

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

## РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента, завідувача кафедри інформаційних технологій Навчально-наукового інституту комп'ютерних систем Національного університету «Одеська політехніка», доктора технічних наук, професора ВИЧУЖАНІНА Володимира Вікторовича на дисертацію ПРОКОФЬЄВА Андрія Юрійовича за темою: «Методи аналізу точності та достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в прикладних задачах їх моделювання та управління», яку подано 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

Адекватним та ефективним апаратом формалізації динамічних об'єктів (суть – процесів у неперервних об'єктах) при розв'язуванні задач їх аналізу (моделювання та ідентифікації), а також синтезу законів управління цими об'єктами є диференційні та інтегральні рівняння. Класи диференційних та інтегральних рівнянь дають змогу описати всі суттєві та характерні прояви динамічної поведінки динамічних об'єктів, зокрема, представлення зміни функцій стану в реальному часі – що забезпечується диференційними рівняннями, або відображення передісторії динаміки функцій стану (тобто, так званих «об'єктів з пам'яттю») – що реалізується математичними моделями (ММ) у вигляді інтегральних рівнянь.

Суттєву роль при дослідженні об'єктів, що описуються ММ у вигляді

диференційних та інтегральних рівнянь, відіграють особливості числової та машинної реалізації відповідних методів розв'язування тих або інших прикладних задач, в тому числі – задач моделювання та управління.

До складних проблем, які поки що не мають універсального розв'язку, відноситься оцінка точності та забезпечення достовірності розв'язування зазначених вище задач моделювання та управління, в тому числі і для динамічних об'єктів, що описуються диференційними та інтегральними рівняннями, із застосуванням як аналітичних, так і неаналітичних методів.

В роботі виконано аналіз похибок, які можуть виникати при числовій реалізації ММ динамічних об'єктів на основі диференційних та інтегральних рівнянь, показано можливість практичної оцінки точності в ході машинного розв'язування останніх, а також розроблено методи забезпечення достовірності отриманих розв'язків.

Саме вказані проблеми визначають *актуальність* дисертаційної роботи ПРОКОФЬЄВА Андрія Юрійовича.

## 2. СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ, СФОРМУЛЬОВАНИХ У ДИСЕРТАЦІЇ

У дисертаційній роботі автором здійснено аналіз розвитку методів реалізації ММ динамічних систем, представлених у класах диференційних та інтегральних рівнянь, при цьому було визначено порядки похибок, які забезпечують ці методи, що, в кінцевому підсумку, визначає точність розв'язування прикладних задач моделювання та управління для обраних систем. Окреслені недоліки методів щодо точності методів реалізації ММ динамічних систем зумовили, зокрема, необхідність подальших наукових досліджень в цьому напрямку. Також було зазначено, що апаратурні збої під час розв'язування прикладних задач спонукають необхідність проведення додаткових досліджень щодо достовірності отриманих розв'язків.

Здобувачем було окреслено ключові невирішені питання, що призводять до протиріччя між наявною, добре розвинутою модельною та методологічною

підтримкою засобів математичного моделювання динамічних систем різного призначення, та недостатнім розвитком питань оцінки точності і достовірності розв'язків відповідних рівнянь як ММ динамічних систем, а також виявлення збоїв (завад) в обчислювальному процесі.

Для вирішення зазначеного протиріччя дисертантом проведено коректну постановку наукової проблеми та визначено послідовність дослідницьких задач, спрямованих на її розв'язання. Ці задачі формують логічно узгоджений порядок дій, що відображає системний підхід щодо вирішення поставленої наукової проблеми, 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, у рамках сучасних наукових підходів сформульовано та реалізовано наступну мету дисертаційного

дослідження: розробити методи прогнозування точності і аналізу достовірності числової реалізації моделей динамічних систем, представлених у класах диференціальних та інтегральних рівнянь, при розв'язуванні відповідних задач моделювання і управління на їх основі, шляхом визначення показників якості задіяних комп'ютерних та програмно-алгоритмічних інструментальних засобів.

На основі отриманих результатів у дисертації сформульовано обґрунтовані висновки щодо вибору відповідних методів аналізу точності та достовірності реалізації ММ динамічних систем, а також показана можливість їх практичного застосування.

Отже, комплексне застосування розроблених наукових методів забезпечило можливість вирішення поставленої наукової задачі (у вигляді мети дисертаційного дослідження), а також розробити теоретичні засади створення високоефективних методів аналізу точності та достовірності реалізації ММ динамічних систем в прикладних задачах їх моделювання та управління. Таким чином, основні наукові положення та висновки, які висунув ПРОКОФЬЄВ А. Ю. у дисертаційній роботі, є достатньо аргументованими та добре обґрунтованими.

### 3. НАУКОВА НОВИЗНА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку та поглибленні теорії і методології аналізу точності та достовірності розв'язку диференціальних та інтегральних рівнянь які являють собою ММ динамічних систем в прикладних задачах їх моделювання та управління. В дисертації автором отримано нові, науково доказові результати, які, в сукупності, розв'язують важливу науково-технічну задачу оцінки та прогнозування якісних показників реалізації моделей динамічних систем, і забезпечують прийняття обґрунтованих рішень щодо перебігу обчислювального процесу при розв'язуванні практичних задач.

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.

Експериментальні дослідження базуються на методах організації комп'ютерних засобів моделювання та обчислювального експерименту для числового розв'язування тестових задач та підтвердження одержаних теоретичних результатів; методах програмної інженерії для розробки інструментального забезпечення.

Автор у своїй роботі пропонує нові методи аналізу точності та достовірності реалізації ММ динамічних систем.

Так, вперше запропоновано метод ранжирування за похибкою, який, на відміну від відомих, зокрема, 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; запропоновано методи контролю достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем (екстраполяційний та інтерполяційний методи — в залежності від обраної інформації, що використовується при контролі), засновані на ідеї введення контрольного алгоритму, який виконується на етапі числового розв'язування поставленої (основної) задачі, але такого, що простіший за основний; запропоновано 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 сформулювати систему прийняття рішень при контролі достовірності, а також 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.

Треба відмітити, що дисертант раціонально застосовує процедуру узагальнення математичного апарату, що дозволяє розповсюдити отримані в дисертаційній роботі результати на широкий клас реальних динамічних систем, які може бути досліджено. Це, безумовно, зумовлює підвищення практичних застосувань результатів дисертаційної роботи.

#### 4. ПОВНОТА ВИКЛАДУ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ В ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ 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 досить повно віддзеркалюють зміст отриманих автором нових наукових результатів. Обсяг та повнота публікацій відповідає існуючим вимогам щодо дисертацій доктора філософії в галузі технічних наук.

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. і узагальнено при оформленні дисертації.

#### 5. ЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ДЛЯ НАУКИ ТА ПРАКТИКИ

Найбільш істотне значення для науки і практики полягає у подальшому розвитку методів аналізу точності та достовірності реалізації ММ динамічних систем при розв'язуванні прикладних задач їх моделювання та управління. Це дозволяє розширити клас важливих для практики задач, які потребують забезпечення (прогнозування) заданої точності або гарантованої достовірності отримуваних розв'язків.

Дисертація містить наукові положення, які можна оцінити як значущі внаслідок того, що результати дослідження визначають принципи застосування теоретичних положень на практиці та створюють нові перспективи для прикладних досліджень у галузі моделювання складних нелінійних динамічних об'єктів та управління 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.

Розроблені методи аналізу точності та достовірності обчислювальної реалізації ММ моделей динамічних систем запроваджено в ТОВ «Нафтогазхім Сервіс» (ТОВ «НГХ Сервіс»), де їх включено до складу програмно-алгоритмічного забезпечення діючої АСУ ТП.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, також використано при розробці лекційних курсів та відповідних циклів лабораторних робіт, які поставлено і читаються кафедрою комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка».

## 6. ВІДСУТНІСТЬ (НАЯВНІСТЬ) ПОРУШЕНЬ АКАДЕМІЧНОЇ ДОБРОЧЕСНОСТІ

Дисертаційну роботу ПРОКОФЬЄВА А. Ю. перевірено на плагіат програмними засобами StrikePlagiarism. Виявлені співпадіння в тексті роботи відносяться до власних публікацій автора, загальноживаної термінології, посилань на бібліографічні джерела.

Під час знайомства з дисертацією та аналізом наукових публікацій дисертанта не виявлено ознак порушення академічної доброчесності, а саме: плагіату та фальсифікації результатів дослідження.

Таким чином, дисертаційна робота ПРОКОФЬЄВА А. Ю. визначається як самостійна оригінальна праця, що не містить порушень академічної доброчесності та може бути допущеною до захисту.

## 7. ДИСКУСІЙНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ЗАУВАЖЕННЯ ЩОДО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційну роботу виконано коректною технічною мовою, з лаконічними і логічними твердженнями; вона містить достатню кількість прикладів, що сприяє кращому розумінню матеріалу, а також акуратно оформлена.

Проте вважаю за необхідне вказати на окремі недоліки роботи.

1. При розгляді методів числової реалізації математичних моделей у вигляді звичайних диференціальних рівнянь (розділ 1.3.2) увагу було приділено лише однокроковим методам Рунге–Кутти та багатокроковим – Адамса–Бешфорда, хоча відомі також і інші методи, наприклад, Ейлера–Коші або Крилова.

2. Потребує пояснень вигляд функцій розподілу норм похибок  $\|\varepsilon_0\|_1$  та  $\|\varepsilon_0\|_2$ , відповідно вирази (2.18) та 92.19).

3. В розділі 2.1 «Аналітична формалізація процедури ранжирування на основі апарату диференціальних і інтегральних рівнянь в задачах моделювання та управління» зазначається, що прикладом наближень при представленні похибки може слугувати її представлення у вигляді усіченого ряду Тейлора. Однак не наводиться ніяких розмірковувань щодо необхідного числа членів цього ряду, які забезпечують задану (бажану) точність.

4. З формулювання та доведення теореми 2.1, представлених на стор. 109, стор. 110, незрозуміло: чи накладаються на матриці  $\mathbf{\Pi}_1$  та  $\mathbf{\Pi}_2$  якісь інші обмеження крім, відповідно, ортогональності та не особливості?

5. В дисертаційній роботі (рис. 4.3 на стор. 188) наведено структуру алгоритму, в якому метод числового розв'язування не потребує обчислення правої частини системи рівнянь між вузлами інтегрування. Однак не визначено: яким чином реалізується даний алгоритм: програмно чи апаратно?

6. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються окремі виняткові

стилістичні неточності.

Однак, ці зауваження не зменшують наукового рівня дисертації. Представлена робота характеризується єдністю змісту і засвідчує особистий внесок дисертанта до наукових знань у галузі інженерії програмного забезпечення.

## 8. ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК ПРО ВІДПОВІДНІСТЬ РОБОТИ ВСТАНОВЛЕНИМ ВИМОГАМ

Дисертаційна робота ПРОКОФЬЄВА А. Ю. на тему: «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, 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:

завідувач кафедри інформаційних  
технологій Навчально-наукового інституту  
комп'ютерних систем  
Національного університету  
«Одеська політехніка»,  
доктор технічних наук, професор

Володимир ВИЧУЖАНІН