

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

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора завідувача кафедри робототехнічних і телекомунікаційних систем та кібербезпеки Черкаського державного технологічного університету ПАЛАГІНА Володимира Васильовича на дисертацію ОРЛОВА Андрія Андрійовича за темою: **«Метод опорних моделей синтезу інтелектуальних систем ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів»**, 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 ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Сучасні об'єкти дослідження стають дедалі складнішими, а умови їх функціонування в різних галузях економіки стають більш вимогливими, що підвищує важливість моделювання у вирішенні завдань управління, діагностики та моніторингу. Для опису таких об'єктів, які зазвичай характеризуються нелінійною динамікою, безперервними параметрами та невизначеною структурою, все ширше використовуються нейронні мережі. Проте обмежена швидкість їх навчання створює суттєві перешкоди для впровадження в критично важливих сферах, таких як транспорт, медицина та фінансовий сектор, де необхідно забезпечити високу швидкодію.

Останнім часом багато досліджень в області інтелектуальних технологій спрямовано на інтеграцію нейронних мереж у різноманітні галузі людської діяльності. Сталий інтерес викликає проблема прискорення процесу створення моделей машинного навчання для складних об'єктів, що мають різну природу та структуру. Вирішення цього завдання має ключове значення для багатьох практичних сфер, оскільки дозволяє ефективніше застосовувати методи штучного інтелекту для аналізу, прогнозування та управління у різних галузях.

Дисертаційну роботу ОРЛОВА А. А. присвячено створенню швидкісного методу ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, а також розробці інструментальних програмно-алгоритмічних засобів комп'ютерного моделювання у складі інтелектуальних систем ідентифікації. Тому, тема дисертації здобувача ОРЛОВА А. А. **«Метод опорних моделей синтезу інтелектуальних систем ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів»** є *актуальною* і має важливе теоретичне і практичне значення для області інженерії програмного забезпечення.

Актуальність роботи засвідчена, зокрема, наведеним в роботі позитивним висновком акту про впровадження результатів досліджень, підтверджена результатами та активною участю здобувача в науково-дослідній роботі кафедри.

2. ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ТЕМАМИ

Дисертаційну роботу ОРЛОВА А. А. виконано на кафедрі комп'ютеризованих систем та програмних технологій Навчально-наукового Інституту комп'ютерних систем Національного університету «Одеська політехніка», в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Методи та програмні засоби інтерпретації моделей машинного навчання непараметричних динамічних об'єктів» №210-63, 2021 — 2025 р. р. (номер держ. реєстрації 0122U002161) Національного університету «Одеська політехніка». Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри.

Зміст дисертаційної роботи, її основні задачі відповідають пріоритетним тематичним напрямкам наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні (Постанова Кабінету Міністрів України від 30.04.2024 р. №476), згідно 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).

3. НАУКОВА НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Виконана дисертаційна робота своїми результатами вносить вклад в розвиток відповідних розділів математичного моделювання та ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів з неперервними характеристиками. В результаті проведеного дослідження автором було отримано нові наукові та практичні результати. Уперше, на рівні дисертаційних досліджень за спеціальністю 121 — Інженерія програмного забезпечення, було запропоновано сімейство опорних моделей у вигляді нейронних мереж для синтезу грубої моделі об'єкта, що не використовують ітераційної процедури навчання, отже дозволяють скоротити час моделювання. Отримані вирази для визначення параметрів грубої моделі у вигляді нейронної мережі на базі алгебраїчних перетворень відповідних параметрів опорних моделей дозволили розвинути метод ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, який полягає у суперпозиції попередньо навчених опорних моделей для побудови грубої моделі об'єкта, що дозволяє скоротити час побудови моделі об'єкту при забезпеченні заданої точності моделювання. Для визначення моменту зупинки попереднього навчання та запобігання перенавчанню опорної моделі удосконалено критерій на основі оцінки середньоквадратичного відхилення її параметрів шляхом його адаптації до тришарової архітектури нейронної мережі з часовими затримками.

На відміну від відомих підходів на основі попереднього навчання розроблений метод синтезу інтелектуальних систем ідентифікації складних нелінійних динамічних об'єктів дозволяє одночасно спростити структуру нейронної мережі та скоротити час побудови моделі об'єкту при забезпеченні заданої точності моделювання завдяки уникненню процедури попереднього навчання грубої моделі об'єкта.

Для отримання наукових та практичних результатів автором дисертаційної роботи було поставлено і розв'язано такі задачі:

– визначення базових проблем існуючих методів скорочення часу побудови моделей у вигляді нейронних мереж; обґрунтування вибору напрямку досліджень в області побудови моделей нелінійних динамічних об'єктів із безперервними характеристиками з використанням підходу на основі попереднього навчання моделей у вигляді нейронних мереж з часовими затримками;

– розробка сімейства опорних моделей у вигляді нейронних мереж з часовими затримками для моделювання нелінійних та динамічних властивостей об'єкта; встановлення ефекту суперпозиції опорних моделей при ідентифікації складних нелінійних динамічних об'єктів для скорочення часу попереднього навчання нейронних мереж;

– розвиток методу синтезу інтелектуальних систем ідентифікації складних нелінійних динамічних об'єктів шляхом суперпозиції попередньо навчених опорних моделей, що відбивають базові властивості об'єкта, для скорочення часу побудови моделей об'єктів при забезпеченні заданої точності моделювання;

– розробка інформаційної технології синтезу інтелектуальних систем ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів та програмно-алгоритмічних інструментальних засобів комп'ютерного моделювання на основі методу опорних моделей.

Висновки здобувача викладено лаконічно та змістовно. Наукову новизну дослідження сформульовано автором самостійно з належним рівнем обґрунтованості.

4. КОРОТКИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНОГО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ

Зміст дисертації має логічний, послідовний виклад матеріалу, достатню аргументацію та виразну візуалізацію завдяки представленню основних результатів роботи у вигляді рисунків, таблиць та додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, надано загальну характеристику роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, наведено основні наукові та практичні результати, які виносяться на захист.

У **першому розділі** наведено огляд публікацій за темою дослідження, розглянуто причини появи протиріччя між точністю моделі об'єкта та швидкістю її побудови; здійснено огляд та пошук ефективних напрямів подолання означеної проблеми.

Обґрунтовано використання нейронних мереж з часовими затримками для моделювання нелінійних динамічних об'єктів типу «чорна скриня». Виконано аналіз та проведено систематизацію існуючих методів скорочення часу побудови моделей у вигляді нейронних мереж з позначенням області їх ефективного застосування, показано переваги підходу до побудови нейронних мереж на основі перенесення навчання. В результаті аналітичного огляду поточного стану проблеми ідентифікації на основі моделей машинного навчання виокремлено актуальний напрям в області побудови моделей нелінійних динамічних об'єктів із безперервними характеристиками з використанням підходу на основі попереднього навчання моделей у вигляді нейронних мереж. На підставі наведеного встановлено, що вирішення протиріччя, наведеного у вступі, може бути досягнуто при поєднанні повного донавчання та багатозадачного навчання нейромережових моделей.

Сформульовано постановку задачі дослідження, як розвиток підходу до синтезу інтелектуальних систем ідентифікації складних нелінійних динамічних об'єктів шляхом суперпозиції попередньо навчених опорних моделей у вигляді нейронних мереж з часовими затримками, що відбивають базові властивості об'єкта, для скорочення часу побудови моделей об'єктів при забезпеченні заданої точності моделювання.

Другий розділ присвячено вирішенню проблеми відсутності розвинутого математичного апарату побудови моделей на основі поєднання повного донавчання та багатозадачного навчання нейромережових моделей.

Для цього автором запропоновано сімейство опорних моделей у вигляді нейронних мереж з часовими затримками для моделювання базових властивостей об'єкта, встановлено ефект суперпозиції опорних моделей при ідентифікації складних нелінійних динамічних об'єктів, що дозволяє скоротити час попереднього навчання нейронних мереж. Наведено вирази для здійснення адитивної, мультиплікативної та складної суперпозиції опорних моделей.

Для запобігання дострокового припинення навчання або перенавчання опорних моделей запропоновано ефективний критерій зупинки попереднього навчання моделі об'єкта на основі оцінки середньоквадратичного відхилення її параметрів шляхом адаптації метрики відхилення параметрів моделі до тришарової архітектури нейронної мережі з часовими затримками.

З метою визначення ефективності запропонованого сімейства опорних моделей організовано та проведено експеримент з ідентифікації тестового нелінійного динамічного об'єкта. Результати експерименту свідчать про скорочення часу навчання нейромережової моделі у порівнянні з попередньо навченою на загальному датасеті грубою моделлю при порівнянній точності обох моделей.

Третій розділ присвячено вирішенню протиріччя між точністю моделювання нелінійної динаміки і часом побудови моделей шляхом розвитку методу ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів з неперервними характеристиками на основі базисних попередньо навчених нейронних мереж. В якості опорних моделей використовуються запропоновані в попередньому розділі опорні моделі у вигляді нейронних мереж з часовими затримками, що збудовані за даними експерименту «вхід–вихід».

Для визначення області ефективного використання розробленого методу організовано та проведено експеримент з ідентифікації тестового нелінійного динамічного об'єкта. Експеримент демонструє скорочення часу навчання нейронної мережі у порівнянні з традиційним підходом побудови моделі на основі попередньо навченої грубої моделі при порівнянній точності обох моделей.

На базі розробленого методу опорних моделей з урахуванням низки допоміжних задач розроблено інформаційну технологію синтезу інтелектуальної системи ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів. Представлено докладний опис ІТ у вигляді переліку етапів та кроків із зазначенням мети, моделей, вхідних та вихідних даних для кожного кроку.

У **четвертому розділі** розглянуто ключові тенденції розвитку та вимоги до програмного забезпечення згідно міжнародним стандартам. На їх основі

сформовано перелік функціональних та нефункціональних вимог до програмного забезпечення інтелектуальних систем для забезпечення сучасного рівня автоматизації життєвого циклу ідентифікації моделей.

Спроектовано структуру програмних засобів комп'ютерного моделювання у складі інтелектуальної системи. Розроблені з використанням сучасних інформаційних технологій модулі інтелектуальної системи містять ефективні обчислювальні алгоритми побудови моделей машинного навчання.

Розроблені програмні засоби комп'ютерного моделювання орієнтовані на забезпечення високої швидкості пошуку розв'язків та обчислювальну потужність за рахунок використання хмарних сервісів та скорочення непродуктивних витрат часу на допоміжні операції з підготовки та перетворення даних поміж суміжними етапами життєвого циклу задачі ідентифікації.

У **додатках** представлено опис структури файлу з бібліотеки опорних моделей, графічний інтерфейс засобів комп'ютерного моделювання для розв'язування задач ідентифікації, відомості про апробацію роботи, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Таким чином, зібраний у дисертаційній роботі ОРЛОВА А. А. теоретичний та практичний матеріал було проаналізовано автором з використанням різноманітних підходів, принципів і методів наукового пошуку, що дозволило забезпечити обґрунтованість і достовірність зроблених у дисертаційному дослідженні висновків.

5. СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНОСТІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ, ЇХ ДОСТОВІРНІСТЬ

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи ОРЛОВА А. А. достатньо обґрунтовано детальним аналізом джерел за даною проблемою, коректним використанням математичного апарату та сучасних методів дослідження. Наукові положення закономірно впливають з результатів, отриманих за допомогою чітких викладок, підкріплені успішною реалізацією, ефективним практичним впровадженням результатів дисертаційних досліджень.

Достовірність та обґрунтованість запропонованих методів і засобів підтверджується результатами експериментальних досліджень та коректним застосуванням методів математичного та комп'ютерного моделювання, які були використані під час виконання роботи.

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

6. ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Достовірність результатів дисертаційного дослідження підтверджується їх практичним впровадженням.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розширенні класу важливих для практики задач ідентифікації моделей нелінійних динамічних об'єктів, а також, в створенні інструментальних програмно-алгоритмічних засобів

розв'язування прикладних задач ідентифікації (зокрема, побудови нейромережових моделей нелінійних динамічних об'єктів). Застосування інструментальних програмно-алгоритмічних засобів забезпечує скорочення часу побудови моделей машинного навчання в 4.7 рази у порівнянні з методом попереднього навчання.

Тому можна стверджувати, що результати та висновки, отримані у дисертаційній роботі, коректні, достатньо обґрунтовані і можуть бути рекомендовані при розв'язанні практичних задач ідентифікації моделей нелінійних динамічних об'єктів.

7. ОФОРМЛЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ПОВНОТА ВИКЛАДУ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 171 сторінку, з яких 159 сторінок основного тексту та 5 додатків, 3 рисунки та 2 таблиці наведено на окремих сторінках. Список використаних джерел містить 168 найменувань. Дисертацію оформлено відповідно до вимог, визначених Міністерством освіти і науки України.

Дисертаційна робота має логічну структуру. Основні висновки і рекомендації закономірно витікають із результатів, які наведено у розділах роботи. Отримані результати свідчать про високу індивідуальність роботи. По всьому тексту дисертації простежується авторський стиль.

Основні наукові положення і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі, у повній мірі відображені в публікаціях здобувача і пройшли достатню апробацію на Міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах.

Основні результати дослідження опубліковано у 13-ти наукових роботах, в тому числі: у 5-ти статтях, які опубліковано у виданнях, включених до Переліку фахових видань України, а також у 7-ми публікаціях у працях і матеріалах Міжнародних наукових конференцій, матеріали 2-х з яких проіндексовано у наукометричній базі Scopus.

Основні положення дисертації повністю викладено в опублікованих працях. Вимоги щодо кількості та якості публікацій виконано.

8. ВІДСУТНІСТЬ (НАЯВНІСТЬ) ПОРУШЕННЯ АКАДЕМІЧНОЇ ДОБРОЧЕСНОСТІ

У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела. Запозичення, виявлені в роботі ОРЛОВА А. А., є загальнонавчаними та не є плагіатом. Відсутність порушення академічної доброчесності підтверджується проведенням перевірки за допомогою програми StrikePlagiarism.

Таким чином, у результаті вивчення дисертаційної роботи порушень академічної доброчесності **не виявлено**.

9. МОВА ТА СТИЛЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертацію написано логічно, послідовно, на високому науково-технічному рівні з використанням сучасної термінології.

Тема, зміст та отримані наукові результати роботи відповідають чинним нормам, які підтверджують що дисертант ОРЛОВ А. А. оволодів методологією наукової діяльності, яка відповідає освітньо-науковій програмі (ОНП) 121 – Інженерія програмного забезпечення, що доведено отриманими науковими результатами, що складають наукову новизну. Методологія наукового пізнання, яку застосовано при розв’язанні основних задач у відповідності до мети роботи, узгоджується з ціллю освітньо-наукової програми ОНП третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 121 — Інженерія програмного забезпечення. Отримані наукові результати дисертаційної роботи відповідають програмним, предметним, фаховим і інноваційним компетентностям ОНП спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Основні результати повною мірою віддзеркалено в опублікованих працях автора. Висновки до розділів та загальні висновки дисертації є достатньо обґрунтованими, а програмно-алгоритмічні засоби комп’ютерного моделювання мають практичну значущість. Дисертацію викладено науковою мовою, розділи дисертації пов’язано між собою структурно і змістовно, висновки ґрунтуються на результатах проведеного дослідження, що, своєю чергою, є достатньо аргументованими та доказовими.

10. ЗАУВАЖЕННЯ ДО ДИСЕРТАЦІЇ

Загалом дисертаційну роботу виконано на достатньому науково-теоретичному та практичному рівнях, що не виключає критичного підходу до окремих позицій здобувача та дозволяє висловити певні міркування та зауваження.

В якості *зауважень* до дисертаційної роботи слід вказати наступне:

1. На рис 1.1 наведено типову структуру вимірювальної системи з блоком ідентифікації у її складі. Незрозуміло, навіщо тут присутні завади та збурення $f(t)$, що діють на об’єкт та сенсори, адже в роботі не досліджується питання стійкості розробленого методу ідентифікації до дії цих завод та збурень.

2. В параграфі 2.4 при описі підходу до формування бібліотеки опорних моделей (стор. 91, 2 абзац) термін «валідація» прирівнюється до терміну «верифікація». Але ці терміни різняться: валідація фокусується на перевірці відповідності отриманої моделі реальному об’єкту, тоді як верифікація фокусується на перевірці коректності отриманої моделі з точки зору її математичної структури, алгоритмів і програмної реалізації. Замість терміну «валідація» в даному контексті необхідно застосувати термін «верифікація».

3. Застосування алгоритму Левенберга-Марквардта для навчання опорних моделей у вигляді нейронних мереж з часовими затримками є недостатньо обґрунтованим через його певні обмеження: ознаки навчального набору даних повинні бути лінійно незалежними, алгоритм має високу вимогливість до обчислювальних ресурсів через необхідність обчислення матриці Гессе. Крім того, його ефективність суттєво знижується при роботі з великими наборами даних, а чутливість до початкових умов може призводити до зупинки на локальних мінімумах, що негативно впливає на якість навчання нейронної мережі.

4. Здобувач пропонує власний критерій зупинки процесу навчання моделі у вигляді тришарової повнозв’язної нейронної мережі з часовими затримками (2.10). Слід було б порівняти запропонований підхід до запобігання перенавчання моделі

з поширеними практиками: Dropout, L1/L2 регуляризація, стабілізація метрики якості та інших.

5. З наведених експериментів в Розділі 3 залишається не зрозумілим, чи виконується попередня обробка вихідних сигналів, яка міститься в запропонованій інформаційній технології ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів (таблиця 3.2, пункт 1.4). Відсутні рекомендації, як треба поводитися з артефактами, які можуть виникнути в процесі вимірювання та передачі даних.

6. Вважаю, що до списку опублікованих праць було недоречним включення роботи за номером 12, так як предмет дослідження цих тез не співпадає предметом дослідження, що розглядається в дисертаційній роботі.

Проте, вказані зауваження *не впливають* на загальне позитивне враження від представленої дисертаційної роботи та не знижують її якість, наукової та практичної цінності.

11. ВИСНОВКИ ЩОДО ДИСЕРТАЦІЇ В ЦІЛОМУ

Представлена дисертаційна робота «Метод опорних моделей синтезу інтелектуальних систем ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів» є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові науково обґрунтовані результати. Наукові публікації, в яких викладено основні положення і результати роботи, демонструють високий науковий рівень. Дисертація за своїм змістом та оформленням відповідає чинним вимогам і є завершеним самостійним науковим дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують актуальну науково-технічну задачу.

Одержані наукові та практичні результати є значущими для галузі інформаційних технологій в цілому та інженерії програмного забезпечення зокрема. Тема і зміст дисертації відповідають спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення.

У підсумку, з огляду на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, сформульованих висновків та рекомендацій, їх новизну та практичну цінність, повноту викладення в наукових публікаціях, а також відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертація цілком 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 – Орлов Андрій Андрійович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:
завідувач кафедри робототехнічних і
телекомунікаційних систем та кібербезпеки
Черкаського державного
технологічного університету,
доктор технічних наук, професор

Володимир ПАЛАГІН