спосіб реалізації слабосингулярних інтегральних рівнянь Вольтерри II роду; [18] – алгоритм визначення оцінки скалярного параметра методом максимізації середнього значення степеневого функціонального полінома; [19] – спосіб калібрування трикомпонентного акселерометра з використанням фільтра Калмана; [21] – спосіб отримання інтегральних рівнянь Вольтерри для нелінійних електричних ланцюгів; [22] – інтегральний метод відновлення сигналів для вирішення задач корекції динамічних помилок системи вимірювання потоків теплового випромінювання; [23] – модифікація методу квадратур для чисельного розв’язання лінійних диференціальних рівнянь; [24] – алгоритм чисельного розв’язання інтегрального рівняння Вольтерри другого роду з використанням формул Ньютона–Котеса різної точності; [25] – інтегроапроксимаційний алгоритм для аналізу перехідних процесів в лінійних і нелінійних електричних ланцюгах (максимально можлива точність одержуваних поліноміальних рішень); [26] – спосіб аналізу за допомогою інтегральних рівнянь для методу контурних струмів у складних лінійних стаціонарних електричних ланцюгах із зосередженими параметрами; [27] – метод визначення імпульсної перехідної функції ВП з використанням функції взаємної кореляції між вхідними та вихідними сигналами; [28] – метод моделювання динамічних об’єктів на основі інтегральних макромоделей; [29] – алгоритм оптимальної фільтрації за показниками точності під час скалярних вимірювань; [34] – аналіз двох варіантів алгоритму автоматичної побудови математичної моделі технологічних процесів із застосуванням лінійних функцій, кусково-лінійних функцій і дробово-раціональних функцій; [35] – метод регуляризації шляхом введення додаткового множника за запропонованим правилом, яке дозволяє обмежитися недостатністю інформації для отримання стійкого достовірного рішення; [36] – способи ідентифікації лінійних і нелінійних динамічних об’єктів; [37] – алгоритм для обчислення коефіцієнтів лінеаризованих рівнянь, що описують динамічні моделі енергетичних об’єктів; [38] – спосіб визначення динамічних характеристик двокоординатного тактильного матричного сенсора; [39] – метод ідентифікації ВП, що описується інтегральним рівнянням Вольтерри II роду; [40] – алгоритм визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією; [41] – метод визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією (застосовуваний як для ВП із зосередженими параметрами, так і для ВП з розподіленими параметрами); [42] – математична модель для автоматизованої обробки інформації від акустичних датчиків механічної деформації, яка має можливість параметричного налаштування під різні види вихідних сигналів; [43] – алгоритм чисельного визначення основних часових характеристик вихідних сигналів акустичної емісії; [44] – спосіб реєстрації фізичних процесів, який істотно полегшує використання виданих реєструючою системою відомостей про досліджуваний процес, і якому властива висока роздільна здатність стосовно флуктуацій досліджуваного фізичного процесу; [45] – спосіб математичної реалізації ВП неселективної дії в багатозв’язних системах; [46] – алгоритм ідентифікації динамічних об’єктів на основі інтегральних рівнянь Вольтерри; [48] – запропонував змінити топографію розташування електродів (нанесених на поверхню в поляризованих зонах чутливого елемента), завдяки чому зменшується бічна чутливість; [49] – запропонував використовувати приймальний резонатор, виконаний у вигляді біморфного елемента, завдяки чому збільшилася чутливість датчика; [51] – спосіб застосування інтегральних рівнянь під час аналізу нестаціонарних ланцюгів та ланцюгів із розподіленими параметрами; [52] – метод параметричної ідентифікації електричних ланцюгів на основі інтегральних операторів з можливістю врахування помилок у вихідних (початкових) даних; [53] – метод ефективного вирішення задачі параметричної ідентифікації електричних ланцюгів, що характеризується наявністю похибок у вихідних даних; [54] – методика отримання інтегральних динамічних моделей ВП за заданим диференціальним рівнянням; [55] – метод отримання нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри на основі топології систем; [56] – методика алгоритмічного та програмного забезпечення процесів моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів з використанням структурно-орієнтованого підходу; [57] – метод отримання передавальної функції по перехідній характеристиці при формуванні ядер інтегральних макромоделей; [58] – алгоритм комп’ютерної реалізації нелінійних інтегральних макромоделей динамічних об’єктів зі зворотним зв’язком; [59] – запропонована загальна схема побудови лінійних багатокрокових методів, яка заснована на використанні формул типу Адамса; [60] – спосіб розрахунку параметрів інтегральної моделі, яка еквівалентна диференціальному рівнянню; [61] – метод отримання інтегральної макромоделі п’єзоелектричного датчика тиску шляхом застосування наближених імпульсних перехідних функцій, які є ядрами інтегральних операторів; [63] – алгоритм ідентифікації ВП на основі рішення алгебраїчної системи, отриманої шляхом «прямої» апроксимації інтегрального оператора в інтегральному рівнянні Вольтерри II роду; [64] – реалізація інтегральних моделей в задачі динамічної корекції ВП; [65] – методика обчислень складних діагностичних ознак на основі інтегрального методу ідентифікації, згідно з яким як діагностичні ознаки вибираються коефіцієнти диференціальних рівнянь, що описують динаміку об’єкта; [66] – структура інтелектуального середовища моделювання для розв’язання інтегральних рівнянь та оцінки її ефективності; [67] – ітераційні алгоритми для розв’язання задач динаміки ВП на основі інтегральних моделей; [68] – методика вибору структури моделі та оцінки її параметрів; [69] – спосіб використання інтегральних рівнянь в задачах моделювання динаміки ланцюгів; [70] – спосіб інтерпретації результатів вимірювання енергетичних параметрів на основі розв’язання обернених задач математичного моделювання; [71] – спосіб математичного моделювання багатопараметричних вимірювальних перетворювачів; [72] – метод перетворення диференціальних рівнянь в частинних похідних, що описують нестаціонарні ВП, до інтегральних рівнянь Вольтерри та їх систем; [73] – аналіз алгоритмів ідентифікації ВП на основі інтегральних рівнянь; [74] – способи моделювання динаміки силових ланцюгів, що використовують узагальнену модель стану і простору; [75] – метод поліпшення енергетичних і динамічних параметрів для електричних систем забезпечення.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертації публікувалися, доповідалися і обговорювалися на конференціях: VII Міжнародній науково-практичній конференції «Наука і освіта’2004», 10-25 лютого 2004 р., Дніпропетровськ; 6th International Conference CONTROL OF POWER SYSTEMS 04, June 16-18, 2004 Štrbskė Pleso High Tatras, Slovak Republic; Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові дослідження – теорія та експеримент 2005», 16-20 травня 2005 р., Полтава; Міжнародній конференції «Інформаційні технології в управлінні енергетичними системами», 18-19 жовтня 2005 р., Київ; Міжнародній науковій конференції «Сучасний менеджмент у виробництві та гуманітарній діяльності», 2005 р., Черкаси; Fourth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, November 21-22, 2006, Tashkent, Uzbekistan; 3rd International Symposium on Electrical, Electronic and Computer Engineering. ISEECE, November 23-25, 2006, Nicosia, North Cyprus; конференції «Інтегральні рівняння – 2009 – Integral equations – 2009», 26-29 січня 2009 р., Київ; Третій міжнародній науково-технічній конференції «Моделювання в електротехніці, електроніці та світлотехніці», MEEC'10, 15-17 вересня 2010 р., Київ; I, VI, VII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації», (квітень 2006 р., 2014 р., 2016 р.), Кам'янець-Подільський; European Science and Technology IV International Research and Practice Conference. April 10th–11th, 2013, Munich, Germany; Global scientific unity 2014: The International Scientific Association «Science & Genesis» 26-27 September, 2014, Prague, Czech Republic; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», 23-25 жовтня 2014 р, Чернівці; Scientific achievements 2015: The International Scientific Association «Science & Genesis» 20 February 2015, Vienna, Austria; Міжнародна конференція «Моделювання – 2016», 25-26 травня 2016 р., м. Київ; II, IV, V, VI Міжнародній науково-практичній конференції «Обробка сигналів і негаусівських процесів» (травень 2009 р., 2013 р., 2015 р., 2017 р.), Черкаси; II, III, IV Міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)», (травень 2013 р., 2015 р., 2017 р.), Київ – Черкаси.

Публікації. За результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано 75 наукових робіт, з них 1 монографія [50], 8 статей у наукових періодичних виданнях інших держав [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], 2 патенти України [48, 49], 37 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку, затвердженого МОН України, [2, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47], 25 публікацій у збірниках міжнародних та вітчизняних науково-практичних і наукових конференцій [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75], 1 стаття у науковому періодичному виданні [1], проіндексованому у міжнародній наукометричній базі даних Scopus. Одноосібні публікації становлять 10 наукових робіт [3, 4, 5, 20, 30, 31, 32, 33, 47, 62]. Англійською мовою – 9 публікацій [1, 3, 46, 47, 71, 72, 73, 74, 75].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, посилання та десяти додатків. Загальний обсяг роботи становить 431 сторінку, з них основного тексту дисертації − 297 сторінок, 31 рисунок, 52 таблиці, посилання включає 234 найменування та займає 26 сторінок, а також 10 додатків на 75 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність напряму досліджень, сформульовано цілі і задачі дослідження, показано наукову новизну отриманих результатів і практичну цінність роботи, відображено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, наведено дані апробації, публікації і застосування результатів досліджень.

Перший розділ присвячений аналізу математичних методів, які використовуються в задачах динаміки вимірювальних процесів. Метою розділу є визначення напрямів дослідження та вдосконалення вимірювальних перетворювачів. Для досягнення окресленої мети проаналізовано методи, спрямовані на підвищення ефективності математичного моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах, і визначено чинники, що стримують їх розвиток.

Аналіз задач вдосконалення вимірювальних перетворювачів у сучасних умовах їх розробки, дослідження, виробництва та застосування свідчить про постійне підвищення вимог до їх якості, використання нових матеріалів і конструкцій, складність проектування без створення методів і комп'ютерних засобів математичної підтримки, гостру необхідність у розвитку методів математичної обробки результатів вимірювань. Систематизація задач, що вирішуються в галузі вимірювальної техніки із застосуванням математичних методів, дозволяє визначити чітку тенденцію активного розвитку цього наукового напрямку.

Традиційний підхід при вирішенні задач динаміки ґрунтується, як правило, на застосуванні звичайних диференціальних рівнянь виду

$$\sum_{i=0}^{r} A_i(t) y^{(i)}(t) = f(t), t \in [0,\ T], \tag{1}$$

де $A_i(t)$ – в загальному випадку, змінні коефіцієнти, $y(t)$ – шукана, а $f(t)$ – задана функції.

Теоретичні передумови і досвід вирішення багатьох задач показують, що в ряді випадків, особливо при побудові моделей за експериментальними даними, доцільно замість моделей (1) розглядати більш загальні інтегральні динамічні моделі виду

$$A(t)y(t) + \int\limits_{G(t)} K(t,\ \tau) y(\tau) d\tau = F(t), \tau \in G(t), \tag{2}$$

де $A(t)$ і $K(t,\ \tau)$ – матриця коефіцієнтів і ядро, $y(t)$ – шукана функція (вихідний сигнал об'єкта), $F(t)$ – відома функція, що відображає вхідний сигнал *f*.

Крім того, для досить широких класів ДО застосування інтегральних динамічних моделей виду (2) і, зокрема, моделей, еквівалентних моделям (1), дозволяє отримати основу для побудови високостійких чисельних алгоритмів аналізу і розрахунку параметрів моделей ДО, чого не дозволило би застосування моделей виду (1).

Розглянемо деякі способи отримання ІДМ виду (2) для лінійних нестаціонарних і стаціонарних ДО з зосередженими параметрами в припущенні, що для них існує диференціальна модель виду (1).

<u>Спосіб послідовного інтегрування.</u> Сутність цього способу полягає в тому, що інтегрується ліва і права частина (1) необхідну кількість разів із застосуванням формули інтегрування частинами. Зокрема, в разі стаціонарних об’єктів модель (2) набуває вигляду

$$y(t)+\int_0^t K(t-s)\,y(s)\,ds=F(t), \tag{3}$$

де

$$K(t-s)=\sum_{i=1}^{n} q_i\frac{(t-s)^{i-1}}{(i-1)!},\ \tau\in G(t),$$

$$F(t)=\int_0^t\frac{(t-s)^{i-1}}{(i-1)!}\,f(s)\,ds+\sum_{i=1}^{n-1}y_i\frac{t^i}{i!}+y_0\sum_{i=1}^{n-1}q_i\frac{t^i}{i!}+y_i\sum_{i=1}^{n-2}q_i\frac{t^{i+1}}{(i+1)!}+\ldots+y_{n-1}\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}.$$

Способом послідовного інтегрування можна також перейти від нестаціонарної моделі (1) до відповідного рівняння Вольтерри.

Поряд з розглянутим способом переходу від моделі виду (1) до інтегральної динамічної моделі виду (2) можна застосувати і ряд інших способів: способи інтегральних перетворень, які базуються на перетвореннях Лапласа, Фур’є, Мелліна; спосіб підстановки; аналітичний метод розщеплення з частковим оберненням; структурний метод отримання інтегральних динамічних моделей та ін.

Основою вирішення задач динаміки вимірювальних перетворювачів у часовій області є динамічні характеристики, що відображають фізичний принцип післядії динамічних об’ктів і закономірності, які випливають з нього. Конструктивні поняття імпульсної перехідної та перехідної функцій приводять до формування операторів ВП у вигляді інтегральних математичних залежностей, тобто інтегральних динамічних моделей. Перевагою цього виду моделей є єдина структура при описі динамічних властивостей ВП із зосередженими та розподіленими параметрами, стаціонарних і нестаціонарних. Наявність перехідних характеристик, одержуваних аналітично або експериментально, однозначно приводить до формування моделей у формі інтегральних залежностей (операторів). Поняття імпульсної перехідної функції ВП органічно пов'язане з поняттям функції Гріна в теорії і практичних методах розв’язання диференціальних рівнянь.

Одним із способів отримання аналітичного виразу для імпульсної перехідної функції ВП з зосередженими параметрами є її визначення у вигляді рішення однорідного диференціального рівняння, відповідного заданому неоднорідному диференціальному рівнянню перетворювача. Спосіб легко ілюструється на прикладі ВП першого і другого порядку.

Для групи вимірювальних перетворювачів із зосередженими параметрами першого порядку, описуваних рівнянням

$$T\frac{\partial Y}{\partial t}+Y=kX(t),$$

імпульсна перехідна функція має вигляд

$$g(t-\tau)=\frac{k}{T}e^{-\frac{t-\tau}{T}}. \tag{4}$$

Рівняння ВП із зосередженими параметрами другого порядку аперіодичного типу

$$T_1T_2Y''+(T_1+T_2)Y'+Y=kX(t).$$

(T_1, T_2 – деякі параметри перетворювача) дає змогу отримати імпульсну перехідну функцію

$$g(t-\tau)=k\left(\frac{1}{T_1-T_2}e^{-\frac{t-\tau}{T_1}}+\frac{1}{T_2-T_1}e^{-\frac{t-\tau}{T_2}}\right). \tag{5}$$

Для вимірювальних перетворювачів із зосередженими параметрами другого порядку коливального типу маємо рівняння

$$T_0^2Y''+2\varepsilon_0T_0Y'+Y=kX(t),$$

еквівалентне раніше наведеним (якщо прийняти $T=1/\omega_0$, причому $k=T_0^2$ для акселерометрів, $k=T_0^2\cdot H_0/J$ для ВП кутової швидкості і т. д.), що дає можливість отримати

$$g(t-\tau)=\frac{k}{T_0\sqrt{1-\varepsilon_0^2}}e^{-\frac{\varepsilon_0}{T_0}(t-\tau)}\sin\left[\frac{\sqrt{1-\varepsilon_0^2}}{T_0}(t-\tau)\right]. \tag{6}$$

Принцип визначення імпульсної перехідної характеристики для ВП з розподіленими параметрами за заданим рівнянням в частинних похідних залишається таким же, як у випадку ВП із зосередженими параметрами. Відмінність полягає в більш складних аналітичних викладках, відповідних методу інтегральних представлень для вирішення рівнянь у частинних похідних. Відповідно до цього підходу перетворення полягають у приведенні задач до звичайних диференціальних рівнянь, аналітичне рішення яких представляється у вигляді інтегрального оператора, який зв'язує шукану функцію з правою частиною вихідного рівняння. Зазначений оператор і являє собою інтегральну, по суті одновимірну, динамічну модель ВП, з якої визначається імпульсна перехідна функція. Методика застосовується до конкретних розповсюджених вимірювальних перетворювачів тиску, температури (варіанти плоского, кулястого, циліндричного і стрижневого типів) і хемотронного перетворювача (з плоским і циліндричним електродами).

У другому розділі розглянуто способи наближеного аналізу вимірювальних перетворювачів за динамічними моделями. Мета розділу: розробка методів, які приводять до математичних описів вимірювальних перетворювачів, що дозволяють отримання наближених аналітичних рішень або застосування чисельних методів. Для досягнення поставленої мети здійснено аналіз теоретичних способів опису вимірювальних перетворювачів.

З метою удосконалення процесів математичного моделювання ВП з зосередженими параметрами, що описуються звичайними диференціальними рівняннями n-го порядку зі змінними коефіцієнтами, пропонуються наступні підходи.

На основі модифікації процесу послідовних наближень для вихідних диференціальних рівнянь отримано аналітичний розв'язок задачі у вигляді ряду, члени якого формуються в процесі ітерацій з цілеспрямованим вибором коефіцієнтів. Метод є ефективним в практичних задачах, де, як правило, досить отримати 2-3 члена ряду, хоча при комп'ютерній реалізації немає необхідності на цьому зупинятися.

Запропонований спосіб заміни змінних дозволяє замінити початкові умови вихідної задачі і перейти до однорідних граничних умов і до відповідної граничної задачі, що, в свою чергу, приводить диференціальне рівняння до інтегрального рівняння Фредгольма II роду з сепарабельним ядром. Це створює можливість скористатися одним із найефективніших методів вирішення рівняння Фредгольма II роду, що полягає в зведенні задачі до системи алгебраїчних рівнянь і до отримання розв'язання як у чисельному, так і в аналітичному вигляді. Метод є досить універсальним.

Розглянутий підхід з використанням послідовних наближень і отриманням еквівалентних інтегральних рівнянь також можна застосувати до дослідження ВП, представлених у досить загальному випадку рівняннями в частинних похідних другого порядку

$$B_1(x,\ t)\frac{\partial^2 U(x,\ t)}{\partial t^2} + B_2(x,\ t)\frac{\partial U(x,\ t)}{\partial t} - \sum_{i,\ j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[a_{i,\ j}(x,\ t)\frac{\partial U}{\partial x_j}\right] +$$

$$\sum_{i=1}^{3} b_i(x,\ t)\frac{\partial U(x,\ t)}{\partial x_i} + a(x,\ t)U(x,\ t) = f(x,\ t),\ \ U(x,\ t)\Big|_{x\in S} = 0, \qquad (7)$$

$$U(x,\ 0) = \varphi(x),\ \ \frac{\partial U(x,\ t)}{\partial t}\bigg|_{t=0} = \psi(x);$$

$$\left[\sum_{i,\,j=1}^{3} a_{i,\,j}\left(x,\,t\right)\frac{\partial U}{\partial x_j}\cos\left(v,\,x_i\right)+\sigma\left(x,\,t\right)U\right]_{x\in S}=0. \tag{8}$$

(в разі крайових умов третього роду).

Модифіковані ітерації приводять до подання розв'язку у вигляді ряду, який, як правило, швидко збігається.

Для багатьох задач цей метод у другому наближенні дає цілком задовільні результати з точки зору оцінки ступеня впливу змінності параметрів на якість відтворення вимірювальними перетворювачами вимірюваної величини. У процесі розв'язання задач аналізу динамічних властивостей нестаціонарних ВП отримані аналітичні вирази можуть бути перевірені численними експериментами.

У методі зведення до інтегрального рівняння (7) зображено у вигляді

$$A\left[U\left(x,\,t\right)\right]=L\left[U\left(x,\,t\right)\right]-f\left(x,\,t\right), \tag{9}$$

де

$$A\left[U\left(x,\,t\right)\right]=\sum_{i,\,j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[a_{i,\,j}\left(x,\,t\right)\frac{\partial U\left(x,\,t\right)}{\partial x_j}\right]-$$
$$\sum_{i=1}^{3} b_i\left(x,\,t\right)\frac{\partial U\left(x,\,t\right)}{\partial x_i}-a\left(x,\,t\right)U\left(x,\,t\right),$$
$$L\left[U\left(x,\,t\right)\right]=B_1\left(x,\,t\right)\cdot\frac{\partial^2 U\left(x,\,t\right)}{\partial t^2}+B_2\left(x,\,t\right)\cdot\frac{\partial U\left(x,\,t\right)}{\partial t}.$$

Рівняння (9) з граничною умовою (8) еквівалентне інтегральному або інтегродиференціальному рівнянню Фредгольма другого роду

$$U\left(x,\,t\right)=-\int\limits_{(\Omega)} G\left(x,\,s,\,t\right)L\left[U\left(s,\,t\right)\right]d_s\Omega+\int\limits_{(\Omega)} G\left(x,\,s,\,t\right)f\left(s,\,t\right)d_s\Omega, \tag{10}$$

де індекс s при диференціалі вказує, за якою змінною відбувається інтегрування (запис інтеграла в такій формі рівнозначний координатній формі у вигляді потрійного інтеграла); $G\left(x,\,s,\,t\right)$ – ядро інтегрального рівняння, що є функцією Гріна оператора A за граничної умови (8).

Якщо функція Гріна є сепарабельною, то задача зводиться до двомірного рівняння Фредгольма II роду, з якого можна отримати систему однорідних (звичайних) диференціальних рівнянь другого порядку, яка вирішується аналогічно випадку ВП з зосередженими параметрами.

Багато вимірювальних перетворювачів, зокрема перетворювачі температури, описуються рівняннями в частинних похідних з граничними умовами, що допускають еквівалентний перехід до моделей у вигляді системи інтегральних рівнянь типу Вольтерри.

$$\chi_1(Fo) + Bi^{(2)}(Fo)\left[\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^{Fo}\frac{\chi_1(Fo')}{\sqrt{Fo-Fo'}}dFo' + \right.$$

$$\left. +\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^{Fo}\frac{\chi_2(Fo')\exp\left[\frac{1}{Fo-Fo'}\right]}{\sqrt{Fo-Fo'}}dFo'\right] -$$

$$-\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^{Fo}\frac{\chi_2(Fo')\exp\left[-\frac{1}{Fo-Fo'}\right]}{\sqrt{(Fo-Fo')^3}}dFo' = \Phi_1(Fo), \tag{11}$$

$$-\chi_2(Fo) - Bi^{(1)}\left[\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^{Fo}\frac{\chi_1(Fo')\exp\left[-\frac{1}{Fo-Fo'}\right]}{\sqrt{Fo-Fo'}}dFo' + \right.$$

$$\left. +\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^{Fo}\frac{\chi_2(Fo')\exp}{\sqrt{Fo-Fo'}}dFo'\right] +$$

$$+\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^{Fo}\frac{\chi_1(Fo')\exp\left[-\frac{1}{Fo-Fo'}\right]}{\sqrt{(Fo-Fo')^3}}dFo' = \Phi_2(Fo), \tag{12}$$

де Fo і Bi – критерії Фур’є і Біо відповідно, Fo' – змінна інтегрування.

Такий спосіб дозволяє скористатися для отримання чисельних рішень ефективними рекурентними обчислювальними схемами.

В розділі розглянуто розв’язання задачі побудови диференціальної динамічної моделі по заданій імпульсній перехідній функції, представленій в сепарабельному вигляді

$$g(t,\ \tau) = \sum_{i=1}^{n}\varphi_i(t)\psi_i(\tau). \tag{13}$$

Запропонований спосіб розв’язання являє собою, по суті, процес апроксимації складних динамічних моделей більш простими моделями. На відміну від відомих у прикладній математиці методів, процес визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією динамічного об’єкта можна спростити, якщо використовувати сепарабельне представлення цієї характеристики стосовно до вимірювальних перетворювачів. Використовуючи аналогію з функцією Гріна, властиві їй умови, інтегральне співвідношення між вимірюваною величиною і вихідними показниками перетворювача, за допомогою n-кратного диференціювання (n – кількість членів білінійного ряду, що представляє імпульсну перехідну функцію) буде отримано шукане диференціальне рівняння

$$\Delta_0 Y^{(n)}(t) - \sum_{i=1}^{n} \varphi_i^{(n)}(t) A_{ni} Y^{(n-1)} - \ldots - \sum_{i=1}^{n} \varphi_i^{(n)}(t) A_{2i} Y' - \\ - \sum_{i=1}^{n} \varphi_i^{(n)}(t) A_{1i} Y = \frac{\Delta_0}{a_n(t)} X(t). \tag{14}$$

Методика застосовується до відновлення диференціального рівняння, що описує ВП другого порядку коливального типу, а також нестаціонарні ВП першого порядку.

Наприклад, для перетворювачів другого порядку рівняння (14) набуває вигляду

$$(\varphi_1 \cdot \varphi_2' - \varphi_2 \cdot \varphi_1') \cdot Y'' + (\varphi_1'' \cdot \varphi_2 - \varphi_2'' \cdot \varphi_1) \cdot Y' + (\varphi_1' \cdot \varphi_2'' - \varphi_2' \cdot \varphi_1'') \cdot Y = \\ = (\varphi_1 \cdot \varphi_2' - \varphi_2 \cdot \varphi_1') \cdot g_t'(t,\ \tau)\big|_{\tau=t} \cdot X(t). \tag{15}$$

Третій розділ присвячено розробці алгоритмічних основ аналізу динаміки вимірювальних перетворювачів за інтегральними моделями (прямі задачі). Метою розділу є розрахунок процесів у вимірювальних перетворювачах, тобто задачі визначення вихідного сигналу, а також вихідних сигналів внутрішніх ланок структурованого ВП, по заданих: моделі ВП, її параметрах і вхідному сигналу. Для досягнення поставленої мети здійснено аналіз вимірювальних перетворювачів по інтегральних моделях на основі чисельної реалізації базового квадратурного методу розв’язання інтегральних рівнянь Вольтерри II роду. Основними видами інтегральних динамічних моделей при цьому є рівняння Вольтерри II роду та інтегральний оператор Вольтерри. Ці моделі можуть бути отримані одним із наступних методів: шляхом опису фізичних закономірностей для процесів у ВП; за допомогою перетворення вихідних математичних моделей іншого виду – звичайних диференціальних рівнянь або рівнянь у частинних похідних; методом ідентифікації на основі обробки експериментальних даних.

Лінійне одновимірне (скалярне) рівняння Вольтерри II роду має вигляд

$$y(x) - \int_a^x K(x,\ s)\, y(s)\, ds = f(x), \quad x \in [a,\ b], \tag{16}$$

де $y(x)$ – шукана функція (вихідний сигнал ВП).

Важливим для практики чисельного рішення є випадки сепарабельного ядра (виродженого чи ядра, що розділяється)

$$K(x,\ s)=\sum_{i=1}^{m}\alpha_i(x)\beta_i(s), \tag{17}$$

якому відповідає рівняння

$$y(x)-\sum_{i=1}^{m}\alpha_i(x)\int_a^x\beta_i(s)y(s)ds=f(x). \tag{18}$$

Нелінійне рівняння Вольтерри II роду з оператором Урисона (рівняння Вольтерри–Урисона) має вигляд

$$y(x)-\int_a^x K\left[x,\ s,\ y(s)\right]ds=f(x),\ \ x\in[a,\ b]. \tag{19}$$

Модель ВП у формі інтегрального оператора

$$y(t)=\int_0^t K(x,\ t)\,f(t)dt, \tag{20}$$

де $y(t)$ – шуканий вихідний сигнал, ядро $K(x,\ t)$ – відома функція (характеристики ВП), $f(t)$ – вхідний сигнал, являє собою явний вираз для визначення $y(t)$.

Встановлено, що в програмних засобах для аналізу ВП доцільно передбачати використання деякої загальної квадратурної формули в сукупності з кількома простими формулами в кінці області інтегрування. При розв'язанні рівнянь Вольтерри потрібно також враховувати можливість обчислень з великою кількістю кроків. Така ситуація має місце при моделюванні вимірювальних перетворювачів у реальному часі, коли проміжок інтегрування може бути дуже великим або навіть заздалегідь невідомим.

Таким чином, особливості динамічних моделей ВП у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерри II роду і операторів Вольтерри при розв'язанні задач аналізу приводять до необхідності розв'язання нової і самостійної відносно диференціальних рівнянь задачі вибору та розробки чисельних методів і алгоритмів реалізації інтегральних динамічних моделей.

Фіксування незалежної змінної x у лінійній моделі (16) дає змогу перейти до виразу

$$y(x_i)-\int_a^{x_i}K(x_i,\ s)y(s)ds=f(x_i),\ i=\overline{1,\ n}. \tag{21}$$

Значення x_i можуть бути обрані спеціальним чином або задані заздалегідь, якщо, наприклад, права частина $f(x)$ задана таблицею (експериментально). Беручи значення x_i як вузли замкнутої квадратурної формули і замінюючи з її допомогою інтеграл у рівнянні (21) кінцевою сумою, отримаємо систему

$$y(x_i) - \sum_{j=1}^{i} A_j K(x_i, x_j) y(x_j) = f(x_i) + R_i[y], \tag{22}$$

де $R_i[y]$ – помилка апроксимації. Вважаючи помилки $R_i[y]$ малими і відкидаючи їх, отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР):

$$y_i - \sum_{j=1}^{i} A_j K_{ij} y_j = f_i,\ i = \overline{1,\ n}, \tag{23}$$

де введено такі позначення:

$$y(x_i) = y_i,\ f(x_i) = f_i,\ K(x_i, x_j) = K_{ij.}$$

Розв'язання (23) дає наближені значення шуканої функції $\tilde{y}(x_i) = y_i$ у вузлах x_i. Система (23) може бути зведена до вигляду

$$-\sum_{j=1}^{i-1} A_j K_{ij} y_j + \left(1 - A_j K_{ii} y_i\right) = f_i,\ i = \overline{1,\ n}, \tag{24}$$

або

$$\begin{pmatrix} 1 - A_1 K_{11} & . & . & . & . & . \\ -A_1 K_{21} & 1 - A_2 K_{22} & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ -A_1 K_{i1} & -A_2 K_{i2} & . & 1 - A_i K_{ii} & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ -A_1 K_{n1} & -A_2 K_{n2} & . & -A_i K_{ni} & . & 1 - A_n K_{nn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ . \\ y_i \\ . \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ . \\ f_i \\ . \\ f_n \end{pmatrix}, \tag{25}$$

звідки видно, що матриця коефіцієнтів системи – трикутна. Це дає змогу послідовно знайти $y_1,\ y_2,\ \ldots,\ y_n$ за рекурентною формулою

$$y_i = \left(1 - A_i K_{ii}\right)^{-1} \left(f_i + \sum_{j=1}^{i-1} A_j K_{ij} y_j \right),\ i = \overline{1,\ n}. \tag{26}$$

Відзначимо особливість виразу (26), що полягає в зростанні кількості обчислень разом із номером кроку дискретизації через збільшення кількості членів суми, причому значення коефіцієнтів $A_i K_{ij}$ при y_j змінюються для кожного i, що в загальному випадку не дає змоги скористатися результатами обчислень на попередніх кроках.

Використання властивостей сепарабельних ядер дозволяє домогтися найкращої швидкодії квадратурних алгоритмів моделювання за рахунок незмінних обсягів обчислень на кроці.

У розділі запропоновано інтегральний метод розрахунку надійності групи вимірювальних перетворювачів, який дозволяє розв'язувати задачу визначення функції розподілу часу безвідмовної роботи групи ВП з урахуванням відновлення їх працездатності. Варіант задачі зводиться до рівняння (19) при:

$$y(t)=\omega_p(t),\;\; f(t)=\lambda e^{-\lambda t},$$

$$K(t-s)=(d-l)e^{-\lambda(t-s)}+le^{-\alpha_1(t-s)}+e^{\alpha_0(t-s)}\left[u\sin\omega_0(t-s)-d\cos\omega_0(t-s)\right],$$

тобто рівняння (19) набуває вигляду

$$\begin{gathered}\omega_p(t)=\lambda e^{-\lambda t}+\int_0^t\Big\{(d-l)e^{-\lambda(t-s)}+le^{-\alpha_1(t-s)}+\\+e^{-\alpha_0(t-s)}\left[u\sin\omega_0(t-s)-d\cos\omega_0(t-s)\right]\Big\}\omega_p(\tau)d\tau,\end{gathered} \tag{27}$$

де $\omega_p(t)$ – функція розподілу часу безвідмовної роботи приладу з урахуванням відновлення працездатності за допомогою ремонту; t – час роботи приладу до відмови; s – час відновлення працездатності приладу; λ – інтенсивність відмов (кількість відома з досліду).

Встановлено, що інтегральний метод вирішення диференціальних рівнянь (у разі зведення до еквівалентного інтегрального рівняння з виродженим ядром) приводить до зниження кількості виконуваних операцій і поліпшення точнісних властивостей рішення.

Розв'язується диференціальне рівняння $y''+y'+y=3e^{-2x},\;\; y'(0)=-2,\;\; y(0)=1.$ Розв'язок шукаємо на інтервалі від 0 до 1. Еквівалентне інтегральне рівняння має вигляд $u(x)=3e^{-2x}+2x+1-\int_0^x(1+x-s)u(s)ds,$ а розв'язок диференціального рівняння визначається виразом

$$y(x)=-2x+1+\int_0^x(x-s)u(s)ds.$$

Поведінку похибки можна простежити за графіками, показаними на рис. 1. Метод Рунге–Кутти забезпечує високу точність на початковій ділянці, але потім приводить до різкого накопичення помилок. Похибка інтегрального методу поступово збільшується на початковій ділянці, але потім стабілізується, що свідчить про згладжувальні властивості методу.

Встановлено, що ітераційні методи розв'язання інтегральних рівнянь є потужним інструментом для моделювання вимірювальних перетворювачів і відрізняються простотою обчислювальних алгоритмів. Метод простої ітерації при розв'язанні лінійних рівнянь Вольтерри II роду при незначних обмеженнях завжди збігається; швидкість збіжності залежить від властивості ядра рівняння.

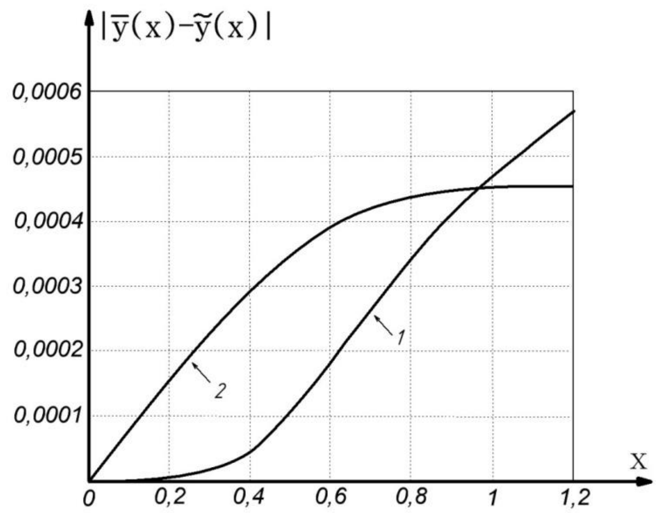

Рисунок 1 – Поведінка похибки при обчисленнях за методом Рунге–Кутти (1) та інтегральним методом (2)

Метод Ньютона–Канторовича є одним із найбільш ефективних при розв'язанні нелінійних рівнянь і дозволяє значно прискорити збіжність порівняно з методом простої ітерації або навіть порівняно з більш складними, в тому числі спеціалізованими, методами.

Застосовуючи метод Ньютона–Канторовича до розв'язання рівняння

$$y(x) = f(x) + \int_a^x K\left[x,\ s,\ y(s)\right] ds, \qquad (28)$$

отримуємо наступний ітераційний процес:

$$y_k = y_{k-1}(x) + \varphi_{k-1}(x),\ k = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots\ , \qquad (29)$$

$$\varphi_{k-1}(x) = \varepsilon_{k-1}(x) + \int_a^x K_y\left[x,\ s,\ y_{k-1}(s)\right]\varphi_{k-1}(s) ds, \qquad (30)$$

$$\varepsilon_{k-1}(x) = f(x) + \int_a^x K_y\left[x,\ s,\ y_{k-1}(s)\right] ds - y_{k-1}(x)\ . \qquad (31)$$

В основі алгоритму лежить рішення лінійного інтегрального рівняння (30) щодо поправки $\varepsilon_{k-1}(x)$ до змінюваних від кроку до кроку ядра і правої частини. Такий процес має надшвидку збіжність другого порядку, проте є досить складним через необхідність розв'язання нового рівняння на кожному ітераційному кроці. Спрощення може бути досягнуто шляхом використання замість рівняння (30)

$$\varphi_{k-1}(x) = \varepsilon_{k-1}(x) + \int_a^x K'_y\left[x,\ s,\ y_0(s)\right]\varphi_{k-1}(s) ds \qquad (32)$$

або рівняння

$$\varphi_{k-1}(x) = \varepsilon_{k-1}(x) + \int_a^x K'_y\left[x,\ s,\ y_m(s)\right]\varphi_{k-1}(s) ds,\ \ m < k-1, \qquad (33)$$

ядра яких незмінні.

Отриманий в результаті ітераційний процес являє собою модифікований метод Ньютона–Канторовича.

Досліджено еквівалентні представлення динамічних моделей вимірювальних перетворювачів першого та другого порядків методом обчислювальних експериментів. Аналітично еквівалентні різні форми динамічних моделей не є рівноцінними при комп’ютерній реалізації, оскільки різні форми моделей реалізуються за допомогою неоднакових обчислювальних схем. Ефективність різних форм моделей вимірювальних перетворювачів дозволяють оцінити обчислювальні експерименти. Проведені дослідження показали, що найкраща якість обчислювального процесу спостерігається при використанні моделей у формі інтегральних рівнянь Вольтерри II роду. Для підвищення точності чисельної реалізації моделей можна застосовувати змінний крок та збільшити кількість точок дискретизації, застосовувати методи Рунге–Кутти вищих порядків. Але ці дії необхідно робити із врахуванням технічних умов до комп’ютерно-інтегрованих систем. У табл. 1-2 наведено відповідно похибки для моделей першого та другого порядків форм динамічних моделей ВП у вигляді диференціального рівняння та еквівалентного йому рівняння Вольтерри II роду з додаванням до вхідного сигналу 5 % білого шуму. Оцінка наведених похибок проведених обчислювальних експериментів в табл. 1-2 при однакових вихідних даних показала, що найвищу точність мають розв’язки, які отримані на основі застосування моделей у формі інтегральних рівнянь Вольтерри II роду.

Таблиця 1 – Похибки чисельної реалізації моделей ВП першого порядку

Вид моделі	Спосіб програмної реалізації	Засіб (метод)	Максимальна абсолютна похибка, M_{Δ}	Інтегральна абсолютна похибка, I_{Δ}	Відносна похибка, M_{δ}
Диференціальне рівняння	Реалізація Matlab	ode23 (Bogacki-Shampine)	0,012817387	0,079925334	1,281738664
		ode45 (Dormand-Prince)	0,022971537	0,146596141	2,297153709
Рівняння Вольтерри II роду	Власна реалізація	VIE (Left)	0,005831836	0,037974921	0,583183593
		VIE1 (Trapezoidal)	0,00547819	0,029871004	0,547818974

Таблиця 2 – Похибки чисельної реалізації моделей ВП другого порядку

Вид моделі	Спосіб програмної реалізації	Засіб (метод)	Максимальна абсолютна похибка, M_{Δ}	Інтегральна абсолютна похибка, I_{Δ}	Відносна похибка, M_{δ}
Диференціальне рівняння	Реалізація Matlab	ode23 (Bogacki-Shampine)	0,005536	0,018696	0,553595
		ode45 (Dormand-Prince)	0,007447	0,028396	0,744722
Рівняння Вольтерри II роду	Власна реалізація	VIE (Left)	0,004773	0,035227	0,477334
		VIE1 (Trapezoidal)	0,003537	0,029062	0,353663

Четвертий розділ спрямований на розробку та дослідження методу і алгоритмів ідентифікації інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів. Метою розділу є вирішення задач побудови моделей вимірювальних перетворювачів за експериментальними даними. Для досягнення поставленої мети розроблено та досліджено інтегральний метод ідентифікації стаціонарних та нестаціонарних вимірювальних перетворювачів як з зосередженими, так і з розподіленими параметрами.

Встановлено, що для досить широкого класу ВП застосування інтегральних динамічних моделей, зокрема моделей, еквівалентних диференціальним моделям, дозволяє отримати основу для побудови високостійких чисельних алгоритмів розрахунку параметрів динамічних моделей ВП у завданні ідентифікації.

При цьому передбачається, що значення вхідного $f(t)$ і вихідного $y(t)$ сигналів вимірюються в моменти часу t_i:

$$0 \le t_1 \le t_2 \le \ldots \le t_N \le T \tag{34}$$

з деякими похибками

$$\tilde{f}(t_i) = f(t_i) + \delta_i, \quad \max_{0 \le i \le N} |\delta_i| = \delta, \tag{35}$$

$$\tilde{y}(t_i) = y(t_i) + \varepsilon_i, \quad \max_{0 \le i \le N} |\varepsilon_i| = \varepsilon, \tag{36}$$

де $\tilde{f}$ і $\tilde{y}$ – наближені, f і y – точні значення сигналів.

Запропоновано спосіб ідентифікації нестаціонарних ВП на основі рішення алгебраїчної системи, отриманої шляхом апроксимації інтегрального оператора, що володіє потенційно високою швидкодією і завадостійкістю.

Для такого класу ВП, після уточненого опису правої частини вихідного інтегрального рівняння, модель набуде вигляду

$$a_1(t)y(t) + \int\limits_{G_1(t)} K_1(t,\tau)y(\tau)d\tau + L_1(t) = a_2(t)f(t) + \int\limits_{G_2(t)} K_2(t,\tau)f(\tau)d\tau + L_2(t), \tag{37}$$

де $a_i(t)$, $K_i(t,\ \tau)$, $L_i(t)$, $\left(i=\overline{1,2}\right)$ параметри, що підлягають визначенню, y і f – відповідно вихідний і вхідний сигнали, $t \in [o,\ T]$.

Алгоритм визначення невідомих параметрів в (37) можна отримати, застосовуючи для обчислення інтегралів квадратурні формули. Суть квадратурного алгоритму розрахунку параметрів моделі (37) полягає в тому, що розрахункові вирази в ньому формуються на основі дискретизації інтегралів за допомогою квадратурних формул, коли шукані параметри $a_\nu(t)$, $L_\nu(t)$, и $K_\nu(t,\ \tau)$ визначаються наступними співвідношеннями:

$$a_1(t) \equiv 1,\ a_2(t) \equiv 0,\ L_1(t) \equiv 0, \tag{38}$$

$$K_1(t,\ \tau)=K(t-\tau)=\sum_{j=1}^{m} q_j \frac{(t-\tau)^{j-1}}{(j-1)!},\ m\in N, \tag{39}$$

$$K_2(t,\ \tau)=\frac{(t-\tau)^{m-1}}{(m-1)!}, \tag{40}$$

$$L_2(t)=\sum_{j=1}^{m-1}\left(C_j\frac{t_j}{j!}+q_j\sum_{k=0}^{m-j-1}C_k\frac{t^{k+j}}{(k+j)!}\right), \tag{41}$$

де q_j – невідомі, а C_j – відомі сталі величини, тоді рівняння (37) буде еквівалентне диференціальному рівнянню.

Для формування системи лінійних алгебраїчних рівнянь щодо невідомих коефіцієнтів $q_j,\ j=\overline{1,\ m},$ перетворимо рівняння (37) з урахуванням (38) – (41) до виду

$$\sum_{j=1}^{m} q_j\left[\int_0^t\frac{(t-s)^{j-1}}{(j-1)!}y(s)ds-\sum_{k=0}^{m-j-1}C_k\frac{t^{k+j}}{(k+j)!}\right]=$$
$$=\int_0^t\frac{(t-s)^{m-1}}{(m-1)!}f(s)ds+\sum_{j=0}^{m-1}C_j\frac{t_j}{j!}-y(t). \tag{42}$$

Звідси для точок фіксації (вимірювання) $t_i\ \left(i=\overline{0,\ n}\right)$ виду (34), вважаючи, що $m=n,$ отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь щодо невідомих коефіцієнтів q_j.

В дисертації наведено приклад розв’язання тестової задачі з використанням описаного методу.

Приклад. Задано: вхідний сигнал $u(t)=t^3$, вихідний сигнал $f(t)=-t^3+1{,}5t+12t+6,$ початкові умови $C_1=0,\ C_2=0,\ C_3=0.$ Необхідно визначити коефіцієнти p_i еквівалентного диференціального рівняння

$$u'''(t)+p_1u''(t)+p_2u'(t)+p_3u(t)=f(t),$$

$$u^{(i-1)}(0)=C_i,\ i=\overline{1,\ 3}.$$

(Точний розв’язок: $p_1=2,\ p_2=0{,}5,\ p_3=-1$).

У табл. 3 представлені значення коефіцієнтів p_i, що отримані при різних значеннях завади.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів p_i

Величина завади в % від вихідного сигналу	Середньо-квадратична похибка	p_1	p_2	p_3
0	$5,9 \cdot 10^{-6}$	1,9996	0,4014	– 1,0018
1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	1,9799	0,4880	– 1,1241
4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	2,0496	0,3674	– 0,8863
10	$8,6 \cdot 10^{-4}$	1,8763	1,1024	– 1,8242

Запропоновано ефективні алгоритми ідентифікації ВП при невідомих початкових умовах. Сутність алгоритму розрахунку моделі ВП має таку особливість, що шляхом виключення нелінійних додатків вихідна нелінійна задача приводиться до лінійної. Таким чином можливо знайти значення параметрів $q_i\left(i=\overline{1,\ n}\right)$ і значення вихідного сигналу в початковій точці t_0. Результати рішення модельних прикладів показують, що запропоновані алгоритми ідентифікації ВП досить ефективні (з точки зору точнісних властивостей квадратурного алгоритму) і можуть бути застосовані для вирішення практичних завдань.

Застосування методів степеневих рядів (в дисертації були використані сплайни) в задачі ідентифікації ВП є високопродуктивним підходом, оскільки дозволяє уніфікувати подання елементів математичної моделі і отримати на цій основі ефективні розрахункові вирази.

Отримання відповідного алгоритму ідентифікації розглянемо на прикладі стаціонарних ВП другого порядку

$$y''(t)+q_1y'(t)+q_2y=f(t),\ y(0)=C_0,\ y'(0)=C_1. \tag{43}$$

Для диференціального рівняння (43) еквівалентним є інтегральне рівняння

$$y(t)+\int_0^t\left[q_1+q_2(t-s)\right]y(s)ds=\int_0^t(t-s)f(s)ds+C_0+C_1t+q_1C_0t, \tag{44}$$

яке можна подати у зручній формі для формування СЛАР відносно невідомих параметрів

$$q_1\left(\int_0^t y(s)ds-C_0t\right)+q_2\int_0^t(t-s)y(s)ds=\int_0^t(t-s)f(s)ds+C_0+C_1t-y(t).$$

Скористаємося інтерполяційним кубічним сплайном вигляду

$$s_3(x,\ y)dx=d_i^j\left(x_j-x\right)^3+d_2^j\left(x-x_{j-1}\right)^3+d_3^j\left(x_j-x\right)+d_4^j\left(x-x_{j-1}\right), \tag{45}$$

$$s_3(x,\ f)dx=a_i^j\left(x_j-x\right)^3+a_2^j\left(x-x_{j-1}\right)^3+a_3^j\left(x_j-x\right)+a_4^j\left(x-x_{j-1}\right). \tag{46}$$

Підставивши (45) і (46) в (44), отримаємо

$$q_1\left(\sum_{j=1}^{i}\int_{x_{j-1}}^{x_j} s_3(x,\, y)\,dx - C_0 x_j\right) + q_2\sum_{j=1}^{i}\int_{x_{j-1}}^{x_j}(x_j - x)\,s_3(x,\, y)\,dx =$$

$$= \sum_{j=1}^{i}\int_{x_{j-1}}^{x_j}(x_j - x)\,s_3(x,\, f)\,dx + C_0 + C_1 x_j - y_j,\ i = \overline{1,\, m}. \tag{47}$$

Для формування системи відносно q_1 і q_2 обчислимо інтеграли в (47).

Остаточний вигляд СЛАР відносно q_1 і q_2 має вигляд

$$Aq = F, \tag{48}$$

де $A = \{A_{k1},\, A_{k2}\}_{k=\overline{1,\, m}}$, $q = (q_1,\, q_2)^T$, $F = (F_1,\, F_2, \ldots,\, F_m)$,

$$A_{k1} = \sum_{j=1}^{k}\Big[d_1^j\left(2j^3 - 3j^2 + 2j\right)h^4 + d_2^j\left(6j - 6j^4 + \frac{15}{4}\right)h^4 + d_3^j\left(2j - \frac{1}{2}\right)h^2 +$$
$$+ d_4^j\,\frac{h^2}{2}C_0 jh\Big],$$
$$A_{k2} = \sum_{j=1}^{i}\Big[d_1^j\left(2j^4 - 3j^3 + 2j^2 - \frac{1}{2}j + \frac{1}{5}\right)h^5 + d_2^j\left(-2j^3 + + 6j^2 + \frac{7}{2}j - 6j^5 + \frac{1}{20}\right)h^5 +$$
$$+ d_3^j\left(j - \frac{1}{6}\right)h^3 + d_4^j\left(-j^2 + 2j - \frac{5}{6}\right)^3 h^3\Big],$$

$$F_k = \sum_{j=1}^{i}\Big[a_1^j\left(2j^4 - 3j^3 + 2j^2 - \frac{1}{2}j + \frac{1}{5}\right)h^5 + a_2^j\left(-2j^3 + 6j^2 + \frac{7}{2}j - 6j^5 + \frac{1}{20}\right)h^5 +$$
$$+ a_3^j\left(j - \frac{1}{6}\right)h^3 + d_4^j\left(-j^2 + 2j - \frac{5}{6}\right)^3 h^3\Big].$$

Алгоритм розрахунку параметрів у разі, коли вхідний і вихідний сигнал апроксимується кубічними сплайнами, дозволяє: підвищити точність розрахунку параметрів q на порядок відносно кроку h порівняно з квадратурним алгоритмом на основі формули трапецій; отримати в разі неповної вихідної інформації додаткові точки для формування нормальних систем відносно параметрів, що розраховуються.

Розглянуто питання побудови лінійних диференціальних та інтегральних моделей вимірювальних перетворювачів на основі тейлорівських розкладів (метод П.Є. Пухова). Ефективність застосування підходів, що викладаються, до підвищення точності розрахунку параметрів Т-моделей ілюструється на прикладах. Показано, що інтегральні алгоритми дають максимально можливу точність (в сенсі величини нев'язки) при тій же вихідній інформації.

П'ятий розділ присвячено розробці методу і алгоритмів відновлення сигналу на вході вимірювального перетворювача. Метою розділу є відновлення сигналу за допомогою обробки вихідного сигналу на основі розв'язання оберненої задачі для рівняння Вольтерри I роду з орієнтацією на задачу динамічної корекції вимірювального перетворювача. Для досягнення поставленої мети розроблені методи та алгоритми чисельної реалізації інтегральних моделей в задачах відновлення сигналів вимірювальних перетворювачів.

Ефективними методами опису задачі відновлення сигналів на вході вимірювального перетворювача є інтегральні рівняння Вольтерри.

Розглянемо рівняння

$$\int_{t_0}^{t} L(t,\ \tau)\, y(\tau)\, d\tau = f(t),\ t \in [t_0,\ T]. \tag{49}$$

Рівняння (49) є інтегральним рівнянням Вольтерри I роду, що описує задачу відновлення сигналу в динамічній системі без зворотного зв'язку. В ньому $L(t,\ \tau)$ – імпульсна перехідна функція (імпульсна реакція або вагова функція), $y(t)$ – вхідний сигнал лінійного ВП, $f(t)$ – вихідний сигнал (відгук, реакція системи). В розділі запропонована структурна динамічна корекція вихідних сигналів вимірювального перетворювача. Типовою системою з елементами структурної корекції є вимірювальний канал (*ВК*) (рис. 2), де *ВП* – вимірювальний перетворювач; *КП* – коригуючий пристрій; *РП* – реєструючий прилад.

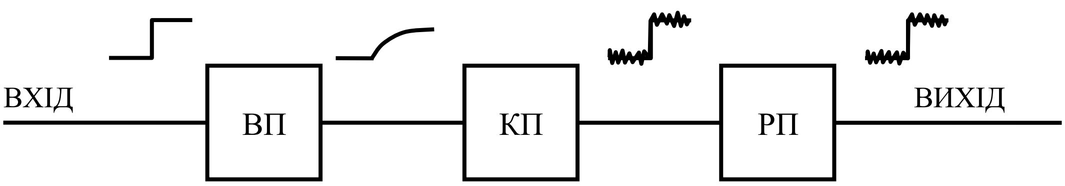

Рисунок 2 – Вимірювальний канал з елементами структурної корекції

Згідно зі структурною схемою ВК динамічні спотворення, що вносяться вимірювальним каналом, будуть мінімальні, якщо сигнали $x_{ВП}(t)$ та $y_{КП}(t)$ збігаються якомога ближче. Цього можна досягти в ідеальному випадку: $A_{КП} = A_{ВП}^{-1}$ ($A_{КП}$ – оператор КП, $A_{ВП}^{-1}$ – оператор ВП), тобто вирішити задачу моделювання вимірювального перетворювача.

Задачу звернення оператора *A* певною мірою можна полегшити, якщо його представити з адитивним виділенням одиничного оператора у вигляді

$$A \approx \alpha + A = \alpha\left(1 + \frac{1}{\alpha} A\right), \tag{50}$$

де α – ваговий коефіцієнт (малий параметр).

Практично у досягненні ідеальних динамічних властивостей вимірювального каналу немає необхідності, що дозволяє замінити оператор $A_{ВП}$ оператором типу (50) з малим параметром α. Цей параметр має назву регуляризуючого.

Для математичного опису ВП, що мають багатозв'язну структуру, використовуються системи інтегральних рівнянь Вольтерри I роду, які в матричній формі мають наступний вигляд:

$$\int_a^x K(x-s)\vec{\varphi}(s)ds = \vec{f}(x),\ a \le x \le b, \tag{51}$$

де $K(x-s)$ – матриця ядер: $\vec{\varphi}(s)$ и $\vec{f}(x)$ – вектори невідомих функцій та правої частини системи.

У задачах відновлення сигналів і динамічної корекції для розв’язання системи рівнянь (51) доцільно застосувати метод обернених матриць, який дозволяє отримати ефективні алгоритми і будувати на їх основі комп’ютерні засоби.

Згідно з методом обернених матриць вираз (51), в якому інтеграли замінюються кінцевими сумами, розв’язуємо відносно φ.

Після проведення необхідних перетворень остаточний розрахунковий вираз розв’язання системи інтегральних рівнянь (51) матиме вигляд (52)

$$\begin{cases} \begin{vmatrix} \varphi_1(0) \\ \varphi_2(0) \\ \vdots \\ \varphi_n(0) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} f_1'(0) \\ f_2'(0) \\ \vdots \\ f_n'(0) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{vmatrix}^{-1}, \\ \begin{vmatrix} \varphi_1(x_i) \\ \varphi_2(x_i) \\ \vdots \\ \varphi_n(x_i) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} f_1*(x_i) \\ f_2*(x_i) \\ \vdots \\ f_n*(x_i) \end{vmatrix} \cdot \dfrac{2}{h} \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{vmatrix}^{-1}. \end{cases} \tag{52}$$

Запропоновані швидкодіючі квадратурні алгоритми (рис. 3) здатні забезпечити чисельну реалізацію інтегральних моделей та бути основою при побудові високопродуктивних спеціалізованих мікропроцесорних систем у режимі реального часу. Встановлено, що алгоритми, отримані на основі використання властивостей роздільності ядра, є більш швидкодіючими.

Підвищення вимог до точності результатів забезпечує застосування методу колокацій, що дає можливість отримувати розв’язок на ділянках, вибираючи їх довжину, застосовуючи на кожній із них апроксимуючий вираз з невеликою кількістю координатних функцій. Розглянуто модифікований варіант методу колокацій, що базується на застосуванні кусково-гладкого полінома $\tilde{y}(x) = P(x)$, складеного по ділянках із поліномів вигляду

$$P_{k+1}(x) = P_k(x_k,\ 0) + \sum_{j=1}^{m} \frac{c_{k,j}}{j!}(x - x_{k,0})^j,\ k = \overline{0,\ N-1} \tag{53}$$

стосовно до розв’язку рівнянь типу Вольтерри I роду.

В дисертації наведено приклад розв'язання тестової задачі з використанням описаного методу.

Задано рівняння

$$\int_0^x (x+s)\,y(s)\,ds = 2x\sin x + \cos x - 1,\ Y(0)=1.$$

Дотримуючись розглянутого методу, знайдемо наближений розв'язок на 1-й ділянці, приймаючи $h=\dfrac{\pi}{60}$, $m=2.$ Значення вузлів, що поділяють ділянки:

$$x_{0,\,0}=0;\ x_{1,\,0}=\frac{\pi}{30};\ x_{2,\,0}=\frac{\pi}{15};\ \ldots$$

Перша ділянка (як і інші) розбивається на дві частини, які обмежені точками колокації:

$$x_{0,\,0}=0;\ x_{1,\,0}=\frac{\pi}{60};\ x_{0,\,2}=x_{1,\,0}=\frac{\pi}{30}.$$

На 1-й ділянці шуканий розв'язок подаємо у вигляді

$$\tilde{y}(x)\cong P_0(x)=P_0\left(x_{0,\,0}\right)+c_{0,\,1}\left(x-x_{0,\,0}\right)+\frac{1}{2}c_{0,\,2}\left(x-x_{0,\,0}\right)^2,$$

де $P_0\left(x_{0,\,0}\right)=Y(0)$, підстановка якого у вихідне рівняння при $x=x_{0,\,1}$ і $x=x_{0,\,2}$ зводить його до системи

$$\int_0^{\frac{\pi}{60}}\left(\frac{\pi}{60}+s\right)\left(1+c_{0,\,1}s+\frac{1}{2}c_{0,\,2}s^2\right)ds=2\frac{\pi}{60}\sin\frac{\pi}{60}+\cos\frac{\pi}{60}-1,$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{30}}\left(\frac{\pi}{30}+s\right)\left(1+c_{0,\,1}s+\frac{1}{2}c_{0,\,2}s^2\right)ds=2\frac{\pi}{30}\sin\frac{\pi}{30}+\cos\frac{\pi}{30}-1.$$

Після обчислення інтегралів система набирає вигляду

$$0,000120c_{0,\,1}+0,000007c_{0,\,2}=-0,0000026,$$

$$0,000958c_{0,\,1}+0,000035c_{0,\,2}=-0,0000036,$$

а її розв'язок $c_{0,\,1}=0,0262569;$ $c_{0,\,2}=-0,8215468;$

тоді

$$P_0(x)=1+0,0262569x-0,8215468\frac{x^2}{2}.$$

Після обчислення значень $\tilde{Y}\left(\frac{\pi}{30}\right) = P_0\left(\frac{\pi}{30}\right) - 0{,}990339$ їх можна порівняти із точними $Y\left(\frac{\pi}{30}\right) = 0{,}9945517$ (точний розв'язок $y(x) = \cos x$).

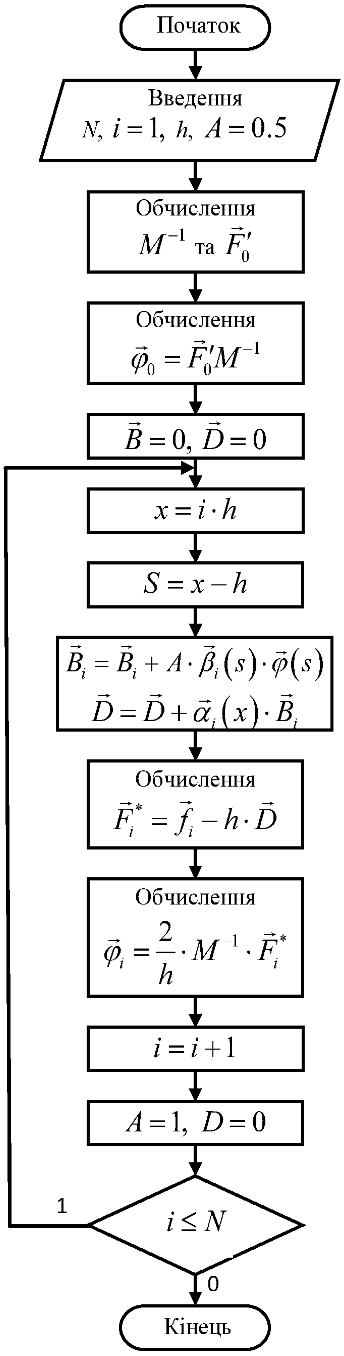

Рисунок 3 – Блок-схема швидкодіючого алгоритму чисельного розв'язання системи IP Вольтерри I роду

Запропоновано спосіб внутрішньої регуляризації (спосіб модельних прикладів) при розв'язанні слабосингулярних інтегральних рівнянь Вольтерри I роду в разі побудови математичної моделі для розв'язання задачі відновлення значень температури на робочому кінці теплового датчика стрижневого типу (високі температури, тривала експлуатація в екстремальних умовах).

У цьому випадку вихідна модель являє собою диференціальне рівняння

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},\ t > 0,\ 0 \le x \le \infty. \qquad (54)$$

Застосовуючи перетворення Лапласа до (54) та розв'язавши операторне рівняння, в підсумку отримаємо вираз

$$\frac{2}{\pi} \int_0^t \frac{l e^{-\frac{l^2}{4a^2 \sqrt{t-\tau}}}}{2a(t-\tau)^{3/2}} f(\tau) d\tau = T(l,\ t). \qquad (55)$$

Таким чином, шукана модель (55) являє собою інтегральне рівняння Вольтерри I роду з різницевим ядром. Разом з тим, ядро (55) є слабосингулярним. Така особливість ядра призводить до обчислювальних ускладнень при $t = \tau$ Одним із способів врахування слабосингулярності є введення малого регуляризуючого параметра β у знаменник функції ядра, тобто здійснення переходу до наближеного рівняння (56).

$$\int_0^t \frac{K_0(t-\tau)}{\beta + (t-\tau)} \tilde{f}(\tau) d\tau = T(l,\ t). \qquad (56)$$

Значення β може бути знайдено різними способами. Одним із ефективних способів є спосіб модельних експериментів. Шляхом чисельного розв'язання рівняння (56) методом квадратур для ряду значень β визначається $\beta_{опт}$.

У розділі запропоновано багатокрокові алгоритми вирішення інтегральних рівнянь Вольтерри I роду в задачі відновлення сигналів, що ґрунтуються на використанні інтерполяційних формул типу Адамса з високим порядком точності. Проведено аналіз стійкості багатокрокового методу до збурень початкових даних.

Запропоновано новий спосіб забезпечення стійкості рішення задачі обчислювального відновлення сигналу неідеального вимірювального перетворювача, який володіє властивостями інерційності або дефокусування. Спосіб полягає у розв'язанні задачі частинами на основі мультиплікативного розщеплення математичної моделі перетворювача.

Шостий розділ присвячений розробці комплексу програм розв'язання прямих та обернених задач моделювання вимірювальних перетворювачів на основі інтегральних рівнянь, рішення модельних і прикладних задач, проведення експериментальних досліджень. Мета розділу – організація моделюючої системи та розв'язання прикладних задач. Для досягнення визначеної мети розроблено відповідний комплекс програм, за допомогою якого здійснено розв'язання прямих та обернених задач моделювання вимірювальних перетворювачів, отримано розв'язки модельних та прикладних задач, досліджено динаміку та формування моделей вимірювальних перетворювачів.

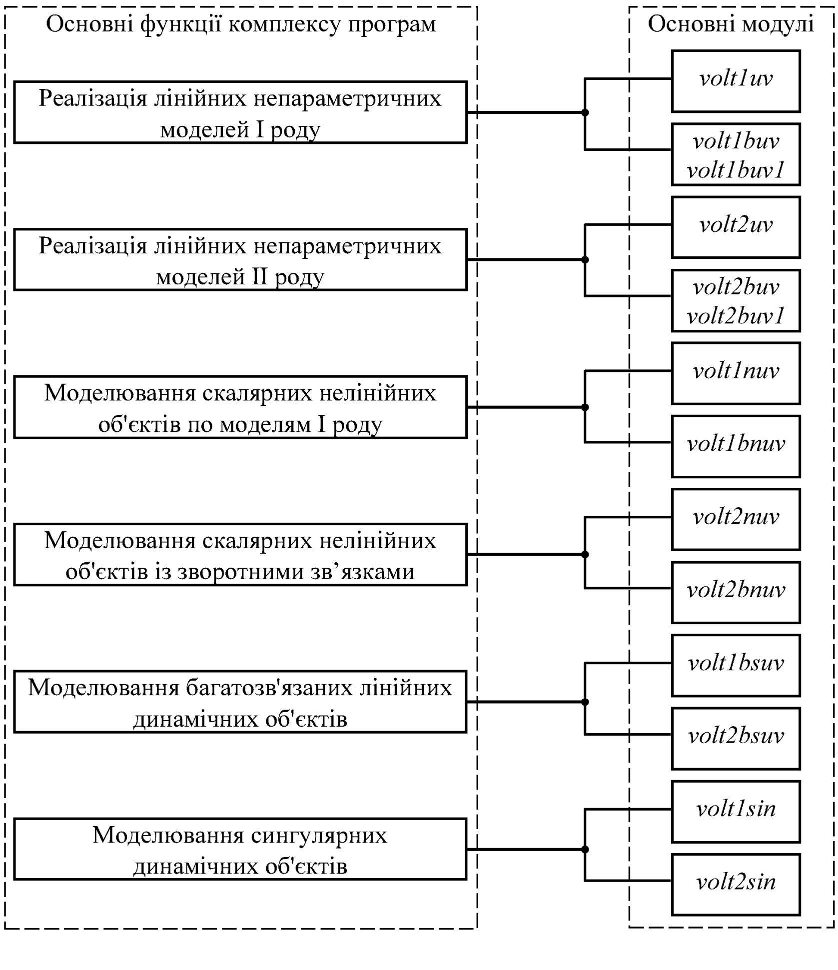

Рисунок 4 – Структурна схема комплексу прикладних програм

На основі запропонованих алгоритмів вперше розроблений комплекс прикладних програм (структурна схема комплексу представлена на рис. 4) для моделювання широкого класу вимірювальних перетворювачів з реалізацією лінійних і нелінійних інтегральних моделей та їх систем в середовищі MATLAB; програмні засоби організовані відповідно до прийнятої в системі MATLAB концепції пакетів прикладних програм, що дозволяє використовувати такі властивості, як можливість спільного використання з іншими пакетами прикладних програм, можливість аналізу, корекції і застосування розроблених функцій як шаблонів для розробки нових додатків, можливість використання програм у рамках системи MATLAB на будь-якій обчислювальній платформі; розроблена методика використання програм комплексу для розв'язання конкретних задач.

Показано, що найбільш точно динамічні властивості градієнтних приймачів теплових потоків описує модель другого порядку

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2}+q_1\frac{dy(t)}{dt}+q_2y(t)=q_3f(t), \tag{57}$$

що добре узгоджується з експериментальними результатами. На рис. 5 зображено вихідний сигнал моделі та реальний вихідний сигнал.

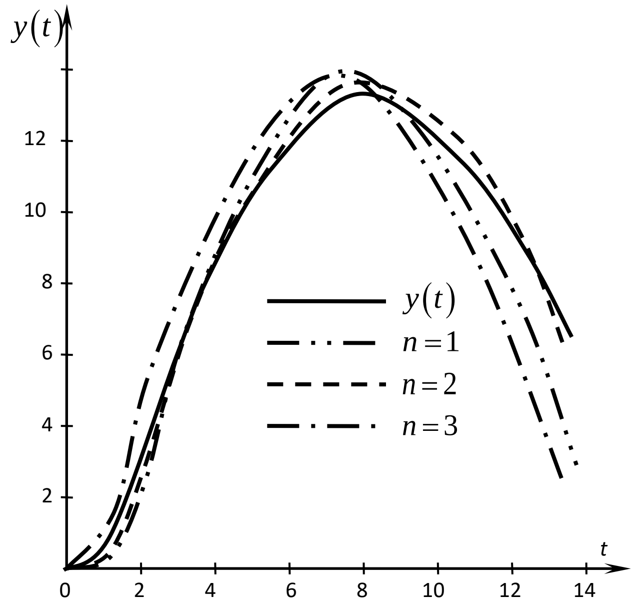

Рисунок 5 – Графіки вихідних сигналів моделі ($n=1, n=2, n=3$) та реального вихідного сигналу $y(t)$

Доцільним підходом до розв'язання цієї задачі є розрахунок параметрів інтегральної динамічної моделі, яка еквівалентна вихідному диференціальному рівнянню.

Встановлено, що вибір тієї чи іншої математичної моделі значною мірою залежить від частоти збурюючого впливу. В області низьких частот перевагу слід віддати диференціальній моделі, в області середніх частот очевидна перевага інтегродиференціальної моделі, а в області високих частот гладкість отримуваного розв'язку за інтеграль-ною моделлю виявляється значно вищою.

На рис. 6 наведені отримані залежності помилки розв'язку від частоти завади.

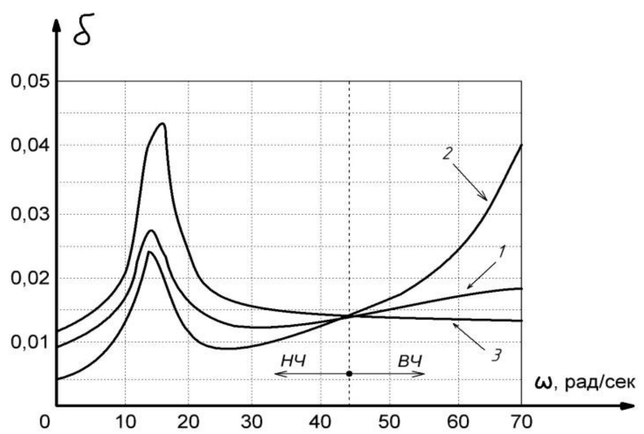

Рисунок 6 – Залежність помилки розв'язку від частоти завади для інтегродиференціальної (1), диференціальної (2) та інтегральної (3) моделей

Розглянуто математичний опис п'єзотрансформаторного вимірю-вального перетворювача. Встанов-лено, що результати моделювання і експерименту показують задовільний збіг, що дає підставу зробити висновок про те, що вибір структури моделі є правильним.

На рис. 7 наведені експериментальні, а на рис. 8 – розрахункові графіки, отримані в одному з варіантів тактильної матриці.

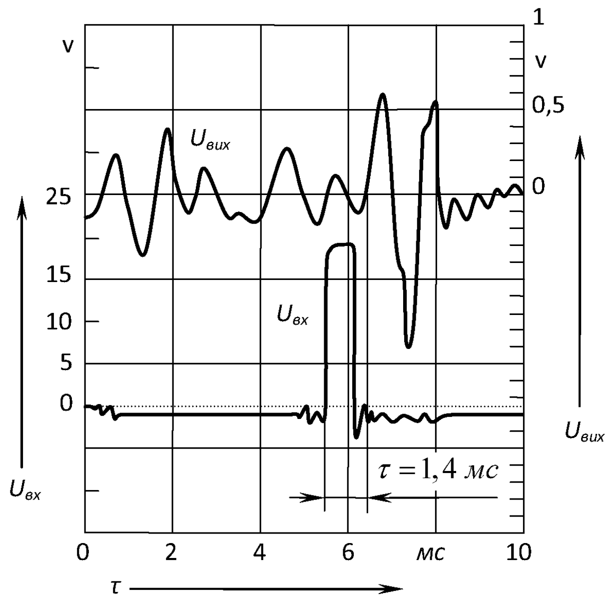

Рисунок 7 – Графік експериментальних даних роботи НПТ

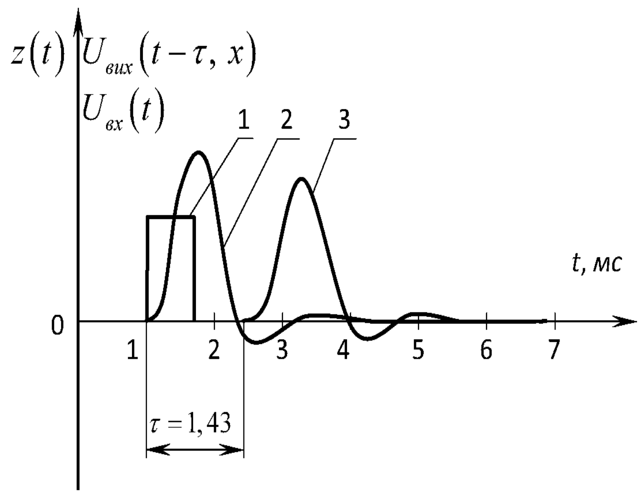

Рисунок 8 – Розрахунковий графік роботи НПТ:
$1 - U_{вх}(t)$; $2 - z(t)$; $3 - U_{вих}(t-\tau, x)$

Показано, що для формування непараметричних інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів використана методика визначення наближень імпульсних перехідних функцій (рис. 9), які є ядрами інтегральних операторів. Методика базується на апроксимації експериментальних залежностей, отриманих при ступінчастих вхідних впливах з подальшим їх диференціюванням за часом.

Як один із прикладів наведено модель аналізатора вмісту вуглекислого газу в газовій суміші, побудовану на основі використання експериментального відгуку газоаналізатора на ступінчастий вплив (імпульсну подачу газової суміші з 2,3 % CO_2 шляхом швидкого відкриття вентиля).

Обчислення згортки наближення $k(t)$ зі ступінчастою функцією $2{,}3H(t)$ (2,3 % – концентрація CO_2 у використаній в експерименті газовій суміші)

$$c(t) = 2{,}3\int_0^t k(t-s)H(s)ds \tag{58}$$

дало як наслідок криву, що практично збігається з вихідною експериментальною залежністю (рис. 10).

Запропоновано інтегральну динамічну модель датчика сигналів акустичної емісії, яка володіє можливістю параметричного налаштування під різні види вихідних сигналів і дозволяє ефективно реалізувати характеристики датчика в комп’ютерних програмах.

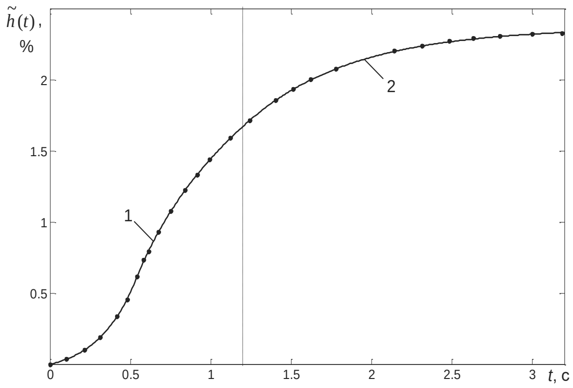

Рисунок 9 – Наближення перехідної функції газоаналізатора:
1 – сплайн-апроксимація,
2 – експоненціальна апроксимація,
точки – експериментальні дані

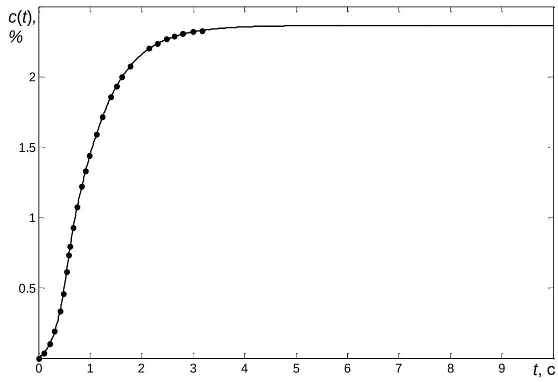

Рисунок 10 – Розрахункова реакція газоаналізатора
на ступінчастий вплив (точки – експериментальні дані)

У **висновках** наведено найбільш важливі наукові і практичні результати, отримані при виконанні роботи.

У **додатках** наводяться акти на впровадження результатів дисертаційної роботи на підприємствах та в науково-дослідних і навчальних установах. Серед них: Черкаський міський РЕМ ПАТ «Черкасиобленерго» (м. Черкаси), ТОВ «СІКАМ Україна» (м. Київ), ДП «Черкасистандартметрологія» (м. Черкаси), ПАТ «АЗОТ» (м. Черкаси), ПАТ «Тернопільський радіозавод «Оріон» (м. Тернопіль), ТОВ «Навіс-Україна» (м. Сміла), у навчальному процесі Черкаського державного технологічного університету, а також список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ З РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема створення і розвитку математичного і комп’ютерного моделювання динаміки широкого класу сучасних вимірювальних перетворювачів на основі розширення кола задіяних видів динамічних моделей з залученням інтегральних операторів і рівнянь типу Вольтерри, створення розгалуженого алгоритмічного забезпечення процесів комп’ютерного моделювання та побудови програмних засобів, які забезпечать ефективне розв’язання задач відтворення динамічних процесів стосовно досліджуваних технічних об’єктів. У тому числі отримані наступні результати.

1. Як вдосконалення запропоновано, обґрунтовано та досліджено інтегральний метод математичного моделювання процесів у вимірювальних перетворювачах, який полягає в застосуванні математичних моделей у вигляді інтегральних операторів Вольтерри і інтегральних рівнянь Вольтерри другого роду, що дозволяє за узагальненою методикою формувати моделюючі залежності для перетворювачів із розподіленими і зосередженими параметрами із забезпеченням високого рівня адекватності при використанні первинних аналітичних або експериментальних даних, а також створити передумови для їх ефективної числової реалізації з

використанням згладжуючих і завадозахисних властивостей інтегральних динамічних моделей.

2. Розроблено методи формування явних і неявних непараметричних моделей динаміки стаціонарних вимірювальних перетворювачів із зосередженими та розподіленими параметрами, в тому числі макромоделей у вигляді інтегральних операторів; динамічних моделей у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерри II роду для структур, охоплених зворотними зв'язками; відповідних нелінійних операторів і рівнянь.

3. Розроблено метод формування на основі двовимірних перехідних функцій інтегральних динамічних моделей нестаціонарних вимірювальних перетворювачів із зосередженими та розподіленими параметрами.

4. Проаналізовано властивості непараметричних динамічних моделей у вигляді інтегральних операторів і рівнянь Вольтерри, що визначають їх функціональні можливості при дослідженні різних класів вимірювальних перетворювачів, а також сформульовано особливості, що впливають на вибір методів і розробку алгоритмів для чисельного розв’язання рівнянь і створення програмних засобів їх комп’ютерної реалізації.

5. Для забезпечення можливості оптимізації процесів і засобів моделювання первинних перетворювачів, побудови комп’ютерної моделюючої системи з урахуванням обмеженої точності первинних даних, вибору форм математичних моделей, сумісності математичних і комп’ютерних моделей за критеріями адекватності, обчислювальної точності і рівня складності запропоновано методи перетворення динамічних моделей, в тому числі: метод розщеплення з частковим оберненням диференціального оператора, методи старшої похідної і послідовного інтегрування.

6. Розроблено алгоритмічні основи побудови ефективних засобів комп’ютерного моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах, описуваних інтегральними динамічними моделями; в тому числі: розроблено квадратурні алгоритми чисельної реалізації інтегральних операторів Вольтерри, а також розв’язання інтегральних рівнянь Вольтерри другого роду і їх систем, що забезпечує широкий діапазон точності моделювання шляхом використання квадратурних формул із різними показниками точності або їх комбінацій; алгоритми розв’язання нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри другого роду на основі модифікованого методу Ньютона–Канторовича, що дає змогу зменшити обчислювальну складність ітерацій зі збереженням збіжності ітераційного процесу. Модифікований метод Ньютона–Канторовича збігається на 4-му кроці, метод простої ітерації – на 13-му кроці. Особливість полягає також у вдало вибраному початковому наближенні. Змінна межа інтегрування в інтегральних рівняннях Вольтерри дозволяє спростити завдання пошуку початкового наближення.

7. Розвинено алгоритмічні основи побудови швидких обчислювальних процесів реалізації інтегральних моделей на основі врахування властивостей сепарабельних ядер. Показано (на прикладі інтегрального методу розрахунку надійності групи ВП), що час комп’ютерного розрахунку за алгоритмом з урахуванням властивості роздільності ядра в 2,2 рази менший, ніж за алгоритмом

без подання ядра роздільним за рахунок незмінного обсягу обчислень на кроці. Підвищується також і точність результату за рахунок меншого накопичення похибок округлень.

8. Запропоновано спосіб ідентифікації нестаціонарних вимірювальних перетворювачів на основі рішення алгебраїчної системи, отриманої шляхом апроксимації інтегрального оператора, що має потенційну високу швидкодію та завадостійкість. Застосування сплайнів у задачах ідентифікації вимірювальних перетворювачів дозволяє підвищити точність розрахунку параметрів на порядок відносно кроку порівняно з квадратурним алгоритмом на основі формули трапецій і отримати, в разі неповної вхідної інформації, додаткові точки для формування нормальних систем відносно шуканих параметрів.

9. Запропоновано метод чисельного розв’язання інтегральних рівнянь Вольтерри І роду в некоректній задачі відновлення вхідного сигналу вимірювального перетворювача з розподіленими параметрами; метод забезпечує отримання стійкого розв’язку на основі «внутрішньої» регуляризації із застосуванням способу модельних експериментів. Отримані результати свідчать про ефективність використання методу регуляризації при розв’язанні сингулярних інтегральних рівнянь.

10. На основі запропонованих алгоритмів вперше розроблено комплекс прикладних програм для моделювання широкого класу вимірювальних перетворювачів із реалізацією лінійних і нелінійних інтегральних моделей та їх систем у середовищі MATLAB; програмні засоби організовані відповідно до прийнятої в системі MATLAB концепції пакетів прикладних програм, що дозволяє використовувати такі властивості, як можливість аналізу, корекції і застосування розроблених функцій як шаблонів для розробки нових додатків, можливість використання програм у рамках системи MATLAB на будь-якій обчислювальній платформі; запропоновано методику використання програм комплексу для розв’язання конкретних задач. Розроблені програми можуть бути ефективно використані як автономно, так і спільно з іншими пакетами прикладних програм.

11. За допомогою запропонованих алгоритмів і розроблених програмних засобів вирішено ряд таких прикладних задач: формування інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів вологості газу, швидкості потоку, кута повороту, прискорення, витрати, тиску, температури, хемотронного ВП; побудова моделей градієнтних приймачів теплових потоків; отримання за експериментальними даними інтегральних моделей газоаналізаторів, плівкового термоприймача, п’єзоелектричного датчика тиску та ін.

12. Результати дисертаційної роботи впроваджено на Черкаському міському РЕМ ПАТ «Черкасиобленерго» (м. Черкаси), ТОВ «СІКАМ Україна» (м. Київ), ДП «Черкасистандартметрологія» (м. Черкаси), ПАТ «АЗОТ» (м. Черкаси), ПАТ «Тернопільський радіозавод «Оріон» (м. Тернопіль), ТОВ «Навіс-Україна» (м. Сміла), в освітньому процесі Черкаського державного технологічного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] A. Sytnik, S. Protasov, and K. Klyuchka, "Development of the metod for creating explicit integral dynamic models of measuring transducers", *Східно–Європейський журнал передових технологій*, № 5/4 (89), с. 40 – 48, 2017 **(Входить до Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, CrossRef, OAJI, Sherpa/Romeo).** *Здобувач запропонував метод формування явних інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів як з розподіленими, так і з зосередженими параметрами.*

[2] В. А. Іванюк, О. О. Ситник, та Ю Стертен, "Дослідження еквівалентних форм представлення динамічних моделей вимірювальних перетворювачів методом обчислювальних експериментів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 1, с. 27–34, 2018. **(Входить до бази даних Index Copernicus).** *Здобувач запропонував алгоритми чисельної реалізації інтегральних рівнянь для проведення обчислювальних експериментів.*

[3] A. A. Sytnik, "Algorithms for identifications of stationary transducers", *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, Vol. 3, Issue 7, July, pp. 1922–1925, 2017 **(Входить до баз даних Google Scholar, GetCited, BASE, WorldCat, Scirus, ResearchGate, UR, Research Bible, Cornell University Library).**

[4] А. А. Сытник, "Идентификация моделей динамических объектов на основе степенных рядов", *Danish scientific journal*, № 3, с. 77–81, 2017.

[5] А. А. Сытник, "Построение моделей градиентных приемников тепловых потоков", *Scientific discussion*, Т. 1, № 9, с. 30–33, 2017.

[6] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Методы и средства моделирования динамических процесов на основе интегральных моделей", *British Journal of Educational and Scientific Studies*, Т. II, № 2 (22), с. 108–114, 2015. *Автор запропонував інтегральний метод у задачі моделювання динаміки ВП.*

[7] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Применение интегральных динамических моделей при решении задачи идентификации параметров электрических цепей", *Известия Томского политехнического университета*, Т. 322, № 4, с. 103–106, 2013. *Здобувач запропонував метод ідентифікації параметрів електричних ланцюгів із застосуванням інтегральних рівнянь Вольтерри II роду.*

[8] А. А. Сытник, С. Ю. Протасов, и К. Н. Ключка, "Приближенные операционные способы анализа линейных динамических систем с переменными параметрами", *Известия ЮФУ. Технические науки*, № 1 (138), с. 105–110, 2013. *Автором запропоновано метод наближеного аналізу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами з використанням операторного методу.*

[9] А. А. Сытник, Н. В. Раевский, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Сопоставление методов фильтрации в задачах статистической регуляризации при оценивании параметров радиолокационных систем", *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, № 1, с. 10–16, 2013. *Автор провів аналіз двох алгоритмів калмановського типу, що застосовуються для оцінювання параметрів систем.*

[10] А. А. Сытник, и М. В. Сагатов, "Математическая модель теплового измерительного преобразователя стержневого типа", *Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление»*, № 6, с. 27–29, 2007. *Дисертантом запропоновано метод розв'язання оберненої динамічної задачі отримання «істинного» вхідного сигналу теплового датчика стрижневого типу.*

[11] Б. П. Бездетный, М. В. Сагатов, и А. А. Сытник, "Способ регуляризации слабосингулярных динамических моделей Вольтерра", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 9, с. 34–40, 2001. *Здобувач запропонував метод оцінки похибки одержуваного розв'язання інтегрального рівняння Вольтерри II роду зі слабосингулярним ядром.*

[12] А. А. Верлань, М. В. Сагатов, и А. А. Сытник, "Квадратурные алгоритмы моделирования измерительных преобразователей с распределёнными параметрами", *Моделювання та інформаційні технології,* Вип. 6, с. 131–136, 2000. *Дисертант розробив швидкодійний алгоритм моделювання вимірювальних перетворювачів з розподіленими параметрами.*

[13] А. Ф. Верлань, О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Інтегральні рівняння аналізу нестаціонарних електричних систем", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*, № 637, с. 12–17, 2009. *Дисертант запропонував метод інтегральних рівнянь для дослідження електричних ланцюгів, включаючи ланцюги, що містять елементи зі змінними параметрами.*

[14] И. О. Горошко, С. Ю. Протасов, и А. А. Сытник, "Формирование непараметрических интегральных динамических моделей датчиков в системах измерения испытательного оборудования", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки,* Вип. 6, с. 49–57, 2012. *Дисертант запропонував методи отримання інтегральних динамічних моделей ВП за даними фізичних експериментів.*

[15] Т. П. Гушель, Б. Б. Абдусатаров, и А. А. Сытник, "Об одном алгоритме реализации интегрального метода решения линейных дифференциальных уравнений", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 13, с. 101–105, 2001. *Автор розробив алгоритм реалізації інтегрального методу розв'язання лінійних диференціальних рівнянь.*

[16] Ю. Л. Коротецкий, Д. Э. Контрерас, и А. А. Сытник, "Применение квадратурно-разностных методов для численной реализации интегродифференциальной модели устройства регулирования питания", *Моделювання та інформаційні технології,* Вип. 9, с. 53–59, 2001. *Дисертантом використані квадратурно-різницеві методи для чисельної реалізації інтегродиференціальної моделі пристрою регулювання живлення.*

[17] Л. А. Митько, А. А. Сытник, В. Ф. Юзвенко, "Квадратурные алгоритмы моделирования процессов деформации упруго-вязких материалов", *Моделювання та інформаційні технології,* Вип. 6, с. 137–142, 2000. *Дисертантом запропоновано спосіб реалізації слабосингулярних інтегральних рівнянь Вольтерри II роду.*

[18] С. М. Первунинский, и А. А. Сытник, "Свойства оценок скалярного параметра методом максимизации стационарного степенного функционального полинома", *Вісник Технологічного університету Поділля*, Т. 1, № 3, с. 181–184, 2002. *Автором розроблений алгоритм визначення оцінки скалярного параметра методом максимізації середнього значення степеневого функціонального полінома.*

[19] М. В. Раєвський, О. О. Ситник, та В. Б. Кисельов, "Використання лінійних фільтрів Калмана для калібрування акселерометрів за допомогою даних глобальних навігаційних супутникових систем", *Відбір і обробка інформації,* № 35 (111), 2011. *Автором запропоновано спосіб калібрування трикомпонентного акселерометра з використанням фільтра Калмана.*

[20] О. О. Ситник, "Деякі алгоритми розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри I-го роду у задачі відновлення сигналів", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки,* Вип. 13, с. 139–149, 2016.

[21] О. О. Ситник, А. А. Верлань, та К. М. Ключка, "Метод формування інтегральних рівнянь нелінійних електричних кіл", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 47, с. 59–70, 2008. *Автор запропонував спосіб отримання інтегральних рівнянь Вольтерри для нелінійних електричних ланцюгів.*

[22] О. О. Ситник, О. А. Дячук, С. Н. Одокієнко, та В. О. Тихоход, "Математичне моделювання і динамічна корекція системи вимірювання потоків теплового випромінювання", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки, Спецвипуск,* с. 72–75,

2006. *Дисертант запропонував інтегральний метод відновлення сигналів для розв'язання задач корекції динамічних помилок системи вимірювання потоків теплового випромінювання.*

[23] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "Застосування методу квадратур для чисельних розрахунків лінійних диференціальних рівнянь", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2, с. 90–95, 2013. *Здобувач запропонував модифікацію методу квадратур для чисельного розв'язання лінійних диференціальних рівнянь.*

[24] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов "Універсальний алгоритм розрахунку інтегрального рівняння Вольтерри II роду із застосуванням формул Ньютона–Котеса", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 36–42, 2010. *Дисертант розробив алгоритм чисельного розв'язку інтегрального рівняння Вольтерри другого роду з використанням формул Ньютона–Котеса різної точності.*

[25] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Застосування інтегроапроксимаційного алгоритму для аналізу динаміки електричних кіл", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 69–73, 2008. *Здобувачем розроблений інтегроапроксимаційний алгоритм для аналізу перехідних процесів у лінійних і нелінійних електричних ланцюгах (максимально можлива точність одержуваних поліноміальних рішень).*

[26] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Один з методів застосування інтегральних рівнянь до аналізу лінійних стаціонарних електричних кіл із зосередженими параметрами", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 43, с. 109–118, 2007. *Здобувачем використаний спосіб аналізу за допомогою інтегральних рівнянь для методу контурних струмів у складних лінійних стаціонарних електричних ланцюгах з зосередженими параметрами*.

[27] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Метод визначення імпульсної реакції динамічної ланки з періодично змінними параметрами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 4, 2013, с. 63–66. *Дисертант описав метод визначення імпульсної перехідної функції ВП з використанням функції взаємної кореляції між вхідними та вихідними сигналами.*

[28] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та В. А. Федорчук, "Інтегральні макромоделі динамічних об'єктів", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 8, с. 98–109, 2013. *Автор запропонував метод моделювання динамічних об'єктів на основі інтегральних макромоделей.*

[29] О. О. Ситник, М. В. Раєвський, та Г. О. Кисельова, "Аналіз алгоритмів оптимальної фільтрації за показниками точності при скалярних

вимірюваннях", *Відбір і обробка інформації*, № 34 (110), с. 78–85, 2011. *Дисертант розробив алгоритм оптимальної фільтрації за показниками точності під час скалярних вимірювань.*

[30] А. А. Сытник, "Аппроксимация многопараметрических первичных измерительных преобразователей на основе метода наименьших квадратов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 4, с. 86–89, 2003.

[31] А. А. Сытник, "Декомпозиционный метод регуляризации измерительных преобразователей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 4, с. 102–105, 2006.

[32] А. А. Сытник, "Математическое описание многопараметрических измерительных преобразователей посредством интегральных моделей", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 34, с. 75–80, 2005.

[33] А. А. Сытник, "Программные средства компьютерного исследования динамики измерительных преобразователей", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 33, с. 37–44, 2006.

[34] А. А. Сытник, А. Ф. Верлань, и Амид Гази, "Построение математических моделей технологических процессов для решения задач оптимизации управления", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 31–36, 2003. *Автор провів аналіз двох варіантів алгоритму автоматичної побудови математичної моделі технологічних процесів із застосуванням лінійних функцій, кусково-лінійних функцій і дробово-раціональних функцій.*

[35] А. А. Сытник, А. Ф. Верлань, и Амид Гази, "Регуляризация линеаризованных систем уравнений при идентификации нелинейных объектов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 1, с. 25–27, 2004. *Автор запропонував метод регуляризації через введення додаткового множника за введеним правилом, яке дає змогу обмежитися недостатністю інформації для отримання стійкого достовірного розв'язку.*

[36] А. А. Сытник, Амид Гази, И. О. Горошко, и И. В. Страшнов, "Некоторые способы статистической идентификации динамических объектов", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 23, с. 87–96, 2003. *Дисертант проаналізував способи ідентифікації лінійних і нелінійних динамічних об'єктів.*

[37] А. А. Сытник, И. О. Горошко, и А. Б. Руденко, "Алгоритмы линеаризации динамических моделей энергетических объектов", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 22, с. 99–110, 2003. *Здобувач розробив*

алгоритм для обчислення коефіцієнтів лінеаризованих рівнянь, що описують динамічні моделі енергетичних об'єктів.

[38] А. А. Сытник, Т. П. Гушель, и Амид Гази, "Исследование двухкоординатного тактильного матричного сенсора", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2, с. 34–37, 2003. *Автор запропонував спосіб визначення динамічних характеристик двокоординатного тактильного матричного сенсора.*

[39] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и Н. Л. Костьян, "Метод идентификации динамического объекта посредством интегральной модели", *Электронное моделирование: международный научно-практический журнал*, Т. 38, № 2, с. 3–10, 2016 **(Входить до Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems Abstracts, INIS Collection, Inspec).** *Дисертант запропонував метод ідентифікації ВП, що описується інтегральним рівнянням Вольтерри II роду.*

[40] А. А. Сытник, и А. В. Козак, "Алгоритм формирования дифференциального уравнения измерительного преобразователя", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 84–87, 2006. *Дисертант розробив алгоритм визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією.*

[41] А. А. Сытник, А. В. Козак, В. Б. Киселев, и А. А. Киселева, "Определение дифференциального уравнения измерительного преобразователя по импульсной переходной функции", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 45, с. 16–22, 2008. *Автор запропонував метод визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією (застосовуваний як для ВП із зосередженими параметрами, так і для ВП з розподіленими параметрами).*

[42] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Интегральная динамическая модель датчика сигналов акустической эмиссии", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 1, с. 47–49, 2009. *Дисертант запропонував математичну модель для автоматизованої обробки інформації від акустичних датчиків механічної деформації, яка має можливість параметричного налаштування під різні види вихідних сигналів.*

[43] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Определение временных характеристик сигналов акустической эмиссии", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 5, с. 185–196, 2011. *Автор розробив алгоритм чисельного визначення основних часових характеристик вихідних сигналів акустичної емісії.*

[44] А. А. Сытник, и С. Ю. Протасов, "О динамической точности линейной регистрирующей системы", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 74–78, 2008. *Дисертантом запропоновано спосіб реєстрації фізичних процесів, який істотно полегшує використання виданих реєструвальною системою відомостей про досліджуваний процес, і якому властива висока роздільна здатність стосовно флуктуацій досліджуваного фізичного процесу.*

[45] А. А. Сытник, С. Ю. Протасов, и В. А. Тихоход, "Применение измерительных преобразователей неселективного действия в многосвязных системах управления", *Электронное моделирование: международный научно-практический журнал*, Т. 36, № 2, с. 113–119, 2014. *Здобувачем запропоновано спосіб математичної реалізації ВП неселективної дії в багатозв'язних системах.*

[46] O. A. Diachuk, N. L. Kostyan, A. A. Sytnik, and F. A. Halmuhametova, "The method and algorithms for identification of dynamic objects on basis of integral equations", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 9, с. 52–66, 2014. *Дисертант розробив алгоритм ідентифікації динамічних об'єктів на основі інтегральних рівнянь Вольтерри.*

[47] O. O. Sytnyk, "Analytical method of forming integrated dynamic models and their software implementation", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 7, с. 191–196, 2012.

[48] В. М. Шарапов, Іван Сарвар (BD), М. П. Мусієнко, О. В. Бикова, Ю. Г. Лега, та О. О. Ситник, "П'єзоелектричний акселерометр", пат. 32821A Україна, МКИ G01P 15/09 / № 98052279, заявл. 05.05.98, опубл.15.02.01, Бюл. № 1. *Дисертант запропонував змінити топографію розташування електродів (нанесених на поверхню в поляризованих зонах чутливого елемента), завдяки чому зменшується бічна чутливість датчика.*

[49] В. М. Шарапов, І. Б. Чудаєва, М. П. Мусієнко, Іван Сарвар (BD), О. В. Бикова, та О. О. Ситник, "П'єзоелектричний датчик тиску", пат. 35762A Україна, МКИ G01L 11/00, 9/08 / № 98052281, заявл. 05.05.98, опубл. 16.04.01, Бюл. № 3. *Здобувач запропонував використовувати приймальний резонатор, виконаний у вигляді біморфного елемента, завдяки чому збільшилася чутливість датчика.*

[50] Ю. Г. Лега, А. А. Сытник, В. Ф. Юзвенко, О. В. Подгорный, *Моделирование процессов в технических системах,* Черкассы, Украина: ЧДТУ, 2004. *Дисертант розглянув питання математичного моделювання лінійних і нелінійних систем з зосередженими та розподіленими параметрами; запропонував метод імітаційного моделювання з використанням пакета прикладних програм TUTSIM.*

[51] А. Ф. Верлань, К. Н. Ключка, А. А. Сытник, и С. Ю. Протасов, "О некоторых особенностях применения интегральных уравнений в вопросе анализа динамики электрических цепей", на *V Междунар. конф. Моделирование – 2016,* Киев: ИПМЭ НАН Украины, 2016, с. 81–84. *Автор запропонував спосіб застосування інтегральних рівнянь під час аналізу нестаціонарних ланцюгів та ланцюгів з розподіленими параметрами.*

[52] А. Ф. Верлань, О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Метод ідентифікації електричних кіл на основі інтегральних динамічних моделей", на *III Міжнар. наук.-техн. конф. Моделирование в электротехнике, электронике и светотехнике,* Київ: ІПМЕ НАН України, 2010, С. 24–26. *Здобувачем запропоновано метод параметричної ідентифікації електричних ланцюгів на основі інтегральних операторів з можливістю врахування помилок у вихідних (початкових) даних.*

[53] К. М. Ключка, О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Особливості використання інтегральних динамічних моделей при розрахунку перехідних процесів в електричних колах", на *The International Scientific Association «Science & Genesis» Global scientific unity 2014*, Прага, Чеська Республіка, 2014, с. 167–170. *Здобувач запропонував метод ефективного розв'язання задачі параметричної ідентифікації електричних ланцюгів, що характеризується наявністю похибок у вихідних даних.*

[54] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Обґрунтування та перспективи застосування інтегральних рівнянь в задачі моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів", на *V Міжнар. наук.-практ. конф. Обробка сигналів і негаусівських процесів,* Черкаси, 2015. с. 59–60. *Дисертантом запропонована методика отримання інтегральних динамічних моделей ВП за заданим диференціальним рівнянням.*

[55] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Один з методів отримання нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри на основі топології системи", на *II Міжнар. наук.-практ. конф. Обробка сигналів і негаусівських процесів,* Черкаси, 2009, с. 261–262. *Дисертант запропонував метод отримання нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри на основі топології систем.*

[56] О. О. Ситник, К. М. Ключка, та С. Ю. Протасов, "Математичне моделювання вимірювальних перетворювачів з використанням інтегральних рівнянь", на *VI Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. пам'яті проф. Ю.П. Кунченка, Обробка сигналів і негаусівських процесів,* Черкаси, 2017, с. 137–139. *Автор розробив методику алгоритмічного та програмного забезпечення процесів моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів з використанням структурно-орієнтованого підходу.*

[57] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Інтерполяційний метод отримання передатної функції по перехідній характеристиці при формуванні ядер інтегральних макромоделей", на *VI Міжнар. наук.-практ. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам’янець-Подільський, 2014, с. 149–152. *Автором запропоновано метод отримання передавальної функції по перехідній характеристиці у процесі формування ядер інтегральних макромоделей.*

[58] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Метод числової реалізації інтегральних макромоделей динамічних об’єктів із зворотнім зв’язком", *на IV Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. Пам’яті професора Ю.П. Кунченка, Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2013, с. 31–32. *Здобувач розробив алгоритм комп’ютерної реалізації нелінійних інтегральних макромоделей динамічних об’єктів зі зворотним зв’язком.*

[59] О. О.Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Багатокрокові алгоритми розв’язання інтегральних рівнянь у задачі відновлення сигналів", на *VII Міжнар. наук. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам’янець-Подільський, 2016, с. 206–207. *Автором запропонована загальна схема побудови лінійних багатокрокових методів, яка заснована на використанні формул типу Адамса.*

[60] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Інтегральний метод побудови моделей градієнтних давачів теплових потоків", на *IV Міжнар. наук.-практ. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Київ, 2017, с. 307–308. *Дисертант запропонував спосіб розрахунку параметрів інтегральної моделі, еквівалентної диференціальному рівнянню.*

[61] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Метод формування інтегральної макромоделі п’єзоелектричного датчика змінного тиску", на *IV Міжнар. наук.-практ. конф. Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки*, Чернівці, 2014, с. 100–101. *Здобувач запропонував метод отримання інтегральної макромоделі п’зоелектричного датчика тиску через застосування наближених імпульсних перехідних функцій, які є ядрами інтегральних операторів.*

[62] А. А. Сытник, "Компьютерная поддержка проектирования приборов контроля автоматизированных систем управления", на *Міжнар. наук. конф. Сучасний менеджмент у виробництві та гуманітарній діяльності*, Черкаси, 2005, с. 45–46.

[63] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, "Особенности применения интегральных уравнений в задаче идентификации измерительных преобразователей", на

III Міжнар. наук.-практ. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи), Київ–Черкаси, 2015, с. 329–330. *Дисертант розробив алгоритм ідентифікації ВП на основі розв'язання алгебраїчної системи, отриманої «прямою» апроксимацією інтегрального оператора в інтегральному рівнянні Вольтерри II роду*.

[64] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "О реализации интегральных моделей в задаче динамической коррекции измерительного преобразователя", на *конф. Интегральные уравнения-2009*, Киев, 2009, с. 131–133. *Автором описано реалізацію інтегральних моделей у задачі динамічної корекції ВП.*

[65] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Метод реализации процесса диагностирования технических изделий по сигналам акустической эмиссии", на *II Міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2013, с. 433–434. *Здобувачем розроблено методику обчислень складних діагностичних ознак на основі інтегрального методу ідентифікації, згідно з яким за діагностичні ознаки вибираються коефіцієнти диференціальних рівнянь, що описують динаміку об'єкта.*

[66] А. А. Сытник, С. Н.Одокиенко, и О. А. Наконечная, "Организация интеллектуальной моделирующей системы", на *Міжнар. наук.-метод. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам'янець-Подільський, 2006, с. 42–49. *Здобувач запропонував структуру інтелектуального середовища моделювання для розв'язання інтегральних рівнянь та оцінки її ефективності*.

[67] А. А. Сытник, В. В. Палагин, С. Ю. Протасов, и К. М. Ключка, "Применение итерационных алгоритмов в задачах исследования динамики измерительных преобразователей на основе интегральных моделей", in *The International Scientific Association «Science & Genesis» Scientific achievements 2015*, Vienna, Austria, Vol. II, 2015, pp. 163–171. *Автор розробив ітераційні алгоритми для розв'язання задач динаміки ВП на основі інтегральних моделей.*

[68] А. А. Сытник, и О. В. Подгорный, "Моделирование и оценка параметров сложных технических систем", *на VII Міжнар. наук.-практ. конф. Наука і освіта—2004*, 2004, Т. 64, с. 77–79. *Здобувачем запропонована методика вибору структури моделі та оцінки її параметрів.*

[69] А. А. Сытник, и О. В. Подгорный, "Применение метода интегральных уравнений при решении электротехнических задач", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Наукові дослідження – теорія та експеримент 2005*, Полтава, 2005, Т. 9, с. 54–58. *Здобувачем запропоновано спосіб використання інтегральних рівнянь у задачах моделювання динаміки ланцюгів.*

[70] А. А. Сытник, и В. А. Тихоход "Интерпретация результатов измерения энергетических параметров на основании решения обратных задач математического моделирования", на *Междунар. конф. Информационные технологии в управлении энергетическими системами*, Киев, 2005, с. 83–84. *Здобувач запропонував спосіб інтерпретації результатів вимірювання енергетичних параметрів на основі розв'язання обернених задач математичного моделювання.*

[71] M. V. Sagatov, Sh. M. Guiyamov, and A. A. Sytnyk, "Mathematical modeling the multipleparameter measuring converters and optimization their metrological characteristics", in *the 6th International Conference CONTROL OF POWER SYSTEMS '04*, Štrbskė Pleso High Tatras, Slovak Republic, 2004, pp.1–5. *Автор розробив спосіб математичного моделювання багатопараметричних вимірювальних перетворювачів*.

[72] A. A. Sytnyk, S. U. Protasov, and K. N. Klyuchka, "Methods of receipt of integral form of description of nonstationary measurings transformers with the distributed parameters", *in the IV International Research and Practice Conference European Science and Technology*, Munich, Germany, 2013, Vol. I, pp. 342–348. *Здобувач запропонував метод перетворення диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описують нестаціонарні ВП, до інтегральних рівнянь Вольтерри та їх систем.*

[73] A. F. Verlan, M. V. Sagatov, A. A. Sytnyk, and A. A. Djachuk, "The method of identification of controlled dynamic objects on the basis of integral models", in *the Fourth World Conference Intelligent Systems for Industrial Automation*, Tashkent, Uzbekistan, 2006, pp. 28–40. *Автором проаналізовано алгоритми ідентифікації ВП на основі інтегральних рівнянь.*

[74] A. A. Verlan, B. B. Abdusatarov, M. Sagatov, and A. A. Sytnyk, "Analysis of power circuits' dynamics using generalized state–space model", in *the Fourth World Conference Intelligent Systems for Industrial Automation*, Tashkent, Uzbekistan, 2006, pp. 168–176. *Здобувач запропонував способи моделювання динаміки силових ланцюгів, що використовують узагальнену модель стану і простору*.

[75] A. Verlan, A. Verlan, and A. Sytnyk, "Simulation of electrical systems for supplying superconducting magnetic energy storage", in *the 3rd International Symposium on Electrical Electronic and Computer Engineering. ISEECE–2006*, Nicosia, TRNC, 2006, pp. 214–220. *Дисертант запропонував метод поліпшення енергетичних і динамічних параметрів для електричних систем забезпечення.*

АНОТАЦІЯ

Ситник О. О. Методи математичного та комп'ютерного моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів на основі інтегральних рівнянь. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи». – Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2018.

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема створення і розвитку математичного і комп'ютерного моделювання динаміки широкого класу сучасних вимірювальних перетворювачів. Як вдосконалення запропоновано, обґрунтовано та досліджено інтегральний метод математичного моделювання процесів у вимірювальних перетворювачах, який полягає в застосуванні математичних моделей у вигляді інтегральних операторів та рівнянь Вольтерри.

Розроблено методи формування явних і неявних непараметричних моделей динаміки стаціонарних вимірювальних перетворювачів з зосередженими та розподіленими параметрами, в тому числі макромоделей.

Проаналізовано властивості непараметричних динамічних моделей у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерри, що визначають їх функціональні можливості при дослідженні різних класів вимірювальних перетворювачів, а також сформульовано особливості, що впливають на вибір методів і розробку алгоритмів для чисельного розв'язання рівнянь і створення програмних засобів їх комп'ютерної реалізації. Розвинено алгоритмічні основи швидких обчислювальних процесів реалізації інтегральних моделей на основі врахування властивостей сепарабельних ядер.

Запропоновано метод чисельного розв'язання інтегральних рівнянь Вольтерри I роду в некоректній задачі відновлення вхідного сигналу вимірювального перетворювача з розподіленими параметрами; метод забезпечує отримання стійкого розв'язку на основі «внутрішньої» регуляризації із застосуванням способу модельних експериментів.

На основі запропонованих алгоритмів вперше розроблений комплекс прикладних програм для моделювання широкого класу вимірювальних перетворювачів, з реалізацією лінійних і нелінійних інтегральних моделей та їх систем у середовищі MATLAB; програмні засоби організовані відповідно до прийнятої в системі MATLAB концепції пакетів прикладних програм, що дозволяє використовувати такі властивості, як можливість спільного використання з іншими пакетами прикладних програм, можливість аналізу, корекції і застосування розроблених функцій як шаблонів для розробки нових додатків; розроблена методика використання програм комплексу для розв'язання конкретних задач.

За допомогою запропонованих алгоритмів і розроблених програмних засобів вирішено ряд наступних прикладних задач: формування інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів вологості газу, швидкості потоку, кута повороту, прискорення, витрат, тиску, температури, хемотронного ВП; побудова моделей градієнтних приймачів теплових потоків; отримання за

експериментальними даними інтегральних моделей газоаналізаторів, плівкового термоприймача, п’єзоелектричного датчика тиску та ін.

Ключові слова: інтегральні динамічні моделі, завадостійкі алгоритми чисельного моделювання, вимірювальні перетворювачі з зосередженими та розподіленими параметрами, інтегральні рівняння Вольтерри I та II роду, побудова моделей за експериментальними даними, слабосингулярні моделі у задачах відновлення сигналу, швидкодіючі алгоритми чисельного розв’язання систем інтегральних рівнянь, ідентифікація стаціонарних і нестаціонарних вимірювальних перетворювачів.

АННОТАЦИЯ

Сытник А. А. Методы математического и компьютерного моделирования динамики измерительных преобразователей на основе интегральных уравнений. − Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 «Математическое моделирование и вычислительные методы». − Винницкий национальный технический университет. Винница, 2018.

В диссертационной работе решена научно-техническая проблема создания и развития математического и компьютерного моделирования динамики широкого класса современных измерительных преобразователей. В качестве усовершенствования предложен, обоснован и исследован интегральный метод математического моделирования процессов в измерительных преобразователях, который заключается в применении математических моделей в виде интегральных операторов и уравнений Вольтерры.

Разработаны методы формирования явных и неявных непараметрических моделей динамики стационарных измерительных преобразователей с сосредоточенными и распределенными параметрами, в том числе макромоделей.

Проанализированы свойства непараметрических динамических моделей в виде интегральных уравнений Вольтерры, определяющие их функциональные возможности при исследовании различных классов измерительных преобразователей, а также сформулированы особенности, влияющие на выбор методов и разработку алгоритмов для численного решения уравнений и создание программных средств их компьютерной реализации. Получили развитие алгоритмические основы быстрых вычислительных процессов реализации интегральных моделей на основе учета свойств сепарабельних ядер.

Предложен метод численного решения интегральных уравнений Вольтерры I рода в некорректной задаче восстановления входного сигнала измерительного преобразователя с распределенными параметрами; метод обеспечивает получение устойчивого решения на основе «внутренней» регуляризации с применением способа модельных экспериментов.

На основе предложенных алгоритмов впервые разработан комплекс прикладных программ для моделирования широкого класса измерительных преобразователей, с реализацией линейных и нелинейных интегральных моделей и

их систем в среде MATLAB; программные средства организованы в соответствии с принятой в системе MATLAB концепцией пакетов прикладных программ, что позволяет использовать такие свойства, как возможность совместного использования с другими программами, возможность анализа, коррекции и применения разработанных функций в качестве шаблонов для разработки новых приложений; разработана методика использования программ комплекса для решения конкретных задач.

С помощью предложенных алгоритмов и разработанных программных средств решен ряд следующих прикладных задач: формирование интегральных динамических моделей измерительных преобразователей влажности газа, скорости потока, угла поворота, ускорения, расхода, давления, температуры, хемотронных ИП; построение моделей градиентных приемников тепловых потоков; получение по экспериментальным данным интегральных моделей газоанализатора, пленочного термоприемника, пьезоэлектрического датчика давления и т.д.

Ключевые слова: интегральные динамические модели, помехоустойчивые алгоритмы численного моделирования, измерительные преобразователи с сосредоточенными и распределенными параметрами, интегральные уравнения Вольтерры I и II рода, построение моделей по экспериментальным данным, слабосингулярные модели в задачах восстановления сигнала, быстродействующие алгоритмы численного решения систем интегральных уравнений, идентификация стационарных и нестационарных измерительных преобразователей.

ABSTRACT

Sytnyk O. O. Methods of mathematical and computer modeling of dynamics of measuring transducers based on integral equations.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences on speciality 01.05.02 “Mathematical modeling and computational methods”. – Vinnytsia National Technical University. Vinnytsia, 2018.

Thesis work solved the problem of scientific and technical creation and development of mathematical and computer modeling of dynamics of a wide class of modern measuring transducers. As improvements, the cumulative method of mathematical modeling of processes in the measuring transducers is suggested, grounded and examined, which consists in the application of mathematical models in the form of operators and Volterra equations.

Methods for formation of explicit and implicit nonparametrical models of the dynamics of the stationary measuring transducers with concentrated and distributed parameters, including macromodels are developed.

The properties of nonparametrical dynamic models in the form of integral Volterra equations are analyzed, that determine their functionalities in the study of various classes of measuring transducers, as well as features are formulated that influence the choice of methods and the development of algorithms for the numerical solution of equations and creating software for their computer realization. Algorithmic fundamentals of fast

computing processes of implementation of integrated models are developed that are based on the account of the properties of separable nuclei.

The method of numerical solution of integral Volterra equations of the first kind the incorrect task of rebuilding input signal of measuring transducers with distributed parameters is suggested; method provides obtaining sustainable solution based on the "inner" regularization with application of model experiments method.

On the basis of the proposed algorithms for the first time the complex of applied programs for modeling of wide class of measuring transducers is developed, with the realization of lineal and nonlineal integral models and their systems in the MATLAB environment; software tools are organized according to the adopted in the MATLAB system package concept application, that allows to use properties such as the ability to share applied programs with other packages, opportunity of the analysis, correction and application of the developed functions as templates for the development of new applications; developed method of using complex of programs for solving specific problems.

Using the proposed algorithms and developed software a number of the following problems are solved: the formation of integrated dynamic models of measuring transducers of gas humidity, flow rate, the angle of rotation, acceleration, pressure, temperature, hemotronnic measuring transducer; construction of models of gradient receivers of heat flows; modeling and dynamic correction of measuring transducers of flow of thermal radiation; obtaining the experimental data of integrated models of gas analyzers, film-type thermal detector, piezoelectric pressure sensor etc.

For providing the opportunities to optimize processes and modeling means of primary converters, building a computer modeling system, taking into account the limited accuracy of the initial data, choice of forms of mathematical models, compatibility of mathematical and computer models by the adequacy criteria, computational accuracy and complexity level of the proposed methods to convert dynamic models, as well as splitting method with partial inversion of the differential operator, senior derivatives and consistent integration methods.

The developed algorithmic fundamentals of building effective means of computer modeling of dynamic processes in the measuring transformers, described by integral dynamic models; in particular, developed quadrature operators of numerical realization of integral Volterra operations , as well as the solution of integral Volterra equations of the second kind and their models, that provide a wide range of accuracy of the simulation by using the quadrature formulas with different indicators of accuracy or their combinations; algorithms for the solution of nonlinear integral Volterra equation of the second kind models of based on the modified Newton's – Kantorovich method, allowing to reduce the computational complexity of iterations preserving convergence of iterational process.

Improved, suggested and examined the integral method of mathematical modelling of processes in the measuring transducers, that underlies in the application of mathematical models in the form of integral Volterra operators and integral Volterra equations of the second kind, allowing by generic methods to form modelling dependencies for transducers with distributed and concentrated parameters by ensuring high level of adequacy in the use of primary analytical or experimental data, as well as to

create conditions for their efficient numerical implementation by using smoothing and anti-interference properties of integral dynamic models.

The method of formation is developed based on two-dimensional transient features of integrated dynamic models of non-stationary measuring transducers with concentrated and distributed parameters.

The method of identification of non-stationary measuring transducers is suggested based on algebraic system solution, obtained by approximation of the integral operator that has potentially high performance and is interference-free.

Keywords: integrated dynamic models, noiseproof numerical simulation algorithms, measuring transducers with concentrated and distributed parameters, the integral Volterra equation of the of I and II kind, modelling by experimental data, weakly singular models in problems of signal, time-optimal algorithms of numerical solving of systems of integral equations, identification of stationary and non-stationary measuring transducers.

Формат 60х84 1/16. Папір офісний. Гарнітура Times New Roman. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 3,02. Тираж 100 прим. Зам. № 18-131.

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі
Черкаського державного технологічного університету
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.
red_vidav@chdtu.edu.ua