

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 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 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

На даний час успішно розвивається інноваційна технологія моделювання нелінійних динамічних об'єктів на основі штучних нейронних мереж. Тривалий час їхнє поширення суттєво стримувалося браком ефективного алгоритмічного та інструментального забезпечення, складністю їхньої інтерпретації. У результаті прогресу технологій інтелектуальної обробки даних сьогодні можна спостерігати помітне зростання інтересу до нейронних мереж у напрямі структурної та функціональної ідентифікації складних об'єктів управління.

Однак, незважаючи на їхні успіхи, однією з ключових проблем залишається інтерпретація роботи нейронних мереж. Це зумовлено їхньою складною і часто непрозорою внутрішньою структурою, що робить важко зрозумілими прийняті ними рішення. Дослідження в галузі інтерпретації нейронних мереж сприяє збільшенню довіри користувачів до систем, що ґрунтуються на машинному навчанні, і дає змогу використовувати їх у критично важливих галузях.

Тому, тема дисертаційної роботи КРИКУНА В. А., яка полягає у створенні методу інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів та у розробці програмних засобів ідентифікації, які забезпечують розв'язування практичних задач моделювання нелінійної динаміки є *актуальною*. Крім того, *актуальність* представленої дисертаційної роботи також підтверджується її виконанням відповідно до 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 177 найменувань, п'яти додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 185 сторінок, в тому числі 169 сторінок основного тексту.

Так, *вступ* містить загальну характеристику дисертаційної роботи; обґрунтування актуальності теми досліджуваної проблеми; мету і задачі дослідження. Визначено об'єкт та предмет дослідження а також наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів; зазначено особистий внесок дисертанта у роботах, які виконані у співавторстві; наведено відомості щодо апробації результатів дисертаційної роботи та вказано основні положення, які виносяться на захист.

У *першому розділі* «Аналіз проблеми інтерпретації моделей машинного навчання в системах ідентифікації неперервних динамічних об'єктів» виконано класифікацію моделей нелінійних динамічних систем та методів і засобів, що застосовуються при числовому дослідженні нелінійної динаміки вказаних систем, виконано аналіз проблеми розв'язування задач інтерпретації моделей машинного навчання.

Автор припускає, що використання інтегро-степеневих моделей Вольтерри в якості інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів дозволить забезпечити адекватність моделі та підвищення точності інтерпретації динамічних нейронних мереж за рахунок одночасного урахування нелінійних та динамічних властивостей об'єкту дослідження.

Наведено формальну постановку задачі дослідження, визначені методи оцінювання інтерпретованості моделей машинного навчання.

*Другий розділ* «Математичні моделі інтерпретації динамічних нейронних мереж на основі ряду Вольтерри» присвячено питанням моделювання нелінійних динамічних об'єктів, в тому числі, за допомогою нейронних мереж з часовими затримками та інтерпретації означених нейронних мереж шляхом пошуку інформаційного зв'язку між моделями Вольтерри та цими нейронними мережами.

Наведено спрощений алгоритм ідентифікації моделей нелінійних динамічних об'єктів у вигляді інтегро-степеневих поліномів Вольтерри другого та третього порядку в часовій області. Для побудови моделей вищих порядків автором пропонується використання нейронних мереж. Так, звертається увага на ізоморфізм нелінійних динамічних об'єктів у вигляді інтегро-степеневих поліномів Вольтерри та нейронних мереж з часовими затримками, завдяки чому знаходить інформаційний зв'язок між цими моделями для випадку використання функції активації нейронів у вигляді випрямляючої лінійної ланки. Для забезпечення гладкості активації функція випрямляючої лінійної апроксимується поліномом. На основі встановленого інформаційного зв'язку розроблено метод оцінки ядер Вольтерри за допомогою нейронних мереж з часовими затримками, що дозволяє підвищити точність ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів у вигляді поліномів Вольтерри.

Виконано дослідження інтерпретаційних моделей у вигляді поліномів Вольтерри, збудованих за допомогою нейронних мереж з часовими затримками. З

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

У третьому розділі *«Метод та інформаційна технологія інтерпретації моделей машинного навчання»* розроблено метод інтерпретації моделей машинного навчання у вигляді нейронних мереж з часовими затримками, збудованими за даними експерименту «вхід–вихід» шляхом побудови сурогатної моделі на основі непараметричних динамічних моделей у вигляді інтегро-степеневих поліномів Вольтерри за допомогою встановленого аналітичного зв'язку між нейронною мережею та ядрами Вольтерри. Метод дозволяє підвищити точність та зменшити розмірність сурогатних моделей при ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів.

Встановлено, що для ефективної реалізації методу інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів потрібно вирішувати низку задач з підготовки та проміжної обробки даних. Виокремлено деякі алгоритми обробки даних, наприклад, визначення оптимальних за швидкістю навчання параметрів структури нейронної мережі, які носять характер окремих самостійних задач. В цих умовах автор наголошує на необхідності створення інформаційної технології інтерпретації моделей машинного навчання на базі розробленого методу.

Розроблена інформаційна технологія вирішує цілий спектр завдань, включаючи сукупність методів, моделей для збору, передачі, оброблення та поширення даних з метою ефективної організації процесу інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів.

Для встановлення області ефективного використання розробленого методу виконується низка експериментальних досліджень ідентифікації моделей машинного навчання динамічних об'єктів з гладкими та значними нелійнностями: дослідження масштабності нейронних мереж з часовими затримками до різних вхідних сигналів, дослідження інтерполяційних та екстраполяційних властивостей нейромережових моделей. За результатами експериментів встановлено область ефективного застосування розробленого методу як множини динамічних об'єктів з суттєво нелійнними властивостями у вигляді зламів та розривів.

У четвертому розділі *«Засоби комп'ютерного моделювання та практика їх застосування при розв'язуванні задач інтерпретації моделей машинного навчання»* розглянуто питання, які пов'язані з розробкою комп'ютерних засобів розв'язування означених задач математичного моделювання нелінійних динамічних об'єктів.

Автором визначено місце інструментальних засобів інтерпретації моделей машинного навчання в складі програмного застосування інтелектуальної системи. Докладно проаналізовано вимоги до інструментальних програмних засобів комп'ютерного моделювання з посиланням на сучасні міжнародні стандарти ISO/IEC; запропоновано модель якості програмного забезпечення інтерпретації моделей машинного навчання. Для цього визначені компоненти мета-моделі якості програмного забезпечення (функціональність та складність) та метрики для їх

кількісної оцінки. Побудовано багатофакторну модель оцінки якості програмного забезпечення інтерпретації моделей машинного навчання на базі визначених компонентів мета-моделі, що дозволяє здійснювати формальне порівняння сурогатних моделей, збудованих різними методами.

При описі процесів проектування та розробки інструментальних програмних засобів дисертант чітко підкреслює, якими чинниками зумовлено вибір програмної платформи у вигляді хмарних сервісів для розв'язування задач математичного моделювання; обґрунтовує перспективність використання хмарної платформи Google Colab щодо розв'язування задач інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів.

Також, враховано обчислювальні особливості, які забезпечує обрана платформа, а саме: ефективність — процесорний час моделювання, число ітерацій та точність результатів; а також надійність — здатність успішно розв'язувати поставлені задачі, достовірність отриманих результатів, здатність обробки (аналізу та виправлення) помилкових ситуацій.

Слід відмітити, що розв'язок всіх поставлених у дослідженні тестових задач реалізовано за допомогою розроблених у дисертації інструментальних програмно-алгоритмічних засобів.

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

*Додатки* містять опис розроблених інструментальних програмних засобів, відомості про апробацію та впровадження результатів дисертаційної роботи.

Практична цінність одержаних результатів дисертаційної роботи визначається тим, що розроблено метод інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів, який розширює можливості використання засобів прикладного математичного моделювання при проведенні наукових досліджень та інженерних розрахунків.

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**

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, наведених у дисертації, підтверджено доцільним використанням обраних методів дослідження, чітким формулюванням мети дисертаційної роботи та визначенням головної наукової задачі роботи, використанням сучасного математичного апарату та програмного забезпечення. Автором для виконання 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, а також впровадженням розроблених моделей і методів у прикладну інформаційну технологію.

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

#### **4. Наукова новизна одержаних результатів**

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення точності сурогатних моделей шляхом розвитку методу інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів. Можна погодитись, що вона містить отримані автором нові наукові положення та науково обґрунтовані результати. А саме:

- вперше запропоновано сурогатну модель у вигляді непараметричної динамічної моделі на основі інтегро-степеневих поліномів Вольтерри для інтерпретації нейронних мереж з часовими затримками, побудованих за результатами експерименту «вхід–вихід», яка, на відміну від відомих моделей, дозволяє підвищити точність їх ідентифікації, завдяки урахуванню нелінійних та динамічних властивостей моделей машинного навчання;

- отримав подальший розвиток метод оцінки ядер Вольтерри за допомогою нейронних мереж з часовими затримками шляхом встановлення аналітичного зв'язку між нейронною мережею та моделлю на основі інтегро-степеневих поліномів Вольтерри, що дозволяє підвищити точність ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів;

- вперше запропоновано метод інтерпретації моделей машинного навчання у вигляді нейронних мереж з часовими затримками шляхом побудови сурогатної моделі у вигляді інтегро-степеневих поліномів Вольтерри за допомогою встановленого аналітичного зв'язку між нейронною мережею та ядрами Вольтерри. Це дозволяє підвищити точність та зменшити розмірність сурогатних моделей при ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів;

- удосконалено математичну модель оцінки якості програмного забезпечення інтерпретації моделей машинного навчання, яка відрізняється від існуючих одночасним врахуванням метрик функціональності та складності, що дозволяє кількісно виразити здатність до інтерпретації для формального порівняння сурогатних моделей, збудованих різними методами.

#### **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 відповідне джерело. 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 КРИКУНА В. А. викладено у 12-ти наукових публікаціях, з яких 4 статті опубліковано в журналах, включених до наукових фахових виданнях України категорії “Б”, 7 публікацій у працях міжнародних науково-технічних конференцій (матеріали двох з них 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 КРИКУНА В. А. задовольняють всім відповідним 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. Перший розділ перевантажено довідковою інформацією, частина якої далі не використовується.

2. В розділі 2 наводиться метод ідентифікації моделей нелінійних динамічних об’єктів у вигляді інтегро-степеневих поліномів Вольтерри в часовій області. При цьому не розглядаються питання обмеження амплітуд спеціальних тестових сигналів на вході об’єкта, які є обов’язковими при використанні моделей Вольтерри.

3. При розробці сурогатних моделей у вигляді інтегро-степеневих поліномів Вольтери не наведена оцінка порядку поліному в інформаційній моделі для забезпечення достатньої точності моделювання.

4. В таблиці 2.1 автором наведено поліноми для апроксимації випрямляючої лінійної ланки. Автор обмежується поліномом 4-го порядку, хоча підвищення ступеню поліному тягне підвищення точності моделювання, що ставиться за мету дисертаційного дослідження.

5. В розділі 2.2 не наведено обґрунтування апроксимації функції випрямляючої лінійної за допомогою полінома. Апроксимацію функції може бути виконано за допомогою ряду Маклорена, що може забезпечити більшу точність.

6. На рис. 4.7 наведено конвеєр руху даних всередині інтелектуальної системи інтерпретації моделей машинного навчання, в склад якої включено блоки оптимізації моделі машинного навчання та сурогатної моделі. На жаль ці блоки описано не

достатньо повно. Зокрема, незрозуміло якими методами та за якою цільовою функцією здійснюється оптимізація моделі.

7. У висновках до розділу 4 зазначаються як переваги розроблених програмних засобів комп'ютерного моделювання висока обчислювальна потужність за рахунок використання хмарних обчислень та швидкість пошуку розв'язків, що не ставилося в меті дисертаційної роботи.

8. В тексті дисертаційної роботи зустрічаються незначні розбіжності термінологічного характеру, наприклад, поряд з використанням терміну «чорна скриня» іноді вживається термін «чорний ящик».

Проте, слід відмітити, що наведені 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, результати достовірні.

Аналіз дисертації дає підстави для висновку, що дисертація КРИКУНА Валентина Андрійовича 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 **«Метод та програмні засоби інтерпретації моделей машинного навчання нелінійних динамічних об'єктів»** 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 їй 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