

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 КРИКУНА Валентина Андрійовича за темою: **«Метод та програмні засоби інтерпретації моделей машинного навчання 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

Зі зростанням складності сучасних об'єктів дослідження та умов їх експлуатації в різних галузях господарства зростає роль моделювання в задачах контролю, діагностування, управління тощо. Для опису згаданих об'єктів, переважно, нелінійних динамічних з неперервними характеристиками та невідомою структурою, в останні роки значно поширюються нейронні мережі. Однак складність нейромережевих моделей заважає їх представленню в зрозумілій для людини формі. Тому, впровадження моделей машинного навчання стримується в таких критично важливих сферах, як транспорт, медицина або фінанси.

В останні роки багато досліджень зосереджено на спробах зрозуміти, як працюють моделі машинного навчання, щоб проаналізувати структуру і закони функціонування об'єктів управління, підвищити довіру до цих моделей. Так, задача інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів має важливе прикладне значення у практичних застосунках.

Дисертаційну роботу КРИКУНА В. А. присвячено інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів, а також розробці інструментальних програмно-алгоритмічних засобів ідентифікації неперервних об'єктів у складі інтелектуальних систем. Тому, тема дисертації здобувача КРИКУНА В. А. **«Метод та програмні засоби інтерпретації моделей машинного навчання 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 КРИКУНА В. 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 постанові Кабінету Міністрів України від 7.09.2011 р. №942 із змінами «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2023 року», постанові Президії НАН України від 30.01.2019 р. № 30 «Про Основні наукові напрямки та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019–2023 роки».

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 модель інтерпретації нейронної мережі з часовими затримками у вигляді непараметричної динамічної моделі на основі інтегро-степеневих поліномів Вольтерри, побудованих за результатами експерименту «вхід–вихід». Встановлення аналітичного зв'язку між нейронною мережею з активацією у вигляді лінійного випрямляча та непараметричною динамічною моделлю на основі інтегро-степеневих поліномів Вольтерри дозволило розробити новий метод інтерпретації моделей машинного навчання у вигляді нейронних мереж з часовими затримками. Для визначення якості програмного забезпечення інтерпретації моделей машинного навчання запропоновано вдосконалену багатofакторну математичну модель оцінки якості з врахуванням метрик функціональності та складності.

На відміну від відомих підходів розроблений метод інтерпретації нейронних мереж, дозволяє одночасно спростити структуру сурогатних моделей та підвищити точність їх ідентифікації, завдяки урахуванню нелінійних та динамічних властивостей моделей машинного навчання.

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

– визначення базові проблеми інтерпретації нейромережевих моделей; обґрунтування вибору напрямку досліджень в області побудови сурогатних моделей у вигляді інтегральних непараметричних динамічних моделей на основі інтегро-степеневих поліномів Вольтерри для аналітичного опису нелінійних динамічних об'єктів;

– розробка математичної моделі на основі інтегро-степеневих поліномів Вольтерри в якості сурогатних моделей для інтерпретації нейронних мереж з часовими затримками; встановлення зв'язку в аналітичному вигляді між нейронними мережами з часовими затримками та моделями на основі інтегро-степеневих поліномів Вольтерри;

– розвиток методу інтерпретації нейронних мереж з часовими затримками шляхом побудови сурогатних моделей у вигляді непараметричних динамічних моделей на основі інтегро-степеневих поліномів Вольтерри;

– розробка інструментальних програмно-алгоритмічних засобів побудови нейромережових моделей нелінійних динамічних об'єктів та сурогатних моделей для їх інтерпретації: визначення якості програмного забезпечення інтерпретації моделей машинного навчання за допомогою багатфакторної моделі оцінки якості.

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 наочну візуалізацію завдяки представленню та узагальненню результату роботи у вигляді рисунків, таблиць та додатків.

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

У **першому розділі** наведено огляд публікацій, розглянуто причини появи протиріччя між складністю об'єкта та інтерпретованістю його моделі; здійснено огляд та **пошук ефективних напрямів** подолання означеної проблеми.

Проведено систематизацію поширених моделей машинного навчання з позначенням області їх застосування, основних характеристик та здатності до інтерпретації результатів навчання. Окремо проведено класифікацію моделей нелінійних динамічних об'єктів, як таких, що викликають найбільший інтерес з боку практики. В результаті аналітичного огляду поточного стану проблеми інтерпретації нелінійних динамічних моделей машинного навчання виокремлено актуальний напрям створення прозорих моделей об'єктів типу «чорна скриня» у вигляді аналітичних виразів.

Обґрунтовано використання нейронних мереж з часовими затримками для моделювання нелінійних динамічних об'єктів типу «чорна скриня». Показано, що застосування нейронних мереж у критично важливих сферах діяльності людини обмежено дією ряду ускладнень, пов'язаних з проблемами їх інтерпретації. Розглянуто поширені підходи до інтерпретації нейронних мереж.

Сформульовано постановку задачі дослідження, як розвиток підходу до застосування сурогатних моделей у вигляді інтегральних непараметричних динамічних моделей для апроксимації нейронних мереж з часовими затримками, що забезпечує підвищення точності інтерпретації моделей при створенні програмного забезпечення спеціалізованих інтелектуальних систем.

Другий розділ присвячено дослідженню підходів до ідентифікації

нелінійних динамічних об'єктів у вигляді моделей Вольтерри за даними експерименту «вхід-вихід» з використанням тестових сигналів.

Запропоновано та обґрунтовано підхід до інтерпретації нейромережових моделей складних об'єктів з нелінійними і динамічними характеристиками типу «чорна скриня» шляхом застосування в якості аналітичних виразів залежності «вхід/вихід» сурогатних моделей у вигляді інтегро-ступеневих рядів Вольтерри. Це дозволить забезпечити підвищення точності інтерпретації складних об'єктів дослідження типу «чорна скриня» у порівнянні з нелінійними статичними або лінійними динамічними сурогатними моделями.

З метою верифікації запропонованих моделей організовано та проведено експерименти з ідентифікації тестового нелінійного динамічного об'єкту. Результати експериментів' свідчать про високу точність і ефективність побудови сурогатних моделей на основі поліномів Вольтерри.

У **третьому розділі** запропоновано метод інтерпретації моделей машинного навчання у вигляді нейронних мереж з часовими затримками, збудованими за даними експерименту «вхід-вихід». В якості сурогатної моделі використовуються непараметричні динамічні моделі у вигляді інтегро-ступеневих поліномів Вольтерри.

Розроблено обчислювальний алгоритм реалізації методу інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів, наведено його реалізацію у вигляді псевдокоду. Створений алгоритм дає можливість будувати нелінійні сурогатні моделі, що мають переваги в точності перед лінійними сурогатними моделями.

Для визначення області ефективного використання розробленого методу інтерпретації моделей машинного навчання організовано та проведено імітаційні експерименти з використанням даних тестових динамічних об'єктів з гладкими нелійними та насиченням. Експерименти полягають у дослідженні масштабованості TDNN моделей до різних вхідних сигналів та дослідженні екстраполяційних властивостей TDNN моделей.

У **четвертому розділі** розглянуто вимоги до програмного забезпечення згідно стандарту ISO/IEC 2500n. Запропонована модель оцінки якості програмного забезпечення інтерпретації моделей машинного навчання згідно з моделлю ISO/IEC 25010, яка дозволяє одночасно врахувати метрики функціональності та складності.

Спроектовано структуру програмних засобів комп'ютерного моделювання у складі інтелектуальної системи. Розроблені з використанням сучасних хмарних технологій модулі інтелектуальної системи містять ефективні обчислювальні алгоритми побудови моделей машинного навчання та сурогатних моделей нелінійних динамічних об'єктів.

Розроблені програмні засоби комп'ютерного моделювання застосовано при випробуванні запропонованого багатофакторного критерія якості моделей машинного навчання на прикладі тестового об'єкта з нелінійними динамічними характеристиками.

У **додатках** представлено опис деяких модулів розроблених засобів комп'ютерного моделювання для розв'язування задач інтерпретації моделей

машинного навчання, відомості про апробацію роботи, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Таким чином, зібраний у дисертаційній роботі КРИКУНА В. 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 ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ, ЇХ ДОСТОВІРНІСТЬ

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи КРИКУНА В. 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 інтерпретації моделей машинного навчання 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 та сурогатних моделей для їх інтерпретації). Застосування інструментальних програмно-алгоритмічних засобів забезпечує точність ідентифікації вище на 10-12% за лінійні моделі за рахунок врахування нелінійних та динамічних властивостей об'єктів дослідження.

Тому можна стверджувати, що результати та висновки, отримані у дисертаційній роботі, коректні, достатньо обґрунтовані і можуть бути рекомендовані при розв'язанні практичних задач інтерпретації моделей машинного навчання 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 185 сторінок, з яких 169 сторінок основного тексту та 5 додатків, 7 рисунків та 5 таблиць наведено на окремих сторінках. Список використаних джерел містить 177 найменування. 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.

Основні результати дослідження опубліковано у 12-ти наукових роботах, в тому числі: у 4-х 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 КРИКУНА В. А., є загальноживаними 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 було виявлено**.

9. МОВА ТА СТИЛЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

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

Тема, зміст та отримані наукові результати роботи відповідають чинним нормам, які підтверджують що дисертант КРИКУН В. А. оволодів методологією наукової діяльності, яка відповідає освітньо-науковій програмі (ОНП) 121 – Інженерія програмного забезпечення, що доведено отриманими науковими результатами, які викладено у науковій новизні. 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 пропозиції 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. Здобувач пропонує власний підхід до оцінки обчислювальної складності моделей машинного навчання у вигляді тришарової повнозв'язної нейронної мережі з часовими затримками. Слід було б порівняти цей підхід з класичною оцінкою складності згідно до концепції $O(n)$.

2. Використання алгоритму Левенберга-Марквардта для навчання нейронної мережі з часовими затримками не достатньо обґрунтовано, адже алгоритм має певні обмеження: ознаки навчального датасету мають бути лінійно-незалежними, існують обмеження на вигляд цільової функції.

3. В параграфі 1.1 при описі підходу побудови ускладнених моделей (стор. 31) на Етапі 4 термін «пояснюваність моделі» прирівнюється до терміну «інтерпретованість моделі». Але ці терміни різняться: інтерпретованість фокусується на розумінні внутрішньої роботи моделей, тоді як пояснюваність фокусується на поясненні прийнятих рішень

4. В параграфі 1.5 для оцінювання інтерпретованості моделей машинного навчання серед інших метрик наведено вираз (1.13) – коефіцієнт детермінації R^2 . Але далі в роботі ця метрика не використовується.

5. В параграфі 2.2 в якості структури нейронної мережі з часовими затримками обрано тришаровий перцептрон з прямим розповсюдженням сигналу, але не надано обґрунтування ефективності цієї структури.

6. В пункті 2.4.2 при реалізації обчислювального експерименту з побудови нейромережевої моделі тестового об'єкта кількість нейронів вхідного шару (довжина пам'яті моделі об'єкта) визначається експериментально шляхом перебору нейромережевих моделей з різною кількістю нейронів у першому та другому шарах, що істотно збільшує час процедури ідентифікації. Доцільним було б оцінити довжину пам'яті моделі об'єкта на основі статистичної обробки сигналів «вхід/вихід».

7. Вважаю, що до списку опублікованих праць було недоречним включення роботи за номером 11, так як предмет дослідження цих тез не 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 та програмні засоби інтерпретації моделей машинного навчання 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 вирішують 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 – Крикун Валентин 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