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

РЕЦЕНЗІЯ
на дисертаційну роботу Танасійчука Степана Андрійовича
на тему «Методи і засоби керування автономними безпілотними літальними апаратами», подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Актуальність теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт університету.

Сьогодні безпілотні авіаційні комплекси знаходять масштабне практичне застосування як у цивільній інфраструктурі, так і у сфері безпеки та оборони, забезпечуючи виконання критичних місій дистанційного зондування, високоточного просторового орієнтування та безпілотної логістики. Разом із тим жорсткість вимог до динамічної точності траєкторного руху в умовах непередбачуваних зовнішніх збурень і параметричної невизначеності об'єкта диктує необхідність формування нових алгоритмів автоматичного регулювання з оптимізованими обчислювальними витратами.

Автономні літальні апарати функціонують як багатокомпонентні кіберфізичні комплекси, апаратна база яких суттєво лімітована за швидкодією та пам'яттю. Застосування класичних робастних підходів, зокрема ковзних режимів змінного порядку, гарантує інваріантність системи, проте їх дискретизація неминуче породжує явище чатерингу («деренчання»). Це генерує високочастотну паразитну динаміку в контурах актуації та призводить до насичення ліній обміну даними. У той же час алгоритми на основі глибоких нейромережевих архітектур вирізняються надлишковою складністю, що робить їх практично непридатними для задач жорсткого реального часу.

Найбільшу складність становить термінальна фаза наведення апарата, де вимагається безпомилкова стабілізація координатного положення без відхилення кутів орієнтації. Залучення парадигми цифрових двійників уможливлює комплексну апробацію синтезованих алгоритмів у високоточних моделюючих комплексах із дотриманням суворого обчислювального

детермінізму. З огляду на це, розроблення адаптивних регуляторів на підґрунті самоеволюційних обчислювальних схем, що реалізують ідентифікацію нестаціонарних збурень у реальному часі за мінімального споживання ресурсів, належить до пріоритетних науково-прикладних завдань.

Незважаючи на значний доробок у цій галузі, аналітичний огляд наявних концепцій демонструє явний розрив між положеннями теорії керування та реальними вимогами комп'ютерної інженерії. Більшість нейромережевих рішень орієнтовані на рівень глобальної навігації і спираються на спеціалізовані прискорювачі (GPU/NPU), що унеможливлює їхнє впровадження у швидкодіючі придонні контури стабілізації. Традиційні ж регулятори, реалізовані на базі бортових мікроконтролерів, не здатні самоналаштовуватися під складні збурення, а породжувані ними високочастотні пульсації виснажують ресурс приводних механізмів і створюють надлишковий трафік на апаратній шині. Відтак залишається відкритою науково-технічна задача створення обчислювальних структур, здатних синтезувати гнучкість онлайнової адаптації штучного інтелекту, строгу аналітичну стійкість та гарантований граничний час виконання (WCET) в межах обмеженого стека оперативної пам'яті (RAM) мікроконтролерних систем.

Зазначена науково-технічна задача відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 123 – Комп’ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, зокрема, такому об’єкту вивчення та діяльності, як «… кіберфізичні системи, Інтернет речей, системи та засоби оброблення великих даних і штучного інтелекту, ІТ-інфраструктури, методи та способи подання, отримання, зберігання, передавання, опрацювання та захисту в них інформації, математичні моделі обчислювальних процесів та технології виконання обчислень, архітектура та організація їх функціонування, інтерфейси та протоколи взаємодії їх компонентів, методи та технології людино-машинної взаємодії та кооперації…».

Дослідження, результати яких наведено в дисертації, проведені в рамках науково-дослідної тематики Хмельницького національного університету – 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», в якій автор дисертації був виконавцем.

Формулювання наукової задачі, мети й задач дослідження.

Здобувачем правильно визначено наукову задачу, об’єкт і предмет дослідження, відповідно до висунутої заздалегідь гіпотези дослідження. Так, науково-прикладною задачею визначено створення комплексних обчислювальних структур, які б поєднували здатність штучного інтелекту до онлайн-адаптації з математично доведеною стійкістю та суворою детермінованістю часу виконання (WCET) в умовах жорстких обмежень на оперативну пам'ять (RAM) мікроконтролерів. Об’єктом дослідження визначено процеси алгоритмічного керування автономними БПЛА в умовах динамічних невизначеностей та зовнішніх збурень. Предметом дослідження визначено методи, алгоритми та обчислювальні структури адаптивного керування автономними БПЛА на основі поєднання теорії ковзних режимів та нейро-нечітких мереж.

Мету дисертаційного дослідження визначено як підвищення ефективності керування автономними БПЛА на етапі донаведення шляхом розробки методів адаптивного керування та обчислювально легких нейромережевих структур, що забезпечують компенсацію нестаціонарних збурень у реальному часі.

Поставлену мету досягнуто в результаті розв’язання таких задач:

- проаналізувати обмеження сучасних методів керування БПЛА за критеріями точності, робастності та алгоритмічної складності для обґрунтування вибору гібридної архітектури «контролер-спостерігач»;

- розробити уточнену математичну модель динаміки БПЛА з надлишковою актуацією (горизонтальними підрулюючими пристроями), забезпечивши програмну декупеляцію каналів керування для точного позиціонування без нахилу корпусу;

- синтезувати адаптивну систему керування на основі управління змінним режимом та розроблено метод мінімізації «деренчання» шляхом впровадження неперервних функцій апроксимації та адаптивного граничного шару;

- спроєктувати архітектуру рекурентної самоеволюціонуючої нечіткої нейронної мережі (RSEFNN) для оцінювання невизначеностей динаміки, здатної самостійно оптимізувати свою структуру під наявні обчислювальні ресурси;

- розробити методику імітаційної валідації алгоритмів у середовищі високої вірності з використанням спектральних моделей турбулентності Драйдена та імітацією стохастичних шумів сенсорних систем;

- провести комплекс чисельних експериментів для оцінки точності позиціонування, обчислювальної стабільності та енергетичної ефективності запропонованого підходу у порівнянні з класичними методами керування.

Наукова новизна одержаних автором результатів полягає в наступному:

1) вперше розроблено 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) удосконалено 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;

3) набула подальшого розвитку 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;

4) вперше розроблено 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.

Короткий аналіз основного змісту дисертації.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг роботи становить 211 сторінок, з них 146 сторінок основного тексту.

У вступі автором обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, основні завдання, предмет та об’єкт дослідження, наведено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан методів і засобів керування автономними БПЛА, зокрема, визначено актуальність та роль автономних безпілотних літальних апаратів у сучасному світі, проаналізована класифікація систем керування БПЛА та їх архітектурні особливості, досліджені архітектурно-алгоритмічні принципи побудови обчислювальних систем керування БПЛА в умовах обмежених ресурсів, проаналізовані технології сприйняття середовища та навігаційні системи для БПЛА. Також, підведено підсумки проведеного аналізу та здійснено постановку задачі дослідження.

У другому розділі розроблене математичне та алгоритмічне забезпечення гібридної системи керування БПЛА, зокрема, розроблено математичну модель динаміки БПЛА з надлишковою актуацією, виконано синтез адаптивної системи донаведення на основі управління змінним режимом, проведено математичне доведення стійкості замкненої системи за методом Ляпунова, запропоновано методи зменшення деренчання в системах зі змінним режимом, спроєктована архітектура вбудованої обчислювальної структури предиктивного оцінювання збурень на основі рекурентної нечіткої нейронної мережі, розроблено метод адаптивного навчання параметрів нейромережі на основі градієнтного спуску.

У третьому розділі виконано верифікацію та дослідження гібридної системи керування, зокрема, розроблено обчислювальну інфраструктуру програмного симуляційного стенду БПЛА, проведено дослідження процесів самоеволюції та навчання нейромережі RSEFNN, виконано валідацію динамічної моделі БПЛА з надлишковою актуацією, проаналізовано чутливість та робастну стійкість гібридної системи.

У четвертому розділі виконано порівняльний аналіз та оцінку ефективності запропонованого підходу, зокрема, описано умови проведення та методологію експериментів, виконано порівняльний аналіз точності позиціонування, аналіз якості сигналів керування, оцінку стійкості до зовнішніх збурень, аналіз надійності вбудованої системи та гарантування детермінованості часу виконання, аналіз енергетичної ефективності, визначено узагальнену порівняльну характеристику (радарну діаграму), проведено статистичну

валідацію методом Монте-Карло, досліджено внесок окремих компонентів, проведено числову верифікацію стійкості за Ляпуновим, порівняльний аналіз із сучасними методами, проведено розширення системи керування на БПЛА з надлишковою актуацією, зведений порівняльний аналіз 4DoF та 6DoF та узагальнення результатів.

У висновках дисертації подано отримані наукові та практичні результати дослідження. Основні висновки і рекомендації логічно витікають із результатів, які наведено у розділах роботи.

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

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові висновки та рекомендації, наведені в дисертації, ґрунтуються на адекватному та цілеспрямованому використанні теорії автоматичного керування, апарату нелінійної динаміки, теорії стійкості Ляпунова, методів штучного інтелекту з використанням нейро-нечіткої логіки, чисельних методів інтегрування та імітаційного моделювання у середовищі MATLAB. Успішна реалізація комплексу імітаційних моделей у середовищі MATLAB, що реалізують концепцію цифрового двійника БПЛА з надлишковою актуацією, а також ефективне впровадження результатів дослідження в комерційну діяльність підприємств демонструє відповідність отриманих теоретичних результатів реальним результатам їхнього використання.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в доведенні теоретичних результатів дисертаційної роботи до реалізації та у безпосередньому використанні їх на підприємствах.

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.

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені у ТОВ «Жало» (акт впровадження від 11.02.2026 р.); ТОВ «Центр ШІ Технологій» (акт впровадження від 15.01.2026 р.); ГО «ІТ Кластер м. Хмельницького» (акт впровадження від 19.03.2026 р.); у навчальному процесі Хмельницького національного університету (акт впровадження від 10.04.2026 р.); 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.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці та обґрунтуванні методу програмної реалізації інтелектуальних алгоритмів керування у системах жорсткого реального часу, архітектури адаптивної системи наведення для безпілотних літальних апаратів, комплексному аналізі методів управління безпілотними літальними апаратами, зокрема дослідження особливостей GPS-позиціонування та застосування інтелектуальних методів управління, а також в проєктуванні архітектури вбудованої обчислювальної структури предиктивного оцінювання збурень БПЛА на основі рекурентної нечіткої нейронної мережі. Усі наукові результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто. У публікаціях, що опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать основні ідеї, теоретична та практична розробка положень, відображених у характеристиці наукової новизни отриманих результатів.

За результатами проведених досліджень основні наукові результати 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.

Апробація матеріалів дисертації.

Апробацію основних положень, ідей, висновків дисертаційної роботи проведено на науковому семінарі кафедри комп’ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету. Наукові результати доповідались та обговорювались на 2 міжнародних науково-технічних та науково-практичних семінарах: 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).

Зауваження.

У результаті розгляду дисертації сформовано наступні зауваження та рекомендації:

1) у Вступі (с. 18-19) варто було не тільки перерахувати українських та іноземних учених, які зробили чималий внесок у розвиток теорії автоматичного

керування, навігації та застосування штучного інтелекту в кіберфізичних системах БПЛА, але й зазначити їх внесок у вирішення такої науково-прикладної задачі;

2) при висвітленні практичного значення отриманих результатів та впровадження результатів дисертаційної роботи у Вступі (с. 22) не зазначено кількісного значення ефекту, який забезпечили розроблені автором програмні модулі адаптивного керування ASMC та самоеволюціонуючої нейромережі RSEFNN;

3) у розділі 2.1 стверджується досягнення повної розв'язки між переміщенням у площині XY та кутами орієнтації завдяки ГПП. Проте в реальному польоті тяга горизонтальних пристроїв F_5, F_6 створює додаткові аеродинамічні сили опору на несучі ротори (ефект скосу потоку та інтерференції), а також паразитні моменти від неідеальності розміщення точки прикладання сили відносно центру мас, що не враховано в ідеальній матриці актуації (2.17);

4) доведення стійкості за Ляпуновим у підрозділі 2.3 виконано в неперервному часі ($V \leq 0$). Проте вся реалізація орієнтована на цифрові мікроконтролери з кроком $\Delta t = 2$ мс. Для SMC перехід у дискретний час породжує явище псевдоковзання та розширення граничного шару, тому теоретична стійкість у неперервній формі не гарантує відсутності дискретних автоколивань без окремого аналізу дискретного аналога функції Ляпунова;

5) у моделі (2.14)–(2.17) зусилля F_5, F_6 вважаються безінерційними силами. У дійсності безколекторні електродвигуни малої тяги разом із пропелерами мають постійну часу розгону/гальмування $\tau_m \approx 20..50$ мс. Нехтування динамікою перехідних процесів актуаторів при синтезі високих коефіцієнтів підсилення ASMC призводить до втрати стійкості контуру в реальних умовах;

6) у дисертації автор припустився деяких орфографічних та пунктуаційних помилок, зустрічаються неузгодженості відмінків слів, пропущені слова тощо, наприклад, в академічній декларації здобувача на титульній сторінці наявна граматична неузгодженість: «під час написання який використовувалися технології...» замість «яких», у переліку скорочень на с. 16 розшифрування англомовного терміна «FLOPS» містить кальку «операцій з плаваючою крапкою» замість нормативного українського математичного терміна «з плаваючою комою», у другому абзаці с. 19 пропущено дієслово-зв’язку «є»: «...що неприйнятним для низькорівневих контурів...» тощо.

Втім, зазначені зауваження суттєво не впливають на загальний, доволі високий, рівень проведеного дослідження.

Загальний висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота Танасійчука Степана Андрійовича на тему «Методи і засоби керування автономними безпілотними літальними апаратами» містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія галузі 12 Інформаційні технології, які в сукупності забезпечують розв'язання актуальної науково-прикладної задачі створення комплексних обчислювальних структур, які б поєднували здатність штучного інтелекту до онлайн-адаптації з математично доведеною стійкістю та суворою детермінованістю часу виконання (WCET) в умовах жорстких обмежень на оперативну пам'ять (RAM) мікроконтролерів.

Дисертаційна робота «Методи і засоби керування автономними безпілотними літальними апаратами», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає пп. 6, 7, 8, 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), а її автор, Танасійчук Степан Андрійовича, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент:
професор кафедри комп'ютерних наук
Хмельницького національного
університету, доктор технічних
наук, професор Олександр БАРМАК

«Підпис Олександра БАРМАКА засвідчую»:
Проректор з НР ХНУ Олег СИНЮК