

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.

Актуальність теми

Конкурентні переваги продукції, що випускається сьогодні в світі, досягаються за рахунок її більш високої якості та функціональних можливостей. Стосовно ряду технічних систем це досягається за рахунок використання комп'ютерно-інтегрованих систем, до складу яких входять підсистеми керування, контролю, вимірювання, діагностики. Такі технічні системи володіють тоді більш високими показниками техніко-експлуатаційних характеристик (швидкодія, точність, надійність, завадостійкість, безпека), що забезпечує також розширення спектру режимів роботи систем.

Функціонування відповідних технічних об'єктів забезпечується системами керування та контролю, що складають комп'ютерну (керуючу і контролюючу) частину керованої технічної системи, складність якої повинна бути обмеженою згідно з вимогами до надійності. Крім того, в переважній більшості такі комп'ютерно-інтегровані системи реалізуються у вбудованому виконанні. Тому виникають додаткові суттєві ресурсні обмеження, як стосовно габаритних, так і функціональних можливостей. Суттєві обмеженнями на розміри та умови функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем призводять до необхідності створення вузькоспеціалізованих систем реального часу, в яких значно обмежені характеристики продуктивності. Тому математичні моделі, що використовуються в таких системах при вирішенні завдань контролю та керування повинні бути по можливості високоточними, але мати низьку обчислювальну складність. Це складає суть протиріччя між технічними можливостями комп'ютерно-інтегрованих систем та можливостями математичного опису процесів керування, контролю, вимірювання, діагностики, прийнятних для використання в таких системах за умов наявних обмежень на складність моделей та обчислювальні можливості вбудованих комп'ютерно-інтегрованих систем. Вирішення такого протиріччя на основі використання одновимірних інтегральних моделей складає суть технічної та наукової проблеми розробки таких комп'ютерно-інтегрованих систем.

Зазначену проблему в роботі пропонується вирішувати за рахунок використання інтегральних одновимірних моделей, на основі яких можливо забезпечити універсальність (структура інтегральної моделі є спільною для

*УПМЕ вк. 97.
13.03.2009р.*

об'єктів із зосередженими та розподіленими параметрами), згладжування експериментальних даних (особливо у числовій реалізації та обробці сигналів із високочастотними завадами), ефективну побудову макромоделей (можливість отримання моделей безпосередньо за експериментальними даними), де використання одновимірних інтегральних моделей у вигляді інтегρο-степеневого ряду Вольтерри для математичного моделювання нелінійних динамічних систем дозволяє розглядати систему у квазілінійному вигляді.

В той же час, використання одновимірних інтегральних моделей пов'язане із рядом труднощів, пов'язаних з накопичення обсягу обчислень при числовій реалізації інтегральних моделей, де найбільш складними та недостатньо дослідженими є питання числової реалізації поліноміальних інтегральних моделей; складністю розв'язування обернених задач, особливо у випадку дослідження нелінійних динамічних систем, де виникає задача розв'язування поліноміальних інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду, а використання передатних функції призводить до ітераційних процесів уточнення параметрів, при якому неможливо забезпечити обчислення в реальному часі; числовою реалізацією інтегральних моделей із сингулярними ядрами, які, зазвичай, зустрічаються в описі динамічних об'єктів із розподіленими параметрами.

Завдання полягає у комплексному вирішенні задач керування, контролю, вимірювання та діагностики на основі створення таких спрощених математичних моделей для комп'ютерно-інтегрованих систем типу «вхід-вихід», в яких враховуються обмеження на їх складність та ресурсні обмеження щодо функціональних і габаритних їх характеристик та умов функціонування.

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

Актуальність теми дисертаційної роботи Іванюка Віталія Анатолійовича, науково-практичної проблеми та значимість і перспективність отриманих результатів підтверджується тим, що робота проводилась 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).

Структура та зміст дисертації

Дисертацію викладено на 419 сторінках. Робота складається з анотації, вступу, основного змісту, що включає шість розділів, висновків, списку використаних джерел з 281 найменування та 4 додатків. Загальний обсяг основної частини 281 сторінка.

У **першому** розділі розглянуто існуючі підходи 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. Зокрема, здійснено аналіз методів еквівалентних та апроксимаційних перетворень моделей об'єктів із розподіленими параметрами, досліджено підходи до ідентифікації динамічних систем, проведено аналіз методів числової реалізації моделей у вигляді диференціальних рівнянь із частинними похідними та інтегральних операторів і рівнянь, досліджено проблему розв'язування обернених задач динаміки та здійснено огляд програмних засобів математичного моделювання об'єктів із розподіленими параметрами.

Проведений аналіз дозволив сформулювати висновки в яких обґрунтовано необхідність проведення досліджень в напрямку розробки методів моделювання об'єктів із розподіленими параметрами на основі інтегральних моделей, зокрема: вдосконалення методів і засобів побудови інтегральних моделей на основі еквівалентних та/або апроксимаційних перетворень диференціальних рівнянь із частинними похідними; розробка методів ідентифікації моделей із врахуванням нелінійних залежностей та розподіленості параметрів; вдосконалення та розробка методів розв'язування задач аналізу на основі числової реалізації поліноміальних інтегральних моделей, у тому числі із сингулярними ядрами; розробка методів відновлення сигналів на вході нелінійних динамічних систем на основі розв'язування поліноміальних інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду; розширення можливостей пакетів прикладних програм моделювання (які орієнтовані на реалізацію переважно диференціальних моделей) для реалізації інтегральних моделей об'єктів із розподіленими параметрами.

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

Досліджено найбільш типові підходи до перетворень диференціальних моделей із частинними похідними в інтегральні, зокрема, методи функції Гріна, інтегральних перетворень, інтегральних представлень. Застосування зазначених методів призводить до інтегральних моделей, ядра яких містять сингулярність або нескінченні суми, а у випадку нелінійних динамічних систем – поліноміальні інтегральні оператори. Для використання таких моделей у розв'язуванні задач керування та контролю обґрунтовано необхідність їх зведення до «зручного» вигляду в плані числової реалізації шляхом застосування апроксимаційних та регуляризаційних підходів. На основі аналізу широкого спектру задач моделювання об'єктів із розподіленими параметрами для розвитку структурно-алгоритмічного підходу та забезпечення максимальної формалізації процедури організації обчислювального процесу було сформовано базовий набір моделей до яких віднесено такі типові ірраціональні та трансцендентні ланки: напівінтегральну, напівінерційну, напівколивальну, запізнення та напівзапізнення, на основі яких відомі передатні функції можуть бути представлені у вигляді декомпозиції базового набору, що при реалізації моделі призводить до зниження обчислювальної складності алгоритмів розрахунку.

Розглянуто аналітико-апроксимаційні підходи, зокрема запропоновано метод апроксимації моделей у вигляді диференціальних рівнянь із частинними похідними на основі застосування диференціально-різницевої апроксимації, перетворення Лапласа, структурно-алгоритмічного методу, методу ланцюгових дробів, що дозволяє будувати «економні» в обчислювальному сенсі моделі зі збереженням високої точності на рівні диференціально-різницевих моделей. Також, на основі застосування перетворення Лапласа до диференціальних рівнянь із частинними похідними та методу ланцюгово-дробової апроксимації із застосуванням структурної декомпозиції запропоновано метод числової реалізації складних передатних функцій.

Для представлення ядер поліноміальних інтегральних моделей Вольтерри у розділеному вигляді запропоновано методи їх апроксимації функціональними поданнями у формі степеневих або експоненціальних апроксимаційних наближень з використанням методу найменших квадратів.

У третьому розділі розглядаються методи ідентифікації моделей динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами в інтегральній формі.

В дисертаційній роботі розглянуто набір методів ідентифікації моделей динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами, де основна увага приділена розробці та розвитку методів ідентифікації моделей динамічних систем у формі інтегро-степеневих рядів Вольтерри. В роботі розглядається метод, який базується на серії детермінованих вхідних сигналів. Показано, що застосування даного методу ускладнюється при значній кількості експериментів, що використовуються при отриманні функціональних залежностей та їх числового диференціювання.

В розділі 3.3 розглянуто питання розробки методів числового диференціювання на основі аналітичного диференціювання апроксимацій

поліномами та експоненціальними функціями результатів експериментів, що дозволяє підвищити стійкість до шумових завад в експериментальних функціональних залежностей.

В розділі 3.4 для суттєвого скорочення кількості необхідних експериментів у порівнянні з традиційним підходом розроблено адаптивний метод ідентифікації моделей нелінійних динамічних систем у формі інтегро-степеневих рядів Вольтерри, який полягає в адаптації процесу проведення серії активних експериментів до необхідного рівня адекватності моделей та заміні ряду результатів інтерполяційними даними.

Четвертий розділ присвячено розробці методів числової реалізації інтегральних моделей динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами для розв'язування прямих задач.

Для вирішення ключової проблеми застосування інтегральних операторів, особливо поліноміальних, яка полягає в накопиченні кількості обчислювальних процедур при їх числовій реалізації, в дисертаційній роботі запропоновано ряд методів, які висвітлені в розділах 4.2 та 4.3.

Для ефективної числової реалізації поліноміальних інтегральних операторів Вольтерри на основі методу квадратур запропоновано та описано векторно-матричний метод, де всі обчислювальні операції зводяться до поелементного множення та додавання матриць, що створює можливості застосування паралельних алгоритмів в обчисленні інтегральних операторів.

Метод числової реалізації поліноміальних інтегральних операторів Вольтерри із застосуванням апроксимації багатовимірних ядер функціями у вигляді суми добутоків незалежних змінних розглянуто в розділі 4.3. Даний метод дозволяє скоротити на порядок кількість необхідних обчислювальних процедур. Наприклад, складність числової реалізації поліноміального інтегрального оператора Вольтерри другого степеня зводиться до відповідної складності класичного інтегрального оператора Вольтерри із одновимірним ядром.

Крім того, в розділі 4.1 для числової реалізації інтегральних операторів Вольтерри із сингулярними ядрами запропоновано зводити інтегральні моделі до моделей із ядрами без особливостей на основі методу внутрішньої регуляризації.

П'ятий розділ присвячений проблемам розв'язування обернених задач динаміки об'єктів із розподіленими параметрами.

В даному розділі дисертаційної роботи основна увага приділена розробці методів числової реалізації інтегральних рівнянь першого роду, оскільки у розв'язуванні задач керування, контролю та вимірювання вони є класичною формою моделі об'єкта керування, у випадку лінійних систем – інтегральне рівняння Вольтерри першого роду, а за умови, що об'єкт дослідження має нелінійні властивості, – поліноміальне інтегральне рівняння Вольтерри першого роду.

Для розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду, розроблено метод регуляризації шляхом введення диференціального

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

Розв'язуванню поліноміальних інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду другого степеня (білінійних інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду) присвячені розділи 5.4 та 5.5, в яких автором, аналогічно до лінійного випадку, запропоновано застосовувати диференціальний регуляризаційний оператор. В такому випадку розв'язування поліноміального рівняння Вольтерри зводиться до розв'язування поліноміального інтегро-диференціального рівняння. Числова реалізація отриманого рівняння здійснюється шляхом застосування апроксимаційних наближень отриманих на основі методу квадратур (кубатур) та різницевих формул. Такий підхід дозволив отримувати стійкі розв'язки за умови наявності шумів у вхідних сигналах.

Аналогічно до методів розв'язування прямих задач для уникнення сингулярності в ядрах інтегральних рівнянь автором запропоновано застосовувати внутрішній регуляризаційний параметр.

У шостому розділі описані розроблені програмні засоби комп'ютерного моделювання, які 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.

В розділі 6.3 розглянуто застосування розроблених методів та засобів у розв'язуванні прямих та обернених задач на прикладі моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах температури. На основі застосування еквівалентних та апроксимаційних методів побудовано моделі вимірювального перетворювача температури в різних формах: диференціальне рівняння із частинними похідними, інтегральний оператор Вольтерри, передатна функція, структурна модель. Для розв'язування оберненої задачі застосовано моделі отримані на основі моделей для «прямих» задач та надано рекомендації доцільності їх використання.

Розділ 6.4 присвячений розв'язуванню задачі оперативного контролю температурних режимів чипів магістрального та комутаційного обладнання комп'ютерних мереж, в межах розв'язання якої використано розроблені методи ідентифікації нелінійних об'єктів з розподіленими параметрами, а також методи розв'язування обернених задач (відновлення сигналів на вході).

Наукова новизна отриманих результатів

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень отримано рішення науково-технічної проблеми створення спрощених моделей, методів їх реалізації і засобів математичного моделювання в реальному часі динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами 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.

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 (в два і більше разів) зменшити кількість необхідних експериментів у порівнянні з традиційним підходом.

Вперше запропоновано 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.

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

Удосконалено метод багаторазового диференціювання експериментально-отриманих залежностей на основі диференціювання апроксимацій результатів експериментів поліномами та експоненціальними функціями, що дає змогу, на відміну від існуючих методів, 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.

Удосконалено методи розв'язування прямих та обернених задач динаміки об'єктів із розподіленими параметрами на основі застосування одновимірних інтегральних моделей шляхом введення регуляризаційного параметра в сингулярні ядра інтегральної моделі Вольтерри, що дозволяє отримати, на відміну від існуючих методів, поліноміальні інтегральні моделі з ядрами без особливостей.

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.

Набули подальшого розвитку методи апроксимації багатовимірних функцій з використанням методу найменших квадратів (метод апроксимації на основі степеневих функцій та метод експоненціальної апроксимації), що дозволяє, на відміну від існуючих методів, отримувати апроксимаційні представлення ядер поліноміальних інтегральних моделей ядрами, які розділяються.

Удосконалено метод числової реалізації поліноміального оператора Вольтерри на основі методу квадратур шляхом застосування векторно-матричного підходу до апроксимації інтегральних операторів, де використовуються тільки операції додавання та множення виключно відповідних елементів матричних представлень (вектори, матриці, тривимірні структури), який орієнтований на ефективну програмну реалізацію, що дозволяє створити універсальний спосіб програмної реалізації поліноміальних інтегральних операторів довільного порядку.

Ступінь обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки дисертаційної роботи в цілому достатньо обґрунтовані. Для обґрунтування наукових положень автором застосовано: 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.

Наукові положення і висновки дисертаційної роботи підтвердженні шляхом розв'язування великої кількості модельних задач, обсяги експериментальних досліджень є достатніми.

В цілому наукові положення і висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими як теоретично, так і практичним застосуванням.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується, коректністю постановки математичних задач з урахуванням відповідних обмежень та використання сучасних математичних методів, результатами проведених обчислювальних експериментів, та актами впровадження результатів дисертаційного дослідження у виробничому процесі.

Значущість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Значущість отриманих результатів для науки полягає у розвитку: методів побудови спрощених математичних моделей, в яких враховуються обмеження на їх складність, та ресурсні обмеження для комп'ютерно-інтегрованих систем

стосовно габаритних, функціональних їх характеристик та умов функціонування, а також методів їх реалізації, на основі використання одновимірних інтегральних операторів та рівнянь Вольтерри включаючи: еквівалентні та/або апроксимаційні перетворення диференціальних рівнянь із частинними похідними; методи ідентифікації моделей із врахуванням нелінійних залежностей та розподіленості параметрів; методи розв'язування задач аналізу на основі числової реалізації поліноміальних інтегральних моделей, у тому числі із сингулярними ядрами; методи відновлення сигналів на вході нелінійних динамічних систем на основі розв'язування поліноміальних інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду.

Значущість результатів дисертаційної роботи для практики полягає у тому, що розроблені в межах дисертаційного дослідження методи та засоби математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами на основі одновимірних інтегральних моделей можуть ефективно використовуватись в побудові комп'ютеризованих систем керування, контролю та вимірювання, які забезпечують процеси функціонування керованих технічних об'єктів.

Практичне значення

Практичне значення підтверджено актами та довідками про впровадження та використання отриманих у дисертаційній роботі результатів в:

– ТзОВ «Мережа Ланет» – для моніторингу температурних режимів роботи об'єктів інформаційно-обчислювальних систем, зокрема комутаційного та магістрального обладнання комп'ютерних мереж;

– ТзОВ «Лгідком» – для проектування 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» – для проектування апаратно-програмних засобів автоматизованої підтримки комутаційного та магістрального обладнання інформаційно-комп'ютерних мереж;

– Кам'янець-Подільському національному університеті імені Івана Огієнка – для вдосконалення теоретико-методологічного забезпечення освітнього процесу та виконання науково-дослідних робіт.

Отримані результати можуть бути використані:

– у науково-дослідних установах для розв'язування теоретичних та практичних задач математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами;

– у науково-дослідних установах та на підприємствах для розробки математичного та програмного забезпечення комп'ютеризованих систем керування, контролю та вимірювання, які забезпечують процеси функціонування керованих технічних систем;

– для забезпечення освітнього процесу у закладах вищої освіти.

Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 46 працях, з яких: 1 монографія, 21 стаття у фахових наукових виданнях України, що входять до переліку, затвердженого МОН України, 15 публікацій у працях і матеріалах наукових конференцій, 2 публікації в закордонних виданнях, 8 публікацій підготовлено англійською мовою.

Із загального числа опублікованих статей 6 публікацій у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз, зокрема 1 публікація у збірнику наукових праць, який включено в міжнародні наукометричні бази Scopus та Web of Science.

Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях достатньо підтверджено матеріалами роботи.

Рівень та кількість публікацій відповідають вимогам, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає актуальність, мету та задачі, основні наукові положення, практичну значущість, апробацію дисертації, її зміст по розділах, та висновки. Дисертаційна робота та автореферат оформленні у відповідності з вимогами, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень, на основі яких захищена кандидатська дисертація.

Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію «Комп'ютерне моделювання динамічних об'єктів на основі ланцюгово-дробової апроксимації складних передатних функцій» за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи в 2009 році в спеціалізованій вченій раді Черкаського державного технологічного університету, не виносяться на захист його докторської дисертації, але використовуються при огляді відомих результатів на рівні з іншими відомими публікаціями.

Зауваження до роботи.

1. В постановці проблеми, меті та завданнях досліджень не конкретизовано, що вирішуються завдання створення спрощених математичних моделей «реального часу» для комп'ютерно-інтегрованих систем типу «вхід-вихід», в яких враховуються обмеження на їх складність та ресурсні обмеження щодо функціональних і габаритних їх характеристик та умов функціонування, де такі завдання фактично вирішені в роботі.

2. В розділі 1 проведений досить ґрунтовний аналіз існуючих підходів до вирішення задач побудови спрощених моделей, проте завдання, що залишилися невирішеними, представлені тільки у висновках до розділу.

3. Предмет дослідження, поданий в роботі : «методи математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами на основі одновимірних інтегральних моделей», є надто загальним. Насправді мова йде про методи математичного та комп'ютерного моделювання в реальному часі динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами на основі одновимірних інтегральних моделей типу «вхід-вихід».

4. В пунктах наукової новизни 5, 7 та 8 доцільно було вказати чим запропоновані удосконалення відрізняються від відомих результатів.

5. Застосування методу квадратурних формул для розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду передбачає $A_i K_{ii} \neq 0, i = \overline{1, n}$ (стор. 251 дисертації) та $\frac{h_i}{2} K_{ii} \neq 0$ (стор. 252 дисертації). Не роз'яснено, чи таке обмеження є критичним для застосування вказаних підходів, якщо ні, то які дії необхідно здійснити для уникнення даної ситуації.

6. В дисертаційній роботі для розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду пропонується метод їх регуляризації на основі введення диференціального регуляризаційного оператора

$Dx = \rho_2 \alpha^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + \rho_1 \alpha \frac{dx}{dt} + \rho_0 \alpha x$ (форм. (5.3), стор. 253), але в авторефераті описано тільки частковий випадок використання диференціального регуляризаційного оператора у вигляді $\alpha \frac{dx}{dt}$ (стор. 24).

7. В дисертаційній роботі та авторефераті мають місце неточності: не роз'яснено питання вибору максимального степеня поліноміального інтегрального оператора Вольтерри під час його ідентифікації; на рис. 5 автореферату (стор. 21) та на рис. 4.12 дисертації (стор. 234) не оговорюється суть позначення «.*» та алгоритм роботи представленої функції sum; говориться про побудову моделей зі збереженням їх адекватності на рівні диференціально-різницевої моделі, де мається на увазі забезпечення точності.

8. В тексті дисертації мають місце неточності, граматичні помилки, але їх порівняно небагато для такої об'ємної роботи.

Наведені зауваження впливають на сприйняття дисертаційної роботи, але не впливають на загальну її позитивну оцінку.

Загальні висновки.

Дисертаційна робота Іванюка Віталія Анатолійовича на тему «Методи та засоби математичного моделювання динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами на основі одновимірних інтегральних моделей» є

завершеною науковою працею, в якій отримані нові, науково-обґрунтовані та практичні результати, що вирішують важливу та актуальну науково-технічну проблему створення моделей, методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання в реальному часі динамічних процесів в об'єктах із розподіленими параметрами на основі використання одновимірних інтегральних моделей для комп'ютерно-інтегрованих систем типу «вхід-вихід», що дозволяє враховувати ресурсні обмеження у побудові систем керування, контролю, вимірювання та діагностики, що забезпечує процеси функціонування керованих технічних об'єктів.

Дисертаційна робота Іванюка Віталія Анатолійовича відповідає вимогам пунктів 1: «Розроблення або розвиток теорії математичного моделювання реальних явищ, об'єктів, систем чи процесів як сукупності формалізованих дій (операцій) для складання ефективних математичних описів об'єктів, що досліджуються. Зокрема: отримання принципово нових (нетрадиційних) видів математичних моделей, еквівалентні та апроксимаційні методи перетворення та модифікації (лінеаризація, дискретизація тощо), оцінки, ідентифікація та оптимізація математичних моделей, методи теорії подібності й аналізу розмірностей», 2: «Розвиток, ефективне використання методів обчислювальної математики стосовно вирішення проблем дослідження, проектування, виготовлення та експлуатації об'єктів нової техніки й нових технологій. В тому числі модифікація й спеціалізація існуючих обчислювальних методів з метою підвищення їх ефективності, створення і дослідження нових обчислювальних методів і алгоритмів, що враховують особливості реальних технічних та технологічних задач, забезпечують створення ефективних програмних засобів комп'ютерної реалізації» паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи та профілю спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01.

Дисертаційна робота за своїм змістом 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 щодо докторських дисертацій, 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 відділу моделювання енергетичних процесів і систем Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник



Підпис Винничука С. Д.
Засвідоковано І. К. Школярчук М.
Начальник відділу кадрів ІГМЕ ім. Г.Є. Пухова
Національної Академії наук України

С. Д. Винничук