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 наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

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

У сучасних реаліях безпілотні літальні апарати стали ключовим інструментом як для народного господарства, так і для оборонних задач, охоплюючи повітряне спостереження, координатно-часове позиціонування та адресне доправлення вантажів. Проте підвищення планки до точності просторового руху в нестаціонарному збуреному середовищі вимагає пошуку нових, обчислювально легких підходів до автоматичного керування.

Як типові кіберфізичні системи, БПЛА безпосередньо залежать від обмежених можливостей бортових обчислювачів. Класична робастна теорія (наприклад, алгоритми ковзного режиму) дає високу стійкість, але в дискретному середовищі спричиняє паразитичні пульсації («chattering»), що перевантажують апаратні інтерфейси та зношують приводи. Альтернативні ж моделі глибокого навчання вимагають ресурсів, непосильних для циклів обробки в жорсткому реальному часі.

Особливого значення набуває термінальний етап зближення, коли необхідне прецизійне утримання траєкторії без зміни кутів апарата. Технологія цифрових двійників дозволяє детально протестувати інтелектуальні алгоритми у симуляторах високої вірності із забезпеченням повної детермінованості процесів. Відповідно, синтез методів адаптивного керування на базі самоеволюціонуючих структур для швидкої оцінки збурень за мінімальної ресурсоємності є нагальною інженерною потребою.

Аналіз показав суттєву суперечність між теорією керування та практичною архітектурою бортових систем. Глибокі мережі зосереджені на рівні місій і вимагають апаратних прискорювачів (GPU, NPU), що не вписується у вимоги до швидких контурів кутової стабілізації. Водночас мікроконтролерні робастні регулятори не вміють динамічно адаптуватися до непередбачуваних факторів і провокують високочастотні вібрації актуаторів. Головним невирішеним

викликом лишається синтез обчислювальних моделей, які органічно інтегрують адаптивність ШІ в режимі реального часу, математичні гарантії стійкості та суворо детермінований час відгуку (WCET) за дефіциту оперативної пам'яті (RAM) цільових мікроконтролерів.

Зазначена науково-прикладна задача відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 123 – Комп’ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

Дослідження, результати яких викладено в дисертаційній роботі, проведено під час виконання 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», в якій автор дисертації був безпосереднім виконавцем.

2. Формулювання наукової задачі, мети й задач дослідження.

Здобувачем правильно визначено наукову задачу, об’єкт і предмет дослідження, відповідно до висунутої заздалегідь гіпотези дослідження. Так, об’єктом дослідження є процеси алгоритмічного керування автономними БПЛА в умовах динамічних невизначеностей та зовнішніх збурень. Предметом дослідження є методи, алгоритми та обчислювальні структури адаптивного керування автономними БПЛА на основі поєднання теорії ковзних режимів та нейро-нечітких мереж.

Метою дисертаційної роботи є 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 роботи досягнуто в результати розв’язання таких задач: 1) проаналізовано обмеження сучасних методів керування БПЛА за критеріями точності, робастності та алгоритмічної складності для обґрунтування вибору гібридної архітектури «контролер-спостерігач»; 2) розроблено уточнену математичну модель динаміки БПЛА з надлишковою актуацією (горизонтальними підрулюючими пристроями), забезпечивши програмну декупеляцію каналів керування для точного позиціонування без нахилу корпусу; 3) синтезовано адаптивну систему керування на основі управління змінним режимом та розроблено метод мінімізації «деренчання» шляхом впровадження неперервних функцій апроксимації та адаптивного граничного шару; 4) спроєктовано архітектуру рекурентної самоеволюціонуючої нечіткої нейронної мережі (RSEFNN) для оцінювання невизначеностей динаміки, здатної самостійно оптимізувати свою структуру під наявні обчислювальні ресурси; 5) розроблено методику імітаційної валідації алгоритмів у середовищі високої вірності з використанням спектральних моделей турбулентності

Драйдена та імітацією стохастичних шумів сенсорних систем; 6) проведено комплекс чисельних експериментів для оцінки точності позиціонування, обчислювальної стабільності та енергетичної ефективності запропонованого підходу у порівнянні з класичними методами керування.

3. Наукова новизна одержаних автором результатів:

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..

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки й рекомендації дисертації обґрунтовані коректним та доцільним використанням математичного апарату, успішною

реалізацією комплексу імітаційних моделей у середовищі MATLAB, що реалізують концепцію цифрового двійника БПЛА з надлишковою актуацією, а також програмних модулів адаптивного керування ASMC та самоеволюціонуючої нейромережі RSEFNN, які можуть бути інтегровані у бортові обчислювальні системи реального часу, ефективним практичним впровадженням результатів дисертаційної роботи на підприємствах, що продемонструвало відповідність теоретичних досліджень із реальними результатами застосування.

5. Практичне значення одержаних результатів.

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 ШІ 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».

6. Особистий внесок здобувача.

Усі основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. 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.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать основні ідеї, теоретична та практична розробка положень, а саме: розробка та обґрунтування методу програмної реалізації інтелектуальних алгоритмів керування у системах жорсткого реального часу, архітектура адаптивної системи наведення для безпілотних літальних апаратів, комплексний аналіз методів управління безпілотними літальними апаратами, зокрема дослідження особливостей GPS-позиціонування та застосування інтелектуальних методів управління, а також архітектура вбудованої обчислювальної структури предиктивного оцінювання збурень БПЛА на основі рекурентної нечіткої нейронної мережі. Окрім цього, праці підготовлені та опубліковані здобувачем одноосібно, і в них повністю викладено авторські ідеї щодо аналізу методів і засобів керування автономними БПЛА в умовах воєнних конфліктів та техногенних катастроф.

7. Апробація матеріалів дисертації.

Основні положення та наукові результати доповідалися та обговорювалися 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).

8. Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота 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».

9. Зауваження.

У результаті розгляду дисертації сформовано наступні зауваження та рекомендації:

1) на мою думку, додавання нового нечіткого правила за простим пороговим значенням (формула 2.61) є суто статичним геометричним критерієм. Воно не враховує похибку керування в цей момент – мережа може плодити надлишкові правила у випадках, коли відхилення зумовлене короткочасним некорельованим сенсорним шумом, а не реальним зовнішнім навантаженням;

2) використання функції гіперболічного тангенса замість строгої знакової функції у виразі (2.50) перетворює систему з асимптотично стійкої на практично стійку (Uniformly Ultimately Bounded). За наявності граничного шару стан системи збігається не в нуль, а в деякий окіл ε-околу, розмір якого залежить від φ, що суперечить твердженням про асимптотичне прямування похибки до нуля в розділі 2.3;

3) апроксимація функції гіперболічного тангенсу раціональним дробом Паде другого-третього порядків (вираз 2.53) володіє високою точністю лише в околі нуля ($|x| < 1{,}5$). При значних початкових відхиленнях ($|s/\varphi| >> 1$) похибка наближення Паде призводить до викривлення розрахункового значення насичення або неконтрольованого зростання сигналу керування, якщо не передбачено жорсткого відсікання;

4) основні результати роботи отримані суто шляхом симуляції в середовищі MATLAB, відсутні результати фізичного HIL-тестування на реальному мікроконтролері з вимірюванням напруги, споживання струму та реального часу виконання переривань в умовах апаратних затримок шин I2C/SPI/CAN;

5) в роботі трапляються граматичні, орфографічні, синтаксичні та стилістичні помилки, трапляються неузгодженості відмінків слів, наприклад, на стор. 10 в списку публікацій здобувача за темою дисертації у позиціях № 4 та № 5 назва англомовного журналу подана з різною капіталізацією: «Computer Systems and Information Technologies» та «Computer systems and information technologies», у назві додатка Е в Змісті на стор. 15 допущено орфографічну помилку – надруковано «ПАРАМЕТРИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКПЕРИМЕНТІВ...» замість «ЕКСПЕРИМЕНТІВ», на стор. 26 у переліку рівнів автономності після формулювання «рівень 1 (дистанційне пілотування)» використано кому замість двокрапки або тире, що порушує пунктуаційну однорідність списку тощо.

Проте підкреслюю, що зазначені зауваження істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукову новизну та практичну цінність.

10. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Танасійчука С.А. «Методи і засоби керування автономними безпілотними літальними апаратами» є завершеною науковою роботою, яка містить новий та актуальний науково-прикладний внесок. Усі результати, які виносяться на захист, є достовірними та отримані автором особисто.

Тому, з огляду на вище вказане, вважаю, що дисертаційна робота «Методи і засоби керування автономними безпілотними літальними апаратами», яка подана на здобуття наукового 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 Андрійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент:
доцент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницького національного
університету, доктор філософії Павло РАДЮК

«Підпис Павла РАДЮКА засвідчую»:
Проректор з наукової роботи ХНУ Олег СИНЮК