

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

КЛЮШНІКОВ ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 629.7.017.014.1-519.1:004.942(043)

МЕТОДОЛОГІЯ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНИХ
МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БЕЗПЛОТНИХ
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

05.13.06 – інформаційні технології

РЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Харченко Вячеслав Сергійович,
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», завідувач
кафедри комп'ютерних систем, мереж та
кібербезпеки

Опоненти:

доктор технічних наук, професор
Казимир Володимир Вікторович,
Національний університет «Чернігівська
політехніка», професор кафедри інформаційних
та комп'ютерних систем

доктор технічних наук, професор
Шмельова Тетяна Федорівна,
Державний університет «Київський авіаційний
інститут», професор кафедри аеронавігаційних
систем

доктор технічних наук, професор
Дмітрієв Олег Миколайович,
Державний науково-дослідний інститут
випробувань і сертифікації озброєння та
військової техніки, провідний науковий
співробітник науково-інформаційного відділу

Захист відбудеться «11» грудня 2025 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.01 у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

Із дисертацією можна ознайомитися на офіційному веб-сайті Університету та в науково-технічній бібліотеці Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070 м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

Реферат розісланий «8» листопада 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ольга МОРОЗОВА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. В останні роки впровадження різних послуг здійснюється не тільки з використанням традиційних інформаційних технологій (ІТ), які є їх обов'язковою інфраструктурною складовою різних систем, але й мобільних технологій (МТ).

Симбіоз ІТ та МТ створює синергетичну е-мобільність, засновану на застосуванні безпілотних транспортних засобів, автономних транспортних систем тощо. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають провідною технологією для розгортання різноманітних послуг, які пов'язані з моніторингом та інспектуванням стану об'єктів, доставленням товарів, ліків тощо, моніторингом та оповіщенням про випадки порушення безпеки, розважальними та рекламними послугами та ін. Поява концепції БПЛА як сервісу (англ. Unmanned Aerial Vehicle as a Service, UAVaaS) стала природним кроком у розширенні використання БПЛА для обслуговування різноманітних запитів. Це стосується і низки оборонних задач в часи російської агресії та масового використання безпілотних систем.

Впровадження концепції UAVaaS передбачає перехід до більш ефективного та систематичного використання БПЛА в сучасних умовах з урахуванням багатьох обставин та тенденцій, таких, як:

- зростання різноманітності та інтенсивності їх застосування, необхідність впровадження різних типів БПЛА та груп БПЛА (рої, зграї, флоти) для вирішення різноманітних динамічних завдань;
- ускладнення умов використання БПЛА та зростання впливу фізичного та кібернетичного середовища на виконання ними завдань;
- впровадження штучного інтелекту (ШІ) для підтримки ключових функцій застосування БПЛА (навігації, розпізнавання зображень, безпеки польотів тощо);
- впровадження централізованого технічного обслуговування, що забезпечує надійність і доступність БПЛА, а також тривале виконання завдань;
- необхідність забезпечення ефективного застосування БПЛА (мінімізації витрат (матеріальних і часових) при заданому рівні надійності, мінімізації енергетичних витрат тощо) шляхом розробки математичних моделей і методів.

Таким чином, впровадження концепції UAVaaS потребує:

- системного аналізу її розвитку, створення модельної бази для досліджень та розширення можливостей застосування з урахуванням параметрів запитів на послуги, засобів обслуговування та складних умов навколишнього середовища;
- забезпечення гарантоздатності (надійності, доступності, безпеки та захищеності) UAVaaS у в умовах обслуговування різноманітних запитів, відмов БПЛА та підсистеми обслуговування з різних причин, а також впливу навколишнього середовища.

Концепція гарантоздатних обчислень (dependable computing) була запропонована А. Авіженісом, Ж. К. Лапрі та В. Ренделом і знаходиться у постійному розвитку. Серед вітчизняних вчених, які розвивали концепцію гарантоздатності та гарантоздатних систем провідне місце займають роботи Теслера Г. С., подальший розвиток відображено в роботах Харченка В. С., Глухова В. С., Федухіна А. В., Ковтуна В. В., Горбенка А. В, Скліяра В. В., Поночовного Ю. Л. та ін. В даних дослідженнях враховуються різні аспекти забезпечення гарантоздатності: введення надмірності, стратегій обслуговування, забезпечення безпеки, але не приділяють належної уваги аспектам сервіс-орієнтованості та мобільності систем, що будуються

на основі безпілотних літальних апаратів і утворюють складні кіберфізичні комплекси, які застосовуються в складних середовищах

Виходячи з вище викладеного, розроблення методології, моделей, методів та інформаційної технології забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів є **актуальною науково-прикладною проблемою**.

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів (СОМС БПЛА) шляхом розроблення методології, системних моделей та інформаційної технології для обґрунтування прийняття рішень при плануванні розгортання та використання СОМС БПЛА.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1) проаналізувати методи, засоби і математичний апарат оцінювання та забезпечення гарантоздатності мобільних безпілотних систем та розробити методологію створення і використання гарантоздатних СОМС БПЛА;

2) розробити концептуальну модель та базову онтологію СОМС БПЛА;

3) розробити та дослідити моделі функціонування СОМС БПЛА та їх таксономію;

4) розробити та дослідити моделі систем масового обслуговування (СМО) для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА;

5) розробити та дослідити таксономію та моделі для оцінювання гарантоздатності (функційної надійності, живучості та безпечності та кібербезпеки) СОМС БПЛА;

6) розробити та дослідити моделі багатоступеневої деградації СОМС БПЛА в умовах накопичення відмов компонентів;

7) розробити метод обґрунтування та формування структури та складу гарантоздатних СОМС БПЛА;

8) розробити структуру та засоби ІТ для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА;

9) впровадити результати досліджень у практику діяльності підприємств, установ та організацій, які використовують БПЛА.

Об'єкт дослідження – процеси оцінювання, створення та використання СОМС БПЛА.

Предмет дослідження – концептуальні та математичні моделі, методи та інформаційна технологія для створення (обґрунтування структури, складу), планування та використання гарантоздатних СОМС БПЛА.

Методи дослідження. В основу дисертаційних досліджень покладено методи системного аналізу, теорій надійності та живучості складних систем; методи онтологічного представлення та виведення знань, методи оптимізації; методи теорії систем, теорії мультиагентних систем та систем масового обслуговування; методи марковського аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукові результати дисертаційного дослідження полягають у наступному:

1) вперше розроблено методологію побудови гарантоздатних сервіс-орієнтованих 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.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційного дослідження, які подані до захисту, отримано автором самостійно. У наукових роботах, опублікованих в співавторстві, з питань, що стосуються цього дослідження, автору належать: [1] – розроблення порядку визначення вимог до систем підтримки прийняття рішень для забезпечення визначених вимог до якості функціонування при побудові складних технічних систем; [2] – визначення переліку завдань, які мають виконуватися БПЛА та пріоритетності їх розгортання; [3] – способи забезпечення безпеки польотів БПЛА в єдиному повітряному просторі; [4] – модель застосування БПЛА у складі системи моніторингу з урахуванням часових обмежень на доступність цільової області; [5] – методика визначення чисельності БПЛА у складі перспективних систем; [6] – модель застосування БПЛА та підсистеми забезпечення у складі системи післяаварійного моніторингу атомних електростанцій (АЕС); [7] – модель оцінки ефективності групового застосування БПЛА; [8, 9] – моделі функціонування системи післяаварійного моніторингу АЕС на основі БПЛА; [10] – типові варіанти місій та алгоритм обґрунтування структури та складу СОМС БПЛА для обслуговування різноманітних запитів з урахуванням функційних вимог; [11] – оцінка впливу хмарних технологій на ефективність моніторингу критичних інфраструктур; [12, 15, 37] – моделі СМО для опису функціонування та оцінювання функційної надійності сервісів на основі БПЛА з різними варіантами підсистеми обслуговування; [13] – методологія побудови та моделі оцінювання надійності систем моніторингу з використанням БПЛА; [14] – моделі застосування та оцінювання функційної надійності системи моніторингу АЕС з урахуванням відмов БПЛА; [15] – моделі СМО та моделі оцінювання функційної надійності системи моніторингу АЕС; [16] – моделі оцінювання функційної надійності літаючої сенсорної мережі з урахуванням відмов БПЛА при виконанні завдань моніторингу урбанізованих районів; [17, 22, 39, 42, 50] – моделі розгортання та застосування мобільних систем пошуку вибухонебезпечних предметів (ВНП) з використанням БПЛА; [18] – моделі оцінювання функційної надійності літаючих бездротових мереж з урахуванням відмов БПЛА при різних стратегіях обслуговування БПЛА; [19] – моделі оцінювання функційної надійності літаючої сенсорної мережі з урахуванням можливості відмов БПЛА; [21, 40] – метод визначення структури та складу СОМС БПЛА при розгортанні систем моніторингу фізичної безпеки малих модульних реакторів; [23] – підходи до розгортання систем моніторингу на основі групового застосування БПЛА; [24] – метод визначення структури та складу СОМС БПЛА при розгортанні сервісів інспектування об’єктів транспортної інфраструктури (ОТІ); [25, 26] – моделі оцінювання функційної надійності БПЛА при розгортанні сенсорних мереж для покриття цільової області з підсистемою обслуговування; [27] – підходи до визначення вимог щодо системи керування групою БПЛА; [28] – модель деградації БПЛА; [29] – модель деградації якості виконання завдань моніторингу з використанням БПЛА; [30] – моделі СМО СОМС БПЛА з контрольованою деградацією; [31] – концептуальна модель СОМС у вигляді холонічної мультиагентної системи та метод визначення структури та складу систем моніторингу на основі БПЛА; [32] – підхід до оцінки ефективності застосування БПЛА у змішаних групах; [33] – моделі застосування БПЛА при виконанні різноманітних завдань; [34] – концептуальна модель холонічної мультиагентної системи на основі БПЛА; [35] – модель застосування БПЛА при виконанні завдань; [36] – спосіб підвищення кібербезпеки БПЛА від атак на відмову в обслуговуванні

(DoS-атак); [38, 52] – модель застосування БПЛА для покриття визначених контрольних точок на місцевості з урахуванням обмежень у часі; [40] – метод визначення структури та складу інтелектуальних систем моніторингу; [41] – модель застосування БПЛА для обльоту визначених цільових точок на місцевості; [43] – визначення проблемних питань та напрямків впровадження групового застосування БПЛА; [44] – підходи до зміни цільового призначення БПЛА з використанням однієї платформи; [45] – підхід до визначення чисельності засобів необхідних для виконання завдань БПЛА; [46] – спосіб оптимізації навантаження на БПЛА при їх груповому застосуванні; [47] – модель онтологічного представлення та виведення знань в інтелектуальних системах; [48] – модель оцінки ефективності групового застосування БПЛА; [49] – модель представлення результатів моніторингу БПЛА для пошуку маршрутів руху небезпечними просторами; [51, 54] – модель функціонування БПЛА у складі системи моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки (ОПН); [53] – модель функціонування БПЛА при розгортанні системи фізичного захисту ОПН.

Роботи [20, 21] виконано без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Результати робіт доповідалися на міжнародних та галузевих науково-технічних конференціях, на науково-технічних семінарах кафедр університету 2018–2024 рр., а саме: Міжнародній конференції «Scientific International Conference on CBRNe SICC Series» (Рим, Італія, 2020 р.); Міжнародній конференції «International Symposium on Automation, Information and Computing» (Пекін, Китай, 2020 р.); Міжнародній конференції «International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies» (Київ, Україна, 2020 р., Афіни, Греція, 2022 р., 2023 р., 2024 р.); Міжнародній конференції «International Conference on ICT in Education, Research, and Industrial Applications» (Херсон, Україна, 2021 р.); Міжнародній конференції «Information and Digital Technologies» (Жиліна, Словаччина, 2021 р., 2023 р.); Міжнародній конференції «International Conference On Advanced Trends In Radioelectronics, Telecommunications And Computer Engineering» (Львів-Славське, Україна, 2022 р.); Міжнародній конференції «International Conference on Dependability of Computer Systems» (Вроцлав, Польща, 2022 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем та комунікаційних технологій» (Київ, 2021 р.); Міжнародній науковій конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (Харків, 2020 р., 2023 р., 2024 р., 2025 р.); Науково-практичній конференції «Випробування і сертифікація озброєння і військової техніки» (Чернігів, 2019 р., Черкаси, 2024 р.). Також результати роботи в повному обсязі доповідалася на міжгалузевому науково-технічному семінарі «Критичні комп'ютерні технології та системи (КриКТехС-2024/8)» на кафедрі комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» (м. Харків, 28 листопада 2024 р.).

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що основні наукові положення дисертації доведено до практичної реалізації у вигляді, зокрема: комплексу алгоритмів і програмно-апаратних рішень, захищених патентами; 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. Практичне значення отриманих результатів досліджень підтверджується актами впровадження наукових результатів: у навчальному процесі Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» при викладанні курсів «Методи штучного інтелекту для кібербезпеки», «Безпека мобільних систем», «Мобільні інтелектуальні системи» (акт впровадження від 30.06.2025); у науково-дослідних роботах, які виконувалися у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» (акт впровадження від 14.07.2025) та у міжнародних проєктах, що виконувались Національним аерокосмічним університетом «Харківський авіаційний інститут» спільно з закордонними установами (акт впровадження від 30.06.2025); Командуванням Повітряних Сил Збройних Сил України при проведенні наукових досліджень з групового застосування БПЛА (акт реалізації від 14.05.2025); у наукових дослідженнях, які виконувались у Харківському Національному університеті Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба із застосування БПЛА при розгортанні системи багатопозиційної системи навігації (акт впровадження від 18.06.2025); у навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України (акт впровадження від 22.06.2025).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота виконана в Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» на кафедрі комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки у 2020-2025 роках відповідно до планів:

1) *науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України за держбюджетними темами*: «Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів» (д/р № 0222U001146, 2021 – 2023 рр.) – в частині розроблення концепції, принципів, методів та моделей оцінювання та забезпечення гарантоздатності і безпеки флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу; «Методи, моделі та інформаційні технології підвищення надійності та безпечності складних ІТ-систем на етапах розроблення та впровадження» (д/р № 0222U002861, 2021 – 2023 рр.) – в частині розроблення моделей оцінювання і методів забезпечення надійності та функційної безпечності гарантоздатних систем на основі БПЛА; «Методологія та інформаційні технології оцінювання та забезпечення безпеки цифрової інфраструктури малих модульних реакторів» (№ ДР 0122U000977, 2022 – 2024 рр.) – в частині розроблення моделей застосування БПЛА для виконання завдань моніторингу та забезпечення фізичної безпеки малих модульних реакторів (ММР), де здобувач був виконавцем окремих розділів і відповідальним виконавцем роботи в цілому; «Методи та засоби виявлення вибухонебезпечних предметів з використанням багатофункційних інтелектуальних систем БПЛА» (№ ДР 0123U101992, 2023 – 2024 рр.) – в частині розроблення моделей застосування БПЛА для пошуку ВВП, де здобувач був виконавцем окремих розділів і відповідальним виконавцем роботи в цілому; «Методи, засоби та технологія забезпечення гарантоздатності і резильєнтності інтелектуальних комплексів безпілотних літальних і безекіпажних апаратів з комбінованими стратегіями використання» (№ ДР 0124U000945, 2024 р. – по т.ч.) – в частині розроблення моделей застосування гетерогенних груп БПЛА та оцінки гарантоздатності виконання завдань; «Методи, інтелектуальні мобільні

системи та засоби для забезпечення комунікацій і подолання небезпечних просторів» (№ ДР 0125U002056, 2025 – по т.ч.) – в частині розроблення методів обґрунтування завдань, складу та моделей групового застосування гетерогенних груп БПЛА;

2) *міжнародних проєктів*: «Autodrone.UA» (ФРН-Україна, 2024 – 2025 рр.) – в частині розроблення моделей покриття та планування групового застосування БПЛА для пошуку ВВП; WILDFire preparedness and prevention framework for unmanned vehiCle plATforms (“WILDCAT”) (Швеція–Естонія–Україна, Swedish Institute, 2024 – по т.ч.) – в частині розроблення структури гетерогенної системи моніторингу лісових пожеж з використанням БПЛА та наземних роботизованих платформ (НРП).

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

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладено в 54 наукових публікаціях, у тому числі: 3 розділи в колективних закордонних монографіях (всі проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus), 2 розділи в колективній вітчизняній монографії, 20 статей у періодичних наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України (2 з яких у наукових виданнях категорії А, 4 – у виданнях, що проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus, з них 2 – у віднесених до третього квартиля (Q3)); 5 статей в 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)); 19 публікацій що засвідчують апробацію результатів, також результати захищені 1 патентом на винахід, 2 патентами на корисну модель, та 2 договори про передачу права на використання твору.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації становить 490 сторінок, з яких зміст на 8 сторінках, вступ на 11 сторінках, перелік умовних скорочень на 3 сторінках, основний текст на 308 сторінках, список використаних джерел на 28 сторінках (із 229 найменувань). Робота містить 26 таблиць, з яких 8 таблиць на 10 окремих сторінках, 98 рисунків, з яких 32 рисунки на 23 окремих сторінках, 5 додатків на 125 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, подано зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано науково-прикладну проблему, яка вирішується, мету і завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження. Представлено наукову новизну і практичне значення результатів, та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Подано інформацію щодо апробації та публікацій результатів, особистого внеску автора. Представлено характеристику структури та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану проблеми забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих систем та методів теоретичних досліджень, що використовуються при розв'язанні цієї проблеми за результатами якого визначено, що фактично відсутні роботи, які б були спрямовані на розв'язання питань забезпечення гарантоздатності застосування БПЛА при обслуговуванні запитів на виконання завдань, пов'язаних з моніторингом, інспектуванням охороною, доставлення вантажів і т.п. Наукові дослідження щодо групового застосування БПЛА

в основному спрямовані на організацію управління з метою підтримання стійкості зв'язку та утримання формування.

Аналіз науково-методичного апарату оцінювання гарантоздатності систем на основі БПЛА дозволяє дійти висновку, що, не зважаючи на значну кількість розроблених методів та моделей, за рамками досліджень, що існують, залишилися декілька важливих питань, які пов'язані з:

- організацією групового застосування БПЛА як сервісів з урахування необхідності їх обслуговування;

- визначенням структури та складу сервісів для виконання функціональних вимог з урахування відмов БПЛА, деградації якості виконання завдань, необхідності обслуговування

- оцінюванням гарантоздатності виконання завдань з урахуванням відмов, керованої та некерованої деградації БПЛА і місій в цілому, а також кібератак на БПЛА;

- створенням загальної методології забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі БПЛА.

Також, слід відзначити відсутність інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень з розгортання гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі БПЛА.

В контексті застосування БПЛА під сервісом розуміється сукупність різнотипних завдань, які мають бути виконано в певних умовах і визначеними вимогами, наприклад, доставлення ліків, продуктів, вантажів; моніторингові та пошукові сервіси, які базуються на різних стратегіях обльоту, обстеження та вимірювання; підтримки комунікацій і надання інформації тощо.

Групи (рої, зграї) БПЛА надають набір сервісів $\{SSer_q, q = 1 \dots e\}$, які є підмножиною всіх сервісів які можуть бути надані, і ці групи є частинами загального флоту БПЛА (UAV_A), сформованого для обслуговування всіх сервісів:

$$\left\{ \begin{array}{l} SSer_q = \{TSer_q, TSSer_q = \{TSSer_{sf}, f = 1, \dots, n_q\}, Sp_q(X, Y, Z)\}, \\ USer_q = \{USer^{phys}_q, USer^{inf}_q\} \\ Req_TSSer_q = \{Req_TSSer_{qf}, f = 1, \dots, n_q\}, \end{array} \right\}, (1)$$

де $TSer_q$ – тип сервісу; $TSSer_q$ – множина сервісів q -го типу; $Sp_q(X, Y, Z)$ – простір, в якому надається сервіс; $USer_q$ – множина умов фізичного Env^{phys} та інформаційного Env^{inf} середовища, в яких виконуються сервіси q -того типу; Req_TSSer_q – множина вимог до виконання сервісів q -го типу.

В загальному випадку це може стосуватися мобільних систем різного типу на основі БПЛА, НРП, морських і підводних роботів та різних комбінацій вказаних типів.

При проведенні дисертаційного дослідження склад COMC було обмежено застосуванням БПЛА та наземних (повітряних) платформ для розміщення автоматизованих обмінно-зарядні станцій для обслуговування бортових джерел живлення БПЛА.

Поняття сервіс-орієнтованої системи здебільшого використовується у сфері інформаційних технологій, під яким розуміється система, що побудована на основі сервіс-орієнтованої архітектури (анг. Service-oriented architecture). Своєю чергою, сервіс-орієнтована архітектура – це результат модульного підходу до розроблення

програмного забезпечення, заснованого на використанні розподілених, слабо пов'язаних замінних компонентів, оснащених стандартизованими інтерфейсами для взаємодії за стандартизованими протоколами.

В контексті використання БПЛА, сервіс-орієнтована мобільна система на основі БПЛА – це система, в якій безпілотні літальні апарати (БПЛА) або їх групи (рої, зграї) виступають як агенти, що динамічно надають сервіси у відповідь на запити користувачів або систем вищого рівня. До складу системи також входять елементи обслуговування БПЛА для забезпечення тривалого функціонування.

В загальному випадку гарантоздатність об'єднує властивості надійності, живучості та безпечності:

$$G = F(\text{Rel}, \text{Surv}, \text{Saf} \ \& \ \text{Sec}), \quad (2)$$

де Rel – надійність; Surv – живучість; Saf & Sec – функційна безпечність та кібербезпека.

Надійність об'єднує властивості безвідмовності, готовності/доступності, ремонтпридатності та обслуговуваності:

$$\text{Rel} = f(\text{Ff}, \text{Avail}, \text{Maint}, \text{Repair}), \quad (3)$$

де Ff – безвідмовність; Avail – готовність; Maint – обслуговуваність; Repair – ремонтпридатність.

В роботі запропоновано використовувати наступні показники: імовірність успішного виконання плану польотів, $P_{\text{SPF}} = f(\text{Ff}, \text{Maint})$; імовірність обслуговування без втрати замовлення, $P_{\text{SWLO}} = f(\text{Ff}, \text{Maint}, \text{Repair})$.

Для оцінювання живучості в роботі використовується імовірність обслуговування замовлення з визначеним рівнем деградації – $P_D(t)$, який визначається імовірністю виконання запиту на обслуговування при виникненні відмов, які не призводять до погіршення якості обслуговування менше ніж задана.

При оцінюванні безпеки враховуються два складники – функціональна та кібербезпека. Для оцінювання функціональної безпеки використовується імовірність небезпечної відмови – $P_{\text{DF}}(t)$.

Для оцінювання кібербезпеки використовується імовірність перебування апаратів обслуговування у безпечному стані – $P_{\text{SS}}(t)$.

Гарантоздатність окремих сервісів оцінюється за формулою:

$$G_S(t) = (P_{\text{SPF}}(t) \vee P_{\text{SWLO}}(t)) P_D(t) P_{\text{DF}}(t) P_{\text{SS}}(t). \quad (4)$$

З урахуванням вимог стандарту IEC 60300-1 Dependability management для забезпечення гарантоздатності використовується ризикоорієнтований підхід, згідно з яким проводиться оцінювання наслідків невиконання вимог щодо гарантоздатності:

$$R(\bar{G}_S(t)) = (1 - G_S(t)) EL(\bar{G}_S(t)), \quad (5)$$

де $EL(\bar{G}_S(t))$ - очікувані втрати від невиконання вимог гарантоздатності.

Визначено, що на даний час концепції забезпечення гарантоздатності складних технічних систем, до яких відносяться СОМС БПЛА можуть визначати порядок планування, прогнозування, попередження, протидії та адаптації таких систем, і можуть використовувати класичні підходи до розробки моделей системи для визначення її відповідності висунутим вимогам. В рамках даної роботи обґрунтовано підхід, за яким використовується прогнозований стан середовища та вимоги як вхідні параметри моделей гарантоздатних СОМС БПЛА та вирішуються задачі вибору математичного апарату для розроблення та дослідження адекватних аналітичних та математичних моделей та методів.

Методологія дисертаційних досліджень включає наступні етапи.

На першому етапі здійснюється теоретичне обґрунтування, розробляються елементи методології побудови гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі БПЛА, які включають концепцію, принципи, методи, моделі та інформаційну технологію.

На другому етапі розробляється концептуальна модель СОМС БПЛА, базова онтологія функціонування СОМС БПЛА, таксономії моделей функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА.

На третьому етапі удосконалюються моделі опису процесів розгортання та надійнісної поведінки СОМС БПЛА при обслуговуванні типових завдань за ієрархією ознак «завдання – тип покриття – тип множини БПЛА – види працездатності – типи моделей» .

На четвертому етапі розвиваються моделі систем масового обслуговування для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА, марковська модель готовності СОМС БПЛА з урахуванням кібератак на інформаційні активи та удосконалюються моделі функційної надійності СОМС БПЛА з урахуванням фрагментації цільової області, варіантів формування маршрутів для її покриття в умовах можливих відмов БПЛА та підсистеми обслуговування, а також деградації структури і характеристик апаратів та якості виконання завдань.

П'ятий етап присвячений розробленню методу формування структури та складу СОМС БПЛА що враховує зв'язки між завданнями, умовами виконання, технічними характеристиками елементів СОМС та виконання функційних та нефункційних вимог.

Прикінцевий, шостий етап полягає у розробленні структури та засобів інформаційної технології забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА, яка базується на запропонованих моделях і методах, здійснюється систематизація та аналіз результатів практичного впровадження наукових положень та надаються узагальнені висновки за результатами дисертаційних досліджень.

Другий розділ дисертації присвячений розробленню концепції, принципів, моделей і методів, які утворюють методологію побудови СОМС БПЛА, та визначаються їх взаємозв'язки.

Концепція створення гарантоздатних мобільних сервіс-орієнтованих систем на основі БПЛА розвиває парадигму фон Неймана і формулюється як «концепція побудови гарантоздатних (надійних і безпечних) мобільних сервіс-орієнтованих систем з недостатньо надійних і безпечних БПЛА та їх множин».

Основні елементи методології гарантоздатних СОМС БПЛА та їх зв'язок показані на рисунку 1. Ця методологія базується на концепції (A1) створення

гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі БПЛА та сукупності принципів:

- 1) онтологічного та мультиагентного представлення процесів функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем (A2);
- 2) функціонально- і просторово (покриття)-орієнтованої побудови моделей надійності та гарантоздатності (A3);
- 3) комбінованого використання структурно-компонентного резервування та керованої деградації (A4);
- 4) гарантованого обслуговування різноманітних запитів на виконання сервісів флотами БПЛА з визначеними вимогами в умовах відмов, кібератак та обмеженої автономності апаратів, а також адаптації їх структури та складу до змін параметрів середовища (A5).

Перелічені принципи реалізуються у послідовності $A2 \rightarrow A3 \rightarrow A4 \rightarrow A5$ та покладені в основу розроблених моделей і методів, а саме:

– принцип A2 покладений в основу концептуальної моделі СОМС БПЛА у вигляді мультиагентної системи (A6) та використовується під час розроблення онтологій (A7, A8, A9), як складника методу визначення структури та складу СОМС БПЛА (A13);

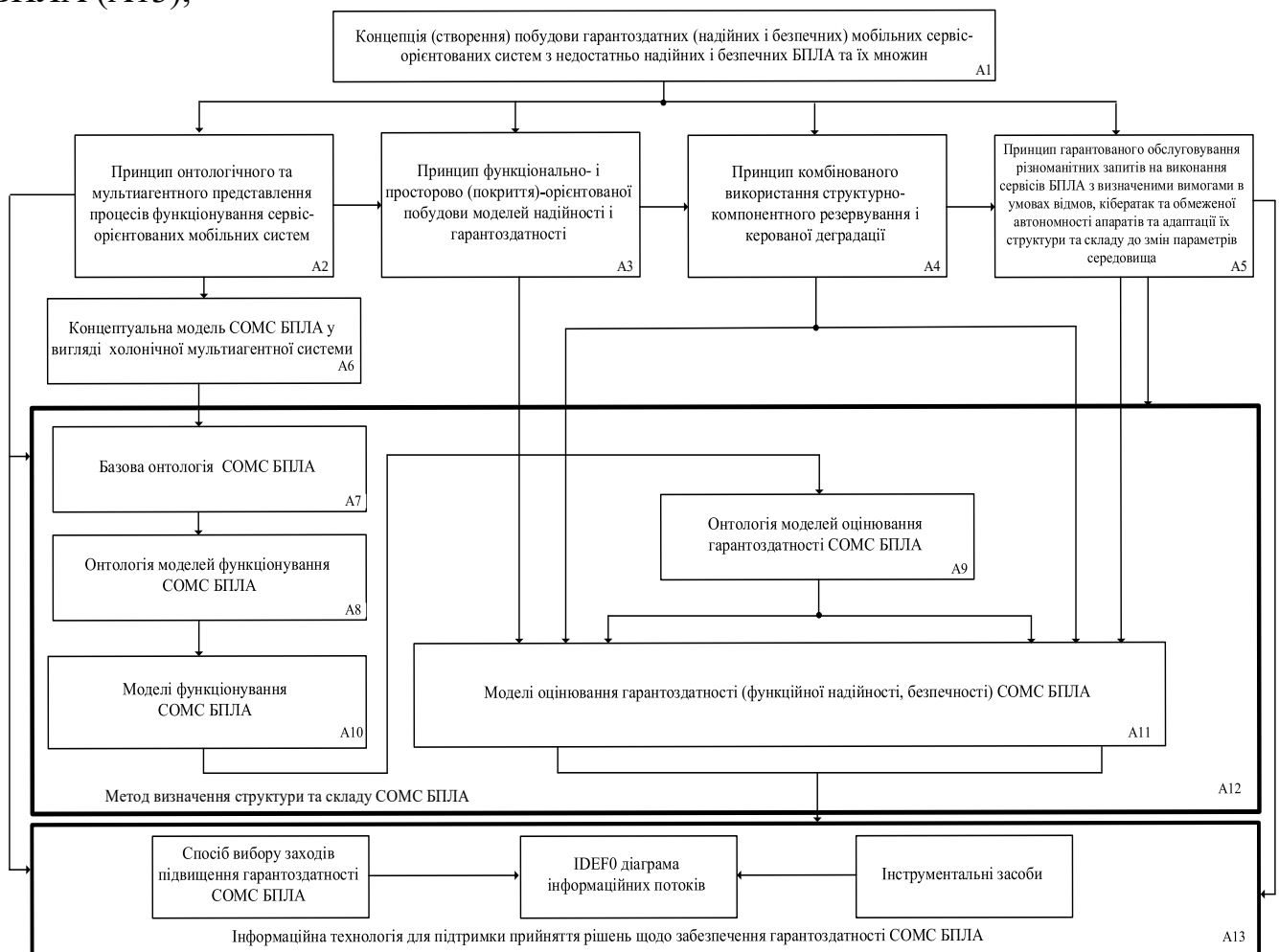


Рисунок 1 – Структура і взаємозв'язок елементів методології

– принцип A3 покладений в основу комплексу моделей функціонування СОМС БПЛА (A10) та комплексу моделей оцінювання функційної надійності СОМС БПЛА (A11);

- принцип А4 покладений в основу моделей оцінювання гарантоздатності (функційної надійності, безпечності) СОМС БПЛА (А11);
- принцип А5 комплексу моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА (А11) та методу визначення структури та складу СОМС БПЛА (А12).

Онтології (А7, А8, А9) та моделі (А10, А11) покладені в основу методу визначення структури та складу СОМС БПЛА (А12).

Інформаційна технологія (А13) складається з комплексу вибору заходів підвищення гарантоздатності СОМС БПЛА, IDEF0-діаграми інформаційних потоків, інструментальних засобів і базується на методі А12, принципах А2 та А5 та моделях А10-А11; вона є інструментарієм для підтримки прийняття рішень щодо складу і вибору параметрів гарантоздатних СОМС БПЛА.

Запропоновано концептуальну модель СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи (ХМАС), яка описує структуру системи, властивості та взаємозв'язки холонів-агентів (рисунок 2). Перевагою запропонованої моделі є можливість формування масштабованої структури, на основі мобільних агентів, які представляють програмно-апаратні сутності, апаратна частина яких базується на БПЛА та наземних станціях обслуговування.

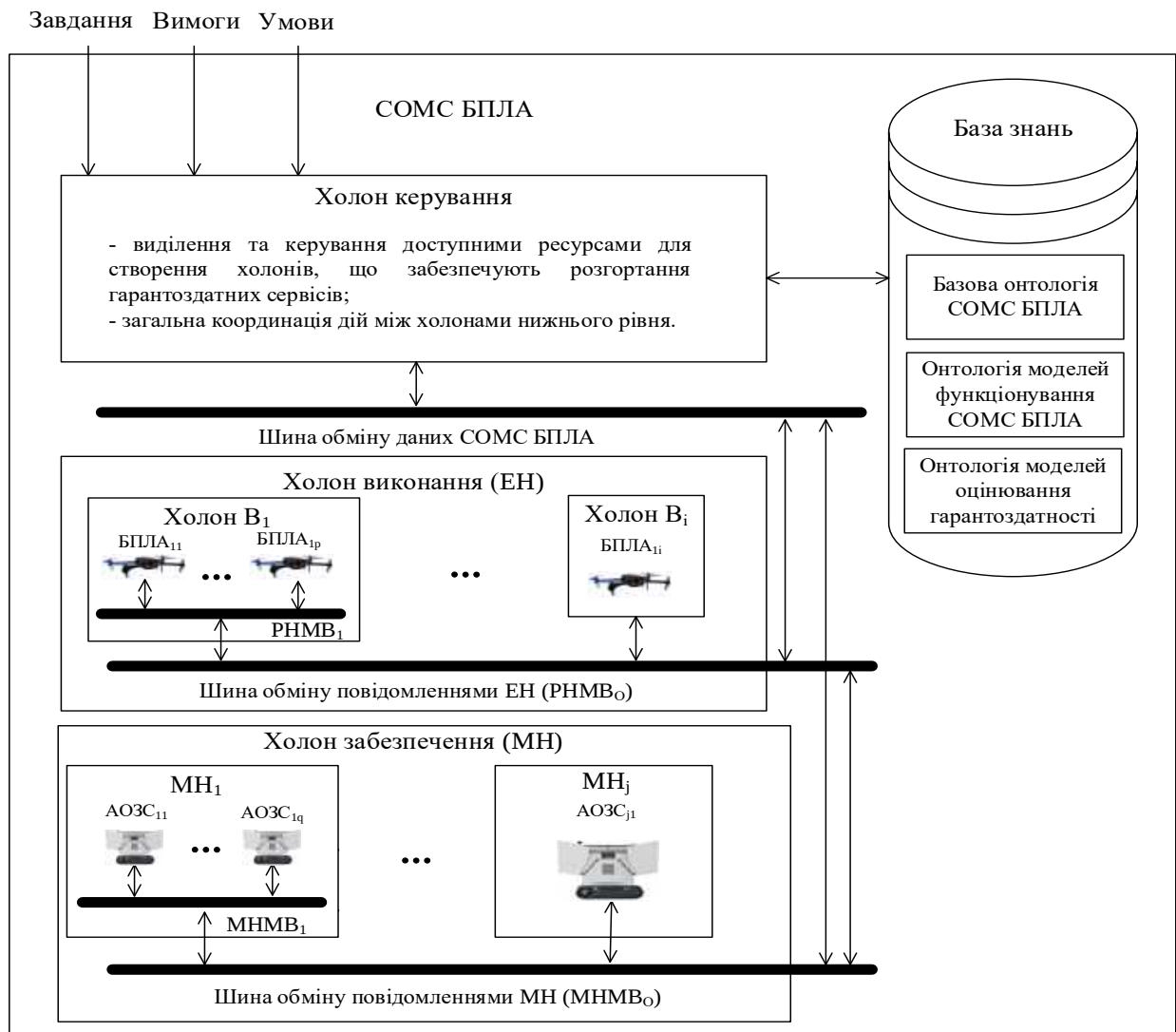


Рисунок 2 – СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи

Основні компоненти ХМАС:

- холон керування здійснює управління розгортанням нових холонів, загальну координацію дії між холонами верхнього рівня, керування доступними ресурсами для створення нових холонів;
- холони виконання з БПЛА, кожен із яких здатний самостійно приймати рішення, виконувати завдання та обмінюватися інформацією з іншими холонами (іншими БПЛА, холонем керування, холонем забезпечення);
- холон забезпечення, що здійснює обслуговування холонів виконання. Він має обмінюватися інформацією з іншими холонами стосовно свого поточного стану, місця знаходження, можливостей з обслуговування;
- внутрішній ринок або протокол взаємодії, який визначає правила обміну повідомленнями між холонами, протоколи передачі даних, обмін статусами та запитами ресурсів. Обмін повідомленнями має бути реалізований як в середині холонів, так і між холонами, які беруть участь в обслуговуванні запиту, а також холонем керування;
- загальна база знань та функції задоволення всієї системи і окремих холонів, які доступні для всіх холонів та забезпечують узгодженість дій.

Розроблено базову онтологію СОМС БПЛА. Базова онтологія описує структуру та взаємодію основних складових елементів СОМС при виконанні різних завдань у різних умовах.

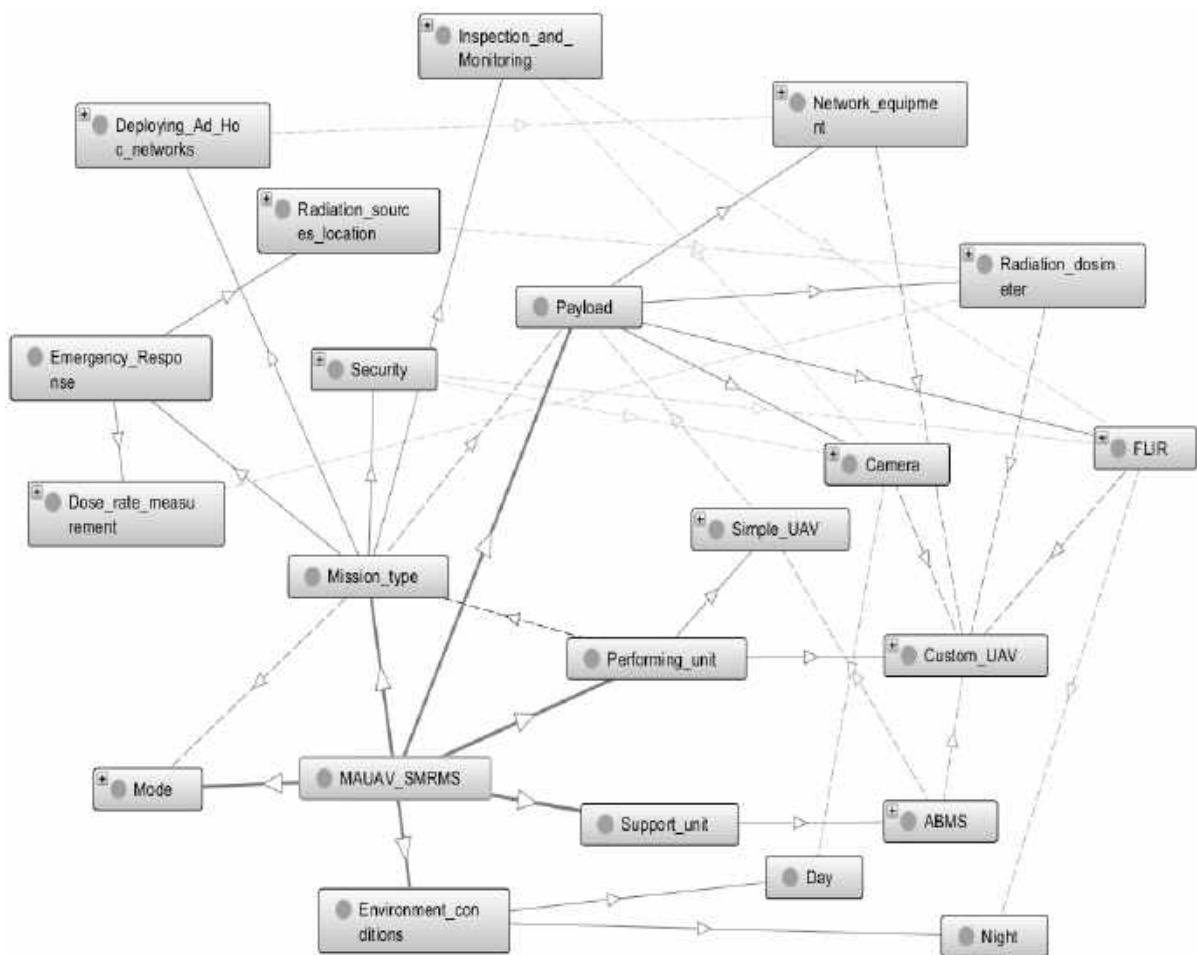


Рисунок 3 - Онтограф базової онтології функціонування СОМС БПЛА

В базовій онтології (рисунок 3) використовується наступна ієрархія класів: тип завдання (Mission type); режим функціонування (Mode); виконавчі елементи (Performing unit); елементи обслуговування (Support unit); корисне навантаження (Payload); умови виконання (Environment conditions).

Опис доменів, властивостей та діапазонів для об'єктів, визначених в базовій онтології, представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Опис властивостей об'єктів, визначених в онтології

Домен	Властивість	Діапазон
UAV	виконує (perform)	Mission type
ABMS	обслуговує (maintenance)	Simple UAV; Custom UAV
Simple UAV	Has	Camera; FLIR
Camera; FLIR; Radiation dosimeter; Network equipment	Deployed	Custom UAV
Inspection and Monitoring	Need	Camera; FLIR
Deploying Ad Hoc networks	Need	Network equipment
Emergency Response	Need	Radiation dosimeter
Security	Need	Camera; FLIR
Camera	Used	Day
FLIR	Used	Night

Розроблено таксономії моделей функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА, що описують взаємозв'язки моделей та атрибутів, які вони покривають, а саме: особливості завдань (сервісів) (одиничні, потокові); тип покриттів, на яких базується виконання завдань (точкове, площинне, часове); характеристики флоту БПЛА (склад та структура, обслуговуваність); тип працездатності (двоступенева, багатоступенева (деградація); відмови (БПЛА, підсистеми забезпечення). На основі таксономій розроблено онтології та описано

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX ims: <http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#>
SELECT ?payload ?UAV ?ABMS
WHERE {
  ?payload rdf:type :Payload.
  ?UAV :has ?payload
  FILTER EXISTS {?payload :used ?Night}
  FILTER EXISTS ((?UAV :maxWind > 10))
  ?ABMS :maintenance ?UAV
  FILTER EXISTS ((?UAV :flightEndurance < 0.8))
  OPTIONAL {?UAV :dataTransmissionProtocol ?protocol}
```

Рисунок 4 – Приклад SPARQL запиту до онтології вибору БПЛА та обладнання, необхідного для виконання завдання не менше 0,8 години вночі за вітру більше 10 м/год

процес вибору необхідних засобів для розгортання сервісів, моделі для розрахунку кількісних показників СОМС БПЛА та моделі оцінювання гарантоздатності сервісу, який базується на SPARQL-запитах (рисунок 4).

Розроблено аналітичні моделі для опису процесів розгортання СОМС БПЛА при виконанні типових завдань, які, на відміну від відомих, представлені залежностями, що враховують таксономію, яка

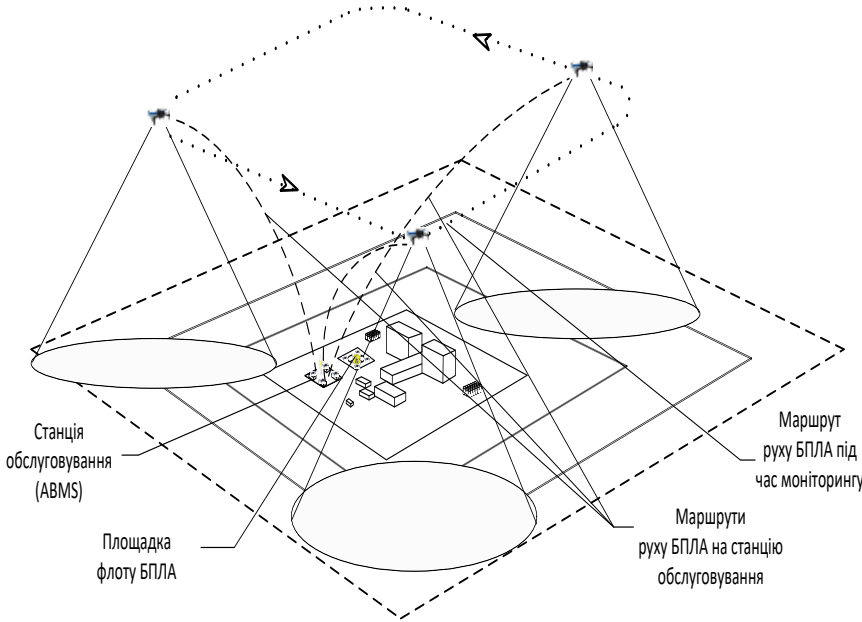


Рисунок 5 – Модель розгортання СОМС БПЛА для періодичного моніторингу ММР

описує сутності за ієрархією ознак «завдання – тип покриття – тип множини БПЛА– типи моделей».

Описано приклади використання запропонованих моделей для формування структури та складу СОМС БПЛА при виконанні завдань моніторингу та у складі системи фізичного захисту малого модульного реактору (ММР) (рисунок 5), який дозволяє визначити необхідну кількість БПЛА та автоматичних обмінно-зарядних станцій (АОЗС):

$$m_{UAV} > \frac{P_z}{T_d V_{UAV}}, \quad (6)$$

$$k_{UAV_swarm} = \left\lceil 1 + \frac{\frac{2S_{UAV}}{V_{UAV}} + t_{conf} + t_{repl_bat}}{t_{mon}} \right\rceil, \quad (7)$$

$$m_{\Sigma} = k_{UAV_swarm} \cdot m_{UAV}, \quad (8)$$

$$m_{ABRAS} = \left\lceil \frac{m_{UAV}}{n_{ch}} \right\rceil, \quad (9)$$

де m_{UAV} – потрібна кількість БПЛА на маршруті; k_{UAV_swarm} – необхідна кількість роїв з m_{UAV} БПЛА у кожному рої; E_{UAV} – середній час польоту БПЛА; S_{UAV} – відстань яку долає БПЛА від точки на маршруті до станції обслуговування; t_{conf} – час необхідний для підключення БПЛА після обслуговування до системи моніторингу; P_z – периметр захищеної зони; V_{UAV} – швидкість БПЛА; n_{ch} – кількість каналів обслуговування БПЛА на одній АОЗС обраного типу.

В **третьому розділі** розроблено моделі систем масового обслуговування для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА. В роботі розглядаються різні моделі СМО: без втрат замовлень; з втратами замовлень, які обслуговуються, через відмови БПЛА. Для більш точного опису моделей СМО з урахуванням відмов та обслуговування пропонується розширення нотації Кендалла-Лі - (A/B/C):(D/Q/K) до виду:

$$(A/B/C(U)):(D/Q/K):(F/S)/R, \quad (10)$$

де A – тип вхідного потоку замовлень; B – тип потоку обслуговування; C – кількість каналів СМО; D – правило (пріоритетність) оброблення черги; Q – розмір черги з замовлень; K – кількість джерел замовлень; U – кількість БПЛА в складі апарату обслуговування; F – параметри, що враховують в моделі можливості відмов БПЛА та їх відновлення; S – параметр, що враховує в моделі необхідність обслуговування БПЛА під час виконання замовлень.

На рисунку 6 показана фасетна класифікація моделей СМО СМОС БПЛА з позначенням моделей, які досліджуються.

Кількість каналів, C	Кількість UAV в каналі, U	Наявність черги, Q	Кількість джерел замовлень, K	Можливість відмов UAV	Необхідність обслуговування UAV під час обробки замовлень	Пріоритетність обслуговування замовлень	Використання резервних UAV	Позначення моделі, що розглядаються
Один, 1	Один, 1	без черги	одне, 1	без відмов	без обслуговування	FCFS		M/M/1
		обмежена черга, p						M/M/N
		необмежена черга, ∞				LCFS		(M/M/N):(F)
						SIRO		(M/M/N(U)):(F)
						SRPT		(M/M/N):(F/S)
						LRPT		
						RR		
Декілька, n	Декілька, u		декілька, r	з відмовами	з обслуговуванням		без резерва	
							з резервом	

Рисунок 6 – Класифікація моделей СМО СМОС БПЛА

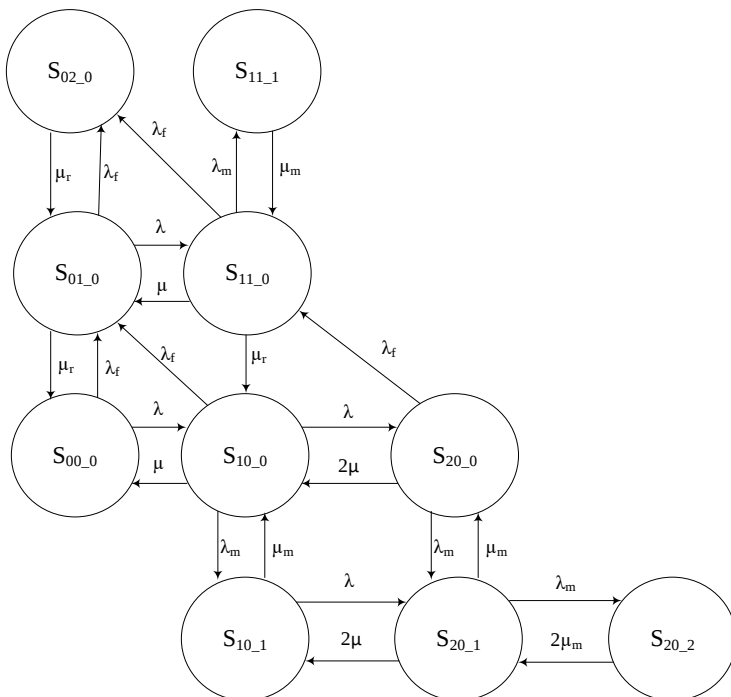


Рисунок 7 – Марковський граф моделі СМО СМОС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/3): (-/0/-):(F/S)$

Найбільш повне врахування факторів здійснено при розробленні моделі СМОС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/N):(F/S)$, і представляє СМО з потоком замовлень, які обробляються N БПЛА за час, що описується показовим розподілом. Розмір черги – необмежений. Модель передбачає використання в якості апаратів обслуговування як одиночних БПЛА, так і роїв БПЛА.

Під час оброблення замовлень можливе виникнення відмов БПЛА, після виникнення яких вони відновлюються. Внаслідок виникнення відмов БПЛА замовлення, яке виконувалось втрачається. Виникнення відмови одного БПЛА в складі рою призводить до

припинення функціонування всього рою та до втрати замовлення. Під час обробки замовлень БПЛА потребують обслуговування (заряджання або заміни бортових джерел живлення), після якого продовжується обробка замовлення.

Розглянемо модель СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/Ν):(F/S) на прикладі моделі, що, описується нотацією (М/М/2): (-/0/-):(F/S), в якій 2 БПЛА, що можуть відмовляти, відновлюватись після відмови та потребують обслуговування, обробляють найпростіший потік замовлень, черга для замовлень відсутня.

На рисунку 7 представлений марковський граф, який описує стани цієї моделі та переходи між ними де λ – інтенсивність потоку замовлень, μ – інтенсивність обробки замовлень, λ_f – інтенсивність відмов БПЛА, μ_f – інтенсивність відновлення БПЛА, $\mu_1, \mu_{(u-1)}$ – інтенсивності обслуговування замовлень при виникненні відмови одного та (u-1) БПЛА відповідно. Стани, в яких може перебувати система позначені як S_{kn_m} , де k – замовлення, що обробляються (k=0..2), n – несправні БПЛА (n=0..2), m – БПЛА, що обслуговуються (m=0..2).

Система рівнянь Колмогорова-Чепмена для даної моделі має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{00}(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_f)P_{00}(t) + \mu_f P_{01}(t) + \mu P_{10}(t); \\ \frac{dP_{10}(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + \mu + \lambda_m)P_{10}(t) + \lambda P_0(t) + \mu_f P_{11}(t) + 2\mu P_2(t) + \mu_m P_{10_1}(t); \\ \frac{dP_{10_1}(t)}{dt} = -(\lambda + \mu_m)P_{10_1}(t) + \lambda_m P_{10}(t) + 2\mu P_{20_1}(t); \\ \frac{dP_{20}(t)}{dt} = -(\lambda_f + 2\mu + \lambda_m)P_2(t) + \lambda P_1(t) + \mu_m P_{2_1m}(t); \\ \frac{dP_{20_1}(t)}{dt} = -(\lambda_m + \mu_m + 2\mu)P_{20_1}(t) + \lambda_m P_{20}(t) + \lambda P_{10_1}(t) + 2\mu_m P_{20_2}(t); \\ \frac{dP_{20_2}(t)}{dt} = -2\mu_m P_{20_2}(t) + \lambda_m P_{20_1}(t); \\ \frac{dP_{01}(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + \mu_f)P_{01}(t) + \lambda_f P_{00}(t) + \lambda_f P_{10}(t) + \mu_f P_{02}(t) + \mu P_{11}(t); \\ \frac{dP_{11}(t)}{dt} = -(\lambda_f + \mu + \mu_f + \lambda_m)P_{11}(t) + \lambda P_{01}(t) + \lambda_f P_{20}(t) + \mu_m P_{11_1}(t); \\ \frac{dP_{11_1}(t)}{dt} = -\mu_m P_{11_1}(t) + \lambda_m P_{11}(t); \\ \frac{dP_{02}(t)}{dt} = -\mu_f P_{02}(t) + \lambda_f P_{01}(t) + \lambda_f P_{11}(t). \end{array} \right. \quad (11)$$

В результаті проведення досліджень було отримано залежності зміни фінальних імовірностей перебування системи (ІПС) у різних станах від зміни інтенсивності: надходження потоку замовлень (рисунк 8); обробки потоку замовлень (рисунк 9); виникнення відмов БПЛА (рисунк 10); відновлення БПЛА (рисунк 11); потоку надходження БПЛА на обслуговування (рисунк 12); обслуговування БПЛА (рисунк 13).

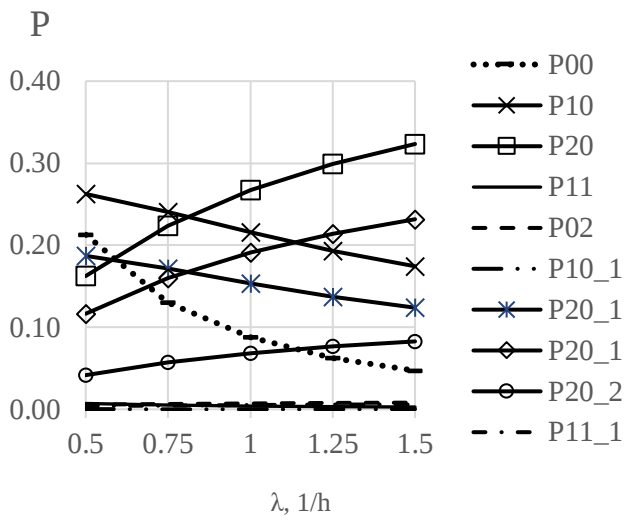


Рисунок 8 – Графік залежності фінальних ППС у різних станах в залежності від інтенсивності надходження потоку замовлень

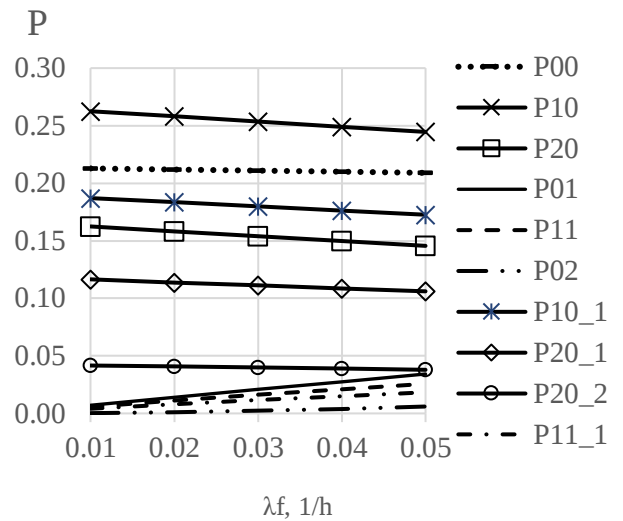


Рисунок 9 – Графік залежності фінальних ППС у різних станах в залежності від інтенсивності виникнення відмов БПЛА

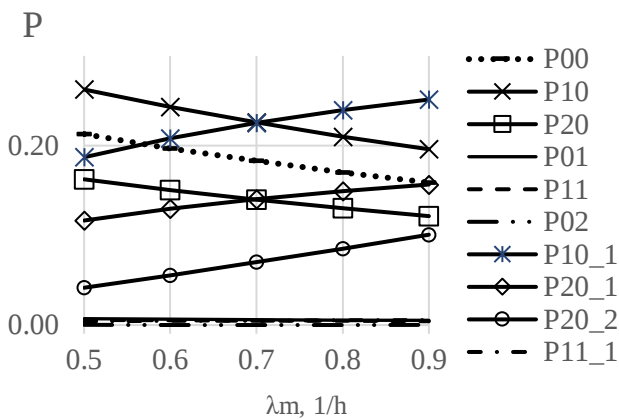


Рисунок 10 – Графік залежності фінальних ППС у різних станах в залежності від інтенсивності потоку надходження БПЛА на обслуговування

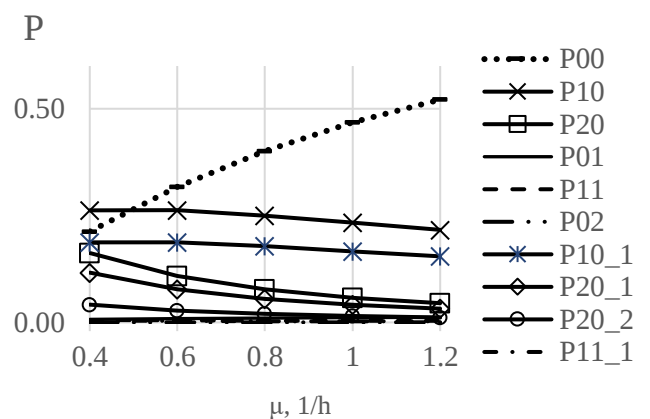


Рисунок 11 – Графік залежності фінальних ППС у різних станах в залежності від інтенсивності обробки потоку замовлень

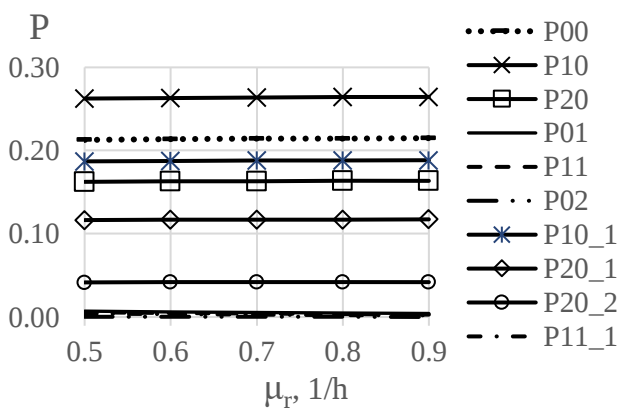


Рисунок 12 – Графік залежності фінальних ППС у різних станах в залежності від інтенсивності відновлення несправних БПЛА

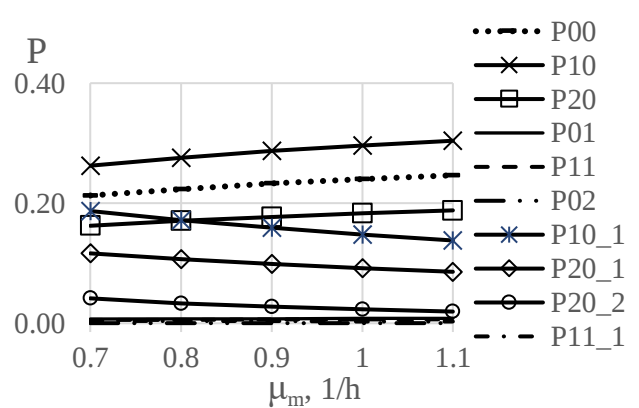


Рисунок 13 – Графік залежності фінальних ППС у різних станах в залежності від інтенсивності обслуговування БПЛА

Отримані результати дозволяють зробити висновки, що зміна інтенсивностей виникнення відмов БПЛА та їх усунення істотно не впливає на зміну фінальних імовірностей перебування системи у працездатних станах, а найбільші зміни фінальних імовірностей перебування системи у різних станах відбуваються при змінах інтенсивностей потоків надходження замовлень та їх обробки. Це надає змогу визначати необхідну кількість та продуктивність БПЛА, що формують апарати обслуговування, а також чисельність підсистеми їх обслуговування.

Модель функціонування СМО СОМС БПЛА $M/M/n(u):(F)$ описує випадок некерованої деградації якості обслуговування заявок. В моделі заявки обслуговуються n роями БПЛА, що складаються з u БПЛА. Під час обслуговування заявок БПЛА можуть відмовляти та відновлюватися (літера F).

Граф станів і переходів моделі СМО СОМС БПЛА $M/M/n(u):(F)$ представлена на рисунку 14, де λ – інтенсивність надходження завдань, μ_f – інтенсивність відмов БПЛА, μ_0 – інтенсивність обслуговування завдань, коли всі БПЛА справні, μ_1 – інтенсивність обслуговування завдань, коли один БПЛА несправний, $\mu_{(u-1)}$ – інтенсивність обслуговування завдань, коли $(u-1)$ БПЛА несправні.

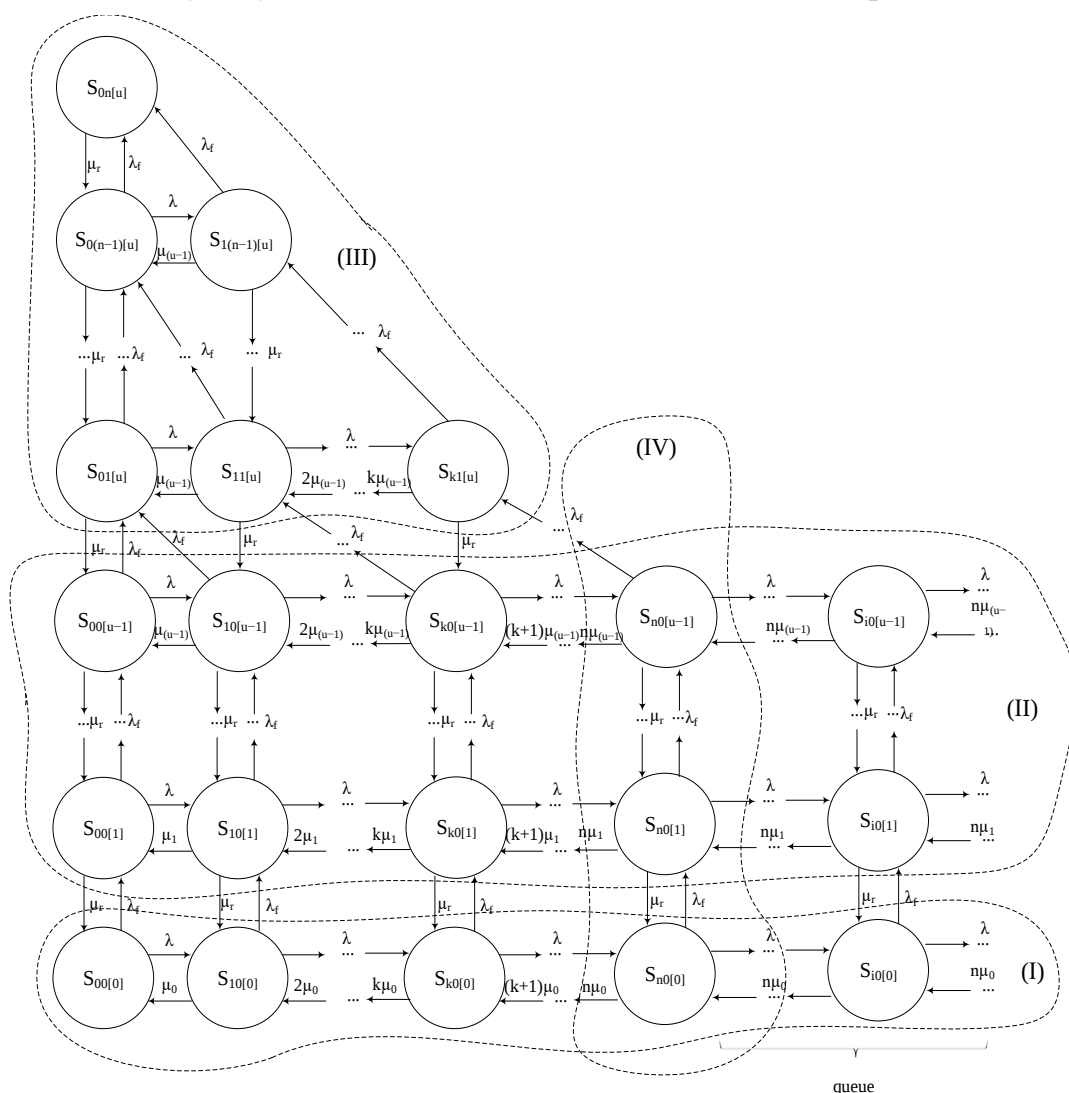


Рисунок 14 – Граф станів та переходів моделі СМО СОМС БПЛА $M/M/n(u):(F)$

До множини станів (I) належать стани, коли всі БПЛА працездатні. До множини станів (II) належать стани, коли один або декілька БПЛА непрацездатні, але запити

обслуговується рештою працездатних БПЛА (в цьому випадку СОМС БПЛА знаходиться в деградованому стані). Множина станів (III) включає стани, коли всі БПЛА непрацездатні (існуючі заявки на виконання завдань втрачені). Множина станів (IV) включає стани, коли всі БПЛА залучені до виконання завдань.

Четвертий розділ присвячено розробленню та дослідженню моделей оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.

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». Дані моделі належать до моделей оцінки функційної надійності точкового покриття цільової області і дозволяють врахувати кількість БПЛА, що виконують завдання, АОЗС, які їх обслуговують, а також показники їх надійності, можливість деградації, особливості виконання завдань покриття, а саме:

- кількість маршрутів;
- кількість цільових точок (ділянок) на маршруті.

Для опису запропонованих моделей використовується кортеж даних:

$$\{S(n[m], r, b, d)\}, \quad (12)$$

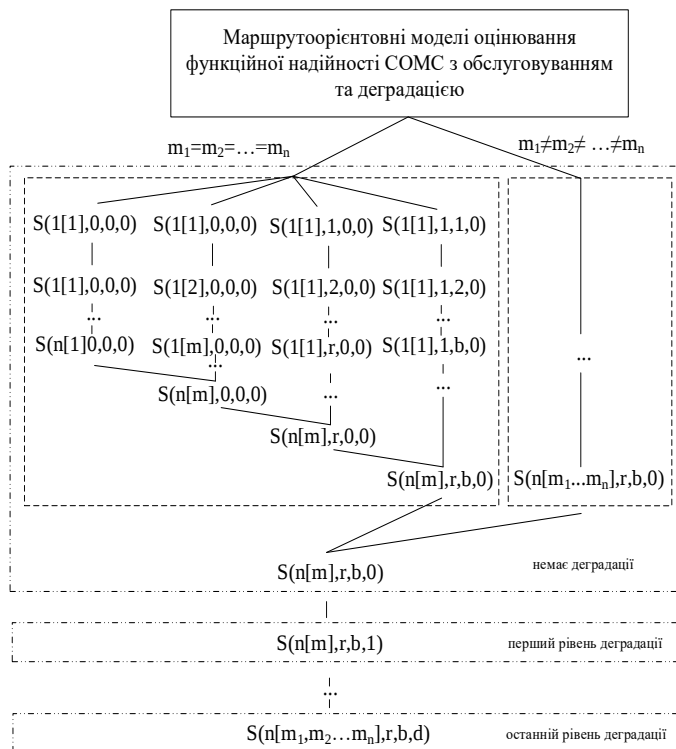


Рисунок 15 – Класифікація моделей оцінювання функційної надійності СОМС з урахуванням обслуговування БПЛА та деградації якості виконання завдань

де n – кількість основних маршрутів; m – кількість ділянок маршруту; r – кількість резервних БПЛА; b – кількість АОЗС; d – кількість ступенів деградації.

Класифікація моделей оцінювання функційної надійності СОМС БПЛА з урахуванням необхідності обслуговування та деградації представлена на рисунку 15. Розроблено моделі, що описуються кортежами $S(1[4],0,0)$, $S(2[2],0,0)$, $S(2[2],0,1)$, $S(2[2],0,2)$, $S(1[2],1,0,0)$; $S(1[3],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,1)$, $S(1[3],1,0,2)$.

Модель $S(2[2],0,2)$ описує використання 2 БПЛА для польоту по 2 маршрутах з 2 цільовими точками в кожному і використання 2 АОЗС для обслуговування акумуляторів (рисунок 15) без деградації якості місії.

Імовірність успішного виконання плану польоту для моделі $S(2[2],0,2)$ визначається як:

$$P_{SPF_S(2[2],0,2)} = P_{MD}^{12} P_{ABRAS}^2 + P_{MD}^{12} P_{ABRAS} (1 - P_{ABRAS}) + (P_{MD}^4 P_{ret}^2) P_{QD} (1 - P_{ABRAS})^2, \quad (13)$$

де P_{MD} – імовірність безвідмовної роботи (ІБР) основного БПЛА на одній ділянці; P_{ret} – імовірність успішного повернення БПЛА на майданчик вильоту при відмові АОЗС; P_{QD} – ІБР станції обслуговування на майданчику вильоту; P_{ABRAS} – ІБР АОЗС.

Імовірність успішного виконання плану обльоту для $P_{MD} = P_{ret} = P_{QD} = P_{ABRAS} = 0.9$ дорівнює $P_{SPF_S(2[2],0,2)} = 0.327$.

Модель $S(1[3],1,0,2)$ описує виконання завдання з двома рівнями деградації та застосуванням 1 основного та 1 резервного БПЛА для польоту по 1 маршруту з 3 цільовими точками, показана на рисунку 17. Деградація якості виконання завдання полягає у можливості збирання даних лише з однієї вимірювальної станції.

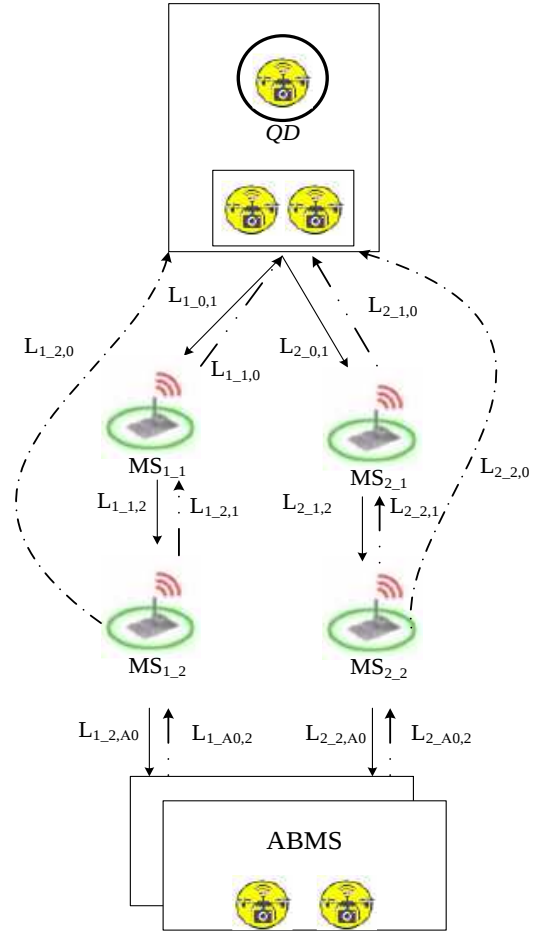


Рисунок 16 – Графічне представлення моделі $S(2[2],0,2)$

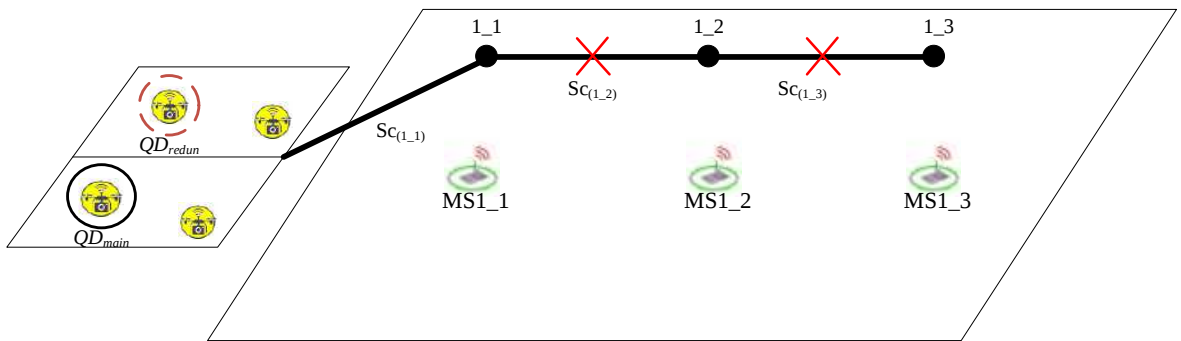


Рисунок 17 – Графічне представлення моделі $S(1[3],1,0,2)$

Імовірність успішного виконання плану польоту для моделі $S(1[3],1,0,1)$ визначається за формулою:

$$P_{SPF_S(1[3],1,0,2)} = P_{MD}^3 + P_{MD}^2 (1 - P_{MD}) P_{RD}^3 + P_{MD} (1 - P_{MD}) P_{RD}^3 + (1 - P_{MD}) P_{RD}^3 + 0,67 (P_{MD}^2 + P_{MD} (1 - P_{MD}) P_{RD} + (1 - P_{MD}) P_{RD}^2 - P_{MD}^3 + P_{MD}^2 (1 - P_{MD}) P_{RD}^3 + P_{MD} (1 - P_{MD}) P_{RD}^3 + (1 - P_{MD}) P_{RD}^3) + 0,33 (P_{MD} + (1 - P_{MD}) P_{RD} - (P_{MD}^2 + P_{MD} (1 - P_{MD}) P_{RD} + (1 - P_{MD}) P_{RD}^2)). \quad (14)$$

Крім того, було розроблено моделі, які не враховують обслуговування та деградацію і описуються кортежем даних:

$$\{S(n[m],r)\}, \quad (15)$$

де n – кількість маршрутів (дорівнює кількості основних БПЛА); m – кількість ділянок на маршруті; r – кількість резервних БПЛА.

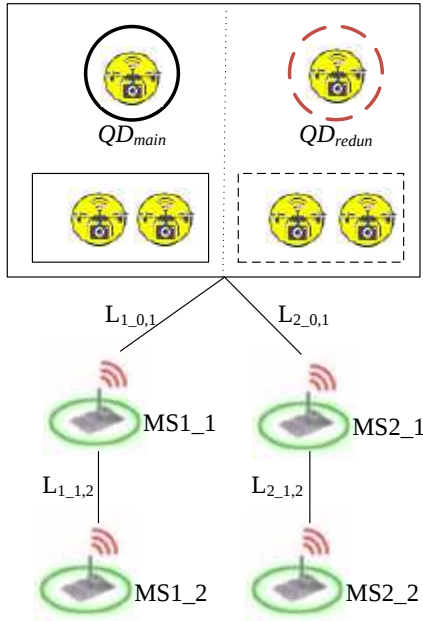


Рисунок 18 – Графічне представлення моделі $S(2[2],2)$

Модель $S(2[2],2)$ описує СОМС БПЛА, що складається з 2 основних і 2 резервних БПЛА для виконання польотів по 2 маршрутах з 2 вимірювальними станціями в кожному (рисунок 18).

Імовірність успішного виконання плану польоту при розгортанні системи, що описується кортежем $S(2[2],2)$ визначається як:

$$P_{SPF_S(2[2],0,2)} = P_{MD}^4 (1 + 2P_{RD}(1 - P_{MD})) \times (1 + P_{MD} + P_{MD}P_{RD}(1 - P_{MD})), \quad (16)$$

де P_{RD} – ІБР резервного БПЛА.

БПЛА можна розглядати як сукупність компонентів, несправності яких призводять до неможливості подальшого виконання завдання, і компонент, після несправності яких можливе подальше виконання завдання, але з меншою ефективністю. При цьому БПЛА можна розглядати як об'єкт з кількома станами, або об'єкт з деградацією, а системи на базі тих самих БПЛА – як системи з кількома станами, або системи з деградацією.

Отже, БПЛА як об'єкт, що деградує, можна представити як сукупність ключових компонентів, відмови яких призводить до припинення виконання місії/завдання, та набір компонентів різного роду, що деградують, відмови яких призводять до зниження характеристик БПЛА і, як наслідок, до погіршення ефективності виконання завдань.

У загальному вигляді модель надійності БПЛА описується формулою:

$$P_{MS_UAV} = F(S_C, S_{NS}(GPS, CVS), S_P(V, M, T)), \quad (17)$$

де S_C – стан ключових компонентів (Core-компонентів); $S_{NS}(GPS, CVS)$ – стан навігаційної системи, визначений станами глобальної системи позиціонування (англ. Global Positioning System, GPS) і системи комп'ютерного зору (англ. Computer Vision System, CVS); $S_P(V, M, T)$ – стани корисного навантаження: відеокамери (V), вимірювача дози випромінювання (M) і модуля передавання даних (T).

Структурні схеми надійності БПЛА, як об'єкта з двома станами та об'єкта з деградацією, коли можуть існувати комбінації станів різних типів корисного навантаження та навігаційної системи, наведено на рисунку 19.

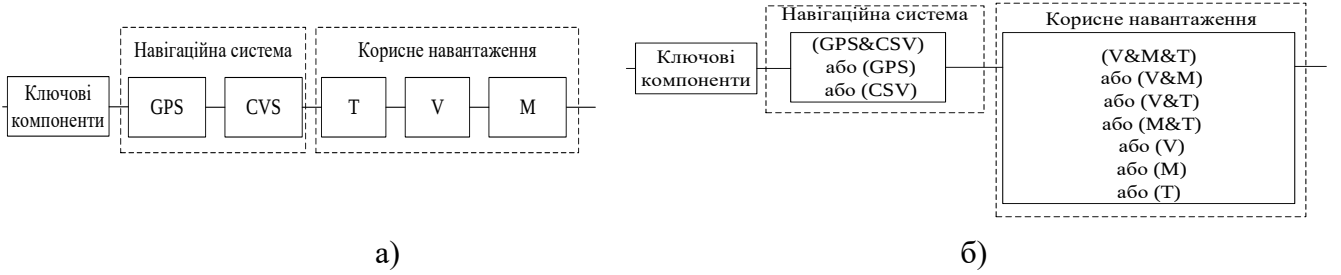


Рисунок 19 – Структурні схеми надійності БПЛА:
а) як об'єкта з двома станами б) як об'єкта з деградацією

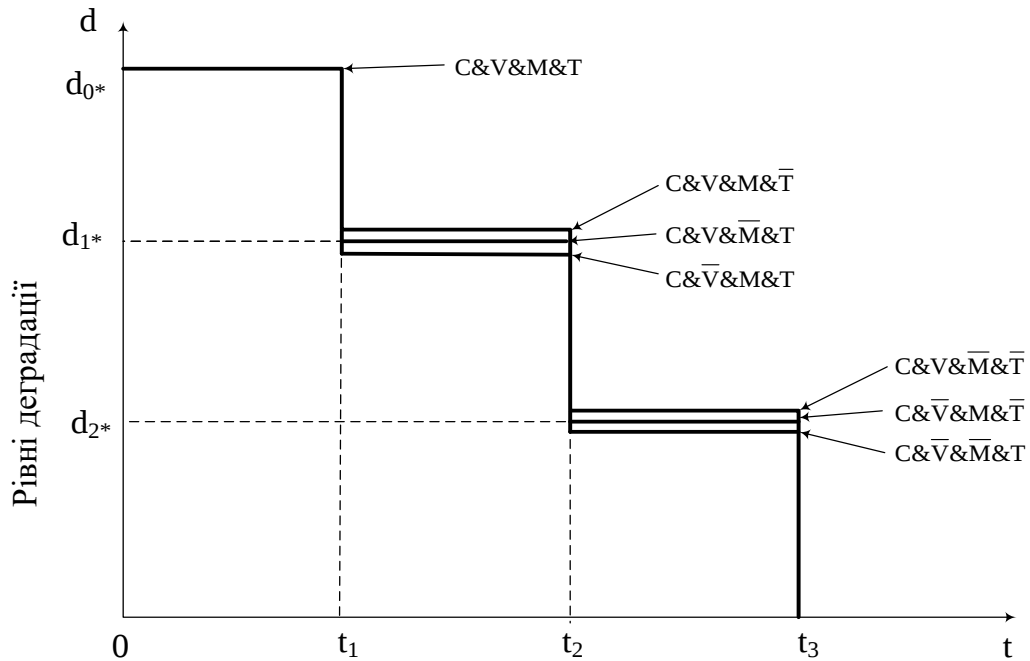


Рисунок 20 – Графічне пояснення процесу деградації, що спричинена відмовами корисного навантаження БПЛА

Графічне пояснення процесу деградації показано на рисунку 20 у вигляді однієї з можливих траєкторій деградації, де t_1 , t_2 , t_3 є стохастичні моменти часу, коли виникають відмови різних видів корисного навантаження БПЛА: $\bar{M}$, $\bar{V}$, $\bar{T}$.

Імовірності перебування БПЛА у станах, що відповідають різним рівням деградації корисного навантаження: $P_{d_0}^P$, $P_{d_1}^P$, $P_{d_2}^P$; визначаються за формулами:

$$P_{d_0}^P = P_C P_M P_V P_T; \quad (18)$$

$$P_{d_1}^P = P_{d_1^*}^T (M \& V \& \bar{T}) + P_{d_1^*}^V (M \& \bar{V} \& T) + P_{d_1^*}^M (\bar{M} \& V \& T); \quad (19)$$

$$P_{d_1^*}^T (M \& V \& \bar{T}) = P_C P_M P_V (1 - P_T); P_{d_1^*}^V (M \& \bar{V} \& T) = P_C P_M (1 - P_V) P_T; \quad (20)$$

$$P_{d_{1*}(\bar{M}\&V\&T)}^M = P_C (1 - P_M) P_V P_T; \quad (21)$$

$$P_{d_{2*}}^P = P_{d_{2*}(\bar{M}\&\bar{V}\&\bar{T})}^{V-T} + P_{d_{2*}(\bar{M}\&V\&\bar{T})}^{M-T} + P_{d_{2*}(\bar{M}\&\bar{V}\&T)}^{M-V}; \quad (22)$$

$$P_{d_2(\bar{M}\&\bar{V}\&\bar{T})}^{V-T} = P_C P_M (1 - P_V) (1 - P_T); P_{d_2(\bar{M}\&V\&\bar{T})}^{V-T} = P_C (1 - P_M) P_V (1 - P_T); \quad (23)$$

$$P_{d_2(\bar{M}\&\bar{V}\&T)}^{M-V} = P_C (1 - P_M) (1 - P_V) P_T, \quad (24)$$

де $P_{d_0*}^P$ – ймовірність перебування БПЛА у стані коли основні компоненти та всі види корисного навантаження БПЛА працездатні (рівень деградації – d_0*); $P_{d_{1*}}^P$ – ймовірність перебування БПЛА у стані коли основні компоненти та будь які два види корисного навантаження БПЛА працездатні (рівень деградації – d_1); $P_{d_{2*}}^P$ – ймовірність перебування БПЛА у стані коли основні компоненти та будь який один вид корисного навантаження БПЛА працездатні (рівень деградації – d_2); $P_{d_{1*}(\bar{M}\&\bar{V}\&T)}^V$, $P_{d_{1*}(\bar{M}\&V\&T)}^M$, $P_{d_{1*}(M\&V\&\bar{T})}^T$ – ймовірність перебування БПЛА у стані відмови відеокамери, обладнання для вимірювань та передавання даних, відповідно; $P_{d_{2*}(\bar{M}\&\bar{V}\&\bar{T})}^{V-T}$, $P_{d_{2*}(\bar{M}\&V\&\bar{T})}^{M-T}$, $P_{d_{2*}(\bar{M}\&\bar{V}\&T)}^{M-V}$ – ймовірність перебування БПЛА у стані відмови комбінацій двох різних видів корисного навантаження.

Аналогічно розроблено аналітичні залежності для деградації систем навігації та одночасної деградації систем навігації та корисного навантаження. Показано, що врахування можливості деградації дозволяє продовжувати виконання місій з погіршенням якості, але для варіанта розгортання сервісів моніторингу це може дозволити отримувати неповні дані, на противагу їх повній відсутності.

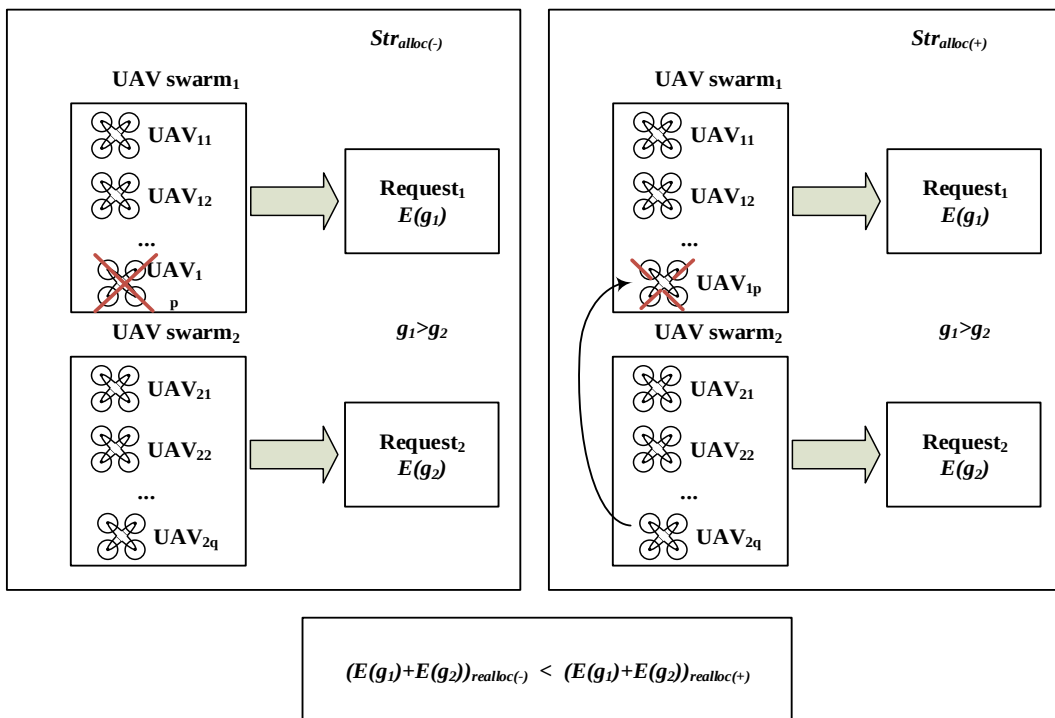


Рисунок 21 – Опис використання стратегій $Str_{alloc(-)}$ та $Str_{alloc(+)}$

Розроблено модель СМО СОМС БПЛА, яка дозволяє досліджувати функціонування та покращувати точність оцінювання показників гарантоздатності за рахунок врахування процесів керованої деградації якості виконання завдань. Модель описує функціонування СОМС БПЛА, коли різні замовлення мають різний ступінь важливості залежно від їх вагових коефіцієнтів – g . Значення коефіцієнтів ваги нормовані, тобто їх сума дорівнює одиниці. При такому функціонуванні СМО у випадку, коли всі БПЛА, які задіяні в обслуговуванні замовлень і виникають їх несправності, пропонується застосування різних стратегій обслуговування замовлень (рисунок 21): без перерозподілу ресурсів, $Str_{alloc(-)}$; з перерозподілом ресурсів, $Str_{alloc(+)}$. Модель з перерозподілом ресурсів описує випадок контрольованої деградації.

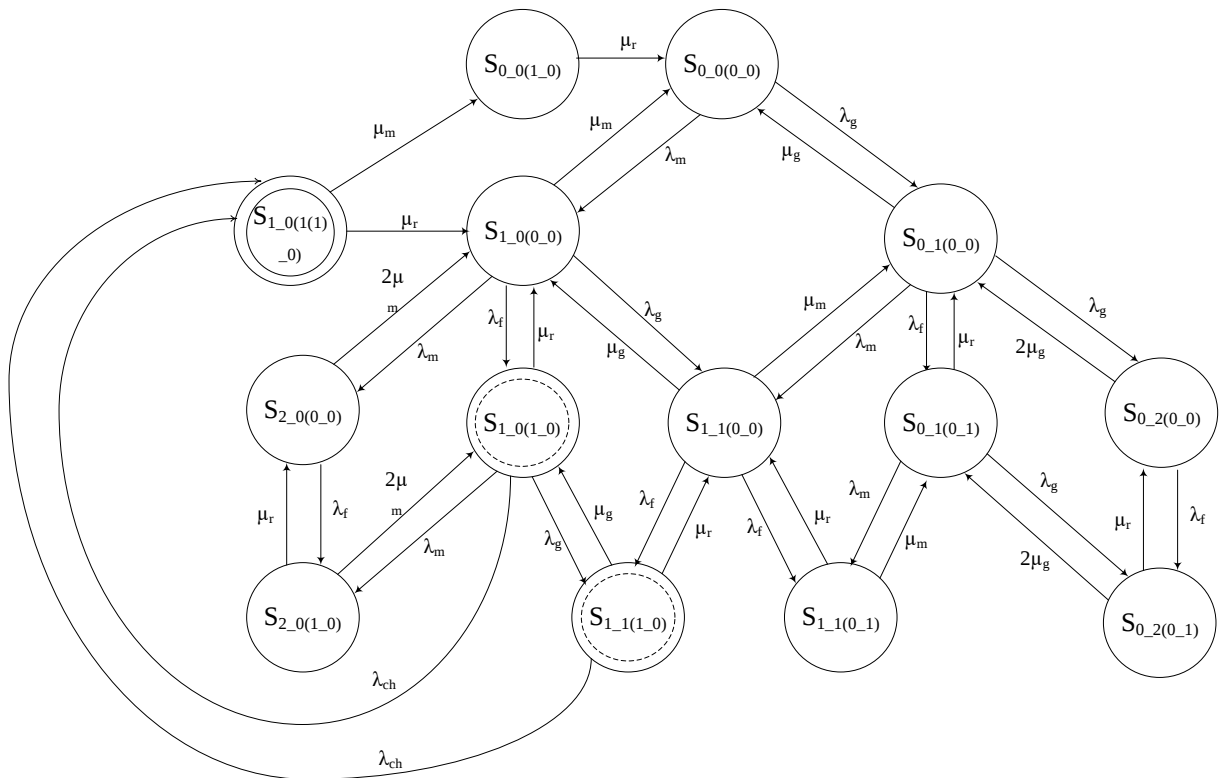


Рисунок 22 – Марковська модель системи СОМС БПЛА, що обслуговує різні типи запитів

При проведенні дослідження розглядалась модель функціонування СОМС БПЛА з контрольованою деградацією, яка описує сервіс де два БПЛА обслуговують замовлення на доставку медикаментів і два БПЛА - на доставку звичайних вантажів. Вагові коефіцієнти для доставки медикаментів та звичайних вантажів становлять 0,7 та 0,3 відповідно. Марковський граф станів і переходів для даної моделі СОМС БПЛА представлений на рисунку 22, де $\lambda_{(m)}$ – інтенсивність надходження замовлень на доставку медикаментів, λ_g – інтенсивність надходження замовлень на доставку звичайних вантажів, $\mu_{(m)}$ – інтенсивність обслуговування замовлень на доставку медикаментів, μ_g – інтенсивність обслуговування замовлень на доставку звичайних вантажів, λ_f – інтенсивність відмови БПЛА, μ_f – інтенсивність відновлення БПЛА, $\lambda_{(ч)}$ – інтенсивність відновлення обслуговування запиту на доставку медикаментів при залученні інших БПЛА. Опис станів, в яких може перебувати система, представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Опис станів марковської моделі СОМС БПЛА, що обслуговує запити на доставку продуктів медикаментів та звичайних вантажів

Стан	Опис стану
$S_{0_0(0_0)}$	Замовлення не надходили. Всі БПЛА справні.
$S_{1_0(0_0)}$	Одне замовлення на доставку медикаментів обслуговує один БПЛА. Всі БПЛА справні.
$S_{1_0(1_0)}$	Один запит на доставку медикаментів обслуговується одним БПЛА. Один БПЛА несправний.
$S_{1_0(1(1_0))}$	Одне замовлення на доставку медикаментів обслуговується одним БПЛА. Один БПЛА несправний. Для продовження обслуговування заявки залучено інший БПЛА.
$S_{2_0(0_0)}$	Два замовлення на доставку медикаментів обслуговують два БПЛА. Всі БПЛА справні.
$S_{2_0(1_0)}$	Два замовлення на доставку медикаментів обслуговуються двома БПЛА. Один з БПЛА несправний.
$S_{0_1(0_0)}$	Одне замовлення на доставку звичайних вантажів обслуговується одним БПЛА. Всі БПЛА справні.
$S_{0_1(0_1)}$	Одне замовлення на доставку звичайних вантажів обслуговується одним БПЛА. Один БПЛА несправний.
$S_{0_2(0_0)}$	Два замовлення на доставку звичайних вантажів обслуговуються двома БПЛА. Всі БПЛА справні.
$S_{0_2(0_1)}$	Два замовлення на доставку звичайних вантажів обслуговуються двома БПЛА. Один БПЛА несправний.
$S_{1_1(0_0)}$	Одне замовлення на доставку медикаментів обслуговується одним БПЛА, і одне замовлення на звичайних вантажів харчування обслуговується одним БПЛА. Всі БПЛА справні.
$S_{1_1(1_0)}$	Одне замовлення на доставку медикаментів обслуговується одним БПЛА, одне замовлення на доставку звичайних вантажів обслуговується одним БПЛА. БПЛА, який обслуговує замовлення на доставку медикаментів, несправний.
$S_{1_1(0_1)}$	Одне замовлення на доставку медикаментів обслуговується одним БПЛА, і одне замовлення на доставку звичайних вантажів обслуговується одним БПЛА. БПЛА, який обслуговує замовлення на доставку продуктів харчування несправний
$S_{0_0(1_0)}$	Запитів немає. Один з БПЛА несправний.

Стани $S_{1_0(1_0)}$ та $S_{1_1(1_0)}$ – це стани, коли для продовження обслуговування замовлення на доставку медикаментів необхідно залучити додаткові БПЛА.

Отримано аналітичні залежності для визначення фінальних імовірностей перебування СОМС у різних станах. Дослідження моделі показало, що застосування керованої деградації не зменшує кількість втрачених замовлень, але дозволяє зменшити загальну вартість втрат коштом перерозподілу наявних ресурсів Для даної моделі зменшення втрат склало 24%.

Для оцінювання впливу кібератак на гарантоздатність запропоновано марковську модель готовності СОМС БПЛА, що дозволяє оцінити вплив кібератак на інформаційні активи, зокрема, навігаційні системи, сенсорне обладнання та канали управління. Граф станів та переходів між ними для марковської моделі готовності СОМС БПЛА на рисунку 23, де S_0 – стан, коли на БПЛА не здійснюється ніяких кібератак; S_C – кібератака на канал керування БПЛА; S_{Sp} – атака GPS-спуфінгу; S_p – атака на корисне навантаження, що формує та передає дані; S_{C_Sp} – комбінована атака на канал керування та GPS-спуфінгу; S_{Sp_p} – комбінована атака GPS-спуфінгу та на дані корисного навантаження; S_{UAV_1} – втрата БПЛА; S_{M_f} – невиконання завдання.

Через λ та μ на рисунку позначені, відповідно, інтенсивності переходів між станами внаслідок атак та інтенсивності відновлення стану СОМС БПЛА після атак за рахунок застосування контрзаходів, які вимірюються в 1/год. Модель враховує

також можливість проведення комплексних кібератак, в яких поєднуються дві атаки. Можливо також враховувати складніші варіанти комплексування.

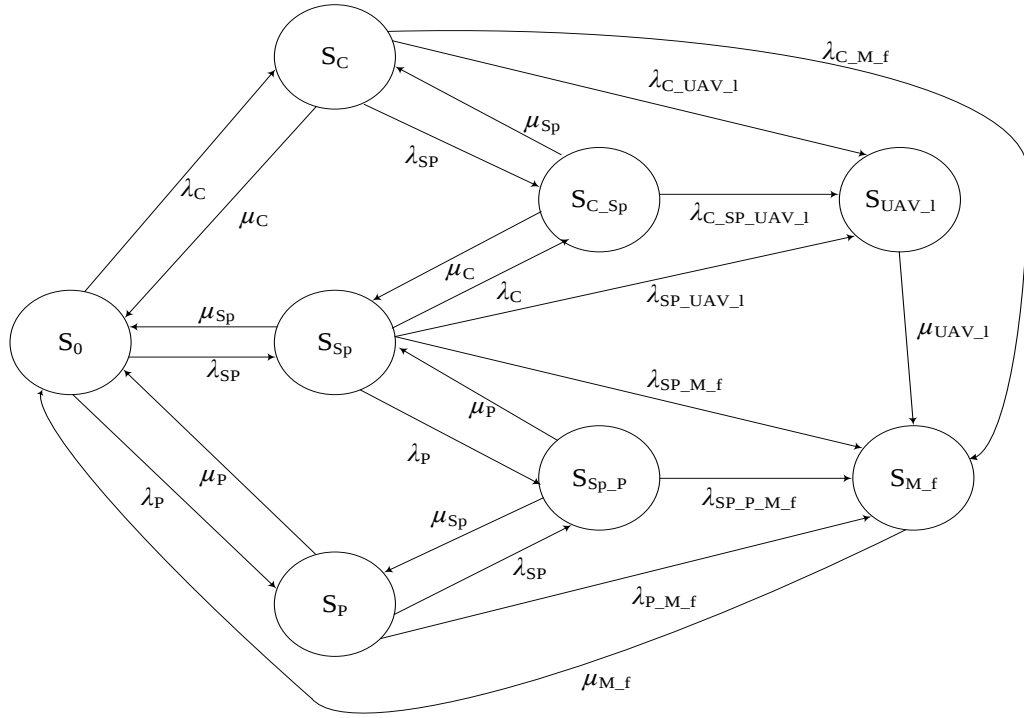


Рисунок 23 – Граф станів та переходів марковської моделі готовності СОМС БПЛА

Значення імовірностей перебування БПЛА у відповідних станах визначаються з системи рівнянь Колмогорова-Чепмена:

$$\begin{cases}
 \frac{dP_0}{dt} - (\lambda_C + \lambda_{Sp} + \lambda_P)P_0 + \mu_C P_C + \mu_{Sp} P_{Sp} + \mu_P P_P + \mu_{M_f} P_{M_f} = 0; \\
 \frac{dP_C}{dt} = -(\mu_C + \lambda_{Sp} + \lambda_{C_UAV_1} + \lambda_{C_M_f})P_C + \lambda_C P_0 + \mu_{Sp} P_{C_Sp} = 0; \\
 \frac{dP_{C_Sp}}{dt} = -(\mu_{Sp} + \mu_C + \lambda_{C_Sp_UAV_1})P_{C_Sp} + \lambda_{Sp} P_C + \lambda_C P_{Sp} = 0; \\
 \frac{dP_{Sp}}{dt} = -(\mu_P + \lambda_{Sp} + \lambda_P + \lambda_{P_M_f})P_P + \lambda_P P_0 + \mu_{Sp} P_{Sp_P} = 0; \\
 \frac{dP_{Sp_P}}{dt} = -(\mu_{Sp} + \mu_P + \lambda_{Sp_P_M_f})P_{Sp_P} + \lambda_{Sp} P_P + \lambda_P P_{Sp} = 0; \\
 \frac{dP_{UAV_1}}{dt} = -\mu_{UAV_1} P_{UAV_1} + \lambda_{C_UAV_1} P_C + \lambda_{C_Sp_UAV_1} P_{C_Sp} + \lambda_{Sp_UAV_1} P_{Sp} = 0; \\
 \frac{dP_{M_f}}{dt} = -\mu_{M_f} P_{M_f} + \mu_{UAV_1} P_{UAV_1} + \lambda_{Sp_M_f} P_{Sp} + \lambda_{Sp_P_M_f} P_{Sp_P} + \lambda_{P_M_f} P_P = 0.
 \end{cases} \quad (25)$$

Розроблена марковська модель враховує стани втрати працездатності внаслідок таких атак та аварійного закінчення місії та дозволяє обґрунтовувати вимоги до систем захисту та комплексу контрзаходів.

В п'ятому розділі розроблено метод формування структури та складу СОМС БПЛА, який базується на встановленні зв'язків між завданнями, умовами виконання, технічними характеристиками елементів СОМС, а також на моделях їх функціонування та оцінювання гарантоздатності. Схема реалізації методу показана на рисунку 24.

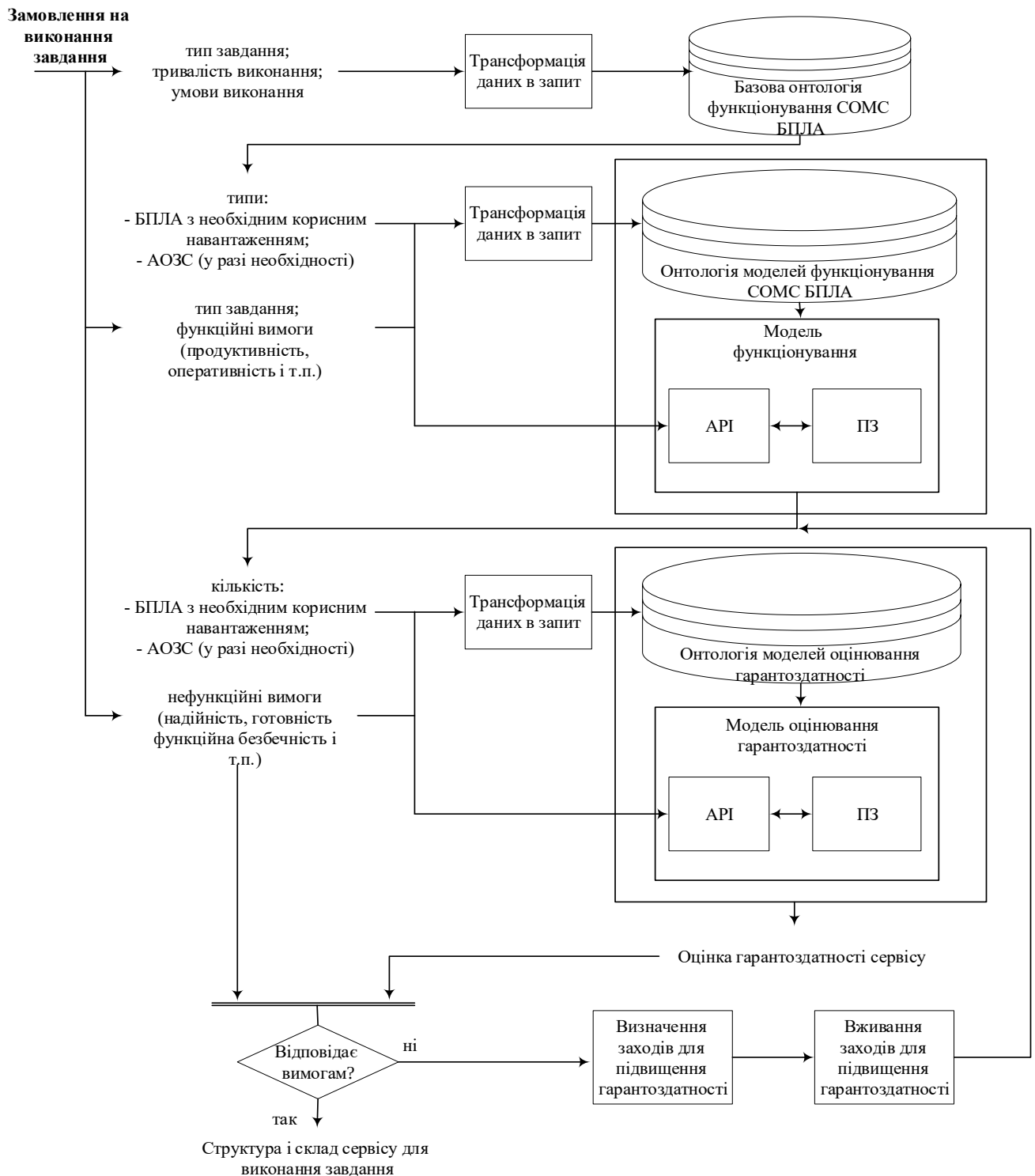


Рисунок 24 – Схема реалізації методу формування структури та складу СОМС БПЛА

Використання методу 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.

На першому етапі визначення структури та складу СОМС БПЛА, після отримання замовлення на виконання завдання на основі даних про параметри, вимоги та умови виконання, формується запит до сервісу прогнозування погоди, за результатами якого визначаються найгірші погодні умови, що очікуються.

На другому етапі розраховується чисельність БПЛА та АОЗС, якими наповнюються холони виконання та обслуговування, і які забезпечують реалізацію функційних вимог місії. Для цього використовується онтологія моделей функціонування СОМС БПЛА, яка містить описує взаємозв'язки моделей та атрибутів, які враховують типи завдань та їх особливості.

Третій етап полягає в оцінюванні виконання нефункційних вимог, а саме гарантоздатності сервісу, склад якого забезпечує виконання функційних вимог. Для цього використовується онтологія моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА.

У випадку невідповідності результатів оцінювання гарантоздатності встановленим вимогам необхідно вжити заходів щодо її підвищення, яке може бути досягнуто шляхом: підвищення надійності елементів системи; підвищення надійності системи за рахунок структурного резервування; вдосконалення підсистеми обслуговування; підвищення кібербезпеки системи та ін. Кожний з визначених заходів характеризується вартістю, складністю та тривалістю реалізації.

Для визначення найбільш ефективного заходу, пропонується використовувати принцип оптимальності Парето. Вибір оптимального заходу з множини допустимих зводиться до трьох етапів:

- 1) множина всіх альтернативних заходів зводиться до множини допустимих;
- 2) множина допустимих заходів звужується до множини ефективних;
- 3) з множини ефективних заходів вибирається єдиний оптимальний за критерієм Парето захід.

Множиною ефективних заходів (оптимальних за критерієм Парето) називається множина, в якій неможливо при переході від реалізації одного заходу до іншого поліпшити значення одного показника, не погіршуючи при цьому значень інших. Всі ефективні заходи, що можуть підвищувати гарантоздатність $Ops=(Ops_1, Ops_2, ..., Ops_i)$; зводяться в єдину таблицю.

На наступному кроці групою експертів оцінюються показники вартості (В), складності (С) та тривалості (Т) реалізації кожного заходу підвищення гарантоздатності, значення яких заносяться в сформовану таблицю з (вище значення відповідає кращому значенню показника) (таблиця 3).

У підсумку визначається найбільш ефективний захід (тобто оптимальний за принципом Парето) – Ops_0 , для якого не існує інших заходів суворо кращих за нього.

Таблиця 3 – Заходи підвищення гарантоздатності та їх показники

№ з/п	Захід підвищення гарантоздатності	Вартість реалізації заходу	Складність реалізації заходу	Тривалість реалізації заходу
1	Ops ₁ . Підвищення надійності елементів системи.	V ₁	C ₁	T ₁
2	Ops ₂ . Підвищення надійності системи за рахунок структурного резервування.	V ₂	C ₂	T ₂
3	Ops ₃ . Вдосконалення підсистеми обслуговування.	V ₃	C ₃	T ₃
4	Ops ₄ . Підвищення кібербезпеки системи.	V ₄	C ₄	T ₄
	...			
i	Ops _i . Інший захід підвищення гарантоздатності	V _i	C _i	T _i

Шостий розділ дисертації присвячений розробленню інформаційної технології для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА, в основі якої - загальна архітектура СОМС, що базується на концептуальній моделі у вигляді холонічної мультиагентної системи з використанням БПЛА, АОЗС (рисунок 25).

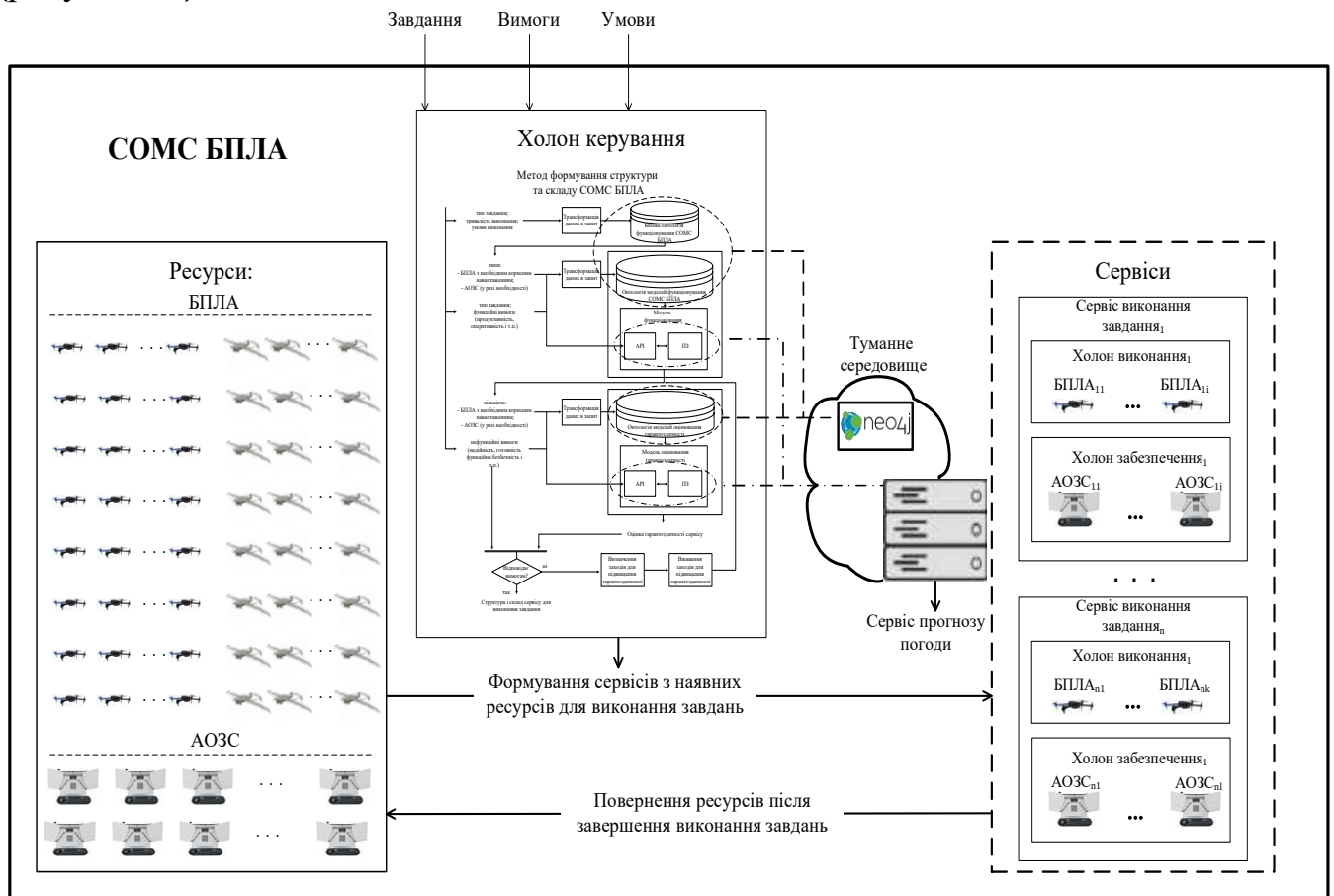


Рисунок 25 – Загальний вигляд архітектури СОМС БПЛА

До ресурсів, які використовуються для розгортання сервісів, відносяться:

- БПЛА різних типів, як апаратів обслуговування;
- наземні станції керування, які необхідні для застосування БПЛА;
- автоматичні обмінно-зарядні станції, як складник системи обслуговування БПЛА, що забезпечує тривале функціонування сервісу.

Перелік сервісів формується відповідно до потреб у виконанні. При виникненні нового сервісу до онтологій додаються складники (сутності, властивості), що дозволяють описувати функціонування та оцінювати гарантоздатність.

Для розгортання гарантоздатного сервісу формується необхідна кількість БПЛА та АОЗС з наявних ресурсів, яка після припинення функціонування сервісу повертається. Для розміщення онтологій та роботи з ними використовуються системи керування базами даних, які дозволяють зберігати та працювати з графовими моделями, серед яких можна виділити Neo4J.

Програмне забезпечення, яке використовується для визначення складу сервісів та оцінювання їх гарантоздатності, розміщується у туманному середовищі, а для роботи з ним використовуються відповідні API, що дозволяють передавати дані для опрацювання та отримувати результати.

Для розгортання гарантоздатного сервісу виділяється необхідна кількість БПЛА та АОЗС з наявних ресурсів, яка після припинення функціонування сервісу повертається.

Для розміщення онтологій та роботи з ними використовуються системи керування базами даних, які дозволяють зберігати та працювати з графовими моделями серед яких можна виділити Neo4J.

Програмне забезпечення, яке використовується для визначення складу сервісів та оцінки їх гарантоздатності, розміщується у туманному середовищі, а для роботи з ним забезпечують відповідні програмні інтерфейси, що також передають дані для опрацювання та надають змогу отримувати результати.

Розроблено інформаційну технологію (ІТ), яка має за мету підтримання прийняття рішень під час вирішення завдань щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА: при оцінюванні можливостей СОМС БПЛА щодо розгортання гарантоздатних сервісів з виконання завдань на об'єктах критичної інфраструктури та потенційно-небезпечних об'єктах; у ході розгортання СОМС БПЛА для обслуговування нових запитів з виконання завдань з заданими вимогами; під час оцінювання гарантоздатності вже розгорнутих сервісів на основі застосування БПЛА; під час розроблення рекомендацій щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА.

До складу ІТ входять IDEF0-діаграма (рисунок 26); архітектура СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи з використанням БПЛА, АОЗС; інструментальні засоби, які використано для реалізації процесів аналізу й моделювання.

Представлено опис інструментальних засобів, які використовуються в інформаційній технології.

Проведено систематизацію результатів впровадження і надано їх детальний опис.

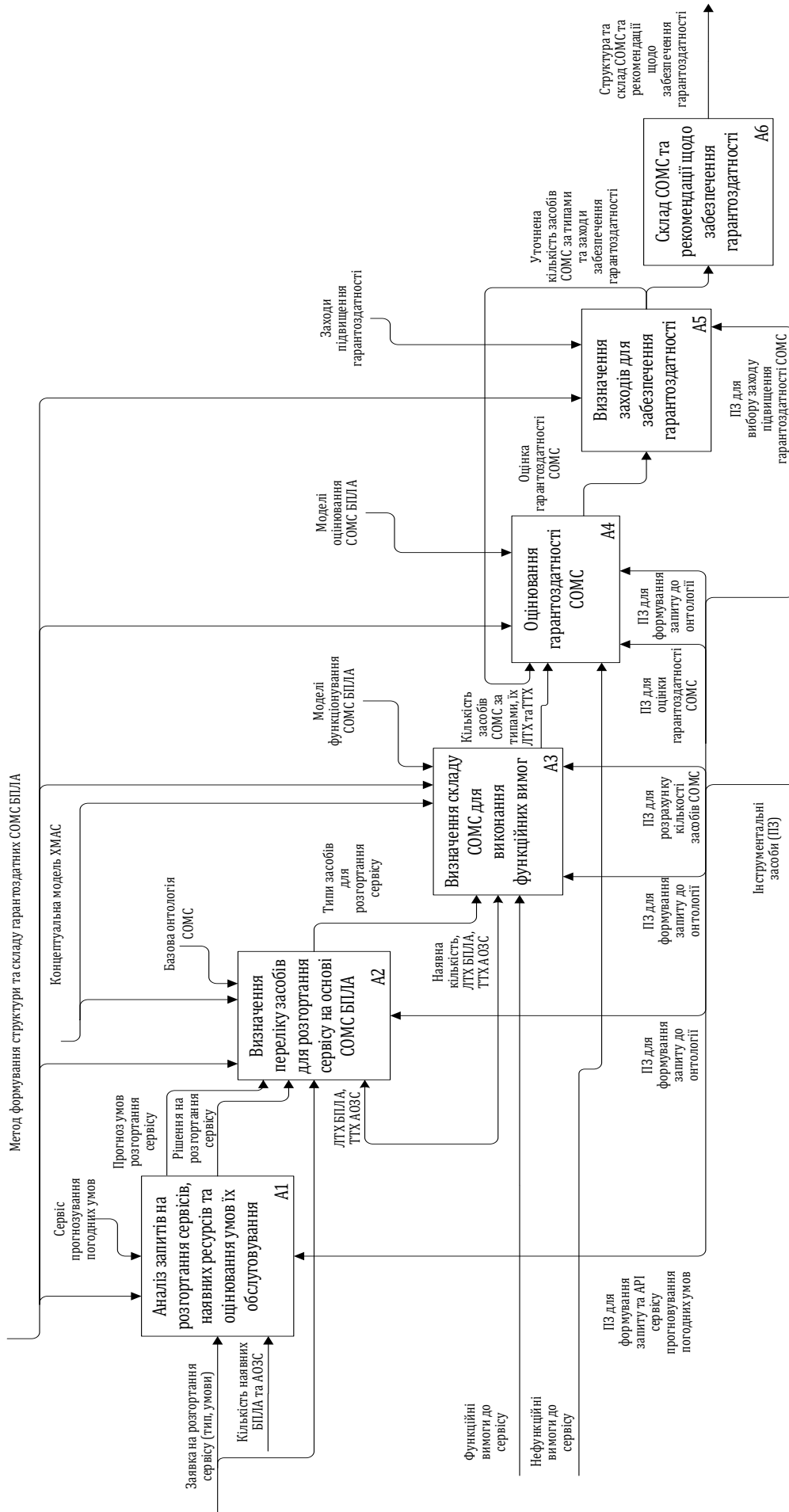


Рисунок 26 – Інформаційна технологія забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА (загальна IDEF0-діаграма)

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі сформульовано й розв'язано актуальну науково-прикладну проблему забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів шляхом розроблення науково-обґрунтованої методології та інформаційної технології

Проблема обумовлена існуванням об'єктивного протиріччя жорсткими вимогами до надійності та безпечності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів при виконанні різноманітних послуг та функцій.

При проведенні дисертаційних досліджень отримано наступні нові наукові результати:

1) вперше розроблено методологію побудови гарантоздатних сервіс-орієнтованих 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/окремих 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 та аварійного закінчення місії, та дозволяє обґрунтовувати вимоги до систем захисту та комплексу контрзаходів.

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.

Практичне значення отриманих результатів досліджень підтверджується актами впровадження наукових результатів:

- у навчальному процесі Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» при викладанні курсів «Методи штучного інтелекту для кібербезпеки», «Безпека мобільних систем», «Мобільні інтелектуальні системи» (акт впровадження від 30.06.2025);

- у науково-дослідних роботах, які виконувалися у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» (акт впровадження від 14.07.2025);

- у міжнародних проектах, що виконувались Національним аерокосмічним університетом «Харківський авіаційний інститут» спільно з закордонними установами (акт впровадження від 30.06.2025);

- у Командуванні Повітряних Сил Збройних Сил України при проведенні наукових досліджень з групового застосування БПЛА (акт реалізації від 14.05.2025);

- у наукових дослідженнях, які виконувались у Харківському Національному університеті Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба при проведенні досліджень з застосування БПЛА при розгортанні системи багатопозиційної системи навігації (акт впровадження від 18.06.2025);

- у навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України (акт впровадження від 22.06.2025).

Достовірність результатів підтверджується:

- 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;

- 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 АОЗС, які використовуються з функціонуючих проєктах з розгортання сервісів на їх основі;

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

- практичним впровадженням і позитивним досвідом використання отриманих результатів;

- 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.

Подальші дослідження доцільно спрямувати за напрямками:

– розроблення методологічних основ, моделей та інформаційних технологій управління мобільними інтелектуальними сервіс-орієнтованими системами на основі застосування технологій крайових та туманних обчислень;

– розроблення моделей та засобів для дослідження кібербезпеки систем на основі БПЛА та наземних роботизованих платформ;

– розроблення методів планування руху БПЛА у небезпечних динамічних просторах на основі врахування ризиків та прогнозування руху небезпечних предметів в умовах невизначеності з використанням технологій нечіткої логіки та штучного інтелекту.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Публікації в іноземних виданнях та фахових виданнях, які включені до міжнародних наукових баз даних:

1. Kliushnikov, I., Fesenko, H. & Kharchenko, V. (2019) 'Using automated battery replacement stations for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP post-accident monitoring', *Radioelectronic and Computer Systems*, 4(92), pp. 30–38. Available at: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.4.03> (Scopus, Google Scholar).

2. Fesenko, H. & Kliushnikov, I. (2020) 'NPP monitoring missions via a multi-fleet of drones: Reliability issues'. In: Yastrebenetsky, M. & Kharchenko, V. (eds.) *Cyber Security and Safety of Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems*. Hershey,

PA, USA: IGI Global, pp. 458–473. Available at: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3277-5.ch017> (Scopus, Google Scholar).

3. Kliushnikov, I., Fesenko, H. & Kharchenko, V. (2020) 'Scheduling UAV fleets for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP monitoring', *Radioelectronic and Computer Systems*, 1(93), pp. 29–36. Available at: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.1.03> (Scopus, Google Scholar).

4. Kliushnikov, I., Fesenko, H., Kharchenko, V., Illiashenko, O. & Morozova, O. (2021) 'UAV fleet based accident monitoring systems with automatic battery replacement systems: Algorithms for justifying composition and use planning', *International Journal of Safety and Security Engineering*, 11(4), pp. 319–328. Available at: <https://doi.org/10.18280/ijssse.110404> (Scopus Q3, Google Scholar, CrossRef).

5. Ivanchenko, O., Brezhnev, E., Kliushnikov, I. & Moroz, B. (2021) 'Cloud Simulation and Virtualization for Testing of Critical Energy Infrastructure Components', *International Journal of Computing*, 20(1), pp. 119–128. Available at: <https://doi.org/10.47839/ijc.20.1.2100> (Scopus Q3, Index Copernicus, Google Scholar).

6. Kharchenko, V., Kliushnikov, I., Rucinski, A., Fesenko, H. & Illiashenko, O. (2022) 'UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application', *Smart Cities*, 5(3), pp. 1151–1178. Available at: <https://doi.org/10.3390/smartcities5030058> (Scopus Q1, Web of Science).

7. Sun, Y., Fesenko, H., Kharchenko, V., Zhong, L., Kliushnikov, I., Illiashenko, O., Morozova, O. & Sachenko, A. (2022) 'UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application', *Sensors*, 22(17), 6444. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22176444> (Scopus Q2, Web of Science).

8. Kliushnikov, I., Kharchenko, V. & Fesenko, H. (2022) 'UAV Fleet Routing with Battery Recharging for Nuclear Power Plant Monitoring Considering UAV Failures', In: Ignatenko, O. et al. (eds.) *ICTERI 2021 Workshops*. Cham, Switzerland: Springer, pp. 442–454. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5_29 (Scopus).

9. Kliushnikov, I., Kharchenko, V., Fesenko, H. & Leontiiev, K. (2022) 'UAV Fleet with Battery Recharging for NPP Monitoring: Queuing System and Routing Based Reliability Models', In: Zamojski, W. et al. (eds.) *DepCoS-RELCOMEX 2022*. Cham, Switzerland: Springer, pp. 109–119. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06746-4_11 (Scopus, Web of Science).

10. Fesenko, H., Illiashenko, O., Kharchenko, V., Kliushnikov, I., Morozova, O., Sachenko, A. & Skorobohatko, S. (2023) 'Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring', *Drones*, 7(7), 409. Available at: <https://doi.org/10.3390/drones7070409> (Scopus Q2, Web of Science).

11. Fedorenko, G., Fesenko, H., Kharchenko, V., Kliushnikov, I. & Tolkunov, I. (2023) 'Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: concept, general structure, and models', *Radioelectronic and Computer Systems*, 2(106), pp. 143–159. Available at: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.12> (Scopus Q3, Google Scholar).

12. Zheng, Y., Shcherbakova, G., Rusyn, B., Sachenko, A., Volkova, N., Kliushnikov, I. & Antoshchuk, S. (2025) 'Wavelet Transform Cluster Analysis of UAV

Images for Sustainable Development of Smart Regions Due to Inspecting Transport Infrastructure', *Sustainability*, 17(3), 927. pp.1–27. Available at: <https://doi.org/10.3390/su17030927> (Scopus Q2, Web of Science).

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку фахових видань України:

13. Ключников, І. М., Шалигін, А. А. & Джус, Р. М. (2011) 'Визначення вимог до побудови систем підтримки прийняття рішень', *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, 3(29), с. 114–116.

14. Ключников, І. М., Єрилкін, А. Г., Джус, Р. М. & Крук, Б. М. (2013) 'Обґрунтування шляху озброєння авіації ПС ЗС України безпілотними авіаційними комплексами', *Системи озброєння і військова техніка*, 2(34), с. 28–31.

15. Ключников, І. М., Єрилкін, А. Г., & Петров, В. М. (2015) 'Шляхи вирішення проблем безпеки польотів в повітряному просторі України при застосуванні в ньому безпілотних повітряних суден', *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 2(19), с. 30–32.

16. Фесенко, Г. В. & Ключніков, І. М. (2018) 'Використання алгоритму розфарбовування графа для визначення порядку збору даних радіаційного моніторингу з точок «рандеву» безпроводної літальної мережі', *Системи та технології*, 2(56/1), с. 5–18. Available at: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2018.2-56.1>.

17. Опенько, П. В., Мартинюк, О. Р., Ключніков, І. М. & Никифоров, О. В. (2018) 'Методика обґрунтування раціонального складу перспективних безпілотних авіаційних комплексів', *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, 3(33), pp. 87–92. Available at: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2018-33-3-87-92>.

18. Ключніков, І. М., Нерубацький, В. О. & Шалигін, А. А. (2019) 'Підхід до формування критеріального апарату оцінки ефективності змішаних угруповань пілотованої та безпілотної авіації', *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 4(37), с. 50–55. Available at: <https://doi.org/10.30748/ntps.2019.37.07>.

19. Компанієць, О. М., Ключніков, І. М. & Литвинчук, Д. В. (2023) 'Стратегії функціонування безпілотних літальних апаратів та автоматизованих обмінно-зарядних станцій в бездротових мережах', *Системи обробки інформації*, 2(173), с. 26–31. Available at: <https://doi.org/10.30748/soi.2023.173.03>.

20. Таршин, В. А., Компанієць, О. М., Ключніков, І. М. & Касаткін, М. В. (2023) 'Оцінка безвідмовного функціонування літаючої сенсорної мережі на основі ймовірнісного підходу', *Системи обробки інформації*, 3(174), с. 70–76. Available at: <https://doi.org/10.30748/soi.2023.174.10>.

21. Ключніков, І. М. (2024) 'Оцінка безпеки застосування безпілотних літальних апаратів з використанням марковських моделей', *Системи озброєння і військова техніка*, 4(76), с. 51–57. Available at: <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.76.05>.

22. Ключніков, І. М. (2023) 'Метод визначення структури та складу мультиагентної системи моніторингу малих модульних реакторів побудованої на основі безпілотних літальних апаратів', *Системи управління, навігації та зв'язку*, 4, с. 22–29. Available at: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.022>.

23. Ключніков, І. М., Федоренко, Г. Л., Фесенко, Г. В. & Харченко, В. С. (2023) 'Методи пошуку та ідентифікації вибухонебезпечних предметів з використанням багатоцільових інтелектуальних безпілотних систем', In: Харченко, В. С. & Морозова, О. І. (eds.) *Методи та технології забезпечення якості та безпеки інтелектуальних систем*. Харків: Національний аерокосмічний університет «ХАІ», с. 297–320.

24. Середюк, О. А. & Ключніков, І. М. (2024) 'Групове застосування безпілотних літальних апаратів та наземних роботизованих засобів: виклики, рішення та перспективи впровадження хмарно-агентних технологій', *Системи управління, навігації та зв'язку*, 4(78), с. 143–155. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.143>.

Праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

25. Fesenko, H., Kliushnikov, I., Kharchenko, V., Rudakov, S. & Odarushchenko, E. (2020) 'Routing an unmanned aerial vehicle during NPP monitoring in the presence of an automatic battery replacement aerial system', In: *2020 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Kyiv, Ukraine, 14–18 May 2020. IEEE, pp. 34–39. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125080>.

26. Kliushnikov, I., Kharchenko, V., Fesenko, H. & Zaitseva, E. (2021) 'Multi-UAV Routing for Critical Infrastructure Monitoring Considering Failures of UAVs: Reliability Models, Rerouting Algorithms, Industrial Case', In: *2021 IEEE International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. Zilina, Slovakia, 22–24 June 2021. IEEE, pp. 303–310. Available at: <https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497624>.

27. Nikiforov, A. & Kliushnikov, I. (2021) 'Applying the method of categorical analysis for conceptual design of an automated control system of a group of unmanned aerial vehicles'. In: *2020 International Symposium on Automation, Information and Computing (ISAIC 2020)*. Journal of Physics: Conference Series, 1828, 012069. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1828/1/012069>.

28. Kliushnikov, I., Kharchenko, V. & Fesenko, H. (2022) 'An Unmanned Aerial Vehicle as a Multi-State System'. In: *2022 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, February 20–22, 2022. IEEE, pp. 291–296. <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766951>.

29. Kliushnikov, I., Kharchenko, V., Fesenko, H., Zaitseva, E. & Levashenko, V. 'Reliability Models of Multi-state UAV-based Monitoring Systems: Mission Efficiency Degradation Issues', In: *2023 IEEE International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. Zilina, Slovakia, 20–22 Jun. 2023. IEEE, pp. 299–306. Available at: <https://doi.org/10.1109/IDT59031.2023.10194443>.

30. Kliushnikov, I., Fesenko, H., Fedorenko, G., Rudakov, S., Mikhalevskyi, V., Kompaniets, O. (2022) 'Swarm of Unmanned Aerial Vehicles as a Multi-State Queueing System with Non-Controlled and Controlled Degradation', In: *2023 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Athens, Greece, 9–11 Dec. 2022. IEEE, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT58054.2022.10018784>.

31. Kliushnikov, I., Kharchenko, V., Cherepnov, I., Morozova, O., Rudakov, S. & Kompaniets, O. (2023) 'Structural-Parametric Synthesis of Multi-Agent UAV-based SMR Monitoring system: an Ontology Approach'. In: *2023 13th International Conference on*

Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). Athens, Greece, 13-15 October 2023. IEEE, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416509>.

32. Ключніков, І. М., Шалигін, А. А., Нерубацький, В. О. & Черепенко І. В. (2020) 'Методичний підхід до формування системи показників і критеріїв оцінки ефективності застосування змішаних угруповань пілотованої та безпілотної авіації', In: *Новітні технології для захисту повітряного простору: тези доповідей XVI міжн. наук. конф. ХНУПС*. Харків, Україна, 15-16 квітня 2020. Харків: ХНУ ПС, с. 90.

33. Ключніков, І. М., Камак, Ю. О. & Нестеренко, С. О. (2021) 'Планування застосування безпілотної авіаційних комплексів: моделі, методи та особливості', In: *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: XXI наук.-техн. конф.*. Чернігів, Україна, 02-03 вересня 2021. Чернігів, р. 130.

34. Ключніков, І. М. & Фесенко, Г. В. (2021) 'Особливості застосування мультиагентних технологій при створенні та управлінні системами моніторингу, побудованими на основі безпілотної літальних апаратів', In: *Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій: матеріали Третьої міжнар. наук.-практ. конф.* Київ, Україна, 22-26 січня 2021. Київ, с. 104–107.

35. Ключніков, І. М. & Середюк, А. О. (2023) 'Планування місій з використанням безпілотної літальних апаратів та підсистеми забезпечення', In: *Новітні технології для захисту повітряного простору: тези доповідей XIX міжн. наук. конф.*. Харків, Україна, 12-13 квітня 2023. Харків: ХНУПС, с. 96.

36. Ключніков, І. М. & Васильєв, О. В. (2023) 'Способи забезпечення кібербезпеки застосування безпілотної літальних апаратів', In: *Новітні технології для захисту повітряного простору: тези доповідей XIX міжн. наук. конф.*. Харків, Україна, 12-13 квітня 2023. Харків: ХНУПС, с. 95.

37. Ключніков, І. М. & Прозорова, К. В. (2023) 'Моделі функціонування флоту безпілотної літальних апаратів як системи масового обслуговування потоку замовлень', In: *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності: тези доп. наук.-практ. конф.*. Львів, Україна, 29-30 листопада 2023. Львів: НАСВ, р. 45.

38. Середюк, А. О., Ключніков, І. М., Кожушко, Я. М. & Ряполов, Є. І. (2024) 'Групове застосування безпілотної літальних апаратів та наземних транспортних засобів: сфери використання, завдання, особливості та технології, що використовуються БПЛА та доповненої реальності', In: *Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки: тези доп. III наук.-техн. конф. ДНДІ ВС ОВТ*. Черкаси, Україна, 26 вересня 2024. Черкаси: ДНДІ ВС ОВТ, с. 418–420.

39. Харченко, В. С., Фесенко, Г. В., Федоренко, Г. Л., Ключніков, І. М. & Толкунов І. О. (2024) 'Роботобіологічні системи для виявлення та ідентифікація вибухонебезпечних предметів', In: *Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.*. Харків, Україна, 16 травня 2024. Харків: НУЦЗУ, с. 211–213.

40. Kliushnikov, I. & Viedienieva, R. (2024) 'A method of forming the structure and composition of intelligent monitoring systems', In: *Новітні технології для захисту повітряного простору: тези доповідей XX Міжнар. наук. конф. ХНУПС*. Харків, Україна, 02-03 травня 2024. Харків: ХНУПС, с. 75.

41. Kliushnikov, I. & Serediuk, A. (2024) 'Forming of optimal flight routes for unmanned aerial vehicles during monitoring missions', In: *Новітні технології для захисту повітряного простору: тези доповідей XX Міжнар. наук. конф. ХНУПС*. Харків, Україна, 02-03 травня 2024. Харків: ХНУПС, с. 76.

42. Kliushnikov, I., Olyinik, A. & Kasatkin, M. (2025) 'Methods and means of augmented reality and digital twins for intelligent unmanned systems for searching explosive objects', In: *Новітні технології для захисту повітряного простору: тези доповідей Міжнар. наук. конф. ХНУПС*. Харків, Україна, 09-10 квітня 2025. Харків: ХНУПС, с. 85.

43. Kliushnikov, I., Kasatkin, M. & Serediuk, A. (2025) 'Group application of unmanned aerial vehicles and ground robotic systems: challenges, solutions, and prospects for cloud-agent technologies', In: *Новітні технології для захисту повітряного простору: тези доповідей Міжнар. наук. конф. ХНУПС*. Харків, Україна, 09-10 квітня 2025. Харків: ХНУПС, с. 84.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

44. Севостьянов, Ю. В., Сєдишев, Ю. М., Каратєєв, С. М., Северін, Л. С., Бойко, М. М., Джус, Р. М. & Ключников, І. М. (2012) 'Пропозиції щодо модернізації безпілотних літальних апаратів типу Ту-141 "Стриж" з розвідувального варіанту до варіанту безпілотного літака – перехоплювача повітряних цілей', *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*, 4, с. 44–49.

45. Петров, В. М., Кашаєв, І. О., Ключников, І. М. & Кудрявцев, А. Ф. (2019) 'Методичний підхід до визначення ефективної номенклатури засобів ураження перспективних ударних безпілотних авіаційних комплексів', *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 2(60), с. 59–66. Available at: <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.60.08>

46. Ключников, І. М. & Фесенко, Г. В. (2019) 'Балансування навантаження між безпілотними літальними апаратами літаючої бездротової мережі у разі використання автоматичних обмінно-зарядних станцій', *Комунальне господарство міст*, 1 (154), с. 113–119. Available at: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-113-119>.

47. Гайдук, К. С., Ключников, І. М. & Морозова, О. І. (2023) 'Знання-орієнтовані методи та засоби автоматизації синтезу тестів', In: Харченко, В. С. & Морозова, О. І. (eds.) *Методи та технології забезпечення якості та безпеки інтелектуальних систем*. Харків: Національний аерокосмічний університет «ХАІ», с. 265–279.

48. Компанієць, О. М., Ключников, І. М. & Дмитрієв, А. Г. (2023) 'Комплексний аналіз впливу факторів на ефективність управління роями безпілотних літальних апаратів', *Системи озброєння і військова техніка*, 3(75), с. 66–70. Available at: <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.75.08>.

49. Олійник, О. К. & Ключников, І. М. (2024) 'Особливості застосування алгоритмів пошуку шляхів у небезпечних просторах', *Системи обробки інформації*, 3(178), с. 48–54. <https://doi.org/10.30748/soi.2024.178.06>.

50. Федоренко, Г. Л., Ключников, І. М., Назаренко, С. О., Павліков, В. В., Толкунов, І. О., Фесенко, Г. В., Харченко В. С. Спосіб пошуку та розпізнавання

вибухонебезпечних предметів : пат. 154226 Україна, № u202300129; заявл. 13.01.2023; опубл. 25.10.2023, Бюл. № 43. 6 с.

51. Харченко, В. С., Ключніков, І. М., Фесенко, Г. В., Федоренко, Г. Л. Система моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки : пат. 154299 Україна, № u202302137; заявл. 05.05.2023; опубл. 01.11.2023, Бюл. № 44. 7 с.

52. Ключніков, І. М., Середюк, А.О. Розрахунок оптимального маршруту БПЛА : рішення про реєстрацію дог. який стосується права авт. на твір. Україна №6911, дата реєстрації договору 08.12.2023 ; опубл. 29.12.2023, Бюл. № 78.

53. Кузьменко, А. О., Ключніков, І. М. Комп'ютерна програма «Калькулятор польотів БПЛА»: договір про передачу права на використання твору №7278; дата реєстр. дог. 14.10.2024.

54. Харченко, В. С., Ключніков, І. М., Фесенко, Г. В., Федоренко, Г. Л. Система моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки : пат., заявка № u2023 01106; заявл. 28.03.2023; рішення про реєстрацію винаходу від 21.10.2024 №21237/3а/24.

АНОТАЦІЯ

Ключніков І. М. Методологія, моделі та інформаційна технологія забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2025.

У дисертаційній роботі сформульовано й вирішено актуальну науково-прикладну проблему забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів шляхом розроблення науково-обґрунтованої методології та інформаційної технології, обумовленої існуванням об'єктивного протиріччя між жорсткими вимогами до надійності та безпечності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів при виконанні різноманітних послуг та критичних функцій та відсутністю концептуальних та математичних моделей, методів та засобів для оцінювання та забезпечення гарантоздатності таких систем.

В рамках дисертаційної роботи проведено аналіз методів, засобів і математичного апарату оцінювання та забезпечення гарантоздатності мобільних безпілотних систем. Вперше розроблено методологію побудови гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі, 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. 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. 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. Удосконалено концептуальну модель СОМС БПЛА у вигляді холонічної 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. 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. 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/окремих показників гарантоздатності, обґрунтовувати склад СОМС БПЛА і комплекс засобів для забезпечення гарантоздатності надання сервісів. 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 та аварійного закінчення місії та дозволяє обґрунтовувати вимоги до систем захисту та комплексу контрзаходів.

Результати досліджень впроваджено в навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України, Харківському національному університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Національного авіаційного університету «Харківський авіаційний університет» та науково-дослідних роботах в Командуванні Повітряних Сил Збройних Сил України та у Національному авіаційному університеті «Харківський авіаційний університет».

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, сервіс-орієнтована мобільна система, система масового обслуговування, гарантоздатність, функційна надійність, кібербезпека, система з деградацією.

ANNOTATION

Kliushnikov I. M. Methodology, models and information technology for ensuring the reliability of service-oriented mobile systems based on unmanned aerial vehicles. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the field 05.13.06 – Information Technology. National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, 2025.

The dissertation formulates and solves the topical scientific and applied problem of ensuring the dependability of service-oriented mobile systems (SOMS) based on unmanned aerial vehicles (UAVs) by developing a scientifically sound methodology and information technology related to the existence of an objective contradiction between the strict requirements for the reliability and safety of SOMS UAVs when performing various services and functions and the lack of conceptual and mathematical models, methods and means for assessing and ensuring the reliability of such systems.

As part of the dissertation, an analysis of methods, means and mathematical apparatus for assessing and ensuring the reliability of mobile unmanned systems was carried out. A methodology for the creation and use of reliable UAV SOMS, a conceptual model and a basic ontology of UAV SOMS were developed. Models of the functioning of UAV SOMS, as well as models of queuing systems (QS) for studying the functioning and assessing the reliability and their taxonomy, were developed and researched. Models for assessing the reliability (functional reliability, survivability, safety, and cybersecurity) of SOMS UAVs and their taxonomy have been developed and researched. Models of degradation of UAV SOMS have been developed and researched. Based on the developed models, ontology and taxonomy, a method for forming the structure and composition of reliable UAV SOMS has been developed, as well as the structure and IT tools to support decision-making on ensuring the reliability of UAV SOMS. For the first time, a methodology has been developed for building dependable service-oriented mobile systems based on UAVs (UAV SOMS), which, unlike the known ones, is based on the concept of building reliable (reliable and secure) systems from insufficiently reliable and secure elements and their sets (devices and their swarms), taking into account functional and spatial constraints, as well as the principles of multi-agent representation of UAV SOMS usage processes; a functional-spatial approach to assessing and improving the reliability and dependability of UAV SOMS; dynamic structural and functional redundancy and controlled degradation of UAV SOMS, as well as guaranteed servicing of various requests for the performance of services with specific requirements in conditions of failures, cyberattacks and limited autonomy of devices, which allows justifying the general structure and means of ensuring the dependability of UAV SOMS. For the first time, analytical models have been developed to describe the deployment processes and reliability behaviour of UAV SOMS when performing typical tasks, which, unlike the known ones, are represented by dependencies that take into account the taxonomy describing entities according to the hierarchy of features «task – type of coverage – type of UAV set – types of performance – types of models», which allows determining the quantitative indicators of the UAV SOMS and the compliance of their values with the requirements for services. For the first time, a method for forming the structure and composition of UAV SOMS has been developed, which, unlike the known ones, is based

on the determination of relationships between tasks, conditions of execution, technical characteristics of SOMS elements, as well as on models of their functioning and reliability assessment, which allows determining a set of stationary and mobile components for performing tasks in accordance with the requirements and parameters of the environment. The conceptual model of the UAV SOMS has been improved in the form of a multi-agent system, which consists of control, execution and support holons, and describes the structure of the system, the properties and interrelationships of holons-agents that are formed to perform various tasks, which allows the formation of a scalable structure based on mobile agents that represent software and hardware entities, the hardware part of which is based on UAVs and ground service stations. The functional reliability models of the UAV SOMS have been improved, taking into account the fragmentation of the target area, options for forming routes to cover it in conditions of possible failures of the UAV and the service subsystem, as well as the degradation of the structure and characteristics of the devices and the quality of task execution, which allows for more accurate assessment of reliability indicators and the probability of complete or partial failure of SOMS services, as well as justifying the requirements for the reliability and survivability of devices and systems. Queuing systems models for researching the functioning and evaluating the dependability of UAV SOMS have been further developed by taking into account the possibility of failures due to physical causes and cyber attacks, the parameters of UAV recovery and preventive maintenance processes, as well as the processes of uncontrolled and controlled degradation of task performance quality, which allows for more accurate assessment of partial/individual reliability indicators, justification of the composition of the UAV SOMS and a set of means to ensure the dependability of service provision. The Markov model of UAV SOMS readiness has been further developed, taking into account cyberattacks on information assets, in particular navigation systems, sensor equipment and control channels, which describes the states of loss of operability due to such attacks and emergency termination of the mission and allows justifying the requirements for protection systems and a set of countermeasures. The research results have been implemented in the educational process of the National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv National University of Air Forces named after Ivan Kozhedub, National Aerospace University «Kharkiv Aviation University» and research work at the Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine and the National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute».

Keywords: unmanned aerial vehicle, service-oriented mobile system, queuing system, dependability, functional reliability, cybersecurity, multistate system.

Підписано до друку 05.11.2025 р. Папір офсетний. Формат 60х/16.
Ум. друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим. Зам. № 211/25

Віддруковано згідно з наданим оригінал-макетом в друкарні ТОВ «Цифра принт»
на цифровому лазерному комплексі Xerox DocuTech 6135.
Свідоцтво про державну реєстрацію А01 № 432705 від 3.08.2009 р.
Адреса: Україна, м. Харків, вул. Данилевського, 30.