

Голові разової спеціалізованої
вченої ради
в Національному університеті
«Одеська політехніка»
доктору технічних наук,
професору ПАВЛЕНКУ В. Д.

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента, завідувачки кафедри інженерії програмного забезпечення Навчально-наукового Інституту комп'ютерних систем Національного університету «Одеська політехніка», кандидата технічних наук, доцента КОМЛЕВОЇ Наталії Олегівни на дисертацію ПРОКОФЬЄВА Андрія Юрійовича за темою: *«Методи аналізу точності та достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в прикладних задачах їх моделювання та управління»* подану до захисту в разову спеціалізовану вчену раду Національного університету «Одеська політехніка» Міністерства освіти і науки України на здобуття наукового ступеню доктора філософії з галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

1. Актуальність теми дисертації

Дисертаційну роботу ПРОКОФЬЄВА Андрія Юрійовича присвячено актуальній проблемі, яка полягає у прогнозуванні та забезпеченні бажаних показників точності та достовірності реалізації математичних моделей (ММ) динамічних систем різного призначення в прикладних задачах їх моделювання та управління. Такі задачі значно поширені в критично важливих галузях (зокрема, в техніці, в енергетиці, при розробці корисних копалин, в хімічній та переробній промисловостях, на транспорті, в медицині тощо), особливо, якщо розв'язування цих задач пов'язано із використанням програмно-алгоритмічних та апаратних засобів.

Сучасні досягнення в області обчислювальної математики, інформаційних технологій і штучного інтелекту надають потужні інструменти для аналізу (моделювання та ідентифікації) динамічних об'єктів, а також для забезпечення бажаних функцій їх стану (суть – управління). При цьому необхідним етапом дослідження виступає реалізація ММ динамічних систем, представлених, як правило, у вигляді диференціальних або інтегральних рівнянь. Однак, значним недоліком існуючих методів реалізації (розв'язування) диференціальних або інтегральних рівнянь, є недостатній рівень забезпечення (прогнозування) точності одержуваних розв'язків, та контролю достовірності останніх (тобто – виявлення можливих збоїв в обчислювальному процесі).

Очевидно, що для успішного розв'язування прикладних задач моделювання динамічних систем та управління ними необхідно, на

відповідних етапах досліджень, запроваджувати дієві методи аналізу точності і достовірності отримуваних розв'язків.

Таким чином, тема дисертації ПРОКОФЬЄВА А. Ю., присвячена розробці методів прогнозування точності і аналізу достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем, представлених у класах диференціальних та інтегральних рівнянь – при розв'язуванні прикладних задач моделювання і управління на їх основі, шляхом визначення показників якості задіяних комп'ютерних та програмно алгоритмічних інструментальних засобів, є надзвичайно актуальною. Вона відповідає поточним науковим і практичним викликам, сприяючи підвищенню ефективності застосування передових інформаційних технологій в різних галузях науки і техніки.

Дисертантом, в ході аналітичного огляду, було зазначено, що брак достатньої теоретичної бази та глибоких практичних досліджень в напрямі забезпечення (прогнозування) бажаної точності та гарантованої достовірності розв'язків задач моделювання динамічних систем та управління ними спонукає розробку відповідних методів контролю якісних показників перебігу обчислювального процесу. Отже, цій **актуальній** темі присвячено дисертаційну роботу ПРОКОФЬЄВА Андрія Юрійовича.

Зміст дисертаційної роботи, її основні задачі, відповідають пп. 1.2.1.1, 1.2.1.4, 1.2.4.6 і 1.2.1.7 «Основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019–2023 роки» (постанова Президії НАН України від 30.01.2019 р. № 30).

Дисертаційна робота виконувалась у межах держбюджетної науково-дослідної роботи №210-63 «Методи та програмні засоби інтерпретації моделей машинного навчання непараметричних динамічних об'єктів», № держ. реєстрації 0122U002161 (Національний університет «Одеська політехніка», 2021 — 2025 р.р.).

Таким чином, можна констатувати, що дисертаційна робота ПРОКОФЬЄВА Андрія Юрійовича є, безперечно, **актуальною**, яка має важливе науково-практичне значення.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

В дисертації автором проаналізовано питання математичного опису та машинних методів математичного моделювання (та/або управління) динамічних систем, які поширені в різних галузях техніки або мають важливе природне значення, що дозволило визначити проблематику задач аналізу обчислювальних процесів реалізації ММ зазначених систем, та спонукають до проведення подальших наукових досліджень. Аналіз змісту дисертації та наукових публікацій здобувача дозволяють дійти висновку, що сформульовані в роботі ключові наукові положення, висновки та рекомендації повністю відповідають тематиці дослідження. Їх наукова обґрунтованість підтверджується чіткою і коректною постановкою наукової проблеми щодо

забезпечення необхідної точності і гарантованих оцінок достовірності реалізації ММ динамічних систем в прикладних задачах моделювання та управління останніх. Вище означена проблема утворює логічно обґрунтовану послідовність, що відбиває системне бачення поставленої науково-прикладної задачі, і забезпечує конструктивний розв'язок завдань в практиці досліджень та інженерних розрахунків для широкої гами процесів і об'єктів природного походження та технологічного призначення.

Для цього автором виділено основні етапи постановки та розв'язання науково-практичних задач, а саме:

- розглянуто існуючі підходи до математичної формалізації динамічних систем в задачах їх моделювання і управління, в результаті чого показано особливості опису динамічних систем моделями у вигляді диференціальних та інтегральних рівнянь різних типів;
- виконано аналіз методів числової реалізації диференціальних та інтегральних рівнянь як математичних моделей динамічних систем, а також похибок, які виникають при цьому; – розроблено метод ранжирування за похибкою для оцінки точності розв'язування задач моделювання динамічними системами та управління ними;
- побудовано (на основі методу ранжирування за похибкою) оцінки «знизу» функцій розподілу неусувної похибки реалізації математичних моделей динамічних об'єктів, представлених диференціальними та інтегральними рівняннями, в задачах моделювання і управління;
- розроблено методи (екстраполяційний, інтерполяційний та адаптивний) контролю достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в процесах їх моделювання та управління;
- опрацьовано досвід практичного застосування методів ранжирування за похибкою та контролю достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в задачах їх моделювання та управління.

Для вирішення поставлених задач автором обрано сучасні наукові підходи, що передбачають використання відповідних методів дослідження, які було коректно застосовано для досягнення визначеної мети дисертаційної роботи. Їх ефективність і придатність до реалізації задач підтверджено проведенням комп'ютерного моделювання, що дозволило верифікувати сформульовані наукові положення.

У дисертації наведено чіткі та обґрунтовані висновки, що базуються на результатах проведених досліджень. Вони містять детальні рекомендації щодо умов задач, вибору методів їх вирішення та способів впровадження запропонованих підходів. Комплексне застосування низки наукових методів дало змогу розробити теоретичні основи створення ефективних методів аналізу точності та достовірності реалізації ММ динамічних систем при розв'язуванні прикладних задач їх моделювання та управління.

Наукові положення і теореми, представлені в роботі, супроводжуються строгими математичними доведеннями, що не викликають сумнівів у їх коректності. Алгоритми, описані в дослідженні, детально проаналізовані з

точки зору конкретності й обчислювальної складності. Вивчення літературних джерел засвідчує, що автор провів ґрунтовний аналіз праць як класичних, так і сучасних дослідників у відповідній науковій галузі, що підтверджує високий рівень опрацювання теми.

Ознайомлення з дисертацією підтверджує актуальність досліджуваної автором проблематики, правильний вибір найважливіших задач у межах предметної області, а також обґрунтованість представлених наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у роботі.

3. Наукова новизна одержаних результатів

В дисертаційній роботі автором отримано нові, науково обґрунтовані результати, що, в сукупності, розв'язують важливу науково-практичну задачу – забезпечення необхідної точності та гарантованих оцінок достовірності реалізації ММ динамічних систем при розв'язуванні прикладних задач їх моделювання та управління.

Здобувачем в дисертаційній роботі застосовано апарат рівнянь математичної фізики; окремі положення теорій числового аналізу, похибок та математичної статистики; методи організації комп'ютерних засобів моделювання (управління) та обчислювального експерименту.

Автор у своїй роботі пропонує:

- метод ранжирування за похибкою при розв'язуванні задач моделювання динамічних систем та управління ними, який, на відміну від відомих методів оцінювання точності числового розв'язування рівнянь математичної фізики, дозволяє попередньо (до початку процесу комп'ютерного розв'язування задачі) виконати розрахунок залежності похибки розв'язку від характеристик первинних похибок;

- метод контролю достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем зі зростаючою точністю, який забезпечує послідовне отримання значення шуканої функції стану динамічної системи з порядком точності локальної похибки, що збільшується;

- методи контролю (екстраполяційний та інтерполяційний) достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в процесах їх моделювання та управління, засновані на ідеї введення контрольного алгоритму, який виконується на етапі числового розв'язування поставленої (основної) задачі, але такого, що простіший за основний;

- критерії щодо прийняття рішення про наявність або відсутність похибки (збою) в основному обчислювальному алгоритмі розв'язування задач моделювання динамічних систем та управління ними, що дозволило розробити адаптивні методи контролю достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем, які забезпечують визначення параметрів контрольного алгоритму з умови мінімуму певної міри близькості результатів, отриманих за контрольним та основним алгоритмах.

Таким чином, наукові положення, представлені в дисертаційній роботі

здобувача, дозволяють розширити клас важливих для теорії та практики задач моделювання та управління динамічними системами.

4. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у дисертації, викладено у 18 наукових публікаціях, в тому числі: у 8-ми статтях, які опубліковано у виданнях, включених до Переліку фахових видань України (категорії «Б») та індексуються у міжнародних наукометричних базах даних (зокрема, Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar); у 1-й статті, яку опубліковано у зарубіжному виданні, а також у 9-ти тезах Міжнародних наукових конференцій (матеріали однієї з яких проіндексовано у наукометричній базі Scopus).

Публікації повною мірою висвітлюють результати дисертаційної роботи та досить повно відображають зміст досліджень і розробок, наведених в роботі. Аналіз публікацій та особистого внеску в них здобувача показує, що всі наукові положення та висновки, що містяться в дисертаційній роботі та виносяться на захист, отримано здобувачем самостійно в період з 2022 р. по 2025 р. та узагальнено при оформленні дисертації.

Участь у наукових конференціях високого рівня підтверджує ознайомлення наукової спільноти з результатами дисертаційного дослідження. Обсяг опублікованих праць відповідає встановленим МОН України вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

5. Значення роботи для науки та практики

Найбільш істотне значення у дисертаційній роботі для науки і практики полягає в тому, що запропоновані в тому, що запропоновані методи прогнозу точності і аналізу достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем дозволяють розширити клас важливих для практики задач моделювання та управління вказаними системами, а розроблені алгоритми, що покладено в основу запропонованих методів, орієнтовано на розв'язування широкого кола інженерних та дослідницьких задач, які виникають при аналізі динамічних систем та управлінні ними.

Застосування розроблених прикладних алгоритмів прогнозування точності та достовірності числової реалізації ММ динамічних систем дозволяють забезпечити бажану точність, а також зменшити у (1,4 ... 2,5) рази кількість збоїв в процесі розв'язування реальних задач моделювання динамічних систем та управління ними.

Зважаючи на новизну, концептуальність, доказовість та перспективність наукових положень дисертаційної роботи, їх теоретичне значення можна оцінити як достатньо високе внаслідок того, що результати дослідження визначають принципи застосування теоретичних положень на практиці та створюють нові перспективи для прикладних наукових досліджень.

Обґрунтованість результатів дисертаційної роботи засвідчується актом

впровадження у діючому виробництві (ТОВ «Нафтогазхім Сервіс»).

Ще одним свідченням значущості результатів роботи є використання певних теоретичних положень та розроблених програмно-апаратних засобів моделювання у навчальному процесі магістрів та аспірантів кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка».

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

Дисертація містить результати власних досліджень автора. Використання ідей, результатів і текстів інших дослідників мають посилання на відповідний ресурс. В результаті вивчення дисертаційної роботи порушень академічної доброчесності в представленому тексті дисертації і наукових публікаціях, які висвітлюють основні результати дослідження – не виявлено.

Важливим підтвердженням відсутності порушень академічної доброчесності в роботі ПРОКОФЬЄВА А. Ю. є публікація здобувачем результатів досліджень у рецензованих виданнях, які передбачають попередню перевірку матеріалів на відсутність запозичень.

7. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації

Дисертаційну роботу написано хорошою літературною мовою, робота містить значну кількість прикладів, що сприяє кращому розумінню матеріалу.

Проте дисертаційна робота не позбавлена окремих недоліків:

1. Автором не дано чітких роз'яснень щодо випадків застосування методу зі зростаючою точністю обчислень та алгоритмічних методів (екстраполяційного або інтерполяційного) при аналізі достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем.

2. В першому розділі, присвяченому, зокрема, аналізу та розгляду реалізацій математичних моделей динамічних систем, дисертант практично не торкається питань щодо огляду стохастичних моделей динамічних систем.

3. В розділі 1.3.2 «Числова реалізація диференціальних рівнянь як ММ динамічних систем» автор приводить лише посилання на літературні джерела, де описано метод кінцевих елементів. Вважаю, що було б доцільно в дисертаційній роботі навести повну формалізацію методу кінцевих елементів.

4. В дисертаційній роботі (стор. 101) зазначено, що застосування оцінки (2.14) обмежено випадком, коли «точно» відомі матриця A та вектор b , але не розглянуто інших випадків застосування цієї оцінки.

5. Для запропонованого методу «ранжирування за похибкою» зазначено, що отримані оцінки справедливі в рамках лінійної теорії точності. Відкритим залишається питання застосування запропонованих оцінок в разі порушення даної вимоги.

6. За яких умов застосування частинного випадку, що підпадає під

вираз (2.40), може бути розповсюджено на загальний випадок?

7. При розгляді інтерполяційного методу контролю достовірності обчислень наведено відхилення наближень шуканої функції стану, яке обмежується лінійною теорією точності. Чи було виконано відповідні дослідження відхилень, які не обмежуються лінійною теорією?

Однак, вказані зауваження **не зменшують наукового рівня** дисертації.

Представлена дисертаційна робота характеризується єдністю змісту і засвідчує особистий внесок дисертантки до наукових знань у галузь інженерії програмного забезпечення.

8. Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам

Дисертаційна робота ПРОКОФЬЄВА А. Ю. за темою: **«Методи аналізу точності та достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в прикладних задачах їх моделювання та управління»** є цілісним, самостійним, завершеним науковим дослідженням, що вирішує важливу науково-прикладну задачу, має теоретичну і практичну цінність у галузі інформаційних технологій. На підставі вищезазначеного можна констатувати, що дисертаційна робота ПРОКОФЬЄВА А. Ю. відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44, із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023 та № 507 від 03.05.2024, а її автор – ПРОКОФЬЄВ Андрій Юрійович – заслуговує на присудження наукового ступеню доктора філософії у галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний рецензент:

завідувачка кафедри інженерії
програмного забезпечення
Навчально-наукового Інституту
комп'ютерних систем
Національного університету
«Одеська політехніка»,
кандидат технічних наук, доцент

Наталія КОМЛЕВА