

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. директора Інституту технічної  
механіки НАНУ і ДКАУ  
член-кореспондент НАН України  
Володимир ПОШИВАЛОВ

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2024 р.

**Витяг**

з протоколу № 9 від 9 вересня 2024 року  
засідання відділу системного аналізу і проблем керування Інституту  
технічної механіки НАНУ і ДКАУ (далі Інститут)

**Присутні співробітники відділу системного аналізу і проблем керування:** Алпатов А. П., член-кореспондент НАН України, д-р техн. наук, професор, зав. відділу; Пироженко О.В., д-р фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник; Храмов Д. О., канд. техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник; Волощенко О. Л., канд. техн. наук, старший дослідник, старший науковий співробітник; Маслова А. І., канд. техн. наук, старший дослідник, старший науковий співробітник; Фоков О. А., канд. техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник; Гольдштейн Ю. М., канд. техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник; Палій О.С., канд. техн. наук, старший дослідник, старший науковий співробітник; Лапханов Е. О., д-р філофії, старший науковий співробітник; Сюткіна-Дороніна С. В., канд. техн. наук, науковий співробітник; Міщенко О. В., канд. техн. наук, науковий співробітник; Григор'єв С. В., науковий співробітник; Сазіна Н. П., молодший науковий співробітник; Жукова Л. Г., молодший науковий співробітник; Своробін Д. С., молодший науковий співробітник; Бражнікова Г. Є., провідний інженер; Візер Т.Ф., провідний інженер; Мала В. М., провідний інженер; Ломакін І. А., провідний інженер; Федякіна Н. М., провідний інженер; Редька М. О., аспірант; Шамаханов В. К., аспірант.

**Головуючий на засіданні** – Фоков Олександр Анатолійович.

**Був присутній:** Сергій Вікторович Хорошилов, доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи.

**Порядок денний:**

Обговорення дисертаційного дослідження здобувача Редьки Михайла Олександровича: "Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем", поданого на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

**Науковий керівник:** д-р техн. наук, професор Хорошилов Сергій Вікторович.

Дисертація виконувалась у відділі системного аналізу і проблем керування Інституту технічної механіки НАНУ і ДКАУ.

Тема дисертації затверджена на засіданні Вченої ради Інституту (протокол №11 від 19 грудня 2019 року). Уточнену редакцію теми дисертаційного дослідження затверджено на засіданні Вченої ради Інституту (протокол №8 від 19 жовтня 2023 року).

### **Виступили:**

Здобувач Редька Михайло Олександрович представив презентацію за основними положеннями дисертації "Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем", поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 -Автоматизація та комп'ютерно- інтегровані технології.

*(Редька Михайло Олександрович викладає основні положення своєї дисертації, акцентуючи увагу на актуальності теми дослідження, предметі, об'єкті, задачах, науковій новизні та на результатах проведеного дослідження).*

Після закінчення презентації Редьки М. О. присутніми на захисті фахівцями були поставлені наступні запитання:

Фоков О. А.:

На якому етапі (до чи вже в режимі польоту) відбувається навчання алгоритму керування орієнтацією?

Редька М. О., відповідь:

Для забезпечення безпечності польоту агент проходить навчання попередньо "на землі" і запускається з попереднім уявленням про динаміку, яка його очікує на орбіті. На орбіті після отримання показників від сенсорів модель динаміки уточнюється, крім цього дії агента наближуються до оптимальних на мірі накопичення досвіду.

Алпатов А. П.:

Які особливості бортової реалізації алгоритму і які проблеми потрібно вирішувати при бортовій реалізації цих алгоритмів?

Редька М. О., відповідь:

При застосуванні алгоритму за допомогою визначення ознак необхідно враховувати, що попередня обробка зображення накладає додаткові вимоги до бортової системи. По-перше, для проведення обробки зображень з використанням бортового комп'ютера бажано використовувати процесори з набором мультимедійних інструкцій, тому що процесори загального призначення, як правило, роблять це повільно. По-друге, для впровадження нейромережових моделей краще за все використовувати спеціалізовані чипи. Зараз є розвинена методологія для того, щоб використовувати нейронні мережі на спеціально для цього призначених апаратних засобах, наприклад від компанії Google. Такі апаратні засоби мають значно вищу енергоефективність у порівнянні з процесорами загального призначення та значно швидше

розраховують нейронні мережі. Таких рекомендацій необхідно дотримуватись для впровадження нейромережових бортових систем.

Алпатов А. П.:

Що можна сказати щодо універсальності застосування отриманих результатів?

Редька М. О., відповідь:

Вагомою перевагою моделей для визначення сили є можливість їх застосування для об'єктів космічного сміття будь-якої форми (у т. ч. складної форми, якими можуть бути об'єкти космічного сміття). Нейронні мережі тут можуть проявити свої переваги у повній мірі.

Сюткіна-Дороніна С. В.:

Який метод мінімізації похибки використовується при навчанні Вашої нейронної мережі?

Редька М. О., відповідь:

Метод стохастичного градієнтного спуску, який використовувався для навчання всіх нейромережових моделей в цій роботі. Під час навчання розбіжність між еталонним та прогнозованим значенням визначалась за допомогою середньоквадратичної похибки.

Лапханов Е. О.:

Застосовано нейромережовий підхід для керування кутовою орієнтацією, і Ви зменшили перерегулювання у порівнянні з LQR-регулятором досить суттєво. Це і було ціллю застосування нейромережі, чи ціль була інша саме для задачі керування кутовою орієнтацією?

Редька М. О., відповідь:

Мотивація застосування навчання з підкріпленням для цієї задачі полягала в тому, що маса космічного апарата (КА) змінюється під час роботи на орбіті, а сам метод відводу може застосовуватися для деорбітування декількох об'єктів космічного сміття (ОКС). В такому випадку вектор інерції значно змінюється, первинні параметри вже не будуть підходити і закон керування матиме значно гіршу точність. А навчання з підкріпленням, як відомо з аналізу літератури, дозволяє уточнювати закон керування під час функціонування, що є більш оптимальним для вирішення цієї задачі.

Лапханов Е. О.:

Як часто планується уточнювати масу та тензор інерції?

Редька М. О., відповідь:

Навчання іде постійно. Цикл Виконавця та Критика оновлюється постійно: після оновлення параметрів одного, оновлюються параметри іншого.

Алпатов А. П. :

Які дані потрібні для уточнення алгоритму керування на орбіті?

Редька М. О., відповідь:

Після впровадження на орбіту для уточнення керування орієнтацією необхідні дані від сенсорів про орієнтацію КА, для керування положенням – дані вектору стану (положення та швидкість по координатам  $x$  та  $y$ ).

В обговоренні дисертаційного дослідження взяли участь: Пироженко О. В., Алпатов А. П., Лапханов Е. О., Гольдштейн Ю. М., Храмов Д. О.

Роботу Редьки М. О. оцінено як цікаву, потужну і на часі. Використання нейромереж для динаміки керування – новий напрямок досліджень. Методи, які було використано у дисертаційній роботі, - один із прикладів наближення до практичного застосування нових технологій.

Зазначено, що на публікації Редьки Михайла Олександровича є 8 посилань у Scopus, він має H-index (індекс Гірша) – 2, що є високими показниками для аспіранта. Результати дисертаційної роботи представлено грамотною доповіддю в рамках регламенту.

Доповідачу рекомендовано удосконалити презентацію для остаточного захисту роботи: уточнити інформацію щодо показників математичних моделей, привести графічне представлення результатів у більш зручному для сприймання вигляді, доповнити доповідь посиланнями на подібні наукові дослідження та їх результати, проведені іншими авторами.

За результатами обговорення проведеної презентації було прийнято рішення надати висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Редьки М. О.

## **ВИСНОВОК**

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Редьки Михайла Олександровича на тему: "Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем", поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 -Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**

### **1. Обґрунтування вибору теми дослідження.**

Робота присвячена актуальній науково-практичній проблемі, яка полягає у створенні моделей та методів машинного навчання для підвищення ефективності методу видалення космічного сміття за допомогою іонного променя. Застосування нейронних мереж дозволяє відмовитись від дорогого тестового обладнання, знизити терміни та вартість розробки. У зв'язку з тим, що однією з основних проблем, яка заважає впровадженню місій, є висока вартість систем відведення космічного сміття, аналіз та підвищення ефективності застосування машинного навчання для ключових задач системи відводу іонним променем є актуальною науково-практичною задачею.

**2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Дослідження виконувалися відповідно до планів науково-дослідних робіт ІТМ НАНУ і ДКАУ: "Розробка та вдосконалення методів системного аналізу, керування та дослідження динаміки, спрямованих на створення об'єктів космічної техніки" (тема фундаментальних досліджень ІІІ-110-21, № ДР 0121U100542).

### **3. Мета і завдання дослідження.**

Підвищення ефективності аналізу динаміки та керування супутників шляхом застосування моделей та методів машинного навчання при видаленні космічного сміття іонним променем.

#### **4. Об'єкт дослідження.**

Система активного видалення об'єктів космічного сміття з використанням іонного променя.

#### **5. Предмет дослідження.**

Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування рухом супутників при видаленні космічного сміття іонним променем.

#### **6. Методи дослідження.**

У роботі для створення методу розрахунку сили впливу факела електро-реактивного двигуна на об'єкт космічного сміття використано методи машинного навчання, нейронні мережі прямого розповсюдження, згорткові нейронні мережі, методи комп'ютерного зору. Для синтезу алгоритмів керування орієнтацією та відносним положенням системи безконтактного видалення космічного сміття використовувалися методи навчання з підкріпленням, методи синтезу оптимальних регуляторів. При дослідженні ефективності створених моделей використовувались методи комп'ютерного моделювання.

#### **7. Наукова новизна дослідження:**

1. Вперше розроблено нейромеревеві моделі для визначення сили впливу факела електрореактивного двигуна (ЕРД) за інформацією про його відносне положення та орієнтацію а також за його зображенням.

2. Вперше отримано аналітичні оцінки обчислювальної складності нейромеревевих моделей для визначення сили електрореактивного двигуна, що передається об'єкту космічного сміття.

3. Отримали розвиток методи керування орієнтацією супутника з використанням навчання з підкріпленням у частині застосування моделей динаміки, що уточнюються в процесі його функціонування.

4. За допомогою навчання з підкріпленням синтезовано закон керування відносним рухом космічного апарата із урахуванням кількості включень електрореактивних двигунів, що дозволяє зменшити обсяг витраченого палива.

#### **8. Теоретичне значення.**

У роботі було виконано аналіз сучасного стану застосування моделей та методів машинного навчання для задач керування, а також видалення космічного сміття з навколосемної орбіти. Обґрунтовано вибір методу видалення космічного сміття, виділено ключові задачі підходять для подальшого покращення ефективності за рахунок впровадження нейронних мереж. Запропоновано методологію навчання, тестування та валідації нейронних мереж для ключових задач системи відводу космічного сміття. Виділено параметри, які впливають на точність визначення сили за допомогою нейронних мереж різних видів. Для задач керування орієнтацією та відносним положенням системи відведення запропоновано закони керування, синтезовані за допомогою навчання з підкріпленням.

#### **9. Практичне значення.**

З практичної точки зору запропонована методологія на базі методів машинного навчання має потенціал зменшити витрати на проведення місії з видалення космічного сміття, знизити вимоги до елементів систем керування

(сенсорів, виконавчих органів), відмовитись від спеціального стендового обладнання, знизити терміни та вартість розробки.

**10. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, є обґрунтованими та достовірними. Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю із наявними результатами інших авторів, а також їх апробацією.

### **11. Особистий внесок здобувача.**

Усі наукові результати дисертації одержано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати:

- реалізовано алгоритм навчання із підкріпленням та підібрано відповідні параметри для його навчання, виконано синтез оптимального керування, яке має властивість покращення якості керування орієнтацією КА у процесі його функціонування;

- виконано синтез оптимального керування відносним рухом КА при неповному складі виконавчих органів з використанням алгоритму навчання з підкріпленням; показано, що якість керування в цьому випадку залежить від структури апроксиматорів, типу оптимізаторів, а також параметрів алгоритму навчання;

- розглянуто сучасний стан застосовності машинного навчання у задачах видалення космічного сміття, навігації та контролю орієнтації, виділено очевидні переваги використання методів та моделей машинного навчання для вирішення складних задач, до яких відноситься керування кутовим та відносним рухом КА, планування місій, класифікація космічного сміття, оцінка оптимальної траєкторії сервісного КА для видалення декількох ОКС, передбачення положення ОКС на орбіті тощо;

- запропоновано використовувати нейронні мережі з повністю пов'язаними шарами для вирішення задачі визначення сили впливу факела ЕРД на ОКС по інформації про його відносне положення та орієнтацію; створено датасети для тестування та валідації запропонованого методу, досліджено вплив конфігурації нейромережевої моделі, а також відносного положення та орієнтації ОКС на значення помилки визначення сили; запропонований метод порівняно з традиційним методом за показниками точності за допомогою розрахункових випадків із змінним параметром, а також визначено швидкодію запропонованого методу у порівнянні з традиційним;

- реалізовано застосування згорткової нейронної мережі (ЗНМ) для проблеми визначення сили факелу ЕРД, що передається ОКС, з використанням тільки його зображень; створено графічний датасет для навчання моделей за допомогою програмного забезпечення з відкритим кодом Blender, а також датасет для тестування, за допомогою якого було перевірено точність та швидкодію запропонованого алгоритму у порівнянні з традиційним методом, зроблено висновки про доцільність застосування такого методу.

### **12. Апробація результатів дослідження.**

1. X Міжнародна науково-технічна конференція "Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні". – Дніпро, 2019.

2. VII Міжнародна конференція "Космічні технології: теперішнє і майбутнє". – Дніпро, 2019.

3. VI Міжнародна науково-технічна конференція "Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем" - Дніпро, 2020.

4. Науково-технічна інтернет-конференція "Космічні горизонти" -Дніпро, 2021.

5. XXIV Міжнародна науково-практична конференція "Людина і космос" - Дніпро, 2022.

### **13. Публікації.**

За результатами дослідження опубліковано 14 наукових праць: 3 статті у виданнях категорії А, проіндексованих в базах даних Scopus та Web of Science Core Collection, 3 статті у наукових фахових виданнях України категорії Б та тези доповідей на конференціях.

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:*

1. Хорошилов С. В., Редька М. О. Глибоке навчання для навігації, наведення та керування в космосі / Хорошилов С. В., Редька М. О. //Космічна наука і технологія. – 2021. – 27, № 6 (133). – С. 38-52. (Scopus, Web of Science)

2. Редька М. О., Хорошилов С. В. Визначення силового впливу факела іонного двигуна на орбітальний об'єкт за допомогою глибинного навчання / М. О. Редька, С. В. Хорошилов //Космічна наука і технологія. - 2022. - Т. 28, № 5.- С. 15 – 26. (Scopus, Web of Science)

3. Редька, М. О., Хорошилов, С. В. Згорткові нейронні мережі для визначення впливу іонного променя на об'єкт космічного сміття / М. О. Редька, С. В. Хорошилов //Science and Innovation. - 2023. – 19(6). – С. 19–30. (Scopus, Web of Science)

4. Хорошилов С. В., Редька М. О. Інтелектуальне керування орієнтацією космічних апаратів із використанням навчання з підкріпленням //Технічна механіка. - 2019. -№ 4. – С. 29 -43 (фахове видання категорії Б).

5. Хорошилов С. В., Редька М. О. Relative control of an underactuated spacecraft using reinforcement learning //Технічна механіка. – 2020. - № 4. – С. 43 - 54 (фахове видання категорії Б).

6. Редька М. О. Визначення сили впливу іонного променя на об'єкт космічного сміття по контурах його зображень з використанням глибокого навчання / М. О. Редька //Технічна механіка. – 2023. -№2. – С. 51 – 63 (фахове видання категорії Б).

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

7. Редька М. О., Хорошилов С. В. Керування рухом космічних апаратів з використанням навчання з підкріпленням / X Міжнародна науково-технічна конференція "Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні". – Дніпро, 2019.

8. Редька М. О., Хорошилов С. В. Керування рухом космічних апаратів з використанням штучного інтелекту /VII Міжнародна конференція "Космічні технології: теперішнє і майбутнє". – Дніпро, 2019.

9. Редька М. О., Хорошилов С. В. Застосування навчання з підкріпленням для керування орієнтацією космічних апаратів /VI Міжнародна науково-

технічна конференція "Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем", м. Дніпро, листопад 2020.

10. Редька М. О., Хорошилов С. В. Застосування навчання з підкріпленням для керування відносним рухом космічного апарату з неповним складом виконавчих органів. – /Научно-практична інтернет-конференція "Космічні горизонти", Дніпро, 2021.

11. Redka M. O. Relative control of an underactuated spacecraft using reinforcement learning / M. O. Redka, S. V. Khoroshylov // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції "Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем". – Дніпро. - 2021, 3-5 листопада. - С. 142-143.

12. Редька М. О. Визначення впливу факелу іонного двигуна на орбітальний об'єкт з використанням глибинного навчання / М. О. Редька, С. В. Хорошилов // XXIV міжнародна науково-практична конференція "Людина і космос". – 25-27 травня 2022, Дніпро.

13. Редька М. О., Хорошилов С. В. Deep learning for determination of the ion beam impact on a space debris object /Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та моделювання – 2022". – 16 грудня 2022, Івано-Франківськ.

14. Редька М. О., Хорошилов С. В. Deep learning for determination of the ion beam impact on a space debris object /XXIV Міжнародна науково-практична конференція "Людина і космос". – 25-27 травня 2022, Дніпро.

#### **14. Структура та обсяг дисертації.**

Анотація, вступ, 4 розділи, висновки, список використаних джерел, 2 додатка, 206 сторінок.

#### **15. Оцінка мови та стилю дисертації.**

Дисертацію виконано фаховою українською мовою, текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури.

#### **16. Пропозиції щодо складу *разової спеціалізованої вченої ради*.**

Відповідно до пп. 15, 16 "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 р. № 44, пропонується такий склад разової спеціалізованої вченої ради:

#### **Голова ради:**

1. Алпатов Анатолій Петрович, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор, завідувач відділу системного аналізу і проблем керування.

#### **Рецензенти:**

2. Пироженко Олександр Володимирович, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник;

3. Храмов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник.



**Офіційні опоненти:**

4. Кулабухов Анатолій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри "Кібербезпека та комп'ютерно-інтегровані технології" фізико-технічного факультету ДНУ ім. Олесь Гончара ,

5. Єфименко Микола Володимирович, д-р техн. наук, доцент, професор кафедри "Інформаційні технології електронних засобів" Національного університету "Запорізька політехніка".

Усі члени разової спеціалізованої вченої ради не мають реального чи потенційного конфлікту інтересів щодо здобувача Редьки Михайла Олександровича (зокрема, не є його близькими особами) та його наукового керівника.

У результаті попередньої експертизи дисертації **Редьки Михайла Олександровича** і повноти публікації основних результатів дослідження

**УХВАЛЕНО:**

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Редьки Михайла Олександровича: "Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем".

2. Констатувати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Редьки М. О. відповідає спеціальності 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 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 р. № 44.

3. Рекомендувати дисертацію Редьки М. О. "Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем" до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

4. Рекомендувати Вченій раді ІТМ НАНУ і ДКАУ затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

**Голова ради:**

1. Алпатов Анатолій Петрович, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор, завідувач відділу системного аналізу і проблем керування

**Рецензенти:**

2. Пироженко Олександр Володимирович, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник;

3. Храмов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник.

**Офіційні опоненти:**

4. Кулабухов Анатолій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри "Кібербезпека та комп'ютерно-інтегровані технології" фізико-технічного факультету ДНУ ім. Олесь Гончара ;

5. Єфименко Микола Володимирович, д-р техн. наук, доцент, професор кафедри "Інформаційні технології електронних засобів" Національного університету "Запорізька політехніка".

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації Редьки Михайла Олександровича:

"За" – 21

"Проти" – немає

"Утримались" – немає

Презентація Редьки Михайла Олександровича на 46 стор. додається.

Завідділу, член-кор. НАН України  
д-р техн. наук, професор



Анатолій АЛПАТОВ

Головуючий на засіданні  
старший науковий співробітник  
канд. техн. наук, с.н.с.



Олександр ФОКОВ

Секретар засідання  
провідний інженер



Тетяна ВІЗЕР