

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

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора кафедри комп'ютерних наук Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка ФЕДОРЧУКА Володимира Анатолійовича 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 ступеня доктора філософії з галузі знань 12 — Інформаційні технології за спеціальністю 121 — Інженерія програмного забезпечення.

1. Актуальність теми дисертації та зв'язок із науковими програмами, темами

В сучасних умовах розвитку науки і техніки набуває визначального значення розробка і удосконалення методів розрахунку та контролю процесів функціонування і експлуатаційних режимів технічних систем, в тому числі моделюючих та управляючих засобів як складових цих систем. Насамперед, важливість зазначеної проблеми пов'язано з оцінкою точності та достовірності реалізації досліджуваних технічних (в тому числі — динамічних) систем на етапах їх аналізу (моделювання та ідентифікації), а також синтезу законів управління ними.

В наукових дослідженнях та при розв'язуванні прикладних задач виникає необхідність реалізації математичних моделей (ММ) динамічних систем із застосуванням засобів обчислювальної математики і комп'ютерної техніки. В ході такої реалізації неодмінно постає проблема аналізу точності та достовірності отримуваних розв'язків математичних виразів, які являють собою відповідні ММ. Принагідно необхідно зазначити, що, в переважній більшості випадків, ММ динамічних систем виступають диференціальні або інтегральні рівняння, які адекватно описують фізичні явища, що притаманні поведінці динамічних систем.

Аналітичне дослідження, проведене автором в дисертаційній роботі показало, що до «складних» проблем, які не мають на тепер універсального розв'язку, відноситься оцінка точності розв'язку задач моделювання та управління

із застосуванням існуючого парку обчислювальних машин. Ця проблема потребує як розвитку існуючих, так і створення нових методів, що дозволяють отримати адекватні оцінки точності реалізації ММ динамічних систем безпосередньо в ході розв'язування основної задачі моделювання (або управління) та таких методів, які дозволяють приймати рішення щодо подальшого перебігу обчислювального процесу за основним алгоритмом розв'язку задачі моделювання (чи управління) або коригування останнього.

Радикально також постає задача формування структур завадо-захищених алгоритмів, які містять в собі блоки розв'язування основної задачі, виконання контрольного алгоритму та управління щодо прийнятого рішення стосовно подальшого перебігу обчислювального процесу. Як важливий чинник повинні враховуватися оцінки часових витрат на реалізацію алгоритмів контролю, що особливо важливо при розв'язуванні задач управління в реальному масштабі часу.

Застосування засобів обчислювальної техніки при реалізації ММ динамічних систем спонукає до розгляду питання організації процесів алгоритмічного контролю, зокрема, вибору та обґрунтування критеріїв прийняття рішень щодо наявності або відсутності завади (збою) в основному обчислювальному процесі. Важливою вимогою організації алгоритмічного контролю має бути те, що система прийняття рішення повинна будуватися на основі введених мір точності обчислень та допустимої області значень цієї міри. З метою оцінки результатів дії алгоритмів контролю має забезпечуватися достовірність контролю, що визначає виявлення похибок, пов'язаних з недосконалістю методу контролю та похибкою, яка вноситься при корекції основних значень (величин), що обчислюються.

З огляду на вище сказане, тема дисертаційної роботи ПРОКОФЬЄВА А. Ю., яка обумовлює створення методів аналізу точності та достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в прикладних задачах їх моделювання та управління, є **актуальною**. Додатково, **актуальність** представленої дисертаційної роботи підтверджується її виконанням в межах держбюджетної науково-дослідної роботи «Методи та програмні засоби інтерпретації моделей машинного навчання непараметричних динамічних об'єктів» №210-63, 2021—2025 р. Р. (№ держ. Реєстрації 0122U002161) Національного університету «Одеська політехніка».

2. Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність

Дисертаційна робота є завершеною працею. Вона складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури з 290 найменувань, п'яти додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 255 сторінок, в тому числі 190 сторінок основного тексту.

Вступ містить загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтування актуальності обраної теми дослідження, мету і задачі дослідження,

об'єкт та предмет дослідження. Викладено основні положення, що складають наукову новизну та виносяться на захист. Визначено практичну цінність отриманих результатів; зазначено особистий внесок дисертанта у роботах, виконаних у співавторстві; наведено відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

У **першому** розділі «Аналіз підходів до математичної формалізації динамічних систем в задачах їх моделювання і управління» показано, що переважна більшість промислових, технологічних та природно важливих процесів і об'єктів характеризуються змінними в часі поведінкою та станами, тобто являють собою динамічні системи. При цьому визначено, що адекватними математичними моделями (ММ) динамічних систем слід вважати диференціальні та інтегральні рівняння, які є формалізованими аналогами природної поведінки динамічних систем. На типових прикладах поширених промислових об'єктів, процесів та природних явищ показано особливості математичного опису динамічних систем в термінах апаратів диференціальних (у повних та у частинних похідних) і інтегральних рівнянь.

Важливим елементом виконаного в першому розділі дисертаційної роботи аналітичного дослідження став аналіз методів розв'язування диференціальних та інтегральних рівнянь різних типів, що застосовуються в якості ММ динамічних систем. При цьому проаналізовано похибки, які виникають при числовому розв'язуванні відповідних диференціальних та інтегральних рівнянь, їх характер та шляхи зменшення чи усунення. Крім того розглянуто переваги і недоліки алгоритмічних та програмно-апаратних засобів, які застосовуються при розв'язуванні задач моделювання динамічних систем та пошуку законів управління ними.

Виконано формалізовану постановку задачі дисертаційного дослідження.

Другий розділ «Метод ранжирування за похибкою для оцінки точності розв'язування задач моделювання динамічними системами та управління ними» присвячено питанням розробки методу оцінки похибок, які виникають при обчислювальній реалізації ММ динамічних систем.

Метод ґрунтується на запропонованій процедурі ранжирування за похибками, які вводяться у обчислювальний процес при розв'язуванні математичних рівнянь, що утворюють ММ динамічних систем в задачах їх моделювання та управління. Ранжирування похибок відбувається у вигляді p -квartilів (тобто рівновеликих груп значень, впорядкованих від мінімального до максимального, та отриманих із ймовірністю p) відповідних функцій розподілу норм похибок $\|\varepsilon_0\|_i$ кожного з i -го квантилю, що дає можливість будувати оцінки границь довірливості для похибок. При ранжируванні похибок враховуються введені коефіцієнти корекції: 1 роду — що дають «завищені» оцінки та

дозволяють побудувати оцінки «зверху» функції розподілу відповідних похибок, а також 2 роду — що визначають можливість потрапляння похибки всередину області вектора нев'язок, зумовлених числовим розв'язуванням рівнянь, що утворюють ММ динамічної системи.

Крім того, запропоновано оцінки «знизу» функцій розподілу неусувної похибки реалізації ММ динамічних об'єктів, які ґрунтуються на застосуванні гарантованих оцінок для абсолютних та відносних похибок, що виникають при числовій реалізації ММ динамічних систем.

Коректність та дієвість запропонованого методу ранжирування за точністю підтверджено числовим дослідженням на тестових прикладах.

У **третьому** розділі «Методи контролю достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в процесах їх моделювання та управління», насамперед, визначено можливості контролю достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем в процесах їх моделювання та управління із застосуванням засобів обчислювальної техніки, що стало методологічною основою подальших досліджень.

Було запропоновано метод зі зростаючою точністю обчислень, який, на відміну від відомого методу «прогноз — корекція», дозволяє послідовно отримувати значення шуканої функції стану динамічних систем з порядком точності локальної похибки, що збільшується. Причому, порядок точності може бути завдано попередньо, до виконання основних етапів числової реалізації ММ динамічної системи.

Також автором запропоновано методи алгоритмічного контролю достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем. Ці методи (екстраполяційний та інтерполяційний) може бути застосовано для контролю процесу обчислень при будь-яких методах числового розв'язування рівнянь динаміки. Екстраполяційний та інтерполяційний ґрунтуються на застосуванні контрольного алгоритму, який виконується на етапі числового розв'язування поставленої (основної) задачі, але такого, що простіший за основний. Відмінність екстраполяційного та інтерполяційного методів контролю достовірності полягають у характері інформації, яка використовується в їх процедурах. В першому — екстраполяційному — методі використовується інформація, яку вже проконтрольовано на попередніх кроках основного алгоритму; в другому — інтерполяційному — методі використовується інформація з поточного етапу обчислень, що дозволяє організувати неявний контроль та забезпечити зниження рівня шуму.

В третьому розділі було запропоновано критерії, які дозволяють зробити висновок про наявність або відсутність похибки в основному алгоритмі числової реалізації ММ динамічної системи, що дає змогу виявляти збої в роботі основного обчислювального алгоритму. На підставі цих критеріїв було розроблено адаптивні

методи контролю достовірності, які забезпечують визначення параметрів контрольного алгоритму з умови мінімуму обраної міри близькості результатів, отриманих за контрольним та основним алгоритмами числової реалізації ММ динамічних систем.

Для виконання практичних розрахунків при організації контролю процесу обчислень запропоновано спосіб прийняття рішень за яким визначається наявність або відсутність збою та приймається рішення щодо подальшого перебігу обчислювального процесу.

У **четвертому** розділі «Досвід практичного застосування методів аналізу похибки та контролю достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в задачах їх моделювання та управління» розглянуто практичне застосування методів ранжирування за похибкою та контролю достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем в задачах їх моделювання та управління на прикладі перетворювача сигналів акустичної емісії, що застосовується в системах неруйнівного контролю технічних об'єктів.

Виконано прогнозне оцінювання точності моделювання первинного перетворювача сигналів акустичної емісії, яке, на підставі запропонованого методу ранжирування похибки, дало змогу отримати оцінку неусувної похибки визначення вектору шуканої функції вихідної координати перетворювача з ймовірністю не нижче 0,96.

Було розроблено практичні заходи організації процедур визначення точності та контролю достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем.

У **висновках** сформульовано основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

Додатки містять опис розроблених процедур самоконтролю при виконанні алгоритму методу зі зростаючою точністю обчислень в процесі розв'язування задач обчислювальної реалізації моделей динамічних систем; процедуру організації контролю процесу обчислень та способу прийняття рішень, за яким визначається наявність або відсутність збою та приймається рішення щодо подальшого перебігу обчислювального процесу, а також відомості про апробацію та впровадження результатів дисертаційної роботи.

Практична цінність одержаних результатів дисертаційної роботи визначається тим, що запропоновані методи прогнозу точності і аналізу достовірності обчислювальної реалізації ММ 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.

Отже, дисертаційній роботі притаманний високий науковий рівень виконання, вона є завершеною науково-дослідницькою роботою, яка відзначається науковою новизною та практичною цінністю, а для розв'язування поставлених задач використано сучасні методи теоретичного та експериментального дослідження. Стиль викладення доказовий.

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

Наукові положення, висновки та рекомендації, наведені в дисертації, достатньо обґрунтовані та підтверджені доцільним використанням обраних методів дослідження, чітким формулюванням мети дисертаційної роботи та визначенням головної наукової задачі роботи, застосуванням сучасного математичного апарату. Автором при виконанні роботи використано сучасне методологічне забезпечення, що складається з науково-технічних та експериментальних методів, за допомогою яких обґрунтовано отримані результати та висновки дисертаційної роботи.

Достовірність отриманих результатів підтверджується їх узгодженням із теоретичними висновками, експериментами та числовими розрахунками.

Автор у дисертації вирішив поставлену актуальну науково-практичну задачу в повному обсязі. Основні наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи логічно впливають з результатів досліджень і достатньо обґрунтовані.

4. Наукова новизна одержаних результатів

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу прогнозування точності і аналізу достовірності обчислювальної реалізації моделей 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.

Можна погодитись, що вона містить отримані автором нові наукові положення та науково обґрунтовані результати. А саме:

— запропоновано метод ранжирування за похибкою при розв'язуванні задач моделювання динамічних систем та управління ними, 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 із залученням класифікації за точністю задач, що розв'язуються;

— запропоновано метод контролю достовірності обчислювальної реалізації ММ динамічних систем зі зростаючою точністю, який, на відміну від методів «прогноз – корекція», забезпечує послідовне отримання значення шуканої функції стану динамічної системи з порядком точності локальної похибки, який (порядок) збільшується;

— запропоновано методи контролю 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; причому, запропоновані методи контролю достовірності, дозволяють досягнути підвищення останньої за рахунок застосування в контрольному алгоритмі інформації, яку вже проконтрольовано на попередніх кроках основного алгоритму (екстраполяційний метод), або дозволяють організувати неявний контроль, що забезпечує зменшення діапазону відхилення величини, яка контролюється від контрольної, тобто дозволяють знизити рівень шуму (інтерполяційний метод);

— 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 (яка ґрунтується на основі уведених поняттях міри точності обчислень та допустимої області значень цієї міри), 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.

5. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

Під час вивчення та аналізу дисертаційної роботи можу стверджувати, що дисертація містить результати як власних досліджень автора, так і досліджень, які проводились у співавторстві. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела. Підкреслюю, що автор дисертації намагався підкреслити актуальність своєї позиції в тексті. Фактів порушення академічної доброчесності в дисертації здобувача **не виявлено**.

6. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові результати дисертаційної роботи ПРОКОФЬЄВА А. Ю. викладено у 18-ти наукових роботах, 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).

Основні наукові положення і рекомендації, які сформульовано в дисертаційній роботі, у повній мірі відображено в публікаціях дисертанта і пройшли апробацію на Міжнародних науково-технічних конференціях.

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

Публікації ПРОКОФЬЄВА А. Ю. задовольняють всім діючим чинним вимогам. Повнота відображення результатів дисертаційної роботи і вимоги щодо кількості публікацій відповідають вимогам, які пред'являються до дисертаційних робіт. Отримані результати наукових досліджень достовірні, достатньо обґрунтовані, мають наукову та прикладну значимість для обраної спеціальності.

7. Дискусійні питання та зауваження щодо змісту дисертації

Дисертація і анотація (українською та англійською мовами) оформлено згідно до вимог чинних законодавчих актів України та викладені послідовно, логічно і в цілому грамотно. В анотації повністю відображено основні положення дисертаційної роботи.

Однак, в якості зауважень до дисертаційної роботи, слід вказати наступне:

1. В розділі 1.1.1 «Застосування моделей у вигляді диференціальних рівнянь при формалізації динамічних систем в задачах їх моделювання та управління» зазначається, що рівняння виду (1.1) являє собою узагальнене представлення математичної моделі динамічних систем у формі нелінійного диференціального рівняння. Однак не розкрито суть можливих нелінійностей для математичної моделі виду (1.1), а лише зосереджено увагу на застосуванні процедур його лінеаризації.

2. При аналізі первинних похибок (стор. 97) пропонується відповідний алгоритм, першим пунктом якого зазначається «Обрати показник точності..», однак не розкривається смисл цього показника.

3. Для практичних розрахунків автор пропонує при визначенні розподілу випадкової величини $\bar{T}_{ij}(\tau)$ використовувати вираз (2.31), що подано без достатньої аргументації.

4. У другому розділі дисертаційної роботи було показано як отримати апіорні та апостеріорні оцінки законів розподілу неусувної похибки. Однак бажано було б провести порівняльну характеристику цих оцінок, а також визначити умови їх використання.

5. Для екстраполяційного методу контролю достовірності обчислень доцільно було б показати визначення контрольного значення функції стану на поточному кроці інтегрування із застосуванням виразу (3.12) на тестовому прикладі.

6. З дисертаційної роботи незрозуміло, чи оцінювався вплив залишкового члена r_i на достовірність прогнозу за екстраполяційним методом за умови, що на попередніх кроках обчислень отримано умовно «точний» розв'язок?

7. Не ясно, яким чином визначається критерій щодо прийняття рішення про наявність або відсутність похибки (збою) в основному обчислювальному алгоритмі у вигляді верхньої межі відхилень значень шуканої функції стану для основного та контрольного алгоритмів в адаптивному методі контролю на достовірність обчислень?

8. При розробці завадостійких алгоритмів числового розв'язування рівнянь динаміки дисертантом було запропоновано застосування алгоритмів з покомпонентним контролем елементів вектора, який контролюється. Чи розглядалися при цьому інші варіанти контролю?

Проте, слід зазначити, що вказані зауваження *не торкаються суті виконаних досліджень та не знижують позитивного враження* від дисертаційної роботи.

8. Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам

Вважаю, що зазначені зауваження не є принциповими і не знижують цінності проведеного дослідження, здобутої наукової новизни та практичної значущості дисертаційної роботи. Дисертація є завершеним науковим дослідженням, виконаним на високому рівні. Виклад матеріалу дослідження логічний та послідовний, висновки та рекомендації обґрунтовані, а результати достовірні.

Аналіз роботи дає підстави для висновку, що дисертація ПРОКОФЬЄВА Андрія Юрійовича є завершеним, самостійним науковим дослідженням, яке має

наукову новизну та практичне значення для теоретичних та практичних досліджень в галузі сучасної інженерії програмного забезпечення.

За актуальністю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація **«Методи аналізу точності та достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в прикладних задачах їх моделювання та управління»** 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 йому наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 12 — Інформаційні технології за спеціальністю 121 — Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:

професор кафедри комп'ютерних наук
Кам'янець-Подільського
національного університету
імені Івана Огієнка,
доктор технічних наук, професор

Володимир ФЕДОРЧУК