

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 Інформаційні технології за спеціальністю
123 Комп'ютерна інженерія

Актуальність теми дисертації

Сьогодні спектр застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) невпинно розширюється як у цивільних сферах, так і в оборонному секторі – від повітряного моніторингу до точного позиціонування й автономної логістики. Утім, ускладнення польотних завдань в умовах динамічних невизначеностей та нестаціонарних вітрових збурень вимагає розробки ресурсоефективних методів автоматичного керування.

Будучи кіберфізичними комплексами, БПЛА безпосередньо обмежені потужністю бортової мікроелектроніки. Традиційне робастне керування (зокрема алгоритми ковзного режиму) забезпечує стійкість, однак на практиці породжує ефект чатерингу (chattering). Він перевантажує шину даних і генерує шум у контурах сервоприводів, знижуючи їхній ресурс. Водночас моделі на базі глибокого навчання вимагають обчислювальних потужностей, надмірних для швидких контурів із жорстким реальним часом.

Найбільш критичним є фінальний етап донаведення, де вимагається гранична точність виходу в цільову точку при фіксації кутового положення апарата. Впровадження концепції цифрових двійників дає змогу безпечно перевіряти роботу адаптивних алгоритмів у реалістичних симуляційних середовищах із повним контролем за детермінованістю процесів. Таким чином, створення методів адаптивного регулювання на підґрунті самоеволюціонуючих структур для ідентифікації збурень «на льоту» є актуальним завданням сучасної інженерії.

Аналіз наявного стану досліджень свідчить про розрив між класичним керуванням та реальною архітектурою вбудованих систем. Сучасні нейромережі здебільшого вирішують задачі верхнього рівня і спираються на апаратні прискорювачі (GPU/NPU), що унеможливорює їхнє використання у швидкодіючих

стабілізуючих контурах. І навпаки: прості регулятори, реалізовані на типових мікроконтролерах, не адаптуються до нелінійних збурень та створюють небезпечні високочастотні осциляції актуаторів. Головним нерозв'язаним завданням залишається побудова цілісних обчислювальних моделей, що поєднують онлайн-навчання ІІІ, строгі математичні критерії стійкості та детермінізм часу відгуку (WCET) за мінімального споживання RAM.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у одержанні таких наукових 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.

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.

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, викладених у дисертаційній роботі, забезпечується шляхом коректної постановки дослідницьких завдань, правильного використання математичного апарату для викладення наукових положень дисертації та підтверджується результатами, отриманими у експериментальній частині дослідження.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, логічно впливають із результатів, отриманих за допомогою чітких викладок. Тому можна стверджувати, що висновки та практичні рішення, отримані у роботі, коректні, достатньо обґрунтовані й можуть бути рекомендовані до використання.

Здобувач успішно засвоїв методологію наукової діяльності. Мета дослідження, поставлена у дисертаційній роботі, досягнута у повній мірі.

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

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота Танасійчука С.А. за своїм змістом та напрямом досліджень у повній мірі 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, 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...».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям комп'ютерної інженерії.

За результатами аналізу звіту подібності з перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги можна зробити висновок, що дисертаційна робота Танасійчука С.А. є результатом самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів наведені із зазначенням посилань на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою. Матеріали дисертаційної роботи викладені послідовно та логічно. Стиль тексту дисертації відповідає вимогам, що висуваються до науково-технічних текстів. У дисертації наведено достатньо ілюстрацій у вигляді таблиць та рисунків. У тексті дисертації здобувач використовує загальноприйняту термінологію.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг роботи складає 211 сторінок.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу сучасного стану 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.

Другий розділ дисертації присвячений розробленню математичного та алгоритмічного 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, спроектована архітектура вбудованої обчислювальної структури предиктивного оцінювання збурень на основі рекурентної нечіткої нейронної мережі, розроблено метод адаптивного навчання параметрів нейромережі на основі градієнтного спуску.

Третій розділ дисертації присвячений верифікації та дослідженню гібридної системи керування, зокрема, розроблено обчислювальну інфраструктуру програмного симуляційного стенду БПЛА, проведено дослідження процесів самоєволюції та навчання нейромережі RSEFNN, виконано валідацію динамічної моделі БПЛА з надлишковою актуацією, проаналізовано чутливість та робастну стійкість гібридної системи.

Четвертий розділ дисертації присвячений порівняльному аналізу та оцінці 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 до дисертації систематизовано наукові та практичні результати, які отримані в процесі проведення 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».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені 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 апробовані на 2 міжнародних науково-технічних та науково-практичних семінарах і конференціях, 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).

Загальна сукупність опублікованих праць відображає повноту викладу результатів досліджень, проведених у рамках дисертаційної роботи. Науковий рівень цих публікацій є високим. У всіх наукових публікаціях автором дотримано принципи академічної доброчесності.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Незважаючи на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи, варто відзначити деякі недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. Модель турбулентності Драйдена (вираз 3.2), згідно з військовими стандартами MIL-F-8785C, є статистичним наближенням вільного повітряного простору. На висотах донаведення ($h < 2$ м) переважають вихрові ефекти

поверхні («екранний ефект» землі) та локальні зриви потоку від перешкод, які мають нестационарну просторову структуру, не описувану лінійним $AR(1)$ -фільтром.

2. Вибір кутів Ейлера у формулах (2.2)-(2.8) автор мотивує роботою в зоні малих нахилів. Проте при різких аварійних маневрах або відмові одного з підрулюючих пристроїв кути нахилу можуть перевищувати розрахункові межі, що створює ризик деградації кінематичного блоку через наближення до кінематичної сингулярності матриці $W(\theta)$.

3. У підрозділі 3.3 декларується різке підвищення точності 6DoF порівняно з 4DoF. Водночас інсталяція двох додаткових двигунів, регуляторів ESC та опорних вузлів збільшує суху масу БПЛА та його лобовий переріз, що призводить до скорочення тривалості автономного польоту, проте в роботі відсутній енергетичний баланс повної місії з урахуванням маси надлишкового обладнання.

4. Хоча час одного такту оцінено як детермінований (до 2 мс), сумарна латентність системи включає час зчитування сенсорних шин, фільтрацію шуму та фазовий зсув аналого-цифрового тракту. Не досліджено допустиму критичну межу затримки (time-delay margin), за якої інтегрована система зберігає робастну стійкість.

5. У дисертації не розглянуто проблему спостережуваності невідомих зовнішніх сил при прагненні поверхні ковзання до нуля, через що інтелектуальний контур ризикує перетворюватися на тривіальний статичний компенсатор або провокувати виродження бази нечітких правил під час тривалого утримання траєкторії.

6. Здобувач припустився незначної кількості граматичних, орфографічних, синтаксичних та стилістичних помилок по тексту дисертаційної роботи, наприклад, на рис. 2.3 у підписі правил обертання допущено описку в позначеннях гвинтів: вказано пару « F_1, F_3 (CCW)» замість « F_1, F_3 », у передостанньому абзаці посилання веде не на той вираз – зазначено «Запропонований закон керування (2.25) є послідовним...», хоча повний закон керування описано у виразі (2.26), а (2.25) є лише його еквівалентною частиною, у формулюванні переваг скалярної функції помилки у підпункті 1 пропущено символ змінної: надруковано «змінна (згідно з (2.22) інтегрує в собі...» тощо.

Вважаю, що висловлені вище зауваження не є визначальними та не применшують загальної наукової новизни і практичної значущості результатів дисертаційного дослідження і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

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 завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для комп'ютерної інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю і 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 ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент

завідувач кафедри електронних обчислювальних машин
Харківського національного університету радіоелектроніки
доктор технічних наук, професор



Андрій КОВАЛЕНКО

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ

Проректор з наукової роботи
Харківського національного університету радіоелектроніки
доктор технічних наук, професор



Юрій РОМАНЕНКОВ

“ 16 ” 10 2026 р.