

АНОТАЦІЯ

Прокоф'єв А. Ю. Методи аналізу точності та достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в прикладних задачах їх моделювання і управління. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення. – Національний університет «Одеська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2025.

В роботі було вирішено важливу науково-практичну задачу, яка полягає у розробці методів прогнозування точності та забезпечення достовірності числової реалізації математичних моделей динамічних систем при розв'язуванні прикладних задач їх дослідження (моделювання та пошуку управління).

Встановлено, що розробка і удосконалення методів розрахунку та контролю процесів функціонування динамічних систем, які складають переважну більшість технічних і технологічних процесів та об'єктів, являє собою *актуальну* наукову проблему, що має також важливе *прикладне* значення. Показано, що конструктивним шляхом дослідження динамічних систем є *моделювання* (зокрема математичне), в ході якого досліджується не реальна (фізична) динамічна система, а її *математична модель* (ММ), яка формалізовано – у вигляді певного математичного виразу – описує фізичні явища, що характеризують динамічні властивості досліджуваної системи. При цьому важливим класом моделей динамічних систем слід вважати *диференціальні* та *інтегральні рівняння*, які, на відміну від інших моделей (наприклад, рекурентних та емпіричних залежностей тощо), зокрема, адекватно описують реальні фізичні явища і процеси в усьому діапазоні параметрів, а другі – крім того, дозволяють описувати явища «післядії» (тобто реакцію на раніше введені збуджуючі впливи), а також забезпечують ефект «пам'яті», що полягає у накопиченні інформації про попередні стани динамічної системи. Результати математичного моделювання можуть мати як самостійне значення в прямій задачі аналізу динамічних систем – у вигляді отриманих

різного роду характеристик (перехідних, імпульсних, частотних тощо), так і у випадку віднаходження відгуків динамічних систем на введені впливи при розв'язуванні зворотної задачі – синтезу алгоритмів та стратегій управління зазначеними системами.

Важливим аспектом математичного моделювання, крім *адекватності* ММ реальній динамічній системі, що полягає у відповідності розв'язків математичних виразів (які складають ММ) динамічній поведінці фізичної системи, є забезпечення *достовірності* цих розв'язків, отриманих із застосуванням при реалізації ММ конкретних обчислювальних засобів і для введених у модель вихідних даних. У зв'язку з цим поставлено та розв'язано низку задач щодо створення дієвих методів і відповідних алгоритмів контролю та аналізу процесів функціонування і точності апаратно-програмних засобів, які реалізують ММ досліджуваних динамічних систем.

До складних проблем, які не мають дотепер універсального рішення, відноситься оцінка *точності* розв'язку задач моделювання та управління динамічними системами із застосуванням засобів комп'ютерної техніки.

На основі аналізу переваг і недоліків існуючих методів аналізу якісних показників отриманих числових реалізацій ММ динамічних систем, в роботі здійснено спробу усунення протиріччя між значною мірою розвинутої модельної і методологічної підтримки засобів математичного моделювання та відсутністю задовільних (зокрема, за швидкодією та обчислювальними витратами) оцінок точності та достовірності розв'язків відповідних рівнянь як моделей досліджуваних динамічних систем.

Конструктивність запропонованих методів контролю показників якості при обчислювальній реалізації ММ динамічних систем в задачах їх моделювання та управління підтверджено розв'язком тестових прикладів, наближених до реальних практичних випадків.

Метою дисертаційної роботи є розробка методів 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.

Для досягнення вказаної мети дослідження в дисертаційній роботі було **поставлено та розв'язано наступні задачі:**

- 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.

Наукова новизна отриманих результатів, які виносяться на захист, полягає в тому, що *вперше*:

- 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 алгоритмами.

Практична цінність роботи полягає 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.

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, використано при розробці лекційних курсів та відповідних циклів лабораторних робіт, з дисциплін: «Числові методи», «Комп'ютерне моделювання процесів і систем», «Ідентифікація та моделювання процесів» і «Моделі та інструментальні засоби математичного моделювання технологічних процесів», а також застосовано при розробці тем бакалаврських та магістерських кваліфікаційних робіт.

Об'єкт досліджень – процеси математичного моделювання динамічних систем в задачах їх моделювання та управління.

Предмет досліджень — оцінки якісних характеристик (точності, достовірності та відсутності збоїв при числовій реалізації) моделей та засобів моделювання і управління в задачах прикладного дослідження динамічних систем.

Ключові слова: математичне моделювання, математична модель, диференціальні та інтегральні рівняння, достовірність обчислювальної реалізації, точність розв'язку, ранжирування за похибкою.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації.

1. Прокоф'єв А. Ю. Аналіз похибок математичного моделювання динамічних об'єктів, які описуються інтегральними рівняннями. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*, 2022. Т. 12, № 3. С. 209-219. DOI 10.15276/imms.v12.no3.209. Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».

URL: <http://immm.opu.ua/#a23>;

http://immm.opu.ua/files/archive/n3_v12_2022/immm_n3_v12_2022.pdf.

2. Прокоф'єв А. Ю. Метод точнісного тарювання при реалізації математичних моделей динамічних систем в задачах моделювання та управління. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць*, 2022. Вип. 23. С. 116-129. DOI 10.326226/2308-5916.2022-23.116-129. Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».

URL: <http://mcm-tech.kpnu.edu.ua/issue/archive>.

3. Лись Д. А., Прокоф'єв А. Ю. Розробка та числова реалізація математичної моделі гравітаційної хвилі на границі поділу двошарової рідинної системи. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*, 2023. Т. 13, № 1-2. С. 97-103. DOI 10.15276/imms.v13.no1-2.97. Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».

URL: <http://immm.opu.ua/#a23>;

http://immm.opu.ua/files/archive/n3_v12_2022/immm_n1-2_v13_2023.pdf.

4. Прокоф'єв А. Ю. Дослідження показників точності моделей нелінійних динамічних систем. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць*, 2023. Вип. 24. С. 56–67. DOI: 10.326226/2308-5916.2023-24.56-67. Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».

URL: <http://mcm-tech.kpnu.edu.ua/issue/archive>.

5. Положаєнко С. А., Прокоф'єв А. Ю. Моделі визначення надійності динамічних систем, функціонування яких характеризується режимом профілактики. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2024. Т. 35 (74), № 1. С. 280–286. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/42>. Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».

URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/35-74-1>.

6. Polozhaenko S. A., Prokofiev A. Yu. Estimation of Accuracy Indicators of Nonlinear Dynamic Systems. *Colloquium-journal*, 2024. Part 1. № 15 (208). P. 61–64. DOI: [10.24412/2520-6990-2024-15208-61-63](https://doi.org/10.24412/2520-6990-2024-15208-61-63).

URL: <https://colloquium-journal.org/wp-content/uploads/2024/06/Colloquium-journal-2024-208-1.pdf>.

7. Положаєнко С. А., Прокоф'єв А. Ю. Параметри методу Рунге-Кутти з різним порядком точності при інтегруванні рівнянь динаміки в задачах моделювання нестационарних систем. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*, 2024. Т. 14, № 1-2. С. 85–96. DOI [10.15276/imms.v14.no1-2.85](https://doi.org/10.15276/imms.v14.no1-2.85). Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».

URL: http://immm.op.edu.ua/files/archive/n1-2_v14_2024/immm_n1-2_v14_2024.pdf.

8. Положаєнко С. А., Прокоф'єв А. Ю. Параметрична редукція по точності математичних моделей динамічних об'єктів систем. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*, 2024. Вип. 6 (149). С. 125–131 DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.6.15>. Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».

URL: https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/visnik.php?id_nom=71.

9. Положаєнко С. А., Прокоф'єв А. Ю. Методи контролю достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем, засновані на застосуванні контрольних алгоритмів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 2025. Вип. 1 (92). Ч. 2. С. 185–193 DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.25> Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».

URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/issue/view/72.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

10. Прокофьев А., Баранов М. Аналіз і моделювання аномальних дифузійних процесів з просторово-часовими характеристиками. *Scientific Paradigm in the Context of Technologies and Society Development: proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference, Geneva, 16-18 May 2023, Geneva, 2023*. P. 454–458.

URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/issue/view/16-18.05.2023/164>

11. Лись Д. А., Прокофьев А.Ю. Моделювання динамічного стану ударних хвиль у парорідинних двофазних системах. *Сучасні Інформаційні Технології 2023: матеріали XIII міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених, м. Одеса, 18–19 травня 2023 р. Одеса, 2023*. С. 159–161.

URL: https://drive.google.com/file/d/1ERFn923_zrEXiPcGj8S0dbSb4K6ToDE/view.

12. Use of dynamic neural networks for modelling nonlinear objects with significant nonlinearity / Polozhaenko S., Fomin O., Krikun V., Orlov A., Prokofiev A. *Математика та інформатика в науці й освіті: виклики сучасності: збірник тез IV Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, м. Вінниця, 25–26 травня 2023 р., Вінниця, 2023*. С. 121–124.

URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/791>

13. Use of Dynamic Neural Networks for Modeling Nonlinear Objects with Significant Nonlinearity / Fomin O., Polozhaenko S., Krikun V., Orlov A., Prokofiev A. *Annals of Computer Science and Intelligence System, Volume 37: preceding 18th Conference on Computer Science and Intelligence Systems. Warsaw, 17–20 September 2023, Warsaw, 2023*. P. 97–102. DOI: 10.15439/2023F3874.

URL: <https://annals-csis.org/proceedings/2023/drp/3874.html>

14. Прокофьев А. Ю., Положаєнко С. А. Підвищення якості процесу моделювання динамічних систем на основі методу точностного тарування. *Проблеми та перспективи реалізації та впровадження міждисциплінарних наукових досягнень: матеріали VI Міжнародної наукової конференції, м. Біла*

Церква, 2 лютого 2024 р., Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2024. С. 155–160.
DOI: <https://doi.org/10.36074/mcnd-02.02.2024>.

URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/02.02.2024/52>.

15. Метод ранжирування за похибкою для оцінювання точності розв'язування задач моделювання динамічних систем / Положаєнко С. А., Прокоф'єв А. Ю., Літинський В. В., Татарин О. В. *Сучасні інформаційні та електронні технології: твори XXV Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Одеса, 27–29 травня 2024 р. Одеса, 2024. С. 15–16.

URL: <https://www.old.tkea.com.ua/siet/archive/2024/15.pdf>.

16. Положаєнко С. А., Прокоф'єв А. Ю. Оцінювання розв'язків задач моделювання динамічних систем на основі методу ранжування за похибкою. *Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: тези доповідей 10-ї Міжнародної наукової конференції*. м. Кам'янець-Подільський, 28–29 червня 2024 р., Кам'янець-Подільський, 2024. С. 104–105.

URL: <http://elar.kpnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/8145>.

17. Improving measurements accuracy in weight-in-motion systems using dynamic neural networks / Oleksandr Fomin, Sergii Polozhaenko, Petro Bidyuk, Oleksii Tataryn, Andrii Prokofiev. *Information Control Systems & Technologies (ICST 2024): proceedings of the 12th International Conference*, Odesa, 23–25 September, 2024. Odesa, 2024 P. 483–493.

URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3790/paper42.pdf>. (Scopus).

18. Положаєнко С. А., Прокоф'єв А. Ю. Адаптивний метод контролю достовірності обчислювальної реалізації моделей динамічних систем в процесах їх моделювання та управління. *Development Priorities for Technical Sciences in the Modern World: proceedings International scientific conference*, Riga, 19–20 March 2025, Riga, 2025. P. 35–39. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-542-6-9>

URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/578>.

ABSTRACT

Prokofiev A. Yu. Methods for analyzing the accuracy and reliability of computational implementation of dynamic systems models in applied problems of their modelling and control. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 121 Software Engineering. – Odessa Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

The work solved an important scientific and practical problem, which consists in developing methods for predicting the accuracy and ensuring the reliability of the numerical implementation of mathematical models of dynamic systems when solving applied problems of their research (modelling and control search).

It has been established that the development and improvement of methods for calculating and controlling the processes of functioning of dynamic systems, which constitute the vast majority of technical and technological processes and objects, is an urgent scientific problem, which also has important applied significance. It has been shown that a constructive way of studying dynamic systems is modelling (in particular, mathematical), during which not a real (physical) dynamic system is studied, but its mathematical model (MM), which is formalized – in the form of a certain mathematical expression – describes physical phenomena that characterize the dynamic properties of the system under study. At the same time, an important class of models of dynamic systems should be considered differential and integral equations, which, unlike other models (for example, recurrent and empirical dependencies, etc.), in particular, adequately describe real physical phenomena and processes in the entire range of parameters, and the latter, in addition, allow describing the phenomena of «after-effects» (i.e., the reaction to previously introduced exciting influences), and also provide a «memory» effect, which consists in accumulating information about the previous states of the dynamic system. The results of mathematical modelling can have both independent significance in the direct problem of analyzing dynamic systems – in the form of various types of characteristics obtained (transient, pulse, frequency, etc.),

and in the case of finding the responses of dynamic systems to the introduced influences when solving the inverse problem – the synthesis of algorithms and strategies for controlling the specified systems.

An important aspect of mathematical modelling, in addition to the adequacy of the MM to a real dynamic system, which consists in the correspondence of the solutions of mathematical expressions (which make up the MM) to the dynamic behaviour of the physical system, is ensuring the reliability of these solutions obtained using specific computational tools in the implementation of the MM and for the input data entered into the model. In this regard, a number of tasks have been set and solved to create effective methods and appropriate algorithms for controlling and analyzing the processes of functioning and accuracy of hardware and software tools that implement the MM of the dynamic systems under study.

Complex problems that do not yet have a universal solution include the assessment of the accuracy of solving problems of modelling and control of dynamic systems using computer technology.

Based on the analysis of the advantages and disadvantages of existing methods for analyzing the qualitative indicators of the obtained numerical implementations of MM dynamic systems, the work attempts to eliminate the contradiction between the significantly developed model and methodological support of mathematical modelling tools and the lack of satisfactory (in particular, in terms of speed and computational costs) estimates of the accuracy and reliability of solutions of the corresponding equations as models of the dynamic systems under study.

The constructiveness of the proposed methods for controlling quality indicators in the computational implementation of MM dynamic systems in the problems of their modelling and control is confirmed by the solution of test examples, close to real practical cases.

The purpose of the dissertation is to develop methods for predicting the accuracy and analyzing the reliability of computational implementation of models of dynamic systems, represented in the classes of differential and integral equations –

when solving applied modelling and control problems based on them, by determining the quality indicators of the computer and software-algorithmic tools involved.

To achieve the stated research goal, the **following tasks were set** and solved in the dissertation work:

- existing approaches to the mathematical formalization of dynamic systems in the tasks of their modelling and control were considered, as a result of which the features of describing dynamic systems by models in the form of differential and integral equations of various types were shown;
- methods for numerical implementation of differential and integral equations as mathematical models of dynamic systems were analyzed, as well as the errors that arise in this case;
- developed an error ranking method to assess the accuracy of solving problems of modelling and controlling dynamic systems;
- constructed (based on the error ranking method) "bottom-up" estimates of the distribution functions of the non-removable error of the implementation of mathematical models of dynamic objects, represented by differential and integral equations, in modelling and control problems;
- developed methods (extrapolation, interpolation and adaptive) for controlling the reliability of the computational implementation of models of dynamic systems in the processes of their modelling and control;
- developed experience in the practical application of error ranking methods and controlling the reliability of the computational implementation of models of dynamic systems in the problems of their modelling and control.

The scientific novelty of the results obtained, which are submitted for defence, lies in the fact that for the first time:

- a method of ranking by error when solving problems of modelling dynamic systems and their control has been proposed, which, unlike known methods, in particular, of assessing the accuracy of numerical solution of equations of mathematical physics, allows to preliminarily (before the beginning of the process of computer solving the problem) calculate the dependence of the solution error on the

characteristics of the primary errors with the involvement of classification by the accuracy of the problems being solved;

- a method of controlling the reliability of the computational implementation of MM of dynamic systems with increasing accuracy has been proposed, which, unlike the methods of «forecast – correction», ensures the consistent obtaining of the value of the desired function of the state of the dynamic system with the order of accuracy of the local error, which (order) increases;

- methods for controlling the reliability of the computational implementation of models of dynamic systems in the processes of their modelling and control are proposed, based on the idea of introducing a control algorithm that is performed at the stage of numerical solution of the set (main) problem, but one that is simpler than the main one; moreover, the proposed methods for controlling reliability allow to achieve an increase in the latter by using in the control algorithm information that has already been controlled at the previous steps of the main algorithm (extrapolation method), or allow to organize implicit control, which ensures a reduction in the range of deviation of the controlled value from the control, that is, they allow to reduce the noise level (interpolation method);

- criteria for making a decision on the presence or absence of an error (failure) in the main computational algorithm for solving problems of modelling and controlling dynamic systems were proposed, which allowed us to formulate a decision-making system for reliability control (which is based on the introduced concepts of the measure of accuracy of calculations and the permissible range of values of this measure), as well as to develop adaptive methods for controlling the reliability of the computational implementation of dynamic systems models, which ensure the determination of the parameters of the control algorithm from the condition of a minimum of a certain degree of proximity of the results obtained by the control and main algorithms.

The practical value of the work lies in the fact that the proposed methods for predicting the accuracy and analyzing the reliability of computational implementation of models of dynamic systems allow us to expand the class of problems of modeling and controlling these systems that are important for practice, and the developed

algorithms that form the basis of the proposed methods are focused on solving a wide range of engineering and research problems that arise in the analysis and control of dynamic systems.

The use of developed applied algorithms for predicting the accuracy and reliability of numerical implementation of MM dynamic systems allows to ensure the desired accuracy, as well as to reduce the number of failures (1,4...2,5) in the process of solving real problems of modelling and controlling dynamic systems.

The developed methods for analysing the accuracy and reliability of computational implementation of MM of dynamic systems were implemented at Naftogazhim Service LLC (NGH Service LLC), where they are included in the software and algorithmic support of the operating ACS.

The results obtained in the dissertation were used in the development of lecture courses and corresponding cycles of laboratory work in the disciplines: «Numerical Methods», «Computer Modelling of Processes and Systems», «Identification and Modelling of Processes» and «Models and Tools for Mathematical Modelling of Technological Processes», and were also applied in the development of topics for bachelor's and master's qualification theses.

The object of research is the processes of mathematical modelling of dynamic systems in the tasks of their modelling and control.

The subject of research is the assessment of qualitative characteristics (accuracy, reliability and absence of failures during numerical implementation) of models and modelling and control tools in the tasks of applied research of dynamic systems.

Keywords: [mathematical modeling](#), [mathematical model](#), [integral equations](#), [reliability of computational implementation](#), [solution accuracy](#), [ranking by error](#).

List of publications of the applicant

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published.

1. Prokofiev A. Yu. Analysis of errors in mathematical modelling of dynamic objects described by integral equations. *Computer science and mathematical methods in modelling*, 2022. Vol. 12, No. 3. P. 209-219. DOI [10.15276/imms.v12.no3.209](https://doi.org/10.15276/imms.v12.no3.209). The issue is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category «B».

URL: <http://immm.opu.ua/#a23>;

http://immm.opu.ua/files/archive/n3_v12_2022/immm_n3_v12_2022.pdf.

2. Prokofiev A. Yu. Precision calibration method in the implementation of mathematical models of dynamic systems in modelling and control problems. *Mathematical and computer modelling. Series: Technical sciences: collection of scientific works*, 2022. Issue 23. P 116-129. DOI [10.326226/2308-5916.2022-23.116-129](https://doi.org/10.326226/2308-5916.2022-23.116-129). The issue is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category «B».

URL: <http://mcm-tech.kpnu.edu.ua/issue/archive>.

3. Lys D. A., Prokofiev A. Yu. Development and numerical implementation of a mathematical model of a gravitational wave at the boundary of a two-layer liquid system. *Computer science and mathematical methods in modelling*, Vol. 13, No 1–2. P. 97–103. DOI [10.15276/imms.v13.no1-2.97](https://doi.org/10.15276/imms.v13.no1-2.97). The issue is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category «B».

URL: <http://immm.opu.ua/#a23>;

http://immm.opu.ua/files/archive/n3_v12_2022/immm_n1-2_v13_2023.pdf.

4. Prokofiev A. Yu. Research on the accuracy indicators of models of nonlinear dynamic systems. *Mathematical and computer modelling. Series: Technical sciences: collection of scientific works*, 2023. Issue 24. P. 56–67. DOI: [10.326226/2308-5916.2023-24.56-67](https://doi.org/10.326226/2308-5916.2023-24.56-67). The issue is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category «B».

URL: <http://mcm-tech.kpnu.edu.ua/issue/archive>.

5. Polozhaenko S. A., *Prokofiev A. Yu.* Models for determining the reliability of dynamic systems whose operation is characterized by a prevention mode. Scientific Notes of the V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences, 2024. Vol. 35 (74), No. 1, P. 280-286. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/42>. *The issue is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category «B».*

URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/35-74-1>.

6. Polozhaenko S. A., *Prokofiev A. Yu.* Estimation of Accuracy Indicators of Nonlinear Dynamic Systems. *Colloquium-journal*, 2024. Part 1. № 15 (208). P. 61–64. DOI: [10.24412/2520-6990-2024-15208-61-63](https://doi.org/10.24412/2520-6990-2024-15208-61-63).

URL: <https://colloquium-journal.org/wp-content/uploads/2024/06/Colloquium-journal-2024-208-1.pdf>.

7. Polozhaenko S. A., *Prokofiev A. Yu.* Parameters of the Runge-Kutta method with different orders of accuracy when integrating dynamics equations in modeling problems of non-stationary systems. *Computer science and mathematical methods in modelling*, 20224 Vol. 14, No. 1–2. P. 85–96. DOI [10.15276/imms.v14.no1-2.85](https://doi.org/10.15276/imms.v14.no1-2.85). *The issue is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category «B».*

URL: http://immm.op.edu.ua/files/archive/n1-2_v14_2024/immm_n1-2_v14_2024.pdf.

8. Polozhaenko S. A., *Prokofiev A. Yu.* Parametric reduction in the accuracy of mathematical models of dynamic objects of systems. Bulletin of Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrohradsky, 2024. Issue 6 (149). P. 125–131 DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.6.15>. *The issue is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category «B».*

URL: https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/visnik.php?id_nom=71.

9. Polozhaenko S. A., *Prokofiev A. Yu.* Methods for controlling the reliability of computational implementation of dynamic systems models based on the use of control algorithms. Bulletin of the Kherson National Technical University, 2025. Issue 1 (92). Part 2. P. 185-193 DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.25>. *The issue is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category «B».*

URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/issue/view/72.

Scientific works that confirm the approbation of the dissertation materials.

10. *Prokofiev A.*, Baranov M. Analysis and modeling of anomalous diffusion processes with spatiotemporal characteristics. *Scientific Paradigm in the Context of Technologies and Society Development: proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference*, Geneva, 16-18 May 2023, Geneva, 2023. P. 454–458.

URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/issue/view/16-18.05.2023/164>

11. Lys D. A., *Prokofiev A. Yu.* Modelling the dynamic state of shock waves in vapor-liquid two-phase systems. *Modern Information Technologies 2023: materials of the XIII international scientific conference of students and young scientists*, Odesa, 18–19 May 2023, Odesa, 2023. P. 159–161.

URL: https://drive.google.com/file/d/1ERFn923_zrEXiPcGj8S0dbSb4K6ToDE/view.

12. Use of dynamic neural networks for modelling nonlinear objects with significant nonlinearity / Polozhaenko S., Fomin O., Krikun V., Orlov A., *Prokofiev A.* *Mathematics and Informatics in Science and Education: Contemporary Challenges: Collection of Abstracts of the IV International Scientific and Practical Internet Conference*, Vinnica, 25–26 May 2023, Vinnica, 2023. P. 121–124.

URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/791>

13. Use of Dynamic Neural Networks for Modeling Nonlinear Objects with Significant Nonlinearity / Fomin O., Polozhaenko S., Krikun V., Orlov A., *Prokofiev A.* *Annals of Computer Science and Intelligence System, Volume 37: preceding 18th Conference on Computer Science and Intelligence Systems*. Warsaw, 17–20 September 2023, Warsaw, 2023. P. 97–102. DOI: 10.15439/2023F3874.

URL: <https://annals-csis.org/proceedings/2023/drp/3874.html>

14. *Prokofiev A. Yu.*, Polozhaenko S. A. Improving the quality of the dynamic systems modeling process based on the precision calibration method. *Problems and prospects for the implementation and introduction of interdisciplinary scientific achievements: materials of the VI International Scientific Conference*, Bila Cerkva, 2

February 2024, Vinnica: UKRLOGOS Group LLC, 2024 P. 155–160. DOI: <https://doi.org/10.36074/mcnd-02.02.2024>.

URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/02.02.2024/52>.

15. Error ranking method for assessing the accuracy of solving dynamic systems modelling problems / Polozhaenko S. A., *Prokofiev A. Yu.*, Lytynsky V. V., Tataryn O. V. *Modern information and electronic technologies: proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference, Odesa, 27–29 May 2024*, Odesa, 2023. P. 15–16.

URL: <https://www.old.tkea.com.ua/siet/archive/2024/15.pdf>.

16. Polozhaenko S. A., *Prokofiev A. Yu.* Evaluation of solutions to dynamic systems modeling problems based on the error ranking method. *Modern problems of mathematical modeling, forecasting and optimization: abstracts of the reports of the 10th International Scientific Conference. Kamianets-Podilskyi, 28–29 June 2024*, 2024. P Kamianets-Podolcky, 104–105.

URL: <http://elar.kpnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/8145>.

17. Improving measurements accuracy in weight-in-motion systems using dynamic neural networks / Oleksandr Fomin, Sergii Polozhaenko, Petro Bidyuk, Oleksii Tataryn, *Andrii Prokofiev*. *Information Control Systems & Technologies (ICST 2024): proceedings of the 12th International Conference, Odesa, 23–25 September, 2024*. Odesa, 2024 P. 483–493.

URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3790/paper42.pdf>. (Scopus).

18. Polozhaenko S. A., *Prokofiev A. Yu.* Adaptive method for controlling the reliability of computational implementation of dynamic systems models in the processes of their modeling and control. *Development Priorities for Technical Sciences in the Modern World: proceedings International scientific conference, Riga, 19–20 March 2025*, Riga, 2025. P. 35–39. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-542-6-9>

URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/578>.