

Голові разової спеціалізованої
вченої ради Хмельницького
національного університету
доктору технічних наук, професору
Олегу САВЕНКУ

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Танасійчука Степана Андрійовича

на тему «Методи і засоби керування автономними безпілотними літальними апаратами», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Актуальність теми дисертації. На сучасному етапі безпілотні авіаційні системи відіграють ключову роль як у цивільній індустрії, так і в секторі безпеки й оборони, забезпечуючи автоматизоване спостереження, високоточну просторову навігацію та самостійне транспортування цільових вантажів. Разом із тим, прогресуюче посилення вимог до точності відпрацювання траєкторій за наявності нестационарних збурень середовища та параметричної невизначеності диктує потребу в синтезі нових методів автоматичного регулювання з оптимізованою обчислювальною трудомісткістю.

Функціонуючи як гетерогенні кіберфізичні системи, БПЛА стикаються із суворими апаратними лімітами бортових обчислювачів. Класична теорія робастного керування (передусім апарат ковзних режимів) гарантує інваріантність динаміки, проте її цифрова дискретизація супроводжується ефектом «деренчання» (chattering). Це спричиняє високочастотну пульсацію сигналів у трактах актуації, призводить до прискореної деградації приводів та перевантажує шину передачі даних. З іншого боку, передові парадигми глибокого навчання вирізняються надмірними вимогами до пам'яті та швидкодії, через що їх практично неможливо розгорнути в контурах жорсткого реального часу.

Особливе значення має фаза термінального донаведення, в якій необхідно досягти граничної прецизійності позиціонування без збурення кутової стабілізації платформи. Використання технології цифрових двійників відкриває можливість комплексної верифікації інтелектуальних алгоритмів у віртуальних симуляторах високої вірності за умови суворо детермінованого перебігу обчислень. За таких передумов розробка адаптивних методів регулювання на основі самоеволюційних обчислювальних моделей, орієнтованих на швидку ідентифікацію зовнішніх впливів за мінімального споживання ресурсів, постає як важлива науково-прикладна проблема.

Попри солідну теоретичну базу, детальний критичний аналіз існуючих напрацювань виявляє суттєві суперечності на стику теорії автоматичного керування та комп'ютерної інженерії. Більшість нейромережевих підходів розраховані на стратегічне планування місій і спираються на спеціалізовані співпроцесори (GPU, NPU), що є критичним обмеженням для низькорівневих циклів стабілізації. Традиційні ж регулятори, оптимізовані під звичайні мікроконтролери, позбавлені гнучкості до зміни динаміки завад і провокують паразитарні коливання, що створюють апаратні перевантаження. Тому ключовим відкритим викликом лишається створення гібридних обчислювальних структур, спроможних інтегрувати адаптивні механізми машинного інтелекту, математично гарантовану стійкість та фіксований час найгіршого випадку (WCET) в умовах дефіциту оперативної пам'яті (RAM) бортових контролерів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету. Її зміст відповідає тематиці науково-дослідних робіт за договором про надання послуг №49-2026 та стандартною грантовою угодою № 101191415 — CLOTEX-HUB — DIGITAL-2023-EDIH-04 «Розробка програмного модуля для інтелектуального аналізу та керування автономними безпілотними літальними апаратами (БПЛА), із забезпеченням впровадження спеціалізованих алгоритмів захисту від витоків інформації та протидії зовнішнім деструктивним інформаційно-технічним впливам під час функціонування БПЛА».

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

вперше розроблено:

1) уточнену математичну модель динаміки безпілотного літального апарата, яка, на відміну від існуючих підходів, що базуються на копланарних схемах із недостатньою актуацією, враховує векторну конфігурацію додаткових горизонтальних підрулюючих пристроїв, що дозволило математично реалізувати повну алгоритмічну декупеляцію каналів позиціонування та орієнтації для забезпечення прецизійного маневрування апарата без зміни кутового стану корпусу та створення умов для паралельної обробки обчислювальних потоків керування бортовою системою;

2) метод програмної реалізації інтелектуальних алгоритмів керування у системах жорсткого реального часу, який, на відміну від існуючих засобів впровадження штучного інтелекту на вбудованих платформах, використовує раціональні апроксимації Паде для обчислювально затратних функцій та архітектуру статичних пулів пам'яті для зберігання параметрів нейромережі, що забезпечило гарантовану детермінованість часу виконання обчислювального такту та усунуло ризики фрагментації оперативної пам'яті для підвищення загальної надійності вбудованої обчислювальної системи автономного апарата;

удосконалено:

3) гібридний метод адаптивного керування змінним режимом, який, на відміну від класичних робастних методів, базується на інтеграції інтелектуального нейромережевого спостерігача для онлайн-компенсації нелінійних складових динаміки та збурень, що дозволило суттєво знизити коефіцієнти підсилення розривної частини контролера, забезпечивши мінімізацію ефекту «деренчання» та підвищення енергоефективності актуаторів при збереженні математично доведеної за методом Ляпунова практичної асимптотичної стійкості замкненої системи в усьому просторі станів;

набула подальшого розвитку:

4) архітектура вбудованої обчислювальної структури предиктивного оцінювання збурень на основі рекурентної нечіткої нейронної мережі, яка, на

відміну від існуючих рішень із жорстко заданою топологією обробки даних, забезпечує можливість автоматичної реконфігурації кількості активних обчислювальних вузлів графа та використання внутрішніх ліній затримки для формування динамічної пам'яті системи, що дозволило реалізувати механізм адаптивного керування обчислювальною інтенсивністю алгоритмів та навантаженням на апаратні ресурси в реальному часі відповідно до складності ідентифікованих зовнішніх впливів.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Танасійчука С.А. достатньо обґрунтовані коректним використанням математичного апарату, підкріплені успішною реалізацією, ефективним практичним впровадженням результатів дисертаційних досліджень, яке продемонструвало збігання теоретичних досліджень з реальними результатами. При розв'язанні поставленої науково-прикладної задачі використовувались теорія автоматичного керування, апарат нелінійної динаміки, теорія стійкості Ляпунова, методи штучного інтелекту з використанням нейро-нечіткої логіки, чисельні методи інтегрування та імітаційного моделювання у середовищі MATLAB.

Наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи характеризуються високим рівнем наукової обґрунтованості. Вони ґрунтуються на всебічному аналізі фахової літератури, коректній постановці дослідницьких завдань, залученні сучасного науково-методичного інструментарію та адекватному використанні математичного апарату під час теоретичних розробок.

Достовірність розроблених методів і засобів підтверджена комплексом експериментальних досліджень та коректністю застосованих аналітичних підходів. Сформульовані в роботі положення й практичні рекомендації логічно впливають із проведених аналітичних викладок і є цілком доведеними.

Таким чином, поставлене наукове завдання розв'язано в повному обсязі, а здобувач продемонстрував належний рівень володіння методологією проведення наукових досліджень.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності. За своїм змістом дисертаційна робота

здобувача Танасійчука С.А. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 123 – Комп’ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти та освітньо-науковій програмі ХНУ «Комп’ютерна інженерія» за спеціальністю 123 – Комп’ютерна інженерія. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям комп’ютерної інженерії.

Розглянувши результати перевірки дисертаційної роботи автоматизованим засобом Strike Plagiarism, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Танасійчука Степана Андрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено комплекс імітаційних моделей у середовищі MATLAB, що реалізують концепцію цифрового двійника БПЛА з надлишковою актуацією. Впроваджено програмні модулі адаптивного керування ASMC та самоеволюціонуючої нейромережі RSEFNN, які можуть бути інтегровані у бортові обчислювальні системи реального часу. Отримані результати дозволяють підвищити точність донаведення БПЛА в умовах інтенсивного вітрового навантаження, знизити енергоспоживання актуаторів та гарантувати обчислювальну стабільність систем керування.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у: ТОВ «Жало»; ТОВ «Центр III Технологій»; ГО «ІТ Кластер м. Хмельницького»; у навчальному процесі Хмельницького національного університету; при виконанні договору про надання послуг №49-2026 та стандартної грантової угоди № 101191415 – CLOTEX-HUB – DIGITAL-2023-EDIH-04 «Розробка програмного модуля для інтелектуального аналізу та керування автономними безпілотними літальними апаратами (БПЛА), із забезпеченням впровадження спеціалізованих алгоритмів захисту від витоків інформації та протидії зовнішнім деструктивним інформаційно-технічним впливам під час функціонування БПЛА».

Мова та стиль викладення результатів. Дисертація виконана державною мовою на високому науково-технічному рівні. Матеріал викладено послідовно,

логічно та аргументовано, із дотриманням вимог до академічного стилю та коректним використанням сучасної фахової термінології. Структура роботи є чіткою та виваженою, а зміст досліджень достатньою мірою проілюстровано наочним матеріалом – рисунками й таблицями, що полегшує сприйняття отриманих результатів.

Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 237 найменувань на 27 сторінках та 6 додатків на 21 сторінці. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 211 сторінок друкованого тексту, з них 146 сторінок основного тексту. Дисертація містить 30 рисунків та 32 таблиці.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертації опубліковані у 8 наукових працях, серед яких 6 статей у фахових наукових журналах України, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України категорії Б; 2 публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

Також результати дисертації були апробовані на 2 міжнародних науково-технічних та науково-практичних семінарах, а саме: 2025 IEEE 15th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (м. Афіни, Греція, 2025); VI Міжнародна наукова конференція «Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки (до 40-х роковин аварії на Чорнобильській АЕС)» (м. Тернопіль, Україна, 2026).

Сумарно опубліковані праці віддзеркалюють повноту викладу результатів дисертаційної роботи. Науковий рівень публікацій – високий. У всіх публікаціях здобувачем дотримано принципи академічної доброчесності.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. У виразі (2.16) матриця B та коефіцієнти перетворення ШІМ у тягу розглядаються як стаціонарні константи. Проте при падінні напруги літій-полімерної батареї під час маневрування тягова характеристика актуаторів

суттєво зміщується, створюючи залежність, яка не компенсується номінальною матрицею B^{-1} .

2. В алгоритмі 3.1 зазначено: якщо основні ротори переходять у сатурацію, система штучно знижує вертикальну тягу F_z на користь стабілізації кутів φ , θ . На етапі фінального донаведення (на малих висотах $h < 2$ м) така логіка створює критичну небезпеку просідання апарата та його зіткнення з підстилаючою поверхнею або перешкодами.

3. Закон адаптації ваг нейромережі (2.43) не містить механізму гарантованого експоненційного згасання ваг у квазістатичних режимах, за винятком евристичного L2-обмеження. При польоті в умовах ламінарного постійного потоку це може призводити до дрейфу параметрів моделі в нульовий простір помилки.

4. У підрозділі 2.6 пропонується одночасна онлайн-адаптація за градієнтним спуском параметрів TSK (a_{ij} , b_j) та параметрів Гаусових функцій (m_{ij} , σ_{ij}). Одночасне налаштування форми функцій належності та коефіцієнтів лінійних виходів у замкненому високочастотному контурі (500 Гц) часто спричиняє погану обумовленість оптимізаційної задачі та локальні нестійкості.

5. У дисертації автор припустився деяких орфографічних та пунктуаційних помилок, зустрічаються неузгодженості відмінків слів, пропущені слова тощо, наприклад, у другому абзаці на с. 38 вжито калькований зворот «моделе-орієнтованого проектування» замість стандартизованого в інженерії «модельно-орієнтованого проектування» (як коректно зазначено на с. 30), перші два абзаци підрозділу 1.4 (с. 42) є майже ідентичним тавтологічним дублюванням одного й того самого твердження різними словами, у розшифруванні формули (2.15) на с. 58 допущено опіску: «динамічні зв'язки між різними ступенями свободи, які виникають при швидкому маневруванні» тощо.

Однак зазначені зауваження не є принциповими, істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукової та практичної цінності.

Висновок про дисертаційну роботу. Вважаю, що дисертаційна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії Танасійчука Степана Андрійовича на тему «Методи і засоби керування автономними безпілотними літальними апаратами» виконана на високому науковому рівні, не порушує

принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі інформаційних технологій. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 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 січня 2022 р. № 44 (із змінами).

Здобувач Танасійчук Степан Андрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент:

професор кафедри комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету
ім. Ю. Федьковича,
доктор технічних наук, професор



Дмитро УГРИН

