

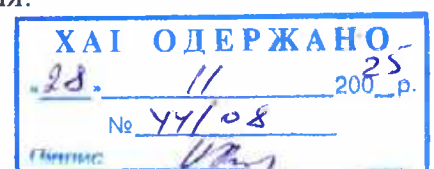
ВІДГУК

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

Актуальність обраної теми дослідження, її зв'язок із науковими програмами, планами, темами, грантами.

Сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) активно застосовуються для виконання різноманітних завдань у різних галузях, у тому числі і для впровадження численних сервісів, зокрема з виконання завдань моніторингу та інспектування об'єктів, доставки вантажів і медичних препаратів, спостереження за порушеннями безпекового режиму тощо. Об'єднання традиційних інформаційних технологій з мобільними, які притаманні БПЛА, створює комплексний ефект і дозволяє значно підвищувати ефективність виконання завдань, у тому числі в умовах, які є небезпечними для людей. Становлення концепції “БПЛА як сервіс” є закономірним етапом у напрямку розвитку використання БПЛА для обслуговування різнопланових потреб, при цьому БПЛА може представляти універсальну платформу, на яку встановлюється корисне навантаження, яке необхідно для виконання визначених завдань. Проте практична реалізація цієї концепції вимагає всебічного аналізу еволюції, формування модельного базису для наукових досліджень з урахуванням розширення сфери застосування та з огляду на специфіку сервісних запитів, механізмів обслуговування та складних зовнішніх факторів. Розгортання сервісів на основі БПЛА передбачає їх групове використання для скорочення часу та підвищення якості обслуговування запитів і необхідність розгортання системи обслуговування, яка забезпечить довготривале функціонування сервісів. Крім того, виконання критичних завдань та функцій та об'єктах критичної інфраструктури, об'єктах підвищеної небезпеки обумовлює необхідність у забезпеченні високої гарантоздатності (а саме надійності, доступності, безпеки та захищеності) цих сервісів в умовах можливих відмов апаратів, збоїв у підсистемах обслуговування та впливу несприятливих чинників середовища.

В роботі розвивається парадигма Джона фон Неймана, яка полягає у формуванні концепції створення гарантоздатних (надійних і безпечних) систем з недостатньо надійних і безпечних елементів та їх множин, з урахуванням особливостей функціонування БПЛА, їх групового застосування та викликів щодо безпеки застосування.



Зв'язок дослідження з науковими програмами та грантовою підтримкою є ще одним суттєвим чинником його актуальності. Робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України (2021-2025 pp.) за шістьма держбюджетними темами, а також в рамках міжнародних проектів: “Autodrone.UA” (ФРН-Україна, 2024-2025 pp.), WILDFire preparedness and prevention framework for unmanned vehicle platforms (“WILDCAT”) (Швеція-Естонія-Україна, Swedish Institute, 2024 - по т.ч.).

Крім того, автор проводив дослідження при виконанні науководослідних робіт та оперативних завдань на замовлення Командувача Повітряних Сил Збройних Сил України у 2012-2018 та 2022-2024 роках.

Отже, розроблення методології, моделей, методів та інформаційної технології, які спрямовані на забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі БПЛА забезпечують вирішення актуальної науково-прикладної проблеми, яка спрямована на долаання протиріччя між жорсткими вимогами до надійності та безпечності мобільних роботизованих систем для виконання різноманітних послуг та критичних функцій та відсутністю концептуальних та математичних моделей, методів та засобів для оцінювання та забезпечення гарантоздатності таких систем.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендації, сформульованих у дисертації.

Теоретичні результати, представлені в дисертаційній роботі, автор отримав із застосуванням загальновизнаних методів, заснованих на комплексному використанні теорії математичного моделювання, аналітичних і обчислювальних методах теорії імовірності, методах теорії випадкових процесів, методах математичного аналізу, методах теорії онтологічного представлення та виведення знань, методах теорії надійності, методах теорії інформаційної безпеки, методах теорії прийняття рішень тощо.

Всі теоретичні положення дисертаційної роботи достатньо обґрунтовані. Достовірність результатів досліджень забезпечується коректністю та строгістю постановки завдань, коректністю використання математичного апарату під час доведення основних наукових положень. Достовірність наукових результатів підтверджується 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.

Матеріали дисертаційної роботи обговорювалися на численних міжнародних наукових конференціях і семінарах. Позитивні результати апробацій і акти впровадження додатково підтверджують достовірність та

обґрунтованість теоретичних положень.

Дисертаційна робота містить висунуті автором науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, наукові положення, які характеризуються єдністю змісту і підтверджують значний особистий внесок здобувача.

Наукова новизна дисертаційної роботи і загальнонаціональне та світове значення.

Наукова новизна і загальнонаціональне та світове значення результатів дисертаційної роботи полягає у наступному:

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 з недостатньо надійних і безпечних елементів та їх множин (апаратів та їх роїв) з врахуванням функційних і просторових обмежень, а також принципах мультиагентного представлення процесів використання СОМС БПЛА; функціонально-просторового підходу до оцінювання та підвищення надійності і гарантоздатності СОМС БПЛА; динамічного структурно-функціонального резервування та керованої деградації СОМС БПЛА, а також гарантованого обслуговування різноманітних запитів на виконання сервісів з визначеними вимогами в умовах відмов, кібератак та обмеженої автономності апаратів, що дозволяє обґрунтовувати загальну структуру та засоби забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА;

2) вперше розроблено 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”, що дозволяє визначати кількісні показники СОМС БПЛА, та відповідність їх значень вимогам до сервісів;

3) вперше розроблено 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, що дозволяє визначати комплекс стаціонарних та мобільних компонентів для виконання завдань відповідно до вимог та параметрів середовища;

4) удосконалено концептуальну модель СОМС БПЛА у вигляді 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, що дозволяє формувати масштабовану структуру, на основі мобільних агентів, які представляють програмно-апаратні сутності, апаратна частина яких базується на БПЛА та наземних станціях обслуговування;

5) удосконалено 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, що дозволяє підвищити точність оцінювання показників надійності та імовірності повного або часткового ненадання сервісів СОМС, а також обґрунтовувати вимоги до безвідмовності та живучості апаратів і систем;

6) отримали подальший розвиток моделі 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, що дозволяє підвищити точність оцінювання часткових показників гарантоздатності, обґрунтовувати склад СОМС БПЛА і комплекс засобів для забезпечення гарантоздатності надання сервісів;

7) отримала подальший розвиток марковська модель готовності СОМС БПЛА з урахуванням кібератак на інформаційні активи, зокрема, навігаційних систем, сенсорного обладнання та каналів управління, що описує стани втрати працездатності внаслідок таких атак і аварійного закінчення місії та дозволяє обґрунтовувати вимоги до систем захисту та комплексу контрзаходів.

Повнота викладу наукових положень, висновків, результатів і рекомендацій в наукових публікаціях.

Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи викладено у 20 статтях у періодичних наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, з яких 2 – у наукових виданнях категорії А, 4 – у виданнях, що проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus, з них 2 – у виданнях віднесених до третього квартиля (Q3); 5 статтях 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 (всі

проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus), 2 розділи в колективній вітчизняній монографії. Отримані результати захищені 5 патентами та договорами на передачу авторських прав.

Реферат за своїм змістом повністю відповідає основним положенням та висновкам дисертації, відображає її структуру та логіку викладення матеріалу, у тому числі, елементів наукової новизни та практичної цінності.

Практичне значення отриманих результатів дослідження.

Практичне значення отриманих результатів полягає у реалізації основних наукових положень дисертації 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.

Відсутність (наявність) академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації.

Дисертаційна робота Ключнікова Ігоря Миколайовича є результатом оригінальних самостійних досліджень здобувача та відповідає принципам академічної доброчесності відповідно до ст. 42 Закону України «Про освіту». У дисертації та наукових працях Ключнікова І.М., які відображають її результати, відсутній академічний плагіат, фабрикація та фальсифікація, компіляція та запозичення, що підтверджено відповідною довідкою. Всі використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело, оформлені згідно вимог.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота складається з анотації вступу, шести розділів, списку використаних джерел, висновків і додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано мету, основні задачі досліджень і наукову новизну отриманих результатів. Розглянуто практичне значення, реалізацію й впровадження результатів дисертації. Визначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами організацій, де виконувалася робота, також особистий внесок автора в роботах, які виконані в співавторстві. Наведено відомості про публікації і апробацію роботи.

В **першому** розділі здійснено огляд теоретичних розробок з оцінювання та забезпечення гарантоздатності інформаційних систем. Наведено визначення та математичну модель СОМС БПЛА. Обрано показники оцінювання гарантоздатності. В результаті проведеного аналізу визначено напрям, мету та здійснено постановку завдань дослідження.

В **другому** розділі представлено результати розроблення концепції, принципів, моделей і методів, які утворюють методологію побудови СОМС БПЛА, визначено їх взаємозв'язки. Запропоновано концептуальну модель СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи (ХМАС), яка описує структуру системи, властивості та взаємозв'язки холонів-агентів. Розроблено базову онтологію, онтології моделей функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА, а також аналітичні моделі для опису процесів розгортання СОМС БПЛА при виконанні типових завдань.

В **третьому** розділі розроблено моделі систем масового обслуговування для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА та проведено їх дослідження.

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”. Розроблено модель БПЛА деградуючого об'єкта та моделі оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА з деградацією якості виконання завдань. Проведено дослідження безпеки застосування БПЛА з використанням розробленої марковської моделі.

В **п'ятому** розділі представлено розроблений метод формування структури та складу СОМС БПЛА, який базується на визначені зв'язків між завданнями, умовами виконання, технічними характеристиками елементів СОМС, а також на моделях їх функціонування та оцінювання гарантоздатності. Наведено опис процесу вибору засобів підвищення гарантоздатності.

В **шостому** розділі дисертації описано розроблену інформаційну технологію для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА, в основі якої знаходиться загальна архітектура СОМС, що базується на концептуальній моделі у вигляді холонічної мультиагентної системи з використанням БПЛА та підсистеми забезпечення. Наведено опис розроблених інструментальних засобів та представлено результати систематизації результатів впровадження та їх детальний опис.

Дисертаційна робота написана технічно грамотною мовою, автор логічно викладає основні положення, із дотриманням наукового стилю і

вимог до оформлення. Зміст дисертаційної роботи відповідає прийнятим вимогам та правилам проведення та оформлення результатів наукових досліджень. Сформульовані у дисертаційній роботі поставлені завдання дослідження розв'язані, внаслідок чого отримані нові наукові та практичні результати. Усі одержані наукові результати висвітлені в тексті дисертації. Автореферат в достатньо повній мірі відображає основний зміст дисертації. Наукова термінологія в дисертаційній роботі є загальновизнаною, стиль викладення результатів досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття.

Дискусійні питання стосовно положень дисертаційної роботи та зауваження.

1. У першому розділі доцільно було більше уваги приділити питанню аналізу чинників, які впливають на гарантоздатність та її складові сервісних систем з використанням БПЛА.

2. В підрозділі 2.4 при описі концептуальної моделі СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи, яка на наш погляд, є доволі цікавою і важливою, базу знань описано дуже загально, не пояснено, яким чином до неї додаються нові знання, які не входять до описаних онтологій.

3. В підрозділі 2.5 при формуванні транспортної підсистеми у складі СОМС автором пропонується для передавання даних використовувати літаючу бездротову мережу, але не розглянуто використання БПЛА на оптоволокну.

4. При розробленні моделі опису розгортання СОМС БПЛА для збирання даних з визначених вимірювальних станцій не враховується вплив метеорологічних чинників, перш за все, вітру на час руху БПЛА по маршрутах, що може призвести до збільшення часу обльоту або навіть до невиконання місії.

5. В моделі періодичного моніторингу зони обмеженого доступу засобами БПЛА автор припускає одночасне їх обслуговування. При виконанні послідовного руху за єдиним маршрутом БПЛА також будуть проходити обслуговування послідовно, що зменшує чисельність додаткової групи.

6. У підрозділі 4.5 не надано достатнього обґрунтування всіх припущень і вибору апарату марковських випадкових процесів з дискретними станами і неперервним часом для моделювання функціонування та оцінювання готовності СОМС БПЛА. Також доцільно було при проведенні дослідження моделі збільшити діапазони змін (варіативність) параметрів.

7. Опис процесу оцінювання ризиків для вибору напрямку та заходів для

підвищення гарантоздатності в підрозділі 5.1 наведено доволі спрощено. Також при описі практичної реалізації методу формування структури та складу гарантоздатної СОМС БПЛА відсутній приклад того, яким чином здійснюється вибір заходів для підвищення гарантоздатності (виконання вимог до неї). Визначені недоліки не знижують цінність одержаних автором наукових та прикладних результатів дисертаційної роботи.

Проте подані зауваження не знижують високий рівень теоретичної та практичної цінності дисертації Ключнікова І.М., не мають принципового значення та не впливають на її загальну позитивну оцінку. Деякі з них можна розглядати як рекомендації здобувачу щодо можливих напрямків подальших досліджень зазначеної науково-прикладної проблеми.

Загальний висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота Ключнікова Ігоря Миколайовича “Методологія, моделі та інформаційна технологія забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів”, є завершеною науковою працею, що виконана на високому науковому і методичному рівнях, в якій представлено нові наукові результати, які спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми. За актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною, змістом та оформленням дисертаційна робота повністю відповідає пп. 7, 8, 9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого Постановою Кабміну України від 17.11.2021 року № 1197 “Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів”, а її автор, Ключніков Ігор Миколайович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології.

Опонент:

провідний науковий співробітник науково-інформаційного відділу
Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки
доктор технічних наук, професор



Олег ДМІТРІЄВ

26.11.2025р

Підпис Олега Дмітрієва ЗАСВІДЧУЮ:

Заступник начальника Державного науково-дослідного інституту
випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки з наукової роботи
доктор технічних наук
старший науковий співробітник



Володимир КРИВЦУН