

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу ІВАНЮКА Віталія Анатолійовича **«МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБ'ЄКТАХ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ОСНОВІ ОДНОВИМІРНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ»**, яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 01.05.02 — Математичне моделювання та обчислювальні методи.

На експертизу представлено дисертаційну роботу обсягом 419 стор. (у тому числі: 281 стор. основного тексту, додатків на 60 стор., 132 рисунки, 36 таблиць та список використаних джерел з 281 найменувань на 28 стор.), автореферат та 46 публікацій за темою дисертації, з яких: 1 монографія; 21 публікація у виданнях, що входять до переліку, затвердженого МОН України; 6 публікацій у виданнях, що включено до міжнародних наукометричних баз; 15 публікацій — у працях і матеріалах наукових конференцій, 2 публікації — в закордонних виданнях, 1 публікація — у збірнику наукових праць, що включено в міжнародні наукометричні бази Scopus та Web of Science, зокрема, 7 публікацій — підготовлено одноосібно, англійською мовою — 8 публікацій.

Предметом дисертаційного дослідження є методи математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в об'єктах з розподіленими параметрами на основі одновимірних інтегральних моделей.

Дисертаційна робота ІВАНЮКА В. А. виконувалась в Кам'янець-Подільському національному університеті ім. Івана Огієнка МОН України відповідно до наукових напрямків в рамках науково-дослідних робіт у Кам'янець-Подільському національному університеті ім. Івана Огієнка, що виконувались спільно з Інститутом проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України згідно з чинною угодою про спільну науково-освітню діяльність: «Математичне моделювання в задачах керування технологічними процесами» (№ держреєстрації 0113U004335), «Теоретичні основи та прикладні методи створення інтегрованих та розподілених засобів комп'ютерного моделювання для оптимального управління електромеханічними системами нафтогазодобувного, гірничого та транспортного обладнання» (шифр «Оптима», № держреєстрації 0107U000889), «Математичні методи і комп'ютерні засоби модельної підтримки розробок систем вимірювання і керування випробувальних стендів силових установок енергетичного і транспортного призначення» (шифр «Стан», № держреєстрації 0109U008340), «Створення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання процесів інверсної обробки сигналів у вимірювальних каналах систем моніторингу енергетичних об'єктів» (шифр «Інверсія», № держреєстрації 0114U003949).

*ГПМЕ вх. 95
12.03.2020р.*

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Задачі автоматизації промислових виробництв та процесів зумовлюють необхідність забезпечення відповідних систем управління засобами вимірювання та контролю, які повинні задовольняти сучасним вимогам щодо швидкодії, точності, надійності, завадостійкості тощо. Останні утворюють елементи інформаційної складової зазначених систем управління, однак їх складність має бути обмеженою внаслідок вимог до надійності. Важливим також є той факт, що засоби контролю та вимірювання систем управління, як правило, являють собою вмонтовані підсистеми, що свідчить про наявність суттєвих обмежень на ресурси при їх практичному виконанні (масо-габаритні характеристики, енергетичні показники тощо). Вказані обмеження породжують певні вимоги до апаратної (зокрема, комп'ютерної) частини, задоволення яких забезпечується якісними вимогами щодо швидкодії та точності програмно-алгоритмічного забезпечення. При цьому очевидно, що сучасне програмне забезпечення систем управління, контролю та автоматики базується на основі модельної підтримки, тобто суттєво залежить від складності та адекватності математичних моделей (ММ) цих систем.

Важливий клас об'єктів управління (ОУ) промислового та природно-значимого характеру, з точки зору математичної формалізації, являє собою об'єкти (процеси) з розподіленими параметрами (РП-об'єкти або РП-процеси). У переважній більшості випадків для математичного опису останніх застосовується апарат диференціальних рівнянь у частинних похідних (ДРЧП). При цьому ДРЧП забезпечують високий ступінь адекватності математичної формалізації РП-об'єктів (РП-процесів), а також можливість врахування їх динамічних характеристик в задачах аналізу (моделювання та ідентифікації) і синтезу (управління). Однак застосування ДРЧП в якості модельної підтримки РП-об'єктів (РП-процесів) в умовах вказаних вище обмежень на часові та апаратні ресурси, робить їх неефективними при побудові вмонтованих інформаційних підсистем автоматизованих систем управління.

Дієвим шляхом вирішення проблеми модельної підтримки, в даному випадку, є застосування спрощених ММ. Обґрунтованість такого підходу зумовлено, одного боку тим, що вхідні дані в поставлених прикладних задачах отримуються з певними похибками (зокрема, через неточність вимірювань), а з другого боку тим, що з урахуванням похибок вимірювань ММ об'єктів (процесів) управління можна будувати у спрощеному вигляді на основі еквівалентних та апроксимаційних перетворювань базових ММ або на основі методів ідентифікації. В цьому сенсі перспективним виглядає використання в якості ММ класу об'єктів (процесів), що досліджуються, інтегральних одновимірних моделей, які мають низку позитивних якостей: високу універсальність (структура моделі залишається незмінною, а властивості ОУ задаються ядрами інтегрального оператора), згладжування експериментальних даних (наприклад, нівелювання високочастотних завод),

можливість ефективної побудови макромоделей тощо. В практичних додатках, при розв'язуванні прикладних задач, в якості спрощених ММ лінійних та нелінійних РП-об'єктів (РП-систем) переважно застосовуються відповідно інтегральні оператори Вольтерри або інтегро-степеневі ряди Вольтерри. Така математична формалізація дозволяє ефективно розв'язувати як задачі аналізу (моделювання динаміки в перехідних режимах і відновлення сигналів у постановці задачі ідентифікації), так і синтезу (формування управляючих впливів для ОУ).

Отже, зважаючи на інтенсивний розвиток комп'ютеризованих автоматизованих систем управління і контролю, *актуальною і не в повній мірі вирішеною* є науково-технічна проблема створення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання РП-об'єктів (РП-процесів) на основі одновимірних інтегральних моделей. Подальший розвиток таких моделей дозволить вирішити задачу врахування ресурсних обмежень при побудові систем управління, контролю та діагностики (зокрема, вимірювань параметрів), які забезпечують якісне функціонування керованих технічних об'єктів та процесів.

2. ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі ІВАНЮКА В. А. вирішено науково-технічну проблему, мета якої полягає у створенні методів і засобів математичного моделювання динамічних процесів в об'єктах з розподіленими параметрами шляхом отримання і застосування спрощених динамічних моделей у вигляді одновимірних інтегральних операторів і рівнянь, що забезпечує високі завадостійкість та швидкодію, а також зниження складності алгоритмічної та програмної реалізації моделей у системах управління, контролю і вимірювання.

Зокрема автором отримано такі наукові результати.

Вперше запропоновано:

— адаптивний метод ідентифікації моделей нелінійних динамічних систем у формі інтегро-степеневих рядів Вольтерри, що полягає в адаптації процесу проведення серії активних експериментів до необхідного рівня адекватності моделей та заміни ряду результатів інтерполяційними даними, що дозволяє суттєво зменшити кількість необхідних експериментів у порівнянні з традиційним підходом;

— метод числової реалізації поліноміальних операторів Вольтерри із застосуванням апроксимації багатовимірних ядер функціями у вигляді суми добутоків незалежних змінних, що дозволяє зменшити на порядок кількість необхідних обчислювальних процедур;

— регуляризаційний метод розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду, в тому числі поліноміальних, на основі введення диференціального регуляризаційного оператора, що дозволяє підвищити

ефективність процесу відновлення сигналів на вході динамічних об'єктів у разі наявності шумових завад.

Удосконалено:

— базовий набір структурних елементів динамічних об'єктів із розподіленими параметрами, які подаються у вигляді передатних функцій та інтегральних операторів, до якого долучено ірраціональні ланки (напівінтегральну, напівінерційні, напівколивальну, напівзапізнення), що дозволяє на основі структурно-алгоритмічного підходу, аналогічно до об'єктів із зосередженими параметрами, здійснювати синтез моделей об'єктів із розподіленими параметрами;

— метод багаторазового диференціювання експериментально-отриманих залежностей на основі диференціювання апроксимацій результатів експериментів поліномами та експоненціальними функціями, що дає змогу отримувати стійкі до високочастотних завад результати і допускає використання тестових сигналів східчастого типу в ідентифікації моделей нелінійних динамічних систем у формі інтегро-степеневих рядів Вольтерри;

— метод числової реалізації поліноміального оператора Вольтерри на основі методу квадратур шляхом застосування векторно-матричного підходу до апроксимації інтегральних операторів, який орієнтований на ефективну програмну реалізацію, що дозволяє створити універсальний спосіб програмної реалізації поліноміальних інтегральних операторів довільного порядку;

— методи розв'язування прямих та обернених задач динаміки об'єктів із розподіленими параметрами на основі застосування одновимірних інтегральних моделей шляхом введення регуляризаційного параметра в сингулярне ядро інтегральної моделі Вольтерри (в тому числі і поліноміальної), що дозволяє отримати інтегральну модель з ядрами без особливостей.

Набули подальшого розвитку:

— методи апроксимації багатовимірних функцій на основі застосування методу найменших квадратів (метод апроксимації на основі степеневих функцій та метод експоненціальної апроксимації), що дозволяє здійснювати апроксимацію ядер інтегральних моделей ядрами, які розділяються;

— засоби комп'ютерного моделювання на основі розробленого комплексу програмних засобів побудови та дослідження інтегральних моделей динамічних об'єктів, що розширює можливості серійних пакетів комп'ютерного моделювання сумісних із MATLAB/Simulink..

Із зазначеного вище можна зробити висновок, що наукова новизна дисертаційної роботи ІВАНЮКА В. А. цілком відповідає вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт, представлених на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Автором отримано та опубліковано нові науково обґрунтовані результати, які, у сукупності, вирішують важливу науково-прикладну проблему. Дисертаційна робота *містить нові, раніше не захищені результати*.

Оформлення дисертації відповідає вимогам ДСТУ. Мова і стиль викладення дисертації та автореферату коректно висвітлюють одержані науково-практичні результати, що відповідають меті досліджень.

3. ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Практична цінність виконаних досліджень підтверджується наведеними у роботі результатами прикладного впровадження розроблених в дисертаційній роботі моделей, методів та комп'ютерних засобів.

При цьому слід зазначити, що практична цінність дисертаційної роботи, зокрема полягає у наступному:

— створені методи та засоби математичного моделювання процесів динаміки в РП-об'єктах (РП-процесах) на основі одновимірних інтегральних моделей можуть використовуватися у розробці математичного та програмного забезпечення комп'ютеризованих систем управління, контролю та вимірювання, які забезпечують процеси функціонування керованих технічних об'єктів;

— розроблений у середовищі MATLAB пакет прикладних програм на основі створених методів може ефективно використовуватись як у лабораторних дослідженнях, так і в реальних системах управління, контролю та вимірювання.

Запропоновані методи і моделі доведено до рівня практичної реалізації. Їх, а також створені засоби математичного та комп'ютерного моделювання, було використано в ході розв'язуванні низки практичних задач, зокрема, в задачі відновлення сигналу на вході вимірювального перетворювача температури для оперативного контролю температурного режиму електронних компонент.

Результати дисертаційного дослідження прийнято до впровадження: в ТзОВ «Мережа Ланет» для моніторингу температурних режимів роботи об'єктів інформаційно-обчислювальних систем, в тому числі комутаційного та магістрального обладнання комп'ютерних мереж; ТзОВ «Легідком» — у проєктуванні вимірювальних комплексів контролю температурних режимів чипів комутаторів доступу та агрегації, що дозволило підвищити ефективність процесів контролю та управління інформаційно-телекомунікаційними системами; ТзОВ «Імпульс» ТРК «Імпульс ТБ» — у проєктуванні апаратно-програмних засобів автоматизованої підтримки комутаційного та магістрального обладнання інформаційно-комп'ютерних мереж. Також результати дисертаційної роботи використовуються у Кам'янець-Подільському національному університеті імені Івана Огієнка для

вдосконалення теоретико-методологічного забезпечення освітнього процесу та під час виконання науково-дослідних робіт.

Слід зазначити, що результати чинної дисертаційної роботи можуть знайти застосування в наукових дослідженнях у споріднених областях, а також в освітньому процесі закладів вищої освіти.

4. СТУПІНЬ ОБГРУНТОВАНOSTІ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Достовірність наукових положень і результатів, отриманих у дисертаційній роботі, підтверджується використанням наведеного у розділах 2 — 6 математичного апарату, зокрема, методів математичного моделювання динамічних систем — для побудови та дослідження моделей; елементів теорії інтегральних рівнянь, методів еквівалентних перетворень — для отримання одновимірних інтегральних моделей; методів обчислювальної математики — для числової реалізації ММ; методів розв'язування обернених задач динаміки — для ідентифікації моделей та відновлення вхідних сигналів; методів програмної інженерії — у розробці програмного комплексу; методів обчислювального експерименту — для числового дослідження ММ.

Обґрунтованість практичних результатів дисертаційної роботи засвідчується актами впровадження.

Основні положення та результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію на 20 Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях та семінарах і отримали підтримку науковців з обраного напрямку досліджень.

5. СТРУКТУРА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертаційна робота структурно складається зі вступу, переліку умовних позначень, шести основних розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Роботу викладено загальним обсягом у 419 сторінок, з яких: 281 сторінки основного тексту та 60 сторінок додатків. Дисертаційна робота містить: 132 рисунки, 36 таблиць, список використаних джерел із 281 найменування на 28 сторінках.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи; зазначено її зв'язок з науковими програмами та темами; сформульовано мету і задачі досліджень; викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів; наведено дані щодо публікацій автора за темою дисертації і його особистий внесок у роботах, написаних у співавторстві, а також відомості щодо впровадження результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз існуючих підходів до математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в РП-об'єктах (РП-процесах) при розв'язуванні задач контролю, вимірювань та управління на основі одновимірних інтегральних моделей.

Було зазначено, що типові РП-об'єкти управління (або контролю) можна розглядати як розподілений блок, під яким розуміють пристрій довільної природи з виокремленням вхідного впливу $x(\zeta, t)$ та вихідного сигналу (координати) $y(\zeta, t)$. Таке представлення РП-об'єкта є зручним у структурно-алгоритмічному моделюванні систем з РП-параметрами, аналогічно до підходу в моделюванні систем із зосередженими параметрами, та значно спрощує класичні представлення моделей у формі ДРЧП. Вказано, що опис співвідношення між вхідним та вихідним сигналами в лінійних РП-об'єктах можна представити інтегральною моделлю у вигляді

$$y(\zeta, t) = \int_0^t K(\xi, \zeta, t, s) x(\zeta, t) ds,$$

де $K(\xi, \zeta, t, s)$ — ядро інтегрального оператора, що є ваговою (імпульсною) функцією ОУ.

Було показано, що різні форми представлення вказаної інтегральної моделі дають змогу формалізувати обернені задачі (відновлення сигналів та пошук управляючих впливів) у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерри I роду або поліноміальних рівнянь Вольтерри I роду другого ступеню.

В першому розділі, як результат виконаного аналітичного дослідження, зроблено висновок про те, що висока універсальність, властивість згладжування експериментальних даних, ефективна побудова макромоделей визначають переваги інтегральних моделей. Проте використання інтегральних моделей у моделюванні РП-об'єктів (РП-процесів) породжує ряд задач, які пов'язано з проблемами побудови таких моделей на основі еквівалентних, апроксимаційних або ідентифікаційних методів, а також із проблемами розв'язування як прямих, так і обернених задач.

Другий розділ присвячено методам побудови спрощених інтегральних моделей динамічних об'єктів з РП-параметрами на основі еквівалентних та (або) апроксимаційних перетворень.

В якості типових перетворень диференціальних моделей з частинними похідними в інтегральні визначено методи функції Гріна, інтегральних перетворень, інтегральних представлень. Застосування даних методів через різноманітність постановки задач, а також крайових та початкових умов, ґрунтовно не досліджено та має особливості у розв'язуванні прикладних задач. Зазначені методи дають змогу отримати інтегральні моделі з ядрами, які містять сингулярність або нескінченні суми. Тому в розв'язуванні прямих та обернених задач виникає необхідність зведення таких моделей до «зручного», в плані числової реалізації, вигляду на основі використання інтерполяційних, апроксимаційних і регуляризаційних методів. Застосування диференціально-різницевих апроксимацій до базових моделей дозволяє отримати інтегральні моделі у вигляді дробово-раціональних передаточних функцій високого порядку, пониження степеня яких пропонується здійснювати на основі ланцюгово-дробової апроксимації. Також в якості

ефективного підходу при отриманні інтегральних моделей є їх ідентифікація на основі застосування методу обчислювальних експериментів шляхом розв'язування (із високою точністю) ДРЧП в математичних пакетах прикладних програм.

Практика моделювання динамічних об'єктів, представлених складними передаточними функціями вказує на застосування методів апроксимації з метою спрощення ММ із забезпеченням вимог до їх адекватності. В дисертаційній роботі запропоновано здійснювати дробово-раціональну апроксимацію таких передаточних функцій за допомогою ланцюгових дробів, оскільки вони мають важливу властивість — збігаються швидше, ніж інші послідовні ряди і містять більше важливих характеристик об'єктів у декількох перших членах ряду.

Відомо, що однією з основних проблем у числовій реалізації інтегральних моделей є накопичення кількості обчислень. Виходом із цієї ситуації, якщо це можливо, є розділення ядер. Автором запропоновано подавати ядра поліноміального інтегрального оператора у виродженій формі, що дало змогу отримувати його ефективно, в обчислювальному сенсі, представлення.

Запропоновано метод розділення ядер Вольтерри поліноміальними представленнями багатовимірних функцій на основі методу найменших квадратів. В основі методу лежить поетапне застосування методу найменших квадратів до кожного виміру ядра.

В одновимірному випадку функція будується у вигляді полінома

$$K(t, s) \approx \sum_{k=0}^n a_k t^k, \quad (1)$$

а у двовимірному випадку апроксимація здійснюється виразом виду

$$K(t, s) \approx \sum_{k=0}^n a_k(s) t^k = \sum_{k=0}^n a_k t^k \sum_{l=0}^k a_l s^l, \quad (2)$$

де a_l , a_k — шукані коефіцієнти. У загальному випадку апроксимаційне представлення має вигляд:

$$K(t, s_1, \dots, s_p) \approx \sum_{k=0}^n a_p(s_1, \dots, s_p) t^k, \quad (3)$$

де a_p — поліноми від змінних s_1, \dots, s_p .

В дисертаційній роботі доведено, що застосування методів апроксимації також буде ефективним і в ідентифікації моделей Вольтерри на основі детермінованих сигналів, де однією з основних проблем є стійкість числового диференціювання.

Третій розділ присвячено розробці методів ідентифікації моделей динамічних процесів в РП-об'єктах в інтегральній формі.

Застосування параметричних моделей потребує обов'язкового початкового аналізу об'єкта дослідження та визначення виду моделі. Для моделей у вигляді передаточних функцій розглянуто детермінований і

стохастичний підходи побудови ММ на основі застосування перетворення Лапласа з апроксимацією перехідної характеристики та застосування моментів Пуассона, відповідно. Наслідком застосування даних методів є ММ у вигляді дробово-раціональних передаточних функцій, які, для забезпечення адекватності, мають бути високого степеня. Аналогічні труднощі виявляються в побудові моделей у вигляді диференціальних рівнянь.

Вказано на доцільність застосування методів ідентифікації непараметричними моделями у вигляді інтегральних операторів, які дозволяють будувати моделі досліджуваних об'єктів у вигляді «чорного ящика». Процес ідентифікації моделей лінійних динамічних РП-об'єктів шляхом кореляційного аналізу результатів проведених експериментів та вхідних впливів досліджено при побудові інтегрального оператора Вінера-Гопфа. При цьому, для отримання адекватних моделей, такий підхід потребує проведення великої кількості експериментів.

У дисертаційній роботі використано метод, відповідно до якого ідентифікація ядер Вольтерри здійснюється на основі комбінації детермінованих ступінчатих впливів з амплітудою A . Ядра визначено на основі однорідних регулярних операторів n -го степеня.

Для розв'язання проблеми диференціювання експериментальних даних, за наявності шумових завад, запропоновано застосовувати аналітичне диференціювання функціональних залежностей. Основою цього методу є метод апроксимації багатовимірних функцій. Диференціювання одновимірної функції здійснюється на основі (1) у вигляді

$$K_1(t_1) = \frac{df(t_1)}{dt_1} \approx \sum_{k=0}^n ka_k t_1^{k-1}, \quad (4)$$

а двовимірної функції — на основі (2) у вигляді

$$K_2(t_1, t_2) = \frac{\partial^2 f(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2} \approx \sum_{k=0}^n \left(ka_k t_1^{k-1} \sum_{l=0}^k la_l t_2^{k-1} \right), \quad (5)$$

де a_l, a_k — коефіцієнти, віднайдені на основі застосування відповідних апроксимаційних представлень.

Для зменшення кількості експериментів запропоновано метод ідентифікації рядів Вольтерри на основі адаптивного підбору серії експериментів. В основі запропонованого методу лежить властивість, яка полягає в тому, що вплив нелінійності на результати різних експериментів є однаковим (у межах заданої похибки), але зміщеним у часі, відповідно до зміщення ступінчатого вхідного сигналу. Ефективність запропонованого підходу досліджено на модельних експериментах, зокрема при розв'язуванні задачі ідентифікації моделі у вигляді однорідного поліноміального оператора Вольтерри другого степеня.

Запропонований адаптивний метод ідентифікації нелінійних динамічних моделей дозволяє отримувати моделі у вигляді поліноміальних операторів Вольтерри зі збереженням адекватності моделі, але кількість необхідних експериментів для побудови ядер відрізняється на порядок. Такий

підхід має значний економічний ефект, оскільки дозволяє скоротити часові та матеріальні ресурси на проведення натурних експериментів. Ефект скорочення кількості експериментів спостерігається на моделях як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами. Розроблений метод також показав високу ефективність при ідентифікації моделей нелінійних систем, які під час перехідного процесу виходять на усталений режим роботи.

У **четвертому розділі** дисертації виконано розробку методів числової реалізації інтегральних моделей динамічних процесів в РП-об'єктах при розв'язуванні прямих задач.

Вказано на слабо сингулярну особливість моделей РП-об'єктів, у вигляді інтегральних операторів, яка виникає в процесі моделювання вказаних об'єктів. Для числової реалізації такого роду моделей запропоновано застосування стійких алгоритмів, заснованих на прийомі регуляризації некоректних задач. Метод внутрішньої регуляризації також було застосовано для регуляризації сингулярних поліноміальних операторів.

Кардинальною проблемою застосування поліноміальних інтегральних операторів є накопичення кількості обчислювальних процедур при їх числовій реалізації.

Для вирішення даної проблеми запропоновано ряд методів.

Перший базується на векторно-матричному підході і полягає у можливості застосування квадратурних формул прямокутників, трапецій та Сімпсона для числової реалізації неоднорідного інтегрального поліноміального оператора Вольтерри третього степеня. При цьому запропоновано застосовувати векторно-матричний підхід зі зведенням усіх операцій обчислювального процесу до поелементного множення. Такий підхід значно спрощує програмну реалізацію поліноміальних операторів, оскільки дозволяє легке масштабування до багатовимірною випадку.

Інший метод зменшення кількості обчислювальних операцій полягає в застосуванні методу розділення ядер. Метод дозволяє при числовій реалізації поліноміальних операторів Вольтерри скоротити кількість обчислень на порядок.

Проведені обчислювальні експерименти засвідчили ефективність запропонованих методів. Залежно від виду ядра можна будувати обчислювальні алгоритми на основі використання різних квадратурних методів, які застосовують окремо до кожного виміру.

Якісні дослідження розроблених методів числової реалізації інтегральних моделей динамічних процесів в РП-об'єктах показали, що в алгоритмах числового розв'язування задач у дискретній формі можуть застосовуватись не тільки обчислювальні схеми прямокутників, трапецій, Сімпсона, але і обчислювальні процедури, що ґрунтуються на основі комбінації квадратурних формул Ньютона-Котеса вищих порядків. Такий підхід дозволяє отримати різні кубатурні формули та розширити множину алгоритмів апроксимації інтегральних моделей скінченними сумами і підібрати «кращий» метод залежно від поставленої вихідної задачі.

Отже, представлення квадратурних і кубатурних формул у векторно-матричному вигляді дозволяє будувати ефективні алгоритми та програмні засоби для числової реалізації інтегральних моделей, а також використовувати переваги матрично-орієнтованих пакетів прикладних програм (Matlab, Octave, Scilab), особливістю яких є висока швидкість виконання матричних операцій. Крім того, запропонований підхід дає змогу здійснювати розпаралелення обчислювальних алгоритмів, що значно пришвидшує числову реалізацію інтегральних операторів.

П'ятий розділ дисертаційної роботи присвячено розробці питань розв'язування обернених задач динаміки РП-об'єктів (зокрема відновлення вхідних сигналів).

Так, при відновленні вхідних сигналів динамічних РП-об'єктів на основі інтегральних моделей складність посилюється тим, що їх ядра мають сингулярність. У такому випадку, аналогічно до прямих задач, запропоновано застосувати регуляризацию інтегральних моделей шляхом внесення регуляризаційного параметра.

Застосування запропонованого підходу до відновлення вхідних сигналів лінійних динамічних систем з розподіленими параметрами досліджено на основі обчислювальних експериментів, зокрема, при відновленні сигналів, які проходять через РП-об'єкти, що описуються типовими ланками.

У розв'язуванні обернених задач динаміки нелінійних об'єктів на основі інтегрального підходу постає проблема розв'язування поліноміальних інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду, для розв'язання яких, на даний час, немає ефективних методів та засобів.

Дану задачу запропоновано розв'язувати шляхом заміни інтегралів в поліноміальному інтегро-диференційному рівнянні квадратурними формулами, що дозволяє отримати ряд переваг, зокрема простоту реалізації та високу стійкість обчислювальних алгоритмів за рахунок регуляризуючих властивостей вибору кроку дискретизації.

Таким чином, запропонований регуляризаційний метод розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду, в тому числі поліноміальних, на основі введення диференціального регуляризаційного оператора, разом з методом внутрішньої регуляризації, дозволяє відновлювати сигнали в межах інженерної похибки на вході як лінійних, так і нелінійних динамічних РП-об'єктів, необхідність дослідження яких виникає у прикладних задачах.

У шостому розділі розглянуто питання розробки комп'ютерних засобів дослідження лінійних та нелінійних РП-об'єктів (комп'ютерного моделюючого середовища), прикладні можливості яких визначено шляхом розв'язування типових прикладних задач.

На основі розроблених методів та алгоритмів створено комплекс програмних засобів Objects with Distributed Parameters (ODP) у вигляді модулів розширень системи моделювання Matlab/Simulink (відповідних користувацьких додатків).

Особливість розробленого ODP-середовища полягає у використанні векторно-матричних операцій, що дозволяє значно підвищити швидкість виконання обчислювальних алгоритмів, оскільки такий підхід є основною перевагою середовища Matlab у порівнянні з іншими програмними пакетами.

Ґрунтуючись на застосуванні розроблених методів та реалізуючих їх комп'ютерних засобів, побудовано моделі вимірювальних перетворювачів, зокрема, для вимірювального перетворювача температури на основі базової моделі у формі ДРЧП отримано моделі у вигляді: систем інтегральних рівнянь Вольтерри другого роду (метод теплових потенціалів); ірраціональних і трансцендентних передатних функцій та їх інтегральних представлень (метод перетворення Лапласа); дробово-раціональних передатних функцій (методи перетворення Лапласа, диференціально-різницевої апроксимації, ланцюгово-дробової апроксимації); операторів Вольтерри (метод функції Гріна, метод обчислювальних експериментів); структурних моделей зі складовими у вигляді передаточних функцій або операторів Вольтерри (метод структурно-алгоритмічного моделювання). Дані моделі виявились ефективними в розв'язуванні задач аналізу. У розв'язуванні задач відновлення сигналів найбільш ефективними виявились моделі у вигляді рівнянь Вольтерри першого роду.

В прикладному застосуванні отримані моделі та алгоритми їх числової реалізації розглядаються як основа при розробці програмного забезпечення комп'ютеризованих систем управління, контролю та вимірювання.

В якості типової прикладної задачі розглянуто задачу оперативного контролю температурних режимів чипів магістрального та комутаційного обладнання комп'ютерних мереж. Вимірювальна система «чип — температурний сенсор» має властивість розподіленості за просторовою координатою. Це призводить до того, що при вимірюванні температури з'являється затримка між показами вимірювального перетворювача та реальним значенням температури чипу.

Для зменшення затримки реакції системи контролю запропоновано проводити обробку цифрової інформації, що надходить з аналогово-цифрових перетворювачів температурних датчиків комутаторів шляхом розв'язування оберненої задачі відновлення сигналу з використанням моделі вимірювальної системи «чип — температурний сенсор». Експериментально виявлено, що вимірювальна система є нелінійною, тому модель побудовано у формі частинної суми інтегро-степеневого ряду Вольтерри. На основі експериментальних досліджень визначено, що задовільна адекватність моделі досягається у використанні поліноміального інтегрального оператора другого степеня, тобто вплив третього і вищих членів інтегрального ряду є незначним (менше 0,5 %).

У **висновках** сформульовано основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі, а також стверджується, що на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень у дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему створення методів і

засобів математичного моделювання динамічних процесів в об'єктах з розподіленими параметрами шляхом отримання і застосування спрощених динамічних моделей у вигляді одновимірних інтегральних операторів і рівнянь, що дозволяє знизити складність алгоритмічної та програмної реалізації моделей у системах управління, контролю і вимірювання із забезпеченням їх високої завадостійкості та швидкодії.

У додатках наведено результати дослідження моделей вимірювальних перетворювачів у розв'язуванні прямих та обернених задач, синтаксис модулів розробленого програмного комплексу.

Текст дисертації викладено грамотною технічною мовою, логічно та послідовно. Стиль викладення доказовий.

6. ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ, СФОРМУЛЬОВАНИХ У ДИСЕРТАЦІЇ ТА ОПУБЛІКОВАНИХ В РОБОТАХ АВТОРА

Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 21 статті, зокрема в таких, що відносяться до наукових фахових видань і збірників наукових праць та індексуються у міжнародних наукометричних базах. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати доповідалися та опубліковані в тезах 20 Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференцій.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи відображено в публікаціях рівномірно по розділах. Одночасно вони відбивають пріоритети автора дисертації у розв'язуванні наукових та прикладних задач обраного ним наукового напрямку.

Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертаційної роботи. Автореферат містить основні положення, висновки та рекомендації, приведені в дисертації, а також всю іншу необхідну для оцінки роботи інформацію.

Публікації ІВАНЮКА В. А. задовольняють всім відповідним вимогам чинного «Порядку присудження наукових ступенів». Повнота відображення результатів дисертаційного дослідження і умови щодо кількості публікацій відповідає вимогам, які пред'являються до докторських дисертацій з обраної спеціальності.

7. ЗАУВАЖЕННЯ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

В якості зауважень до дисертаційної роботи слід вказати наступне.

1. Не зрозуміло і потребує пояснень як визначається «необхідний рівень адекватності моделей», про що вказано в п.1 наукової новизни (стор. 4 автореферату)?

2. В чому полягає і як оцінюється «ефективність процесу відновлення сигналу на вході динамічних об'єктів у разі наявності шумових завод», яка є відмінною рисою запропонованого регуляризаційного методу розв'язування

інтегральних рівнянь Вольтерри (п. 3 наукової новизни, стор. 4 автореферату)?

3. Доцільно було б проілюструвати обчислювальні можливості запропонованих методів побудови інтегральних динамічних моделей на основі еквівалентних та апроксимаційних перетворень (в розділі 2 дисертаційної роботи) шляхом розв'язування тестових задач.

4. В третьому розділі дисертаційної роботи, при розгляді запропонованого способу визначення передаточних функцій динамічного об'єкта на основі інтегральних спектрів Пуасона (стор. 174 дисертаційної роботи), потребує пояснень теза автора про те, що «... $f_{\text{зріз}}$ — верхня межа спектру $W(j\omega)$, яка відповідає частоті, для якої модуль амплітудно-частотної характеристики об'єкта стає менше вбудованої величини наведеної похибки вимірювального комплексу.»

5. Складно, внаслідок низької поліграфічної якості, сприймається інформація, яку наведено на графіках: рис. 3.18 — рис. 3.20 (стор. 211; рис. 4.1 (стор. 219); рис. 4.3 (стор. 220); рис. 4.5 (стор. 221); рис. 4.15 (стор. 236) — у дисертаційній роботі, та рис. 3 (стор. 16); рис. 6 (стор. 24); рис. 7 (стор. 26); рис. 9 (стор. 28) — у авторефераті.

6. Рис. 8 (стор. 27 автореферату) та рис. 6.1 (стор. 297 дисертаційної роботи) радше сприймається не як структура запропонованого моделюючого середовища, а як перелік частинних математичних задач, що розв'язуються за його допомогою.

7. Потребує пояснень план експериментів, наведений в табл. А.6 та табл. А.7 Додатку А (стор. 368, 369).

8. В текстах автореферату та дисертаційної роботи зустрічаються граматичні та стилістичні помилки, кількість яких, проте, цілком природно для друкованих робіт такого обсягу.

Однак, наведені зауваження *не торкаються суті виконаних досліджень та не знижують позитивного враження від дисертаційної роботи.*

ВИСНОВОК

Зміст дисертаційної роботи ІВАНЮКА Віталія Анатолійовича відповідає за формулою та напрямками досліджень паспорту спеціальності 01.05.02 — Математичне моделювання та обчислювальні методи.

Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи. Публікації автора у повному обсязі відображають результати виконаних досліджень. Крім того, повнота відображення результатів дисертаційного дослідження і кількість публікацій відповідають діючим чинним вимогам. Отримані результати наукових досліджень достовірні, достатньо обґрунтовані, мають наукову та прикладну значимість. На основі аналізу автореферату, дисертаційної роботи

та опублікованих робіт ІВАНЮКА В. А. вважаю, що здобувачем вирішено важливу наукову проблему, яка полягає у створенні методів і засобів математичного моделювання динамічних процесів в об'єктах з розподіленими параметрами шляхом отримання і застосування спрощених динамічних моделей у вигляді одновимірних інтегральних операторів і рівнянь, що дозволяє знизити складність алгоритмічної та програмної реалізації моделей у системах управління, контролю і вимірювання із забезпеченням їх високої завадостійкості та швидкодії.

Дисертаційну роботу оформлено із дотриманням необхідних вимог, прийнятих правил та норм. Дисертаційна робота ІВАНЮКА Віталія Анатолійовича «**Методи та засоби математичного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами на основі одновимірних інтегральних моделей**» є завершеним науковим дослідженням, у якому поставлено і вирішено важливу науково-технічну проблему. Одержані результати мають наукову новизну і практичне значення.

Дисертаційна робота відповідає п.п. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. та чинним вимогам Міністерства освіти і науки України, а її автор — ІВАНЮК Віталій Анатолійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — Математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри «Комп'ютеризовані системи управління» Одеського національного політехнічного університету, доктор технічних наук, професор



С. А. ПОЛОЖАЄНКО

Підпис професора ПОЛОЖАЄНКА С. А. посвідчую.

Вчений секретар ради ОНПУ к.т.н., доцент




В. І. ШЕВЧУК