ВИСНОВОК

Національного університету «Чернігівська політехніка» про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Сусла Миколи Юрійовича на тему «Моделі та методи напівнатурного моделювання мультиагентних систем БПЛА», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки

1. Актуальність теми дослідження та її зв'язок з науково-дослідними роботами.

Розвиток безпілотних літальних апаратів та мультиагентних систем на їх основі зумовлює необхідність удосконалення моделей і методів дослідження процесів керування, навігації та координації функціонування окремих БПЛА-агентів. Особливого значення набуває забезпечення виконання маршрутних завдань в умовах відсутності або недоступності супутникової навігації, а також можливість експериментальної перевірки алгоритмів керування до їх безпосереднього застосування на фізичних літальних апаратах.

Застосування програмного моделювання Software-in-the-Loop (SIL) дає змогу досліджувати процеси керування БПЛА у віртуальному середовищі, тоді як напівнатурне моделювання Hardware-in-the-Loop (HIL) передбачає залучення реального польотного контролера до модельованого контуру. Водночас використання фізичного польотного контролера для кожного агента мультиагентної системи потребує значних апаратних ресурсів та ускладнює організацію експериментів.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження гібридних конфігурацій напівнатурного моделювання, у яких апаратні та програмні реалізації польотних контролерів функціонують у спільному середовищі. Таке середовище має забезпечувати узгоджену взаємодію компонентів, розмежування інформаційних потоків окремих агентів та можливість відтворення маршрутних сценаріїв.

Окремою проблемою є забезпечення локального керування положенням БПЛА за відсутності GPS. Використання відносного візуального зміщення, визначеного за даними спрямованої вниз відеокамери, створює можливість стабілізації та маршрутного переміщення без глобальної координатної прив'язки. Проте зміна режимів руху, характеристик позиційної похибки та насичення керуючих каналів потребують урахування поточного стану позиційного контуру під час формування керуючих впливів.

Актуальність дисертаційного дослідження визначається необхідністю розроблення та експериментальної перевірки моделей і методів напівнатурного моделювання мультиагентних систем БПЛА, які забезпечують спільне використання апаратних і програмних компонентів, виконання маршрутних сценаріїв та локальне керування положенням БПЛА за візуальними даними в умовах відсутності GPS.

Дисертаційну роботу виконано в Національному університеті «Чернігівська політехніка» в межах науково-дослідної роботи за державним замовленням «Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів» (номер державної реєстрації 0123U101819, 2023–2025 рр.).

У межах зазначеної НДР здобувачем проведено дослідження з розроблення архітектури гібридного HIL/SIL середовища, агентно-орієнтованих моделей маршрутних сценаріїв, методів просторової стабілізації та адаптивного PID-керування положенням БПЛА.

2. Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності керування мультиагентними системами БПЛА при їх розгортанні для виконання місії за рахунок розроблення моделей і методів напівнатурного моделювання процесів керування, що забезпечують виконання маршрутних сценаріїв і стабілізацію положення БПЛА-агентів за відеоданими в умовах відсутності GPS.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі сформульовано та вирішено такі завдання:

1. Проведено аналіз існуючих моделей, методів і засобів моделювання та керування мультиагентними системами БПЛА, визначено їх особливості та обмеження.

2. Розроблено архітектуру напівнатурного моделювання мультиагентної системи БПЛА, яка забезпечує спільне функціонування апаратних HIL- та програмних SIL-реалізацій польотних контролерів.

3. Розроблено агентно-орієнтовану модель виконання маршрутних сценаріїв БПЛА в середовищі моделювання.

4. Розроблено метод керування положенням і просторової стабілізації БПЛА за візуальними даними в умовах відсутності GPS.

5. Розроблено фазовий метод адаптивного PID-керування положенням БПЛА за візуальним зміщенням.

6. Проведено експериментальну перевірку розроблених моделей і методів та кількісне оцінювання отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – процеси керування БПЛА-агентами за даними бортової системи позиціонування. Предмет дослідження – методи моделювання та керування мультиагентними системами БПЛА та програмно-апаратні засоби їх реалізації.

3. Наукові положення, розроблені особисто здобувачем, та їх новизна.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання щодо розроблення моделей і методів напівнатурного моделювання мультиагентних систем БПЛА та локального керування положенням БПЛА-агентів під час виконання маршрутних сценаріїв за відсутності GPS.

Основні результати, що визначають наукову новизну дисертаційного дослідження, полягають у такому.

Вперше запропоновано:

Метод фазового адаптивного PID-керування положенням БПЛА за візуальним зміщенням, який, на відміну від існуючих, у кожному циклі керування роботою позиційного контуру формує по даним позиційної похибки базову фазову конфігурацію керуючих впливів для польотного контролера із урахуванням заданих параметрів поточного етапу маршрутного сценарію, що забезпечує підвищення надійності проходження маршрутного сценарію до 92 відсотків.

Удосконалено:

Метод навігації БПЛА при його розгортанні в ході виконання місії, що базується на програмно визначених за допомогою середовища моделювання маршрутах переміщення, як послідовності просторових векторів, та моделі виконання маршрутного сценарію з визначенням зміщення позиції по відео зображенню у поєднанні з незалежним вертикальним контуром утримання висоти, що забезпечує просторову стабілізацію БПЛА без використання GPS із середньою абсолютною похибкою за кожною з горизонтальних осей до 8 пікселів у модельованих умовах.

Набули подальшого розвитку:

Моделі та програмно-апаратна архітектура напівнатурного моделювання мультиагентних систем БПЛА, яка, на відміну від існуючих, передбачає спільне використання інтегрованого віртуального імітаційного середовища, апаратних засобів Hardware-in-the-Loop (HIL) та програмних емуляторів Software-in-the-Loop (SIL) для відтворення процесів керування БПЛА-агентами у складі мультиагентної системи, що забезпечує дослідження динаміки виконання польотних завдань у реальному часі.

Отримані наукові результати конкретизовано в архітектурних рішеннях, формальних моделях маршрутних сценаріїв, алгоритмах керування та програмно-апаратних реалізаціях.

Розроблено агентно-орієнтовану модель БПЛА, у якій окремий агент представлений сукупністю локального стану, маршрутного сценарію, контуру

керування та правил переходів між станами. Маршрут формалізовано як послідовність параметризованих маршрутних кроків, а його виконання організовано на основі скінченного автомата.

Запропоновано механізм віртуального дрейфу, що забезпечує зв'язок між параметрами маршрутного кроку та контуром візуальної стабілізації без використання глобальних координат.

Розроблено фазовий механізм адаптації PID-регулятора, що враховує характеристики позиційної похибки, параметри маршрутного кроку, нормований показник якості візуального оцінювання, поперечне відхилення та насичення керуючих каналів.

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

Обґрунтованість наукових результатів забезпечується системним і порівняльним аналізом існуючих підходів, застосуванням методів агентно-орієнтованого моделювання, теорії скінченних автоматів, імітаційного та напівнатурного моделювання, PID-регулювання, адаптивного керування і статистичного аналізу експериментальних даних.

Достовірність результатів підтверджується експериментальною перевіркою розроблених моделей і методів у програмних SIL- та апаратно-програмних HIL-конфігураціях, а для методу просторової стабілізації – також натурними експериментами.

Для експериментального дослідження створено середовище на основі Gazebo, ArduPilot, ROS, MAVROS і фізичного польотного контролера Pixhawk.

Працездатність гібридної архітектури підтверджено на конфігурації одного HIL- та трьох SIL-агентів. Експериментально перевірено одночасне функціонування чотирьох БПЛА під час зльоту, переміщення до заданих положень і стабілізації. У дослідженій конфігурації забезпечувалося моделювання в реальному часі, а обмін MAVLink-повідомленнями відбувався без зафіксованих втрат пакетів.

Для перевірки маршрутного керування виконано п'ять запусків у SIL-конфігурації та три запуски у HIL-конфігурації. Середній час виконання маршруту становив відповідно 35,12 та 44,58 с, а середня позиційна похибка – 91,46 та 106,60 пікселя. Отримані результати підтверджують працездатність маршрутного керування в обох досліджених конфігураціях.

Метод просторової стабілізації перевірено в модельованих і натурних умовах. У модельованому експерименті середні абсолютні відхилення становили 6,78 і 6,55 пікселя, а в натурному – 15,60 і 37,26 пікселя за двома координатними напрямами. Вертикальний контур забезпечував вихід на задану висоту та її подальше утримання.

Експериментальне оцінювання фазового адаптивного PID-регулятора виконано шляхом порівняння з регулятором із фіксованими коефіцієнтами за однакових умов SIL-моделювання.

Загалом проведено 100 запусків: 50 із використанням FIXED_PID і 50 із використанням ADAPTIVE_PID.

За результатами експериментів:

- для FIXED_PID успішно завершено 35 із 50 маршрутів, або 70 %;
- для ADAPTIVE_PID успішно завершено 46 із 50 маршрутів, або 92 %;
- абсолютне підвищення частки успішного завершення маршруту становило 22 відсоткові пункти;
- відмінність між частками успішного завершення маршрутів була статистично значущою за двобічним точним критерієм Фішера;
- середня частка циклів з активною ознакою насичення керуючих каналів зменшилася з 52,60±4,66 % до 48,00±4,84 %, а відмінність залишилася статистично значущою після поправки Холма ($p < 0,001$);
- середній час успішного проходження маршруту становив 144,63±15,26 с для FIXED_PID та 141,35±31,00 с для ADAPTIVE_PID, при цьому відмінність була статистично значущою ($p = 0,027$ після поправки Холма), хоча різниця середніх значень становила лише 2,27 %.

Для порівняння неперервних характеристик керування використано критерій Манна–Вітні з поправкою Холма на множинні порівняння.

За агрегованими показниками позиційної похибки, зокрема середньою похибкою, RMSE, 95-м процентилем, кінцевою та поперечною похибками, статистично значущих відмінностей між FIXED_PID та ADAPTIVE_PID після поправки Холма не встановлено.

Таким чином, основною експериментально підтвердженою перевагою фазового адаптивного PID-керування є підвищення частки успішно завершених маршрутів та зменшення частки циклів із насиченням керуючих каналів у досліджених умовах.

Межі застосування результатів визначаються умовами експериментальної перевірки. Фінальну кількісну валідацію адаптивного PID-керування проведено виключно в SIL-середовищі для одного заданого квадратного маршруту. HIL- та натурні експерименти для фінальної конфігурації цього методу не проводилися.

Наведені показники позиційної похибки отримано в координатах зображення, тому вони не є безпосередньою метричною оцінкою просторової похибки фізичного БПЛА.

Сукупність застосованих методів, експериментальних результатів та статистичних перевірок забезпечує обґрунтованість основних висновків дисертаційного дослідження в межах визначених експериментальних умов.

5. Теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження.

Теоретичне значення отриманих результатів полягає в розвитку моделей і методів напівнатурного моделювання мультиагентних систем БПЛА та формалізації процесів локального керування БПЛА-агентами.

Розроблена архітектура HIL/SIL середовища визначає принципи спільного функціонування апаратних і програмних реалізацій польотних контролерів у єдиному модельованому середовищі з незалежними каналами інформаційного обміну.

Агентно-орієнтована модель маршрутного сценарію забезпечує формальне представлення станів БПЛА, параметризованих маршрутних кроків і правил переходів між ними.

Розроблений метод просторової стабілізації визначає спосіб використання відносного візуального зміщення для горизонтального керування БПЛА без глобальної координатної прив'язки із застосуванням незалежного вертикального контуру підтримання висоти.

Фазовий метод адаптивного PID-керування формалізує механізм визначення поточної фази роботи позиційного контуру та відповідної зміни коефіцієнтів регулятора з урахуванням характеристик похибки, параметрів маршрутного сценарію й обмежень керуючих каналів.

Практичне значення полягає у створенні програмно-апаратного середовища та алгоритмів, які можуть використовуватися для експериментальної перевірки процесів керування БПЛА до переходу до повномасштабних натурних випробувань.

Розроблені моделі маршрутних сценаріїв, методи просторової стабілізації та PID-керування отримали програмну реалізацію мовою Python і були інтегровані в експериментальне середовище та діючі макети квадрокоптерних БПЛА.

Результати дослідження впроваджено:

- Під час виконання науково-дослідної роботи за державним замовленням «Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів» (номер державної реєстрації 0123U101819, 2023–2025 рр.).
- У Державному науково-дослідному інституті випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки для проведення натурних досліджень та відпрацювання програм і методик випробувань безпілотних авіаційних комплексів.
- У навчальному процесі Національного університету «Чернігівська політехніка» з підготовки бакалаврів, магістрів та аспірантів.

Відповідні документи, що підтверджують упровадження результатів дисертаційного дослідження, наведено в додатку Б дисертації.

6. Апробація результатів дослідження.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на таких наукових і науково-практичних конференціях:

- V Міжнародна науково-практична конференція «Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2024)» (Чернігів, Україна, 12 грудня 2024 р.).
- 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2025), 2025 p.
- 13th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2025) (Глівіце, Польща, 2025 р.).

Матеріали апробації результатів дисертаційного дослідження відображено у відповідних наукових публікаціях. Підтвердні матеріали наведено в додатку В дисертації.

7. Повнота викладення основних наукових результатів дисертації в публікаціях та особистий внесок автора.

Основні положення та результати дисертаційного дослідження відображено у шести наукових працях, з яких три висвітлюють основні наукові результати дисертації та три засвідчують апробацію її матеріалів.

Наукові публікації охоплюють основні складові дослідження: просторову стабілізацію квадрокоптера за відеоданими без GPS, напівнатурне моделювання маршрутних сценаріїв мультиагентної системи БПЛА, фазове адаптивне PID-керування за візуальним зміщенням та розроблення гібридного HIL/SIL середовища.

Усі наукові результати, що становлять основний зміст дисертаційної роботи та виносяться на захист, отримано здобувачем особисто.

Особистий внесок здобувача в наукові праці, підготовлені у співавторстві, полягає в розробленні та програмній реалізації моделей і

методів, створенні й налаштуванні експериментального середовища, проведенні SIL-, HIL- і натурних експериментів, статистичному опрацюванні та аналізі отриманих результатів.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці з основними науковими результатами дисертації

1. Сусло М. Ю., Казимир В. В. Метод стабілізації квадрокоптера в заданій позиції з просторовим PID-регулюванням за відеоданими без GPS. Технічні науки та технології. 2026. № 2(44). С. 306–316. DOI: 10.25140/2411-5363-2026-2(44)-306-316.

Особистий внесок здобувача: розроблення та програмна реалізація методу просторової стабілізації БПЛА за візуальним зміщенням, інтеграція сигналів візуального зміщення в контур PID-керування, проведення модельованих і натурних експериментів, оброблення та аналіз отриманих результатів.

2. Сусло М. Ю., Казимир В. В. Напівнатурне моделювання маршрутних сценаріїв для мультиагентної системи БПЛА. Наука і техніка сьогодні. 2026. № 5(59). С. 6049–6068. DOI: 10.52058/2786-6025-2026-5(59)-6049-6068.

Особистий внесок здобувача: розроблення агентно-орієнтованої моделі виконання маршрутних сценаріїв БПЛА, формалізація структури маршрутного сценарію та механізму його виконання, програмна реалізація маршрутного керування, проведення експериментів у SIL- та HIL-конфігураціях, аналіз отриманих результатів.

3. Suslo M., Kazymyr V. Adaptive PID Control of UAV Position Using Visual Displacement. Computer Systems and Information Technologies. 2026. No. 3. P. 58–68. DOI: 10.31891/csit-2026-3-6.

Особистий внесок здобувача: розроблення фазового методу адаптивного налаштування коефіцієнтів PID-регулятора, програмна реалізація адаптивного регулятора, розроблення методики експериментального дослідження, проведення серії SIL-експериментів, статистичне опрацювання та порівняльний аналіз результатів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Сусло М. Ю., Олексієнко П. Д., Сігута А. В., Казимир В. В. Напівнатурне моделювання процесів керування роєм дронів. Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2024) : V Міжнародна науково-практична конференція (Чернігів, 12 грудня 2024 р.) : тези доповідей. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. С. 183–184.

Особистий внесок здобувача: участь у розробленні та дослідженні засобів напівнатурного моделювання мультиагентної системи БПЛА, реалізація та експериментальна перевірка компонентів модельованого середовища.

5. Suslo M., Kazymyr V., Oleksiienko P., Kagitin D. Semi-Physical Modeling of Drone Swarm Control Processes. 2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). IEEE, 2025. P. 102–108. DOI: 10.1109/ACIT65614.2025.11185750.

Особистий внесок здобувача: участь у розробленні та програмній реалізації гібридного HIL/SIL середовища моделювання, інтеграція програмних і апаратних компонентів системи, налаштування експериментального середовища та участь в аналізі результатів моделювання.

6. Kahitin D., Kazymyr V., Suslo M., Yatchenko Y., Oleksiienko P. Drone Positioning in a Specified Location Using Visual Data Under GPS-denied Conditions. 2025 IEEE 13th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Vol. 1. Gliwice, Poland, 2025. P. 318–323. DOI: 10.1109/IDAACS68557.2025.11322385.

Особистий внесок здобувача: налаштування камери та експериментального середовища, інтеграція модуля оцінювання візуального зміщення з програмним контуром керування БПЛА, оброблення отриманих компонент зміщення та участь в експериментальній перевірці системи.

8. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Сусла Миколи Юрійовича на тему «Моделі та методи напівнатурного моделювання мультиагентних систем БПЛА» є самостійним завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне наукове завдання щодо розроблення моделей і методів напівнатурного моделювання мультиагентних систем БПЛА та локального керування БПЛА-агентами в умовах відсутності GPS.

У дисертаційній роботі отримано наукові результати, що характеризуються науковою новизною, теоретичним і практичним значенням. Розроблено архітектуру гібридного HIL/SIL середовища, агентно-орієнтовану модель виконання маршрутних сценаріїв, метод просторової стабілізації БПЛА за візуальними даними та фазовий метод адаптивного PID-керування положенням БПЛА.

Основні результати обґрунтовано теоретичними положеннями, математичними моделями, програмною реалізацією та експериментальними дослідженнями.

Експериментально підтверджено працездатність гібридної HIL/SIL архітектури, можливість виконання маршрутних сценаріїв за відсутності GPS та ефективність застосування фазового адаптивного PID-керування в досліджених умовах SIL-моделювання.

Застосування розробленого методу фазового адаптивного PID-керування в досліджених умовах SIL-моделювання забезпечило підвищення частки успішно завершених маршрутів із 70 % до 92 % порівняно з PID-регулятором із фіксованими коефіцієнтами.

Результати дисертаційного дослідження мають практичне значення, пройшли апробацію на наукових конференціях, відображені в наукових публікаціях та впроваджені в науково-дослідну діяльність і навчальний процес.

За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота відповідає спеціальності

122 «Комп'ютерні науки» та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року № 261 (зі змінами).

Основні наукові результати дисертації опубліковано відповідно до вимог Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами).

Рекомендувати дисертацію Сусла Миколи Юрійовича на тему «Моделі та методи напівнатурного моделювання мультиагентних систем БПЛА» до публічного захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для присудження Суслу Миколі Юрійовичу ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Головуючий
завідувач кафедри інформаційних
та комп'ютерних систем,
к. т. н., доцент Роговенко А.І.

Підпис Роговенка А. І.
засвідчую
Провідний фахівець
відділу кадрів Тетяна ТЧАЧЕНКО
«10» 10 2026 р.