

ВІДГУК

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 представлена дисертаційна робота загальним обсягом 419 сторінок, автореферат (40 сторінок), опубліковані за темою дисертації 46 наукових праць, а також документи про впровадження.

1. Актуальність теми наукового дослідження та її зв'язок з науковими програмами, планами і темами

Розвиток сучасних технічних систем пов'язаний із масовим впровадженням комп'ютерно-інтегрованих технологій, основною метою якого є створення новітніх комп'ютерно-інтегрованих систем керування та контролю. Такі системи зазвичай реалізуються у вбудованому виконанні, що висуває значні ресурсні обмеження, які, в свою чергу, породжують вимоги до обчислювальних методів та засобів, які реалізуються в комп'ютерній частині інтегрованої системи, а саме характеристики точності та швидкодії. Із врахуванням сказаного, розробка програмного забезпечення для підтримки ефективного функціонування таких систем вимагає розв'язування проблем, пов'язаних із отриманням спрощених математичних моделей динаміки відповідних об'єктів керування, контролю та вимірювання.

Всі реальні системи певною мірою містять елементи з розподіленими параметрами. Класичним математичним апаратом опису динаміки таких систем є апарат диференціальних рівнянь із частинними похідними. Сучасні методи числової реалізації таких моделей не завжди можуть ефективно використовуватись у комп'ютеризованих системах в силу складності і великих часових затрат, які суттєво збільшуються у випадку необхідності підвищення точності розв'язків. Крім того, для багатьох практичних задач керування, контролю та вимірювання, оскільки вихідні дані отримуються із певними похибками, достатнім буде математичний опис залежності між вхідним впливом та відгуком у вигляді спрощених моделей.

Досвід показує, що перспективним підходом до вирішення даної проблеми є використання певних видів інтегральних моделей, які мають ряд позитивних властивостей, а саме: незмінність структури інтегральної моделі для різних класів динамічних об'єктів (як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами), де властивості моделей визначаються ядром інтегрального оператора; наявність ефекту згладжування при числовій реалізації та обробці сигналів із високочастотними завадами; можливість отримання моделей безпосередньо за експериментальними даними. Такими моделями, при розв'язуванні прямих задач, є інтегральний оператор Вольтерри (у випадку моделювання лінійних систем) та поліноміальний інтегральний оператор Вольтерри (у випадку дослідження

*ЗПМЕ 8х.96
12.03.2020р.*

нелінійних систем). При розв'язуванні обернених задач (пошук керуючого впливу, відновлення сигналів) подані моделі легко трансформуються в інтегральне рівняння та поліноміальне інтегральне рівняння Вольтерри відповідно, які є класичним поданням для розв'язування такого класу задач.

Отже, у зв'язку з інтенсивним розвитком комп'ютерно-інтегрованих систем і суттєвим розширенням сфери їх застосування актуальною є науково-технічна проблема створення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами на основі одновимірних інтегральних моделей, що дозволяє враховувати ресурсні обмеження у побудові систем керування, контролю та вимірювання, які забезпечують процеси функціонування керованих технічних об'єктів.

Дисертаційне дослідження Іванюка В.А. проводилось в рамках науково-дослідних робіт у Кам'янець-Подільському національному університеті імені Івана Огієнка МОН України, 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).

Одержані результати, наукове і практичне значення, матеріали впровадження у виробництво виконаних Іванюком В.А. досліджень підтверджують актуальність дисертаційної роботи.

2. Основні наукові результати

У дисертаційній роботі Іванюка В.А. отримано наукові результати, які дозволили розв'язати науково-технічну проблему створення методів і засобів математичного моделювання динамічних процесів в об'єктах із 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 керування, контролю і вимірювання із забезпеченням їх високої завадостійкості та швидкодії.

На основі аналізу результатів дисертаційного дослідження В.А. Іванюка доцільно відзначити наступні наукові результати, що мають наукову новизну:

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 добутків 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.

Отримані дисертантом результати є новими науковими знаннями та вирішують важливу науково-технічну проблему. Зазначені вище елементи наукової новизни дисертаційних досліджень вказують на те, що докторська дисертація Іванюка В.А. цілком відповідає вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт, представлених на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

3. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 419 сторінок, із них основного тексту дисертації – 281 сторінка, 132 рисунки, 36 таблиць, список використаних джерел включає 281 найменування та займає 28 сторінок, обсяг додатків складає 60 сторінок.

У *вступі* подано загальну характеристику роботи, сформульовано актуальність наряду досліджень, мету та завдання, наведено відомості про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, відзначені наукова новизна й практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача в роботах у співавторстві, відомості про апробацію результатів дослідження.

У *першому* розділі подано аналіз існуючих підходів до математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами в розв'язуванні задач керування, контролю та вимірювання на основі одновимірних інтегральних моделей. Як результат виконаного аналітичного дослідження, зроблено висновки про те, що для розв'язування задач керування, контролю та вимірювання перспективним є використання одновимірних інтегральних моделей, але незважаючи на широкий спектр наявних публікацій з даного напрямку наукових досліджень залишаються нерозв'язаними ряд проблем, що стосуються моделювання об'єктів із розподіленими параметрами, зокрема: необхідність вдосконалення методів та засобів побудови інтегральних моделей на основі еквівалентних та/або апроксимаційних перетворень диференціальних рівнянь із частинними похідними, ідентифікації моделей із врахуванням нелінійних залежностей та розподіленості параметрів; проблеми розв'язування задач аналізу на основі числової реалізації поліноміальних інтегральних моделей, в тому числі із сингулярними ядрами; складність відновлення сигналів на вході нелінійних динамічних систем на основі розв'язування поліноміальних інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду, для розв'язання яких немає ефективних методів та засобів; неповнота сучасних пакетів прикладних програм засобами для моделювання об'єктів із розподіленими параметрами на основі інтегральних моделей.

У *другому* розділі розглянуто методи побудови спрощених інтегральних моделей динамічних об'єктів із розподіленими параметрами на основі еквівалентних та/або апроксимаційних перетворень.

Досліджено особливості застосування методів еквівалентних перетворень моделей динамічних об'єктів із розподіленими параметрами у формі

диференціальних моделей із частинними похідними в інтегральні, зокрема, методів потенціалів, інтегральних представлень, інтегральних перетворень. Застосування даних методів через різноманітність постановки задач, а також крайових та початкових умов, має особливості у розв'язуванні різних задач, а в результаті отримуються інтегральні моделі із ядрами, які містять сингулярність або нескінченні суми, а у випадку нелінійних динамічних систем – поліноміальні інтегральні оператори.

Проведений аналіз моделей широкого спектру динамічних процесів об'єктів із розподіленими параметрами та методів їх еквівалентних перетворень дозволив удосконалити базовий набір моделей об'єктів із розподіленими параметрами у формі передатних функцій та інтегральних операторів, до яких віднесено ланки: напівінтегральну, напівінерційну, напівколивальну, запізнення та напівзапізнення. Для їх числової реалізації запропоновано два підходи. Перший полягає в апроксимації складних передатних функцій із застосуванням структурної декомпозиції на основі ланцюгово-дробової апроксимації. Другий полягає у застосуванні апроксимаційних представлень інтегральних операторів Вольтерри.

Метод диференціально-різницевої апроксимації диференціальних рівнянь із частинними похідними дозволяє отримати моделі у вигляді дробово-раціональних передатних функцій високого порядку. Застосування ланцюгово-дробової апроксимації дозволило будувати «економні» в обчислювальному сенсі моделі із збереженням їх адекватності на рівні диференціально-різницевих моделей.

Однією з основних проблем числової реалізації інтегральних моделей, особливо поліноміальних, є накопичення кількості обчислень. Виходом із цієї ситуації, якщо це можливо, є розділення ядер. Якщо таке представлення ядер здійснити прямим переходом не вдається, автором запропоновано застосовувати їх апроксимацію на основі застосування методу найменших квадратів (метод апроксимації на основі степеневих функцій, метод експоненціальної апроксимації).

Третій розділ присвячено методам ідентифікації моделей динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами в інтегральній формі.

Складність і різноманіття процесів, що протікають у складних керованих системах, методи побудови математичних моделей досліджуваних динамічних процесів за допомогою законів природи часто виявляються малоефективними. Тому найбільш прийнятними є експериментальні методи ідентифікації. Форма моделі, зазвичай, підбирається відповідно до явищ та процесів, які протікають у досліджуваних динамічних системах, але для розв'язування задач керування, вимірювання та контролю найбільш прийнятними представленнями моделей є форма моделей у вигляді «вхід – вихід», зокрема, операторних моделей (передатні функції, інтегральні оператори).

В дисертаційній роботі досліджено методи ідентифікації параметричних динамічних моделей у формі передатних функцій на основі застосування детермінованого (застосування перетворення Лапласа та апроксимаційного представлення перехідної характеристики) та стохастичного (застосування моментів Пуассона) підходів, що дозволило отримувати апроксимаційні моделі об'єктів із розподіленими параметрами у формі дробово-раціональних передатних

функцій, та метод побудови моделі лінійної динамічної системи у формі непараметричного оператора Вінера-Гопфа в сфері його застосування до об'єктів із розподіленими параметрами шляхом формування рекомендацій щодо вибору типу вхідних сигналів та необхідної мінімальної кількості експериментів.

Основна увага в роботі приділена розвитку методів ідентифікації поліноміальних інтегральних операторів Вольтерри, а саме розв'язанню таких ключових проблем: числове диференціювання експериментально отриманих залежностей та необхідність проведення значної кількості експериментів. В роботі запропоновано здійснювати числове диференціювання на основі аналітичного диференціювання апроксимацій поліномами та експоненціальними функціями результатів експериментів. Суттєве скорочення кількості необхідних експериментів, у порівнянні з традиційним підходом, досягається шляхом адаптації процесу проведення серії активних експериментів та заміни ряду результатів інтерполяційними даними зі збереженням необхідного рівня адекватності моделей нелінійних динамічних систем.

Четвертий розділ присвячено розробці методів числової реалізації інтегральних моделей динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами для розв'язування прямих задач. Ключовою проблемою застосування інтегральних операторів, особливо поліноміальних, є накопичення кількості обчислювальних процедур при їх числовій реалізації. Для вирішення даної проблеми в дисертаційній роботі запропоновано ряд методів.

Вдосконалено метод числової реалізації поліноміальних операторів Вольтерри на основі методу квадратур шляхом застосування векторно-матричного підходу, відповідно до якого здійснюється зведення всіх обчислювальних операцій до поелементного множення та додавання матриць. Запропонований метод орієнтований на ефективну програмну реалізацію із застосуванням паралельних алгоритмів обчислення інтегральних операторів, а також дозволяє використовувати переваги матрично-орієнтованих пакетів прикладних програм (Matlab), особливістю яких є висока швидкість виконання матричних операцій.

Також в межах дисертаційного дослідження розроблено метод числової реалізації поліноміальних операторів Вольтерри із застосуванням апроксимації багатовимірних ядер функціями у вигляді суми добутків незалежних змінних, що дозволяє скоротити на порядок кількість необхідних обчислювальних процедур.

Для числової реалізації інтегральних операторів Вольтерри із сингулярними ядрами, які зазвичай виникають при описі динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами, запропоновано зводити інтегральні моделі, в тому числі і поліноміальні, до моделей із ядрами без особливостей на основі методу внутрішньої регуляризації.

У *п'ятому* розділі розглянуто проблеми розв'язування обернених задач динаміки об'єктів із розподіленими параметрами. В межах дисертаційного дослідження для розв'язування задач керування, контролю та вимірювання, які, часто зводяться до розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду, автором розроблено метод їх регуляризації шляхом введення диференціального

регуляризаційного оператора. Отримані інтегро-диференціальні рівняння розв'язуються на основі застосування різницевих і квадратурних методів.

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'язування яких немає ефективних методів та засобів. Для їх розв'язування розроблено метод в основі якого лежать квадратурні алгоритми та ітераційні методи розв'язування систем нелінійних алгебраїчних рівнянь.

У випадку наявності шумів у вхідних сигналах, оскільки задача є некоректною, не вдається отримувати результати із необхідною точністю. Автором, аналогічно до лінійного випадку, запропоновано застосовувати диференціальний регуляризаційний оператор, тоді розв'язування поліноміального рівняння Вольтерри зводиться до розв'язування поліноміального інтегро-диференціального рівняння, числова реалізація якого здійснюється на основі апроксимаційних наближень шляхом застосування методу квадратур (кубатур) та різницевих формул.

У розв'язуванні обернених задач для динамічних об'єктів із розподіленими параметрами на основі інтегральних моделей складність посилюється тим, що ядра інтегральних моделей мають сингулярність. У такому випадку, аналогічно до прямих задач, автором запропоновано застосувати їх регуляризацію шляхом внесення внутрішнього регуляризаційного параметра.

У шостому розділі розглянуто питання розробки комп'ютерного моделюючого середовища. Розроблені методи та алгоритми стали основою для створеного комплексу програмних засобів Objects with distributed parameters (ODP), який побудовано із дотриманням вимог до програмних модулів у середовищі Matlab/Simulink. Програмні засоби побудовані з використанням векторно-матричних операцій, що дозволяє значно збільшити швидкість виконання алгоритмів, оскільки такий підхід є основною перевагою середовища Matlab у порівнянні з іншими програмними пакетами. Програмні модулі комплексу ODP дозволяють будувати інтегральні моделі об'єктів із розподіленими параметрами із використанням еквівалентних, апроксимаційних перетворень та методів експериментальної ідентифікації, а також розв'язувати прямі та обернені задачі динаміки на основі числової реалізації інтегральних операторів та рівнянь Вольтерри, в тому числі поліноміальних.

Результати дисертаційного дослідження використано в розв'язуванні задачі оперативного контролю температурних режимів чипів магістрального та комутаційного обладнання комп'ютерних мереж. Побудована модель вимірювальної системи «чип – температурний сенсор» у формі частинної суми інтегро-степеневого ряду Вольтерри стала основою комп'ютеризованої підсистеми контролю температурних режимів. Особливістю побудованої моделі є те, що вона визначена ядрами інтегральних операторів, які задані таблично (вектор та матриця), що накладає часові обмеження на використання моделі. Автором дана проблема вирішується шляхом застосування механізму повторного запуску обчислювальних процесів у двох паралельно працюючих потоках.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

У додатках наведено результати розв'язування прямих та обернених задач дослідження моделей вимірювальних перетворювачів, синтаксис модулів розробленого програмного комплексу та копії документів про впровадження результатів дисертаційного дослідження.

4. Ступінь обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові результати роботи, висновки та рекомендації достатньою мірою обґрунтовані, оскільки базуються на аналізі сучасних та загальновизнаних літературних джерел. Загалом в роботі розглянуто та проаналізовано джерела наукової літератури, як вітчизняних, так і зарубіжних вчених (281 найменування у списку використаних джерел), досліджено поточний стан проблеми математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами.

Іванюк В. А. проводить дисертаційне дослідження із застосуванням загальновизнаних теорій, використовуючи: методи математичного моделювання динамічних систем для побудови та дослідження моделей; елементи теорії інтегральних рівнянь, методи еквівалентних перетворень для отримання одновимірних інтегральних моделей; методи обчислювальної математики для числової реалізації математичних моделей; методи розв'язування обернених задач динаміки для ідентифікації моделей та відновлення вхідних сигналів; методи програмної інженерії в розробці програмного комплексу; методи обчислювального експерименту для числового дослідження математичних моделей. Їх коректне застосування забезпечує обґрунтованість отриманих результатів.

Результати проведених обчислювальних експериментів підтверджують достовірність отриманих результатів моделювання. У роботі подано приклади розв'язування модельних та прикладної задач, а також наявні акти впровадження результатів дисертаційного дослідження у виробничому процесі.

Результати дисертаційної роботи були апробовані на 20 міжнародних і всеукраїнських конференціях та отримали підтримку науковців з даного напрямку досліджень.

5. Практична цінність результатів роботи

Основними практичними результатами дисертаційної роботи Іванюка В.А. є розроблені методи та засоби (пакет прикладних програм для середовища MATLAB/Simulink – Objects with Distributed Parameters) математичного моделювання процесів динаміки в об'єктах із розподіленими параметрами на основі одновимірних інтегральних моделей. Програмний комплекс значно розширює можливості середовища Matlab при створенні комп'ютеризованих систем керування, контролю та вимірювання.

Із використанням розроблених методів і засобів розв'язано ряд модельних та прикладних задач, зокрема розроблені методи ідентифікації нелінійних об'єктів з розподіленими параметрами, а також методи розв'язування обернених задач

(відновлення сигналів на вході) використано для покращення швидкості реагування системи моніторингу температурних режимів чипів комутаторів доступу комп'ютерної мережі.

Результати дисертаційного дослідження прийнято до впровадження: в ТзОВ «Мережа Ланет» для моніторингу температурних режимів роботи об'єктів інформаційно-обчислювальних систем, зокрема комутаційного та магістрального обладнання комп'ютерних мереж; ТзОВ «Легідком» – у проектуванні вимірювальних комплексів контролю температурних режимів чипів комутаторів доступу та агрегації, що дозволило підвищити ефективність процесів контролю та керування інформаційно-телекомунікаційними системами; ТзОВ «Імпульс» ТРК «Імпульс ТБ» – у проектуванні 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.

6. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та опублікованих в роботах автора

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційного дослідження повною мірою відображені в опублікованих роботах. Результати дисертаційного дослідження опубліковано в 46 наукових роботах, з них: 1 монографія, 21 стаття в наукових фахових виданнях України, що входять до переліку, затвердженого МОН України, 6 статей у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз (*Scopus, Web Of Science, ProQuest, EBSCOhost, Index Copernicus International, CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory, Cambridge Scientific Abstracts (CSA), Computer and Information Systems Abstracts, INIS Collection, Inspec, e-LIBRARY, BASE, PKP Index, Norwegian NSD, Google Scholar*), 15 публікацій у працях і матеріалах наукових конференцій, 2 публікації в закордонних виданнях, 1 публікація у збірнику наукових праць, який включено в міжнародні наукометричні бази Scopus та Web of Science, 7 публікацій підготовлено одноосібно, англійською мовою – 8 публікацій.

Зміст та кількість публікацій Іванюка В.А., повнота відображення в них результатів дисертаційного дослідження відповідають існуючим вимогам.

7. Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи можуть бути рекомендовані для використання у розв'язуванні практичних задач математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами. Запропоновані та отримані автором результати будуть корисними у розробці математичного та програмного забезпечення комп'ютеризованих систем керування, контролю та вимірювання, які забезпечують процеси функціонування керованих технічних систем.

Крім того, результати роботи можуть бути ефективно використані для забезпечення освітнього процесу у закладах вищої освіти, зокрема для забезпечення навчальних дисциплін пов'язаних із математичним та комп'ютерним моделюванням.

8. Оформлення дисертації та автореферату

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації. Автореферат містить основні положення, висновки і рекомендації, подані в дисертації, а також всю необхідну для оцінки роботи інформацію. Вступ та висновки автореферату та дисертації співпадають.

Мова і стиль викладення дисертації і автореферату чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати, які відповідають меті досліджень.

Оформлення дисертації та автореферату відповідає існуючим вимогам та рекомендаціям відповідних положень.

9. Зауваження по дисертації та автореферату

1. Для розв'язування проблеми накопичення кількості обчислень при числовій реалізації інтегральних моделей розроблено підходи, які базуються на використанні векторно-матричного методу та методу розділених ядер. Їх використання детально досліджено при розв'язуванні «прямих» задач (числова реалізація інтегральних операторів), але недостатньо досліджено можливість їх використання при розв'язуванні «обернених» задач, а саме для розв'язування поліноміальних інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду.

2. В роботі недостатньо описано механізм повторного перезапуску обчислювальних процесів у різних паралельно працюючих потоках (підрозділ 6.4).

3. Для побудови моделей лінійних динамічних систем застосовано стохастичний (кореляційний) та детермінований підходи, але для ідентифікації нелінійних динамічних моделей у вигляді інтегро-степеневого ряду Вольтерри автором не обґрунтовано чому не розглядається питання застосування кореляційного підходу.

4. Розділ другий роботи «Методи побудови інтегральних динамічних моделей на основі еквівалентних та апроксимаційних перетворень» інформаційно перевантажений, варто було б розділити його на два розділи, які присвячені відповідно методам еквівалентних перетворень та методам апроксимаційних перетворень.

5. В роботі подано велику кількість розв'язаних модельних задач на основі методу обчислювальних експериментів, але недостатньо приділена увага оцінці похибки заокруглення числових даних.

6. На рис. 2 автореферату (стор. 15) та рис. 3.2 і рис. 3.3 дисертації (стор. 181, стор. 183) не роз'яснено значення НДС2 (v_2) та НДС3 (v_3), не зрозуміло, чи це різні структурні елементи, чи одні й ті самі.

7. Оцінка апроксимації двовимірних функцій, яка представлена в дисертації у вигляді графіків поверхонь на рис. 2.8, рис. 2.9 (стор. 163) та рис. 2.10

(стор. 166) є малоінформативними, варто було б їх подати аналогічно до оцінки диференціювання двовимірних функцій у вигляді перерізів (рис. 3.4, рис. 3.5, стор. 188).

8. В авторефераті та дисертаційній роботі зустрічаються граматичні та стилістичні помилки механічного характеру, але їх порівняно небагато для такої об'ємної роботи.

10. Висновок про відповідність дисертації паспорту спеціальності і встановленим вимогам

Зазначені зауваження не знижують цінності роботи та не впливають на її загальну позитивну оцінку. Дисертація 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 поставлена та вирішена важлива науково-технічна проблема. Наукові результати одержані автором самостійно і мають наукову новизну та практичне значення.

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п. п. 9, 10 та п. 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. та чинним вимогам Міністерства освіти і науки України, які висуваються до докторських дисертацій, а її автор Іванюк Віталій Анатолійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри радіотехніки,
телекомунікаційних і робототехнічних систем
Черкаського державного
технологічного університету,
доктор технічних наук, професор

В. В. Палагін

