

ВІДГУК

опонента на дисертаційну роботу Ключнікова Ігоря Миколайовича «Методологія, моделі та інформаційна технологія забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології

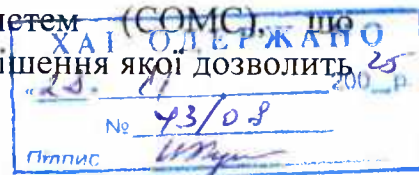
Актуальність теми дисертаційної роботи.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) сьогодні посідають ключове місце серед сучасних інтелектуальних технічних засобів і активно застосовуються для реалізації широкого спектра завдань у різних галузях – від цивільної та промислової до оборонної та гуманітарної. Вони забезпечують виконання операцій моніторингу та інспектування інфраструктурних об'єктів, екологічного спостереження, доставки вантажів і медичних препаратів, контролю безпеки на територіях та в умовах надзвичайних ситуацій.

Сучасний етап технологічного прогресу характеризується формуванням інтегрованих сервісних екосистем, серед яких концепція «Безпілотний літальний апарат як послуга» (Unmanned Aerial Vehicle as a Service, UAVaaS, UAVaaS) набуває ключового значення. Ця парадигма передбачає перетворення флоту дронів на універсальну платформу для надання послуг за принципом «сервісу за запитом», абстрагуючи користувача від технічної складності управління. Сфери застосування UAVaaS стрімко розширюються, охоплюючи логістику та доставку, моніторинг критичної інфраструктури, забезпечення безпеки, телекомунікації та екстрене реагування.

Однак масштабне впровадження даної концепції суттєво обмежене проблемою забезпечення гарантоздатності, яка є комплексною характеристикою, що об'єднує надійність, доступність, безпеку та захищеність. Специфіка UAVaaS полягає у функціонуванні у відкритому, часто несприятливому середовищі, де такі фактори, як погодні умови, перешкоди (навмисні або природні) та обмежений ресурс бортових джерел живлення, становлять пряму загрозу стабільності функціонування сервісів, що розгортаються. Критичним викликом є забезпечення безпеки та стійкості до кібератак, оскільки втрата контролю над апаратом, що виконує критичні завдання, може призвести до серйозних наслідків. Крім того, складність управління цілим флотом, забезпечення стабільного зв'язку та необхідність інтеграції з зовнішніми системами створюють додаткові потенційні проблеми. Вирішення цих проблем вимагає розробки моделей, методів та методології, які спрямовані на створення сервіс-орієнтованих систем та основі БПЛА, які враховують стан апаратів, зовнішні умови та ризики.

Таким чином, тема дослідження, що пов'язана з забезпеченням гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем (СОМС), що створюються на базі БПЛА є **актуальною**, успішне вирішення якої дозволить



забезпечити широкомасштабну інтеграцію безпілотних технологій у інфраструктуру суспільства.

Ступінь достовірності та обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Достовірність отриманих наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується:

1) використанням комплексу взаємодоповнюючих теоретичних і прикладних методів дослідження, зокрема методів ймовірнісного аналізу, надійності і живучості, теорії систем та онтологічного представлення та виведення знань, що дозволило адекватно описати процеси функціонування БПЛА при виконанні типових завдань у складі сервіс-орієнтовних систем;

2) коректною постановкою завдань та обґрунтованістю припущень, зроблених при розробленні моделей і методів, а також значень вхідних параметрів для моделювання, виходячи з досвіду експлуатації та характеристик БПЛА та автоматичних обмінно зарядних станцій (АОЗС), які використовуються з функціонуючих проєктах з розгортання сервісів на їх основі;

3) зведенням отриманих математичних залежностей до раніше відомих при застосуванні граничних значень параметрів, які не були раніше враховані;

4) практичним впровадженням і позитивним досвідом використання отриманих результатів;

5) збігом результатів розрахунку показників функційної надійності на основі марковської моделі, отриманих з використанням аналітичних виразів, з результатами, отриманими з використанням чисельних методів для усталеного режиму;

6) апробацією матеріалів на всеукраїнських, міжнародних наукових конференціях і семінарах різного рівня.

Впровадження результатів, що підтверджується відповідними актами, підсилює ступінь обґрунтованості та достовірності отриманих результатів.

Тому вважаю, що наукові положення, висновки і рекомендації, що представлені в дисертаційній роботі є обґрунтованими та достовірними.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи та їх загальнонаціональне та світове значення.

До наукової новизни результатів представленої дисертаційної роботи та їх загальнонаціонального та світового значення можна віднести наступне:

1) вперше розроблено методологію побудови гарантоздатних сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі БПЛА (СОМС БПЛА), яка, на відміну від відомих, базується на концепції побудови гарантоздатних (надійних і безпечних) систем із недостатньо надійних і безпечних елементів та їх множин (апаратів та їх роїв) з врахуванням функційних і просторових обмежень;

2) вперше розроблені аналітичні моделі для опису процесів розгортання та надійнісної поведінки СОМС БПЛА при виконанні типових завдань, які, на відміну від відомих, представлені залежностями, що враховують таксономію,

яка описує сутності за ієрархією ознак «завдання – тип покриття – тип множини БПЛА – види працездатності – типи моделей»;

3) вперше розроблений метод формування структури та складу СОМС БПЛА, який на відміну від відомих базується на визначенні зв'язків між завданнями, умовами виконання, технічними характеристиками елементів СОМС, а також на моделях їх функціонування та оцінювання гарантоздатності;

4) удосконалену концептуальну модель СОМС БПЛА у вигляді холодної мультиагентної системи, яка складається з холонів керування, виконання та забезпечення, і описує структуру системи, властивості та взаємозв'язки холонів-агентів, які формуються для виконання різноманітних завдань і представляють собою цілісні конструкції, можуть розглядатися як компоненти системи вищого рівня, або як цілі, що складаються з інших холонів як підструктур;

5) удосконалені моделі функційної надійності СОМС БПЛА, які враховують фрагментацію цільової області, варіанти формування маршрутів для її покриття в умовах можливих відмов БПЛА та підсистеми обслуговування, а також деградацію структури і характеристик апаратів та якості виконання завдань;

6) подальший розвиток моделей систем масового обслуговування для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА, шляхом врахування можливості відмов внаслідок фізичних причин та кібератак, параметрів процесів відновлення та профілактичного обслуговування БПЛА, а також процесів некерованої та керованої деградації якості виконання завдань;

7) подальший розвиток марковської моделі готовності СОМС БПЛА з урахуванням кібератак на інформаційні активи, зокрема, навігаційних систем, сенсорного обладнання та каналів управління, що описує стани втрати працездатності внаслідок атак і аварійного закінчення місії.

Практичне значення отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що основні наукові положення дисертації доведено до практичної реалізації у вигляді інструментальних засобів планування застосування БПЛА для виконання завдань покриття множини визначених точок та забезпечення фізичної безпеки об'єктів критичної інфраструктури; IDEF0-діаграми, яка описує процес перетворення інформації під час підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА та архітектури СОМС БПЛА. Зазначені інструментальні засоби, IDEF0-діаграма та архітектура СОМС БПЛА утворюють інформаційну технологію забезпечення підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА.

Повнота викладу наукових положень, висновків, результатів і рекомендацій в опублікованих роботах.

За темою дисертації опубліковано 54 наукові праці з яких: 20 статей у періодичних наукових виданнях України, включених до Переліку наукових

фахових видань (з них 2 – у наукових виданнях категорії А, 4 – у виданнях, що проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus, з яких 2 – у виданнях віднесених до третього квартиля (Q3)); 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав за напрямом дисертації (з них 4 – у наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Scopus та віднесених до першого та другого квартиля (Q1, Q2), 1 – до третього квартиля (Q3)); 3 розділи в колективних зарубіжних монографіях, які проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus, 2 розділи в колективній вітчизняній монографії; 3 патенти (з них 1 на винахід) та 2 договори на передачу авторських прав; 19 публікацій, що засвідчують апробацію результатів

Представлені публікації в повній мірі відображають основні положення та результати дисертаційної роботи. Реферат повністю відповідає змісту дисертації.

Відсутність (наявність) академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації

Аналіз змісту та висновків дисертаційної роботи надає підстави зробити висновок, що дисертаційна робота Ключнікова Ігоря Миколайовича є результатом самостійних оригінальних досліджень і не містить елементів академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 490 стор., з яких зміст на 8 сторінках, вступ на 11 сторінках, перелік умовних скорочень на 3 сторінках, основний текст на 308 сторінках, список використаних джерел із 229 найменувань на 28 сторінках; 26 таблиць та 98 рисунків.

В **анотації** наведено загальну характеристику роботи і список опублікованих праць за темою дисертації.

У **вступі** сформульовано науково-прикладну проблему, обґрунтовано вибір теми дисертації і її актуальність, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи наукового дослідження. Викладено наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів дослідження, наведені відомості про особистий внесок здобувача, про апробацію і публікації результатів дисертаційної роботи, зв'язок роботи з науковими темами.

У **першому** розділі наведено огляд стану наукових досліджень в області оцінювання та забезпечення гарантоздатності складних технічних систем, у тому числі побудованих з використанням БПЛА. Визначено завдання дослідження.

Другий розділ присвячено розробленню концепції, принципів, моделей і методів, які утворюють методологію побудови сервіс-орієнтовних систем на основі БПЛА, онтологічних моделей, концептуальної моделі СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи, а також моделей розгортання систем на основі БПЛА. Запроновано концептуальну модель СОМС БПЛА у

вигляді холоноїчної мультиагентної системи (ХМАС), яка описує структуру системи, властивості та взаємозв'язки холонів-агентів. Представлено базову онтологію та онтології моделей функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА.

В *третьому* розділі представлено розроблені моделі систем масового обслуговування (СМО) для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА. Розглядаються різні моделі СМО: без втрат замовлень, які обслуговуються; із втратами замовлень, які обслуговуються, через відмови БПЛА. В результаті проведення досліджень було отримано залежності зміни фінальних імовірностей перебування системи у різних станах.

В *четвертому* розділі розроблено моделі для опису процесів розгортання та оцінювання функційної надійності СОМС БПЛА при виконанні завдань моніторингу, які, враховують ієрархією ознак «завдання – тип покриття – тип множини БПЛА – види працездатності» з урахуванням процесів деградації. Також розроблено та досліджено марковську модель готовності СОМС БПЛА для оцінювання впливу кібератак на гарантоздатність.

П'ятий розділ присвячено розробленню методу формування структури та складу СОМС БПЛА, який дозволяє визначати комплекс компонентів для розгортання різноманітних сервісів з виконання завдань відповідно до вимог (функційних та нефункційних) та параметрів середовища та ґрунтується на онтологіях: базовій, моделей функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА.

Шостий розділ дисертації містить описи розробленої інформаційної технології для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА, інструментальних засобів та узагальнення впровадження результатів.

У *висновках* наведені підсумки досліджень і вказані основні результати, у *додатках* наведено коди онтологічних моделей та інструментальних засобів, а також акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Дискусійні питання по дисертаційній роботі та зауваження.

1. При розробленні моделей розгортання сервісів на основі БПЛА та прокладання маршрутів не враховано можливу наявність перешкод та заборонених для польотів БПЛА зон.

2. Під час розроблення моделей розгортання та оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтовних мобільних систем БПЛА незрозуміло, яким чином враховуються людино-машинні інтерфейси, які є важливими для безпілотних авіаційних комплексів.

3. При використанні безпілотних систем визначається переліки аварійних ситуацій, які можуть виникати в польоті. Незрозуміло чи враховано це при проведенні досліджень.

4. Сучасні автономні інтелектуальні системи широко використовують штучний інтелект, який може впливати на гарантоздатність, але про це в роботі не згадується.

Вказані зауваження не знижують наукової цінності і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Ключнікова І.М., яку виконано на високому науковому і технічному рівні.

Висновок.

В цілому дисертаційна робота Ключнікова Ігоря Миколайовича «Методологія, моделі та інформаційна технологія забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів» повністю відповідає «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою Кабміну України № 1197 від 17.11.2021 року (зокрема, пп. 7, 8, 9), а її автор Ключніков Ігор Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології.

Опонент:

професор кафедри аеронавігаційних систем

Державного університету «Київський авіаційний інститут»

доктор технічних наук, професор

Тетяна ШМЕЛЬОВА

24.11.2025р

