

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

на дисертаційну роботу Редьки Михайла Олександровича  
«Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування  
супутників при видаленні космічного сміття іонним променем»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі розробки моделей та методів машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності аналізу динаміки та керування супутників шляхом застосування моделей та методів машинного навчання при видаленні космічного сміття іонним променем.

Об'єкт дослідження – система активного видалення об'єктів космічного сміття з використання іонного променя.

Предмет дослідження – моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем.

Здобувачем для досягнення мети в дисертації були поставлені наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану застосування методів машинного навчання для їх використання для аналізу динаміки, задач керування та видалення космічного сміття у Космосі.

2. Розробити нейромережеву модель для визначення сили впливу факела ЕРД на ОКС за інформацією про його відносне положення та орієнтацію.

3. Розробити нейромережеву модель для визначення сили іонного променя за зображенням об'єкта космічного сміття (ОКС).

4. Отримати оцінки обчислювальної складності нейромережевих моделей для визначення сили ЕРД, що передається ОКС.

5. Розробити метод керування орієнтацією супутника, що дає можливість покращувати якість керування у міру накопичення даних при функціонуванні конкретного об'єкта.

6. Розробити алгоритми імпульсного керування відносним рухом КА на базі навчання з підкріпленням, що дозволяє оптимізувати кількість включень реактивних двигунів.

### **Актуальність теми дисертації**

За даними Міжагентського комітету з космічного сміття кількість об'єктів в навколоземному просторі постійно зростає. Подальше накопичення техногенних об'єктів на навколоземних орбітах є дуже небезпечно тому, що після досягнення деякого критичного рівня може скластися умови, що отримали назву синдрому Кеслера, коли діяльність у космосі стане практично неможливою. Крім того у найближчі роки очікується запуск десятків тисяч

малих космічних апаратів, які можуть суттєво посилити проблему космічного сміття.

У зв'язку з цим космічним співтовариством запропоновано низку концепцій активного видалення орбітальних об'єктів. Одною з перспективних таких концепцій є безконтактне відведення космічного сміття, яка отримала назву «Пастух з іонним променем». Незважаючи на існуючий потенціал цієї концепції, для її практичної реалізації потрібно вирішення ряду науково-технічних задач.

Останнім часом методи штучного інтелекту швидко розвиваються та демонструють вражаючі можливості у вирішенні складних задач, що зумовлює перспективність їх застосування для підвищення ефективності технологій видалення космічного сміття.

Здобувачем поставлена задача дослідити можливість вдосконалення методів керування кутовим та відносним рухом космічного апарата – пастуха (КАП) шляхом використання методів навчання з підкріпленням (НЗП).

З урахуванням наведених обставин тема дисертаційної роботи Редьки М.О. «Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем» є актуальною.

Актуальність роботи також підтверджується зв'язком досліджень з науковими темами, які виконуються ІТМ НАНУ і ДКАУ в рамках національної космічної програми України.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі.**

Наукові положення, висновки, рекомендації є теоретично обґрунтованими та базуються на аналізі науково-технічних джерел за даною темою, гармонійній постановці мети і задач досліджень, використанні низки сучасних і науково обґрунтованих методів досліджень, порівнянні і критичному аналізі та інтерпретації отриманих результатів, якісному формулюванні отриманих висновків.

**Достовірність результатів дисертаційної роботи** не викликає сумнівів, оскільки дослідження проведені на високому методологічному і науково-технічному рівнях. Достовірність результатів досліджень забезпечена застосуванням сучасних методів аналізу отриманих результатів у порівнянні з результатами інших дослідників, забезпечується застосуванням сучасних взаємодоповнюючих методів досліджень, відтворюваністю результатів, їх взаємоузгодженістю й відповідністю відомим даним.

### **Наукова новизна результатів дисертаційної роботи**

Основні наукові положення дисертаційної роботи:

- вперше розроблені нейромережеві моделі для визначення сили впливу факелу іонного двигуна на космічне сміття або за його відносним положенням та орієнтацією або по його зображенням;
- вперше отримані аналітичні оцінки обчислювальної складності нейромережевих моделей для визначення сили впливу факелу іонного двигуна на космічне сміття;
- отримали розвиток методи керування орієнтацією та відносим положенням супутників в частині використання методів навчання з підкріпленням.

Наукова новизна отриманих результатів досліджень відповідає встановленим вимогам, обґрунтована, є коректною.

### **Практична значимість результатів дисертаційної роботи**

Результати досліджень є науковим підґрунтям створення удосконаленої технології видалення космічного сміття іонним променем. Це дає підстави сподіватися на вирішення проблеми космічного сміття у майбутньому.

Здобувачем продемонстрована можливість покращення якості керування орієнтацією КА у процесі його функціонування із використанням навчання із підкріпленням, що дає можливість розробляти системи керування, які можуть покращувати свої характеристики у міру накопичення даних при функціонуванні конкретного об'єкта.

Практична цінність отриманих результатів для космічної галузі полягає також в тому, що розроблені моделі та методи машинного навчання мають потенціал покращити характеристики, зменшити вартість і скоротити терміни створення систем космічного призначення.

### **Повнота викладу результатів дисертаційної роботи в публікаціях**

Дисертантом опубліковано 6 статей: 3 – в фахових виданнях категорії А, включених до «Scopus» та «Web of Science», 3 – в фахових виданнях категорії Б. Серед перелічених статей, 1 стаття здобувачем опублікована без співавторства. 4 статті в співавторстві з науковим керівником.

Опубліковано 8 тез доповідей на Міжнародних конференціях, де були апробовані результати досліджень. Публікації здобувача повністю розкривають основний зміст і наукові положення дисертації.

### **Аналіз змісту і структури дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота, що представляється здобувачем, є закінченою науковою працею.

Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків.

Об'єм дисертаційної роботи складає 206 сторінок друкованого тексту, з них 178 сторінок основного тексту, 93 рисунка та 24 таблиці.

У вступі, здобувачем було обґрунтовано актуальність дослідження, визначено мету та завдання, а також подано наукову новизну, практичне

значення роботи, особистий внесок автора, а також інформацію про публікації та апробацію результатів.

У першому розділі роботи здійснено аналітичний огляд наукових публікацій, присвячених застосуванню методів машинного навчання в космічній галузі. На основі проведеного аналізу автор обґрунтував актуальність обраної теми дослідження та визначив методологічні засади для подальшого дослідження. Зокрема, розглянуто існуючі технології видалення космічного сміття та сформульовано наукові завдання, пов'язані з використанням іонних променів для вирішення цієї проблеми.

У другому розділі автор використовує нейромережеві алгоритми різної архітектури для вирішення задачі визначення сили іонного променя, що необхідно для передачі імпульсу об'єкту космічного сміття з метою його видалення з орбіти. Розглядаються нейронні мережі прямого розповсюдження, згорткові нейронні мережі, а також застосовується обробка зображень для підвищення ефективності нейромережевого підходу. Усі моделі порівнюються з традиційним аналітичним методом за критеріями точності та швидкості. Визначено обчислювальну складність як нейромережевих, так і традиційного методу, а також побудовано графіки для візуалізації результатів.

У третьому розділі розглядається задача керування орієнтацією космічного апарата, а також виявляються основні недоліки традиційного алгоритму керування, що базується на лінійно-квадратичному регуляторі. Використовується методологія навчання з підкріпленням для розробки закону керування, який може вдосконалюватися під час роботи на орбіті. Отриманий закон керування порівнюється з лінійно-квадратичним регулятором за критеріями точності.

У четвертому розділі розглядається задача керування положенням космічного апарата за допомогою двигунів, що не передбачають точного регулювання тяги. Для вирішення цієї задачі використовується методологія навчання з підкріпленням, а також вводиться параметр, що дозволяє оптимізувати частоту умикань двигунів. Закон управління порівнюється за точністю та витратами пального з контролерами, що використовують лінійно-квадратичний регулятор та широтно-імпульсну модуляцію.

Висновки містять повний перелік основних результатів дослідження, проведеного здобувачем під час виконання дисертаційної роботи.

У роботі також є додатки, що містять список публікацій здобувача та таблиці із результатами тестування нейромережевих методів для визначення сили впливу факелу електро-реактивного двигуна на об'єкт космічного сміття.

### **Академічна доброчесність**

Жодних порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні її наукові результати, не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в дисертаційній роботі відсутні. Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві,

використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

### **Зауваження і рекомендації щодо змісту дисертаційної роботи**

1. У роботі використовуються скорочення. Було б доцільно їх навести на окремому аркуші.
2. У п. 4 наукової новизни замість «...Крім цього, можливе покращення якості керування орієнтацією КА у процесі його функціонування завдяки використанню алгоритму навчання із підкріпленням «критик-виконавець» та Гаусівської регресії» краще було б «... що дає можливість покращити ...», бо «можливе покращення» може бути тільки після наступних досліджень.
3. У висновках відсутні кількісні показники, що покращуються.
4. З висновків не зрозуміло чи впроваджені або використовуються десь результати досліджень.
5. У висновках при рішення б задачі досліджень, а саме «Розробити алгоритми імпульсного керування ...» в алгоритмі не відображено «імпульсне» керування.
6. Не визначено який розмір навчальних вибірок є достатнім для кожної з трьох моделей у розділі 3.
7. В розділі 4 не відзначено чи враховувались при моделюванні шуми сенсорів та затримки в контурі керування.
8. В розділі 4 відсутня інформація про те, яким чином визначався показник «Моп», що використовується для аналізу якості керування
9. У назвах рисунків і таблиць є незначні відхилення від стандартів, наприклад, замість «Рисунок 4.47. Залежність ...» повинно бути «Рисунок 4.47. – Залежність ...».

Висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову і практичну цінність результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи в цілому.

### **Висновки**

Дисертація Редьки Михайла Олександровича «Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, є завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу науково-практичну задачу, яка полягає у розробці моделей та методів машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем.

Дисертаційна робота “ Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття

іонним”, за актуальністю і новизною отриманих результатів, їхньою достовірністю й обґрунтованістю, науковою і практичною цінністю, повнотою викладення матеріалу в наукових публікаціях, структурою та обсягом відповідає вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 «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 12.01.2022 р. № 44, а здобувач Редька Михайло Олександрович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології.

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри «Кібербезпеки і комп’ютерно  
інтегрованих технологій»

Дніпровського національного  
університету імені Олеся Гончара



Анатолій КУЛАБУХОВ

Підпис Кулабухова А.М. засвідчую:  
Вчений секретар



Тетяна ХОДАНЕН