

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Стрембовського Володимира Васильовича
«Оптимізація траєкторій руху космічних об'єктів
в атмосфері Землі за тепловим чинником», подану на здобуття
ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика

Актуальність теми дослідження.

На сьогоднішній день накопичення космічного сміття на навколоземних орбітах перетворилася з потенційної загрози на гостру проблему, яка потребує новітніх рішень. Неконтрольоване зростання кількості нефункціонуючих об'єктів створює значні ризики для чинних та майбутніх космічних місій. Одним із найбільш перспективних напрямів зменшення цієї загрози є контрольоване зведення космічних об'єктів (КО) з орбіти для їх подальшого згоряння в атмосфері. Науково-практичні задачі, які поставлені у дисертаційній роботі, зокрема, вимагають визначення та обґрунтування траєкторій, які б гарантували повне термічне руйнування об'єкта без падіння його уламків на поверхню Землі.

Закономірності класичної механіки та термодинаміки, з інноваційними напрацюваннями новітніх обчислювальних технологій покладено в основу вирішення цієї оптимізаційної задачі. Застосування методів штучного інтелекту, зокрема глибинного навчання та генетичних алгоритмів, створюють сучасні напрями у створенні ефективних комплексних підходів до вдосконалення технологій видалення космічного сміття. Важливість забезпечення екологічної безпеки космічного простору підтверджують своєчасність й актуальність дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження виконувалося в рамках індивідуального плану підготовки аспіранта та відповідно до тематики держбюджетного проєкту «Теоретичне і експериментальне обґрунтування автофажних систем відведення космічних об'єктів з низьких навколоземних орбіт» (№ 0120U102254) що фінансувалась Міністерством освіти і науки України в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара МОН України.

Метою дисертаційної роботи є розробка інтегрованої методики, що здатна прогнозувати максимальні теплові навантаження та оптимізувати траєкторні параметри для КО, які входять в атмосферу Землі, шляхом синтезу методів машинного навчання та генетичної оптимізації.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано та вирішено п'ять науково-практичних задач, а саме:

- виконати аналітичний огляд сучасних математичних моделей та інженерних методів прогнозування аеродинамічного нагріву КО;

ідентифікувати підзадачі, у межах яких традиційні підходи потребують уточнення вихідних даних, а також надмірних обчислювальних ресурсів;

- сформувати репрезентативний датасет, що охоплює траєкторні, геометричні та фізико-механічні характеристики КО; забезпечити попередню обробку даних шляхом очищення, нормалізації та генерації розширених комбінацій вихідних параметрів для подальшого використання у моделюванні;

- розробити та здійснити навчання моделей машинного навчання з подальшою оцінкою їх ефективності; провести порівняльний аналіз алгоритмів і визначити оптимальну архітектуру для розв'язання поставленої задачі;

- реалізувати генетичний алгоритм для пошуку оптимальних траєкторних параметрів, що забезпечують максимізацію інтегрального теплового навантаження в межах критичного інтервалу;

- вдосконалити рекомендації щодо вибору початкових умов входу в атмосферу для типових класів КО; сформулювати практичні вказівки для проєктування місій активного або комбінованого видалення космічного сміття з урахуванням впливу теплового чинника.

Чотири розділи, з яких складається дисертація, цілком відображають кожен зі сформульованих задач. Вважаю, що основну мету роботи досягнуто.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у застосуванні передових підходів на базі технологій штучного інтелекту. Вперше в роботі:

- запропоновано комплексну модель машинного навчання для оцінки теплових навантажень на КО під час його руху в атмосфері Землі, що дозволяє проводити всебічний аналіз впливу траєкторних параметрів на формування теплових потоків;

- розроблено гібридний обчислювальний фреймворк, що інтегрує високоточні прогнози теплового потоку, отримані за допомогою нейромережі, з потужним механізмом глобальної оптимізації на основі генетичного алгоритму. Це дозволяє визначати об'єкти, для знищення яких доцільно використовувати відведення в атмосферу землі, оскільки забезпечується повне згоряння об'єкта без утворення небезпечних уламків.

Практичне значення роботи полягає у наданні готового інструментарію для проєктування місій з активного видалення космічного сміття. Запропонована методика може бути використана для вибору оптимальних параметрів входу в атмосферу, що гарантує безпечне знищення об'єктів. Результати дослідження є основою для створення автоматизованих програмних комплексів, які поєднують алгоритми оптимізації, моделі глибинного навчання та теплової руйнації для підтримки прийняття рішень у реальному часі. Крім того, робота має освітню цінність як приклад міждисциплінарного дослідження.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які винесено на захист дисертаційного дослідження.

Основні положення та висновки, що представлені в дисертаційній роботі науково обґрунтовані. Достовірність отриманих результатів забезпечується застосуванням в рамках фундаментальних фізичних законів і припущень і коректних математичних підходів, використанням методів і алгоритмів, що мають належне теоретичне обґрунтування та не суперечать загальновизнаним науковим положенням. Додаткову надійність забезпечено контролем точності обчислень, валідацією моделей на незалежних вибірках.

Дисертаційна робота відповідає вимогам до досліджень даного рівня.

Публікації та особистий внесок здобувача.

За темою дисертації опубліковано 4 статті. Дві статті у фахових виданнях України категорії Б, одна стаття у виданні категорії А (Scopus) та одна доповідь у матеріалах міжнародного конгресу (Scopus).

Основні результати дисертації отримано автором самостійно.

Структура та оформлення роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури (195 джерел) та додатків. Робота містить 40 рисунків та 15 таблиць. Загальний обсяг становить 154 сторінки, що відповідає вимогам освітньо-наукової програми «Прикладна математика». Робота оформлена відповідно до чинних стандартів, написана чіткою та фаховою мовою. Матеріал викладено логічно та послідовно, забезпечуючи цілісність та інформативність викладу.

У вступі автор обґрунтовано доводить актуальність вибраної теми, чітко визначає мету, задачі, об'єкт і предмет дослідження, а також висвітлює наукову новизну та практичну цінність роботи.

У першому розділі надано системний аналітичний огляд сучасних підходів до оцінки теплових навантажень та технологій видалення космічного сміття. Автор демонструє ґрунтовну обізнаність із сучасним станом досліджень, критично проаналізовано суттєвий масив наукових джерел.

Другий розділ присвячено розробці математичної моделі руху орбітального об'єкту в атмосфері Землі, що ґрунтується на відповідних фізичних принципах. З використанням цієї моделі сформульовано задачі оптимізації. Обґрунтовано вибір гібридного підходу, що поєднує нейромережеве прогнозування та генетичний алгоритм з визначенням допустимих діапазонів параметрів. Представлені матеріали свідчать про достатню теоретичну підготовку здобувача, обізнаність із класичними підходами до розв'язання прикладних задач, а також високий рівень компетентності. Це, зокрема, проявляється у здатності самостійно опановувати сучасні методи прогнозування, включаючи методи машинного навчання та генетичні алгоритми з подальшим ефективним застосуванням їх для досягнення поставлених дослідницьких цілей.

У третьому розділі детально описано процес підготовки даних, вибору архітектур машинного навчання та оптимізації гіперпараметрів. Продemonстровано, яким чином підготовлена вибірка та налаштовані моделі машинного навчання інтегруються в подальший процес оптимізації траєкторних параметрів із використанням генетичного алгоритму. Така інтеграція забезпечує послідовність і узгодженість усіх етапів дослідження, що дозволяє ефективно поєднати моделювання з процесом пошуку оптимальних рішень. Даний розділ демонструє методичність і ретельність підходу автора до роботи з даними та їх моделювання.

Четвертий розділ представляє практичну реалізацію розробленої методології. Наведено результати навчання моделей, їх порівняння та зовнішньої валідації. Застосування генетичного алгоритму дозволило отримати практичні рекомендації щодо вибору параметрів маневрів для відведення об'єктів з орбіт Землі, спрямованих на підвищення ймовірності їх повного згоряння в атмосфері. Запропоновані підходи враховують результати моделювання теплового навантаження та можуть бути використані при плануванні місій з активного або комбінованого видалення космічного сміття.

Висновки обґрунтовані проведеними дослідженнями і отриманими результатами, є узгодженими та повністю відображають сутність поставлених у дисертаційній роботі задач.

Водночас, у процесі підготовки дисертаційної роботи автору не вдалося уникнути певних недоліків, серед яких слід відмітити наступні:

1. У першому розділі представлено вичерпний огляд класичних та сучасних методів. Однак перехід до постановки власної задачі у другому розділі, на мій погляд, необхідно робити більш акцентованим. Варто було б чіткіше сформулювати, чому саме комбінація сучасних методів є недостатньою для вирішення поставленої оптимізаційної задачі. Доречно було б підкреслити, що пряме використання чисельних методів для розв'язання рівнянь руху в контурі генетичного алгоритму є обчислювально непомірно дорогим, що безпосередньо і обґрунтовує необхідність розробки швидких моделей на базі методів глибинного навчання.
2. Хоча модель на базі архітектури «Трансформер» демонструє високу точність (коефіцієнт детермінації $R^2=0.97$), ці моделі є фактично «чорними скриньками». У якості побажання, необхідно було б згадати про можливість застосування методів інтерпретованого машинного навчання (наприклад, SHAP або LIME) для аналізу того, які саме вихідні параметри (маса, кут, швидкість) мають найбільший вплив на прогнозований профіль теплового навантаження $q(t)$. Це б додало фізичної глибини результатам моделювання.
3. Результати генетичної оптимізації в п. 4.5 представлені для досить вузького діапазону мас (400-700 кг). Хоча вибір обґрунтовано статистичною поширеністю, варто було б у висновках чітко окреслити

межі застосовності розроблених теплових карт і вказати на необхідність додаткових досліджень з метою визначення інших класів об'єктів (наприклад, малогабаритного сміття < 100 кг або великих ступенів > 1500 кг).

4. В тексті дисертації широко використовуються слова та скорочення англійською мовою, наприклад: LEO, vs, DL, LSTM, ANN, MLP, Transformer, Dataset та інші. Формат підписів рисунків відрізняється від формату згідно існуючих вимог (Наприклад «Рисунок – 2.5. Концепція...» замість «Рисунок 2.5 – Концепція...»).

Зазначені зауваження не мають принципового характеру і загалом не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації, не знижують цінності та достовірності основних науково-практичних результатів, висновків і рекомендацій.

Загальний висновок. Дисертаційна робота Стрембовського В. В. є завершеним самостійним науковим дослідженням, що характеризується актуальністю, високим науковим рівнем, новизною результатів та їх прикладною цінністю. Вважаю, що здобувач Стрембовський В.В. у процесі виконання дисертаційної роботи повністю оволодів методологією наукових досліджень та особисто отримав вагомі наукові результати. Дисертація Стрембовського Володимира Васильовича «Оптимізація траєкторій руху космічних об'єктів в атмосфері Землі за тепловим чинником» є закінченою науковою працею, яка відповідає всім 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 р. № 44 (зі змінами), а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Заступник директора

Інституту технічної механіки

Національної академії наук України і

Державного космічного агентства України

з наукової роботи,

доктор технічних наук, професор



Сергій ХОРОШИЛОВ