

Міністерство освіти і науки України

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КЛЮШНІКОВ ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 629.7.017.014.1-519.1:004.942(043)

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

05.13.06 – інформаційні технології

12 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Ігор КЛЮШНІКОВ

Науковий консультант: Харченко Вячеслав Сергійович
доктор технічних наук, професор

Всі примірники дисертації ідентичні за змістом.

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 64.62.01



Ольга МОРОЗОВА

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Клюшніков І. М. *Методологія, моделі та інформаційна технологія забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.* – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

У дисертаційній роботі сформульовано й вирішено актуальну науково-прикладну проблему забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем (СОМС) на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) шляхом розроблення науково-обґрунтованої методології та інформаційної технології, обумовленої існуванням об'єктивного протиріччя між жорсткими вимогами до надійності та безпечності СОМС БПЛА при виконанні різноманітних послуг та критичних функції 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 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 обґрунтувати 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 визначені 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 обґрунтувати 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, обґрунтувати 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 обґрунтувати 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.

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., Brezhniev, 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), pp. 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), pp. 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), pp. 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), pp. 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), pp. 50-55. Available at: <https://doi.org/10.30748/nitps.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), pp. 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), pp. 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), pp. 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, pp. 22-29. Available at:

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», pp. 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), pp. 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 IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Kyiv, Ukraine, 14–18 May 2020. 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. 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 IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, 20-22 Feb. 2022. 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. pp. 299–306. Available at: <https://doi.org/10.1109/IDT59031.2023.10194443>.

30. Kliushnikov, I., Fesenko, H., Fedorenko, G., Rudakov, S., Mikhalevskyi, V., Kompaniiets, O. (2022) 'Swarm of Unmanned Aerial Vehicles as a Multi-State Queueing System with Non-Controlled and Controlled Degradation', In: *2023 12th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Athens, Greece, 9-11 Dec. 2022. 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 IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Athens, Greece, 13-15 October 2023. 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, р. 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, pp. 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, р. 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, р. 95.

37. Ключніков, І. М. & Прозорова, К. В. (2023) 'Моделі функціонування флоту безпілотних 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 безпілотних 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, pp. 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, pp. 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, р. 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, р. 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, р. 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, р. 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, pp. 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), pp. 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), pp. 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», pp. 265-279.

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

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

50. Федоренко, Г. Л., Ключніков, 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.

ABSTRACT

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

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in the field 05.13.06 – Information Technology. – National Aerospace University ‘Kharkiv Aviation Institute’, Ministry of Education and Science of Ukraine, 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 mass service systems (MSS) 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.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень	25
Вступ.....	28
Розділ 1 Аналіз методів, засобів і математичного апарату оцінювання та забезпечення гарантоздатності мобільних безпілотних систем. обґрунтування наукової проблеми	41
1.1 Аналіз вимог до мобільних систем на основі флотів безпілотних літальних апаратів	41
1.1.1 Аналіз досвіду використання безпілотних літальних апаратів.....	41
1.1.2 Концепція гарантоздатності складних сервіс-орієнтовних технічних систем на основі безпілотних літальних апаратів	46
1.2 Аналіз науково-методичного апарату оцінювання гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	50
1.2.1 Аналіз моделей оцінювання гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	50
1.2.2 Аналіз методів і засобів оцінювання гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	53
1.2.3. Визначення показників для оцінки гарантоздатності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів	54
1.3 Аналіз методів забезпечення гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	58
1.3.1 Класифікація методів забезпечення гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	58
1.3.2 Аналіз методів і засобів забезпечення гарантоздатності виконання завдань з використанням безпілотних літальних апаратів	60
1.4 Обґрунтування наукової проблеми та методології досліджень	64
1.4.1 Постановка наукової проблеми та задач досліджень.....	64
1.5 Вибір методів досліджень	65
1.6 Методологія проведення дисертаційних досліджень.....	67

1.7 Висновки до першого розділу.....	68
Розділ 2 Елементи методології створення, використання та системні моделі гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	70
2.1 Концепція і структура методології створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	70
2.1.1 Концепція створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	70
2.1.2 Структура і взаємозв'язок елементів методології створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	70
2.2 Принципи створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	73
2.2.1 Принцип онтологічного та мультиагентного представлення процесів функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	73
2.2.2 Принцип функціонально- і простороворієнтованої побудови моделей надійності і гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	75
2.2.3 Принцип комбінованого використання структурно-компонентного резервування і керованої деградації сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	76
2.2.4 Принцип гарантованого обслуговування різноманітних запитів на виконання сервісів з визначеними вимогами в умовах відмов, кібератак та обмеженої автономності апаратів сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів та адаптації їх структури та складу до змін параметрів середовища.....	78
2.3 Онтологічні моделі сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	79

2.3.1 Базова онтологія сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	83
2.3.1.1 Розроблення базової онтології СОМС БПЛА	83
2.3.1.2 Дослідження базової онтології СОМС БПЛА	90
2.3.2 Онтологія моделей функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	93
2.3.3 Онтологія моделей оцінки гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	99
2.4 Концептуальна модель сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів у вигляді мультиагентної системи.....	106
2.5 Модели розгортання сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	114
2.5.1 Модели сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів для виконання завдань з урахуванням вимог та обмежень	114
2.5.2 Модель гомогенної сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів для виконання завдань моніторингу	126
2.5.3 Модель гетерогенної сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів для розгортання літаючої мережі	138
2.5.4 Модель сервіс-орієнтованої мобільної системи на основі безпілотних літальних апаратів для моніторингу фізичної безпеки	150
2.5.5 Модель сервіс-орієнтованої мобільної системи на основі безпілотних літальних апаратів для збирання даних у визначені часові інтервали	156
2.6 Висновки до другого розділу	162
Розділ 3 Моделі систем масового обслуговування для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	164

3.1 Класифікація моделей систем масового обслуговування для опису функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА	164
3.1.1 Обґрунтування класифікаційних ознак	164
3.1.2. Фасетна класифікація моделей СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів.....	166
3.2 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/1).....	168
3.3 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Ν).....	169
3.4 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Ν):(F).....	170
3.4.1 Розроблення моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Ν):(F)	170
3.4.2 Дослідження моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Ν):(F)	173
3.5 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Ν(U)):(F)	176
3.6 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Ν):(F/S).....	180
3.6.1 Розроблення моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Ν):(F/S)	180
3.6.2 Дослідження моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Ν):(F/S)	183
3.7 Висновки до третього розділу.....	190
Розділ 4 Моделі для оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	192
4.1 Маршрутоорієнтовні моделі оцінки функційної надійності СОМС БПЛА	192

4.1.1 Маршрутоорієнтовні моделі оцінки функційної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів без деградації та обслуговування	192
4.1.1.1 Розроблення маршрутоорієнтовних моделей оцінки функційної надійності СОМС БПЛА без обслуговування та деградації	193
4.1.1.2 Дослідження маршрутоорієнтовних моделей оцінювання функціональної надійності $S(1[4],1)$, $S(2[2],1)$ та $S(2[2],2)$	200
4.1.2 Маршрутоорієнтовні моделі оцінки функційної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів з деградацією та обслуговуванням	203
4.1.2.1 Розроблення маршрутоорієнтовних моделей оцінки функціональної надійності сСОМС БПЛА з обслуговуванням та деградацією.....	203
4.1.2.2. Дослідження маршрутоорієнтовних моделей оцінки функціональної надійності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів з обслуговуванням.....	215
4.2 Моделі оцінювання функціональної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів з деградацією.....	217
4.2.1 Модель безпілотного літального апарату з деградацією.....	217
4.2.2 Розроблення моделей оцінювання функціональної надійності СОМС БПЛА з деградацією	227
4.2.2.1. Модель СОМС БПЛА $S(1[2],1,0,0)$	232
4.2.2.2. Модель СОМС БПЛА $S(1[3],1,0,0)$	233
4.2.2.3. Модель СОМС БПЛА $S(1[3],1,0,1)$	233
4.2.2.4. Модель СОМС БПЛА $S(1[3],1,0,2)$	235
4.2.3 Дослідження моделей оцінювання функційної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів з деградацією.....	237
4.3 Моделі СМО для оцінювання надійності сервісів на основі безпілотних літальних апаратів з некерованою та керованою деградацією	242

4.3.1 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів з некерованою деградацією	243
4.3.2 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів з керованою деградацією	244
4.4 Модель оцінювання надійності системи моніторингу промислових об'єктів, що побудована на основі використання БПЛА.....	253
4.5 Модель оцінювання безпеки сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів	264
4.5.1 Розроблення моделі оцінювання безпеки сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів	264
4.5.2 Дослідження моделі оцінювання безпеки сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів	272
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	275
Розділ 5 Метод формування структури та складу сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	277
5.1. Розроблення методу формування структури та складу сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	277
5.2 Застосування методу формування структури та складу сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів.....	290
5.2.1 Визначення структури та переліку складових з використанням базової онтології сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	290
5.2.2 Визначення чисельності складових для забезпечення функційних вимог при виконанні поставленого завдання з використанням онтології моделей функціонування сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів	299

5.2.3 Оцінювання гарантоздатності виконанні поставленого завдання з використанням онтології моделей оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів	301
5.3 Висновки до п'ятого розділу.....	303
Розділ 6 Інформаційна технологія для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів. Результати впровадження отриманих результатів.....	304
6.1 Архітектура сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	304
6.2 Інформаційна технологія для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів	306
6.2.1 Основні положення інформаційної технології	306
6.2.2 Перетворення інформації в IDEF0-діаграмі.....	308
6.3 Інструментальні засоби	311
6.3.1 Інструментальний засіб планування маршрут обльоту цільових точок на місцевості та визначення необхідної чисельності БПЛА та АОЗС	312
6.3.2 Інструментальний засіб для визначення чисельності БПЛА та АОЗС для розгортання системи фізичного захисту об'єктів критичної інфраструктури.....	320
6.4 Впровадження результатів досліджень.....	324
6.4.1 Впровадження наукових результатів у навчальний процес Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут»	324
6.4.2 Впровадження наукових результатів під час виконання науково-дослідних робіт у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут»	325

6.4.3 Впровадження наукових результатів під час виконання міжнародних проектів у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут».....	326
6.4.4 Впровадження наукових результатів під час виконання науково-дослідних робіт в Командуванні Повітряних Сил Збройних Сил України.....	327
6.4.5 Впровадження наукових результатів під час виконання наукових досліджень в Харківському Національному університеті Повітряних Сил ім. І. Кожедуба.....	328
6.4.6 Впровадження наукових результатів в навчальному процесі в Національному університеті цивільного захисту України.....	329
6.4.7 Систематизація результатів впровадження.....	329
6.5 Висновки до шостого розділу	330
Висновки	332
Список використаних джерел	337
Додаток А OWL - коди онтологій	365
Додаток Б Вихідні коди інструментального засобу для визначення порядку застосування БПЛА та АОЗС для покриття цільових точок на місцевості з урахуванням обмежень.....	419
Додаток В Вихідні коди інструментального засобу для визначення чисельності БПЛА для забезпечення виконання завдань фізичної безпеки об'єктів	428
Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	469
Додаток Д Акти впровадження результатів дисертації	479

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ABRAS	–	Automatic Battery Replacement System (автоматична станція заміни батареї БПЛА);
AHRS	–	Attitude and Heading Reference Systems (система відліку висоти та курсу);
AUAV	–	Aircraft Unmanned Aerial Vehicle (БПЛА з фіксованим крилом);
CM	–	Center of Monitoring (центр контролю та моніторингу);
CR	–	Control Room (диспетчерська);
CrS	–	Crisis Center (кризовий центр);
CVS	–	Computer Vision System (система комп'ютерного зору);
DMU	–	Decision-Making Support Unit (засіб підтримки прийняття рішень);
DT	–	Digital Twin (цифровий двійник);
EC	–	Equipment that is Monitored and Controlled (обладнання, яке контролюється та керується);
ECR	–	Emergency Control Room (аварійна диспетчерська);
EH	–	Execution Holon (холон виконання);
EHMB	–	Execution Holon Messaging Bus (шина обміну повідомленнями холону виконання);
FCC	–	Flying Control Center (центр управління польотами);
FCFS	–	First Come, First Served (першим зайшов, першим обслужили);
FEN	–	Flying Edge Nodes (літаючий крайовий вузол);
GPS	–	Global Positioning System (глобальна система позиціювання);
IoD	–	Internet of Drones (Інтернет Дронів);
JSON	–	JavaScript Object Notation;
LCFS	–	Last Come, First Served (останнім зайшов, першим обслужили);

LRPT	–	Longest Remaining Processing Time (найдовший залишковий час обробки);
MD	–	Main Drone (основний БПЛА);
MH	–	Maintenance Holon (холон обслуговування);
MS	–	Measuring Station (вимірювальна станція);
MUAV	–	Multicopter Unmanned Aerial Vehicle (мультироторний БПЛА);
OM	–	Object of Monitoring (об'єкт, що контролюється та/або керується);
PCG	–	Private Cloud Crisis Group (приватна хмарна кризова група)
PHMB	–	Maintenance Holon Messaging Bus (шина обміну повідомленнями холону обслуговування);
QD	–	Quadcopter Depot (майданчик розміщення БПЛА);
RD	–	Redundant Drone;
RR	–	Round-Robin (циклічне обслуговування);
SIRO	–	Server in Random Order (обслуговування в випадковому порядку);
SM	–	System of Monitoring (система моніторингу);
SOMS	–	Service-oriented Mobile System (сервіс-орієнтовна мобільна система);
SPARQL	–	SPARQL Protocol and RDF Query Language;
SPF	–	Successful Plan Fullfilment (успішне виконання плану);
TSP	–	Traveling Salesman Problem (задача комівояжера);
UAV	–	Unmanned Aerial Vehicle (безпілотний літальний апарат);
UAVaaS	–	Unmanned Aerial Vehicle as a Service (БПЛА як сервіс);
UC	–	Utility that is Monitored and Controlled (засіб, що контролюється та керується);
VAMF	–	Variants of Allocation of Monitoring Functions (варіант розподілу функцій моніторингу);
ZC	–	Zones that are Monitored (зони, що контролюються);

АОЗС	–	автоматизована обмінно-зарядна станція;
БД	–	база даних;
БПЛА	–	безпілотний літальний апарат;
ВНП	–	вибухо-небезпечні предмети;
ВР	–	вперше розроблено;
ЗАЕС	–	Запорізька атомна електростанція
ІТ	–	інформаційні технології;
ЛБМ	–	літаюча бездротова мережа;
ЛБПЛА	–	БПЛА літакового типу;
ЛКМ	–	ліва кнопка миші;
ЛТХ	–	льотно-технічні характеристики;
МАС	–	мультиагентна система;
МБПЛА	–	мультироторний БПЛА;
МТ	–	мобільні технології;
ОПН	–	об'єкти підвищеної небезпеки;
ОТІ	–	об'єкти транспортної інфраструктури;
ПЗ	–	програмне забезпечення;
ПКМ	–	права кнопка миші;
ОПН	–	об'єкт підвищеної небезпеки;
ПР	–	дістало подальшого розвитку;
СМ	–	система моніторингу;
СМО	–	система масового обслуговування;
СОА	–	сервісно-орієнтована архітектура;
СОМС	–	сервіс-орієтовна мобільна система;
ТТХ	–	тактико-технічні характеристики;
У	–	удосконалено;
ФБПЛА	–	флоти безпілотних літальних апаратів;
ХМАС	–	холонічна мультиагентна система;
ШІ	–	штучний інтелект

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

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

Симбіоз ІТ та МТ створює синергетичну е-мобільність, засновану на застосуванні безпілотних транспортних засобів, автономних транспортних систем тощо [1]. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають провідною технологією для розгортання різноманітних послуг [2–4], пов'язаних з моніторингом та інспектуванням стану об'єктів, доставкою продуктів, товарів, ліків тощо, моніторингом та оповіщенням про випадки порушення безпеки, розважальними та рекламними послугами та ін. Поява концепції БПЛА як сервіси (англ. Unmanned Aerial Vehicle as a Service, UAVaaS) стала природним кроком у розширенні використання БПЛА для обслуговування різноманітних запитів [5].

Впровадження концепції UAVaaS передбачає перехід до більш ефективного та систематичного використання БПЛА в сучасних умовах з урахуванням багатьох обставин та тенденцій, таких як [6-9]:

- 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 інформаційного середовища на виконання ними завдань;

- впровадження штучного інтелекту (ШІ) для підтримки ключових функцій застосування БПЛА (навігація, розпізнавання зображень, безпека польотів тощо);

- впровадження централізованого технічного обслуговування, що забезпечує надійність і доступність БПЛА, а також тривале виконання завдань;

- необхідність забезпечення ефективного застосування БПЛА (зниження витрат при максимальній надійності, мінімізації часових показників тощо) шляхом розробки математичних моделей і методів.

Таким чином, впровадження концепції UAVaaS потребує:

- систематичного 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 гарантоздатності була запропонована А. Авіженісом, Ж. К. Лапрі та В. Ренделом і знаходиться у постійному розвитку. Серед вітчизняних вчених, які розвивали концепцію гарантоздатності провідне місце займають роботи Теслера Г.С.. Подальший розвиток концепції гарантоздатності відображено в роботах Харченка В. С., Глухова В. С., Федухіна А. В., Ковтуна В. В., Горбенка А. В., Скляра В. В. Поночевного Ю.Л. та ін. Проте дані дослідження враховують різні аспекти забезпечення гарантоздатності: введення надмірності, стратегій обслуговування, забезпечення безпеки; не приділяючи уваги сервіс-орієнтованості та мобільності систем, що будуються на основі безпілотних літальних апаратів.

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 (ІТ) 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, 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 моделі для оцінювання гарантоздатності (функційної надійності, живучості та безпечності та кібербезпеки) СОМС БПЛА та їх таксономію;

6) розробити та дослідити моделі деградації СОМС БПЛА;

7) розробити метод 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 для виконання різноманітних завдань.

Об'єкт дослідження – процеси 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 аналізу предметної області та математичного апарату (принципи й методи системного аналізу). При розробленні методології, концепції та принципів забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА використовувались методи системного аналізу, елементи теорій надійності та живучості; для розроблення методу формування структури та складу СОМС БПЛА використовувались методи онтологічного представлення та виведення знань, методи оптимізації; при удосконаленні концептуальної моделі СОМС БПЛА використовувались елементи теорії систем, теорії мультиагентних систем та систем масового обслуговування; при удосконаленні та дослідженні моделей моделі функційної надійності СОМС БПЛА використовувались принципи й методи системного аналізу, елементи теорій надійності, деградації, розкладів та покриття; для розроблення й дослідження моделей систем масового обслуговування (СМО) використовувались методи теорії надійності, живучості та масового обслуговування; для розроблення й дослідження марковської моделі готовності СОМС БПЛА з урахуванням кібератак на інформаційні активи використовувались методи теорій надійності, безпечності й відновлення, методи марковського аналізу. При розробленні структури й засобів інформаційної технології для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА використовувались принципи й методи системного аналізу.

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

а) вперше розроблено:

1) методологія побудови гарантоздатних сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі БПЛА (СОМС БПЛА), яка, на відміну від відомих, базується на концепції побудови гарантоздатних (надійних і безпечних) систем з недостатньо надійних і безпечних елементів та їх множин (апаратів

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

2) 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) метод формування структури та складу СОМС БПЛА, який на відміну від відомих базується на визначені 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;

б) удосконалено:

1) 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.

2) 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 обґрунтувати вимоги до безвідмовності та живучості апаратів і систем;

в) отримали подальший розвиток:

1) 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, обґрунтувати склад СОМС БПЛА і комплекс засобів для забезпечення гарантоздатності надання сервісів.

2) 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 обґрунтувати вимоги до систем захисту та комплексу контрзаходів.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційного дослідження, які винесені на захист, 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 електростанції (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 вибухо-небезпечних 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 літаючих 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.

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладено в 54 наукових публікаціях, у тому числі: 3 розділи в колективних зарубіжних монографіях [8, 14, 15] (всі проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus), 2 розділи в колективній вітчизняній монографії [22, 47], 20 статей у періодичних наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України [1–7, 9, 11, 17–21, 23, 44–49] (2 з яких [17, 23] у наукових виданнях категорії А, 4 [9, 10, 17, 23] – у виданнях, що проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus, з них 2 [17, 23] – у віднесених відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank до третього квартиля (Q3)); 5 статей в наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію [10, 12, 13, 16, 24], з них 4 [12, 13, 16, 24] у наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Scopus та віднесених відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank до першого та другого квартиля (Q1, Q2), 1 [10] – до третього квартиля (Q3)); 19 публікацій у матеріалах і тезах наукових конференцій [25–43] (7 з яких [25–31] у наукових виданнях, проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus, 1 патент на винахід [54], 2 патенти на корисну модель [50, 51], 2 договори про передачу права на використання твору [52, 53].

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.); Науково-практичній конференції «Випробування і сертифікація озброєння і військової техніки» (Чернігів, 2019 р., Черкаси, 2024 р.). Також результати роботи в повному обсязі доповідалася на науково-технічному семінарі «Критичні комп'ютерні технології та системи (КриКТехС-2024/8)» кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» (м. Харків, 28 листопада 2024 р.).

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.

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» (№ ДР 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» (№ ДР 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 (НПП).

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.

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 (Додаток В) 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 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).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ І МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ОЦІНЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ. ОБГРУНТУВАННЯ НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз вимог до мобільних систем на основі флотів безпілотних літальних апаратів

1.1.1 Аналіз досвіду використання безпілотних літальних апаратів

Безпілотні літальні апарати характеризуються великою кількістю сучасних літальних апаратів які є різноманітними за конструкцією, розмірами, переліком бортового обладнання, які стрімко розвиваються та розширюють сфери застосування [10].

Застосування БПЛА поширюється майже на всі сфери діяльності людей: промислове виробництво, сільське та лісове господарство, транспорт, телекомунікація біологічні дослідження і цей перелік можна поширювати далі, де вони можуть виконувати різноманітні завдання (рисунок 1.1):

- контроль безпеки людей під час виробничих процесів [11];
- дистанційний моніторинг та збирання різноманітних даних [12, 13];
- розгортання мереж [14-17];
- доставлення різноманітних вантажів (медикаментів, продуктів і т.і) [18];
- контроль транспортних потоків та інфраструктури [19-21];
- контроль стану та обробка рослин [22];
- контроль чисельності та міграції тварин [23-25].

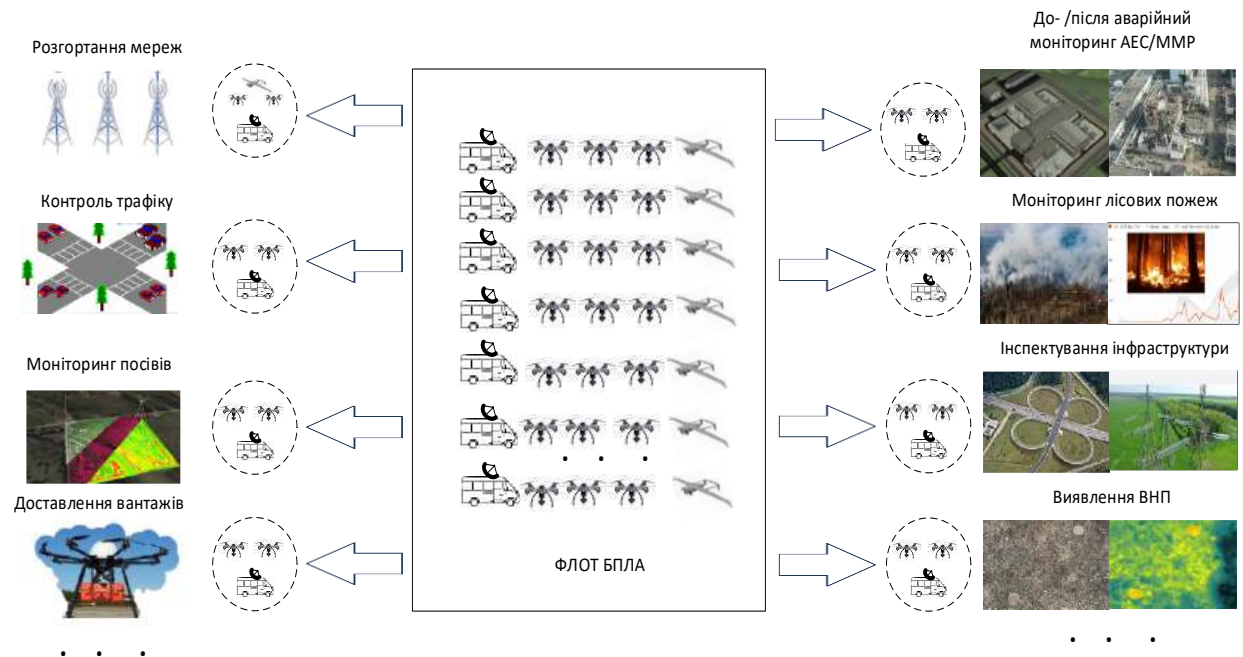


Рисунок 1.1 – Завдання, що можуть виконуватись з використанням БПЛА

Особливо актуально застосування БПЛА для виконання завдань в умовах, які шкодять людині, до яких можна віднести моніторинг та оцінку надзвичайних ситуацій та різноманітних об'єктів критичної інфраструктури. Наприклад:

- вимірювання потужності дози радіації, картографування чи обстеження місцевості [26, 27];
- виявлення ядерних джерел [28];
- розташування втрачених радіоактивних джерел [27];
- характеристика ефективності рекультивації [29];
- формування системи моніторингу наслідків аварій з використанням БПЛА [30].

Так при виникненні аварії на Чорнобильській атомній електростанції (АЕС) для оцінки наслідків застосовувалась пілотована авіація – вертольоти, пілоти якої отримали великі дози радіаційного опромінення. Після аварії на АЕС Фукусіма у Японії було розгорнуто систему моніторингу з використання БПЛА [31], що дозволило здійснювати оцінку наслідків аварії та проводити післяаварійний моніторинг інфраструктури АЕС та навколишньої території.

Однак, розгортання такої системи моніторингу здійснювалось вже після аварії, коли не було інших можливостей для отримання інформації. Крім того процес створення та розгортання таких систем, які є унікальними, та призначені для моніторингу конкретного об'єкту, може займати тривалий час.

Поширення застосування БПЛА на різноманітні сфери та розвиток технологій ІоD [32–34], групового [35, 36] та автономного застосування й інфраструктури, що забезпечує автономність [37-40] показує, що вони можуть використовуватись як складові гнучких сервіси для виконання різних завдань в автономному режимі, що передбачає впровадження засобів їх інтелектуалізації [41–44].

Під сервісом розуміється діяльність, спрямована на задоволення потреб споживачів шляхом надання послуг або обслуговування різноманітних запитів [45].

В контексті застосування БПЛА під сервісом розуміється сукупність однотипних завдань, які мають бути виконано в певних умовах і визначеними вимогами, наприклад, доставка 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} SSer_q = \{TSer_q, TSSer_q = \{TSSer_{sf}, f = 1, \dots, nq\}, Sp_q(X, Y, Z)\}, \\ USer_q = \{USer^{phys}_q, USer^{inf}_q\} \\ Req_TSSer_q = \{Req_TSSer_{qf}, f = 1, \dots, nq\}, \end{array} \right\} \quad (1.1)$$

де $TSer_q$ – тип сервісу;

$TSSer_q$ – множина сервісів q-того 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-того типу.

В загальному випадку це може стосуватися мобільних систем різного типу:

- на основі БПЛА;
- на основі наземних роботів/роботизованих систем;
- на основі морських і підводних роботів;
- комбінованого типу.

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

Поняття сервіс-орієнтованої системи здебільшого використовується в сфері інформаційних технологій, під яким розуміється система, яка побудована на основі сервіс-орієнтованої архітектури (анг. Service-oriented architecture) [46]. В свою чергу, сервіс-орієнтована архітектура – це, головним чином, реалізація модульного підходу до розробки програмного забезпечення, заснований на використанні розподілених, слабо пов'язаних замінних компонентів, оснащених стандартизованими інтерфейсами для взаємодії за стандартизованими протоколами.

В контексті використання БПЛА, сервіс-орієнтовна 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 межах Індустрії 4.0, або Четвертої промислової революції, основні зусилля зосереджуються на автоматизації виробництва, використанні

кіберфізичних систем, Інтернету речей та аналізі даних для підвищення ефективності та оптимізації виробничих процесів [47]. Це також обумовлює впровадження сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі БПЛА, які будуть виконувати різноманітні завдання за запитом.

На даний час існують, або розроблялись систем на основі БПЛА, які обслуговують замовлення різних типів, а саме:

- сервіс доставки замовлень Prime Air від Amazon [48];
- проект Wings від Google [49];
- доставка посилок логістичною компанією DHL [50];
- доставка медикаментів та зразків крові компанією Zipline [51.];
- доставка медичних вантажів компанією Matternet [52];
- доставка поштових відправлень з використанням автомобільної платформи для БПЛА компанією UPS [50].

Використання БПЛА як сервісу досліджуються в роботах [53–57] які акцентують увагу на гнучкості та економічності доцільності використання таких рішень, а також необхідність розв'язання завдань для забезпечення функціонування таких систем, а саме:

- побудови інфраструктури;
- розроблення моделей використання БПЛА для виконання різноманітних завдань та оцінки ефективності функціонування сервісів на основі БПЛА;
- автоматизації розгортання таких сервісів.

Крім того застосування БПЛА особливо актуально при виконанні різноманітних завдань об'єктах критичної інфраструктури що дозволяє:

- уникати, або зменшувати рівень загрози життю та здоров'ю людей
- забезпечити високу оперативність реагування на різні запити;
- підвищувати ефективність виконання завдань;
- можливість використання БПЛА для виконання різних функцій протягом тривалого часу в умовах зміни ситуації.

Для прикладу, при реалізації проектів з побудови перспективних об'єктів атомної енергетики, а саме малих модульних реакторів (ММР) БПЛА можуть використовуватись:

- фізичного захисту майданчику розміщення ММР [58];
- інспектування стану інфраструктури ММР [59];
- розгортання літаючих бездротових мереж (анг. Flying Ad-Hoc Network, FANET), у тому числі сенсорних [60];
- реагування на надзвичайні ситуації [61].

Слід зазначити, що питання забезпечення безпеки при розгортання сервісів на основі БПЛА є одним з ключових факторів, які впливають на гарантоздатність таких систем. Так компанія Amazon оголосила призупиняє свою службу доставки повітрям Prime Air після того, як два дрони МК30 врізалися у кран у США у місті Толлісон, штат Аризона [62].

1.1.2 Концепція гарантоздатності складних сервіс-орієнтованих технічних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Обслуговування запитів сервіс-орієнтованими мобільними системами на основі БПЛА таких сферах, як енергетика, транспортна інфраструктура, медицина і т.і., обумовлює висунання вимог до гарантоздатності надання сервісів.

Гарантоздатність (dependability) є однією з основних властивостей, яка характеризує якість функціонування систем [63, 64]. В широкому сенсі під гарантоздатністю, розуміють комплексну властивість, що полягає у здатності системи надавати потрібні послуги, яким можна виправдано довіряти [65, 66].

Існують різні таксономії, що визначають складові гарантоздатності для різних сфер застосування [67,68]. Гарантоздатність об'єднує такі первинні властивості, як безвідмовність, готовність, обслуговуваність, функційна безпечність, живучість, цілісність, конфіденційність, доступність, а також вторинні властивості, такі як інформаційна безпека, кібербезпека, надійність.

Концепція гарантоздатності була запропонована А. Авіженісом, Ж. К. Лапрі та В. Ренделом [63, 70] і знаходиться у постійному розвитку. Серед вітчизняних вчених, які розвивали концепцію гарантоздатності провідне місце займають роботи Теслера Г.С. [70-72]. В роботах Харченка В. С. [73-75], Глухова В. С. [76-78], Федухіна А. В. [79-81], Ковтуна В. В. [82, 83], Поночевного Ю.Л. [84–86] концепція продовжує свій розвиток.

Результати аналізу концептуальних підходів до змісту первинних підвластивостей гарантоздатності у роботах різних дослідників представлені в таблиці 1.1.

При визначенні терміну «безпека» стосовно систем на основі БПЛА на даний час можна визначити наступні напрями:

- функційна безпека, або «safety»;
- інформаційна безпека, або «security».

«Safety» у перекладі більшості вітчизняних дослідників та у стандартах розглядається як функційна безпечність. Під функційною безпечністю розуміють відсутність неприйнятної ризику за рахунок використання системи управління безпекою та вживання заходів зниження ризику [30]. Ця властивість характеризує виключення або мінімізацію шкідливих наслідків для користувачів, інших систем або навколишнього середовища, що виникають у разі відмов [90, 91]. Концепції управління функційною безпечністю реалізовані у міжнародних стандартах для різних галузей галузями, а саме:

- атомна енергетика [92],
- авіація [93–95],
- залізничний транспорт [96–98],
- автомобільний транспорт [99],
- електронні/електричні програмовані компоненти [90, 100].

Таблиця 1.1 - Аналіз підходів до визначення складових властивостей гарантоздатності технічних систем

Автори, джерело	Рік	Складові властивостей гарантоздатності					
		готовність	безвідмовність			ремонтпридатність	довговічність, збережуваність
ДСТУ 2860-94 [87]	1996	готовність	безвідмовність			ремонтпридатність	довговічність, збережуваність
Avizienis, J.-C. Laprie, Randell, C. Landwehr [63]	2004	availability	reliability	safety	integrity	maintainability	
Теслер Г.С. [70] (гарантоздатність та безпечність)	2008	готовність	безвідмовність	функціональна надійність	цілісність	обслуговуваність	динамічна готовність, системна безпечність, конфіденційність, живучість, достовірність стійкість роботи
Харченко В.С. [75]	2009	готовність	безвідмовність	функціональна безпека	цілісність	обслуговуваність	достовірність (high confidence), живучість, конфіденційність
Горбенко А. В. [88]	2013	готовність	безвідмовність	аварійна безвідмовність		ремонтпридатність	достовірність (high confidence), інформаційна безпека (security)
IEC 60050-192:2015 [63]	2015	availability	reliability	safety (як розширююча властивість)	integrity	maintainability	recoverability, maintenance support performance, durability, security (як додаткові властивості)
K. S. Trivedi, A. Bobbio [90]	2017	availability	reliability	safety		maintainability	
В.В. Ковтун [91]	2019	доступність	надійність		цілісність	ремонтпридатність	конфіденційність
Поночевний Ю.М. [86]	2021		надійність	функційна безпечність		обслуговуваність	кібербезпека

Термін «security» спочатку перекладався як «інформаційна безпека», але в останнє десятиріччя «security» трансформувався в «cybersecurity» [107], який має чіткий переклад - «кібербезпека», який розглядається в контексті забезпечення конфіденційності, цілісності та готовності [102, 103], та додатково автентичність, відстежуваність і надійність [104, 105].

Кібербезпека – це стан безпечного функціонування кіберпростору, його використання в інтересах особи, суспільства і держави [106]; або дії, необхідні для запобігання несанкціонованого використання, відмови в обслуговуванні, перетворення, розсекречення, втрати прибутку, або пошкодження критичних систем або інформаційних об'єктів [107, 108].

Процедури управління кібербезпекою визначено у серії стандартів ISO/IEC 62443 [109-111].

Особливістю функціонування СОМС, які розглянуті у даній роботі є функціонування в умовах змін параметрів середовища та необхідність розгортання сервісів для обслуговування різних запитів. Комплексний характер зовнішніх факторів стосовно СОМС БПЛА є обґрунтуванням для вибору концепції забезпечення саме гарантоздатності, а не резильєнтності, оскільки враховуються лише зміни навколишнього середовища. При цьому під гарантоздатністю СОМС БПЛА буде розумітися здатність системи виконувати різноманітні функції (надавати потрібні послуги), зберігаючи у часі рівень її визначених показників в заданих межах і умовах експлуатації, а також при зміні вимог, параметрів середовища та виникнення різноманітних замовлень.

В даній роботі для сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі БПЛА виділені наступні складові властивості, що враховуються гарантоздатністю, як комплексною властивістю згідно з [63], [64], [75]:

- безвідмовність (reliability), готовність (availability) і обслуговуваність (maintainability). Слід зазначити, що ці характеристики є складовими надійності [87];

- функційну надійність, що трактується як властивість системи виконувати задані функції визначений час у визначених умовах;
- деградацію, що трактується як погіршення якості виконання системою її функцій [112];
- інформаційну і кібербезпеку (security and cybersecurity) і властивості, що до неї входять - цілісність (integrity), доступність (availability) і конфіденційність (confidentiality) [113].

1.2 Аналіз науково-методичного апарату оцінювання гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

1.2.1 Аналіз моделей оцінювання гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Дослідження оцінки надійності сервісно-орієнтованих систем на базі БПЛА стало критично важливою галуззю через критичний для безпеки характер цих платформ. Франко та ін. [114] розробили систематичний підхід на основі моделей з використанням інструменту HiP-HOPS (Hierarchically Performed Hazard Origin and Propagation Studies) для аналізу надійності БПЛА, що дозволяє автоматизовано генерувати артефакти сертифікації безпеки, одночасно зменшуючи зусилля аналізу та кількість помилок. Чжан та ін. [115] провели комплексне дослідження, визначивши вісім ключових областей дослідження для надійних мереж та обчислювальних систем на базі БПЛА, виділивши загрози від програмних помилок, збоїв компонентів, відключень мережі та порушень навколишнього середовища. Петриоллі та ін. [116, 117] досліджують логістичний підхід до оцінювання надійності систем БПЛА з урахуванням деградації та різних підходів до обслуговування, у тому числі на етапі проектування систем. Родрігес та ін. [118] розглянули проблеми впровадження сервісно-орієнтованої архітектури (COA) в БПЛА,

запропонувавши структуру для узгодження недетермінованих підходів СОА з вимогами до вбудованих систем реального часу, зберігаючи при цьому стандарти безпеки.

В таблиці 1.2 представлені результати аналізу публікації, в яких досліджуються підходи до оцінювання гарантоздатності систем на основі БПЛА.

Таблиця 1.2 – Підходи до оцінювання до оцінювання гарантоздатності систем на основі БПЛА

Автори, джерело	Підходи до оцінювання
Франко М. та ін. [114]	<ul style="list-style-type: none"> - систематичний та контекстно-залежний підхід на основі моделей; - використання інструменту аналізу надійності HiP-HOPS; - автоматизована генерація артефактів надійності.
Петриолі Е. та ін. [116]	<ul style="list-style-type: none"> - розробка нового логістичного підходу до оцінки надійності та технічного обслуговування; - дослідження надійності на етапі проектування; - порівняння різних стратегій технічного обслуговування (профілактичної та коригувальної); - застосування моделі випадкових коефіцієнтів для оцінки деградації; - врахування деградації; - оптимізація ймовірнісних функцій та оцінка невизначеності за допомогою довірчих інтервалів
Рана А. [119]	<ul style="list-style-type: none"> - статичний метод з використанням аналізу дерева відмов (FTA) для успішної комунікації БПЛА; - застосування ланцюгів Маркова для аналізу станів та ймовірностей відмов;
Бріто К. та ін. [120]	<ul style="list-style-type: none"> - стохастичні мережі Петрі для моделювання та оцінки доступності та надійності систем з БПЛА; - структурні схеми надійності (СШ) для графічного аналізу компонентів системи та їх взаємозв'язків
Нгуєн Т. та ін. [121]	<ul style="list-style-type: none"> - дерева відмов; - стохастична мережа Петрі; - символічно-ієрархічна автоматизована оцінка надійності та продуктивності (Symbolic Hierarchical Automated Reliability and Performance Evaluator -SHARPE)

Кінець таблиці 1.2

Автори, джерело	Підходи до оцінювання
Сін Л. та Джонсон, [122]	- аналітичні моделі;
Зайцева О. та ін. [123]	- використання підходу на основі структурних функцій для аналізу надійності; - розрахунок показників важливості за допомогою прямих часткових булевих похідних
Чжан К. та ін. [115]	- розроблення таксономій

Крім того існує нормативне регулювання у галузі гарантоздатності. Так міжнародним стандартом ІЕС 60300-3-1:2003 [124] визначено методики, що використовуються при аналізі гарантоздатності технічних систем:

- методика аналізу дерев відмов (англ. Failure tree analysis, FTA) [125];
- методика аналізу дерев подій (англ. Event tree analysis, ETA) [126];
- методика аналізу за допомогою структурних схем надійності (ССН) (англ. Reliability block diagram analysis, RBD) [127];
- методика марковського аналізу (МА) (англ. Markov chain analysis, MCA) [128, 129];
- методика аналізу за допомогою мереж Петрі [130];
- методика аналізу видів, наслідків (та критичності) відмов (англ. Failure modes and effects (and criticality) analysis, FME(C)A) [131];
- методика аналізу небезпеки і працездатності (англ. Hazard and Operability Study, HAZOP) [132];
- методика аналізу таблиць істинності (аналіз структурної функції) [133, 134].

Найбільш поширені підходи, які використовуються для оцінювання гарантоздатності та її складових – надійності, безпечності, полягають у використанні імовірнісних та аналітичних моделей отриманих за допомогою:

- структурних схем надійності (ССН);

- апарату Марковських ланцюгів;
- апарату мереж Петрі.

1.2.2 Аналіз методів і засобів оцінювання гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Питанням забезпечення та оцінювання надійності, живучості та безпеки технічних систем, у тому числі призначених для виконання різноманітних завдань з використанням БПЛА, присвячена низка публікацій вітчизняних та зарубіжних вчених. Зокрема, представники наукової школи В. С. Харченка – В. В. Скляр та Є. В. Брежнев [135–138] запропонували методи аналізу та забезпечення функційної безпечності та інформаційної безпеки інформаційно-керуючих систем АЕС (ІКС), а саме: В. В. Скляр – моделі і методи кейс-орієнтованого оцінювання функційної безпечності та інформаційної безпеки ІКС АЕС; Є. В. Брежнев – моделі і методи комплексного оцінювання та забезпечення безпеки АЕС та їх ІКС з використанням інформаційних технологій.

М. О. Ястребенецький розробив методи нормативного регулювання та аналізу функційної безпечності ІКС АЕС [139];

Значний внесок в розвиток моделей і методів теорії надійності та оптимального резервування внесли А. В. Федухин, В. А. Заславський, І. А. Ushakov, К. Reinschke, D. Lloyd, M. Lipow, R. Barlow [140–147]. Питаннями подальшого розвитку марковських моделей оцінювання надійності займалися К. Reinschke, К. Trivedi, Б. Ю. Волочій [148–150]. В. Littlewood, L. Strigini, Р. Попов, R. Bloomfield, В. С. Харченко запропонували моделі і методи розроблення та оцінювання надійності багатOVERСІЙНИХ систем [152-154]. Над розробленням моделей оцінювання надійності та живучості систем з багатоступеневою деградацією працювали А. Lisnianski, G. Levitin, та E. Zaitseva [155–157].

Однак за рамками проаналізованих досліджень зазначених вчених

залишилось ряд важливих питань, пов'язаних з:

- визначенням архітектури сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів, що здатна забезпечувати обслуговування типових запитів з визначеними функційними та нефункційними вимогами;
- оцінюванням гарантоздатності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів в умовах відмов, багатоступеневої деградації та відновлення;
- створенням загальної методології розгортання сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів, здатних до гарантоздатного обслуговування типових запитів.

1.2.3. Визначення показників для оцінки гарантоздатності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Гарантоздатність є комплексною властивістю, яка включає:

- безвідмовність, як властивість безперервно надавати коректні послуги за замовленням;
- готовність, як властивість доступності ресурсів для надання послуг за замовленням;
- живучість, як властивість мінімізувати зниження та збереження в задовільних межах об'єм та якість послуг, що надаються, в умовах відмов;
- функційну безпечність, як властивість уникати або мінімізувати небажані (катастрофічні) наслідки при відмовах для користувачів, інших систем та навколишнього середовища;
- конфіденційність, як властивість перешкоджати неавторизованому доступу інформації про послуги;
- достовірність, як властивість правильно оцінювати коректність послуг, що надаються;
- обслуговуваність, як властивість пристосованості до модифікації та ремонту/обслуговуванню.

Згідно ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення [87] надійність – це властивість системи зберігати в часі та у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність системи виконувати необхідні функції у заданих режимах та умовах експлуатації. В даному стандарті розглядається функційна надійність систем, як властивість надавати послуги з визначеними вимогами у визначені терміни.

Взаємозв'язок властивостей, які враховуються та показників, що використовуються для оцінювання гарантоздатності наведено на рисунку 1.2.

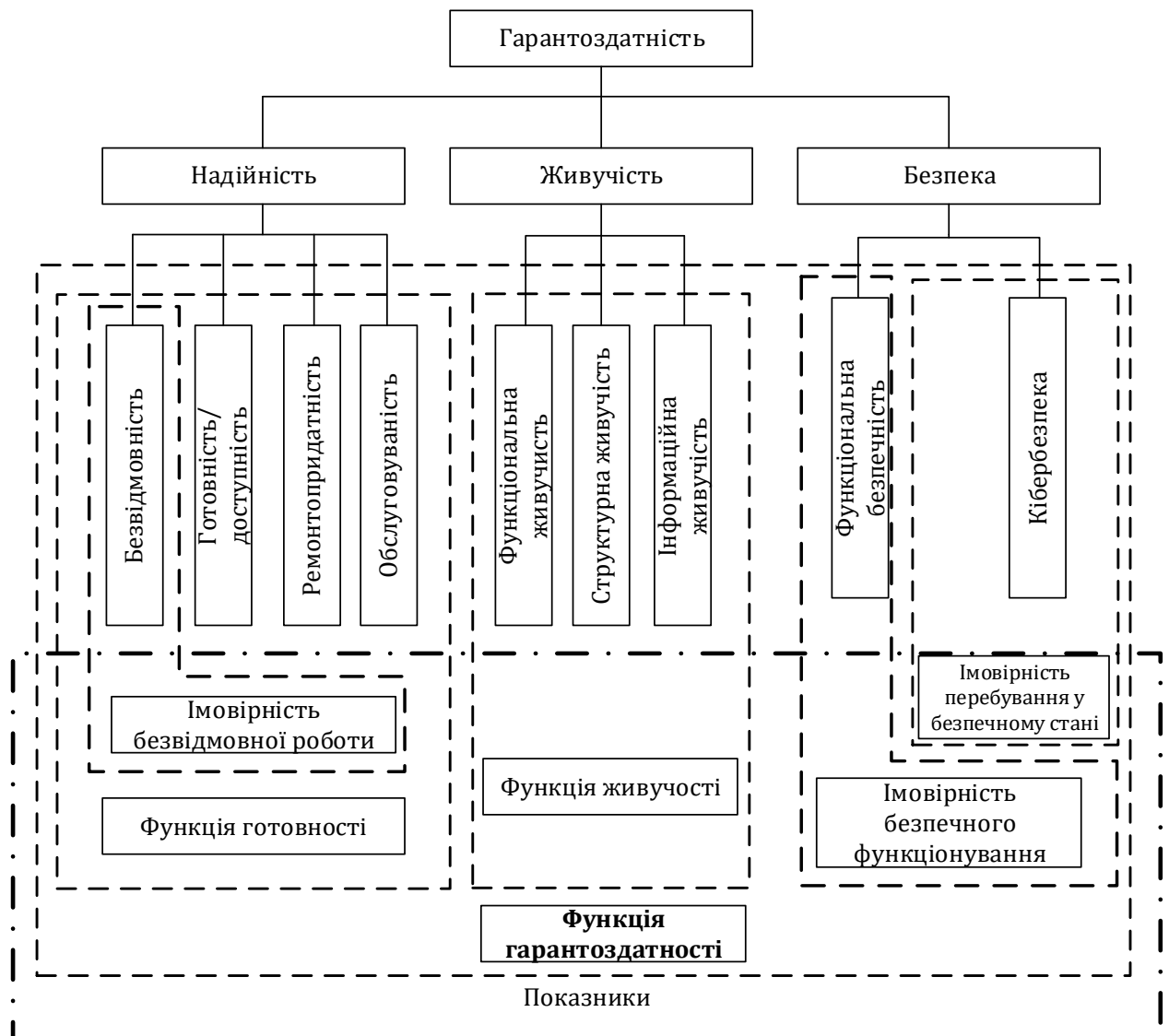


Рисунок 1.2 – Взаємозв'язок властивостей, які враховуються та показників які використовуються для її оцінки

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

$$G = F(\text{Rel}, \text{Surv}, \text{Saf} \ \& \ \text{Sec}), \quad (1.1)$$

де Rel- надійність;

Surv - живучість;

Saf & Sec - функційна безпечність та кібербезпека.

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

$$\text{Rel} = f(\text{Ff}, \text{Avail}, \text{Ma int}, \text{Re pair}), \quad (1.2)$$

де Ff - безвідмовність;

Avail - готовність;

Ma int - обслуговуваність;

Re pair - ремонтопридатність.

При врахуванні лише безвідмовності системи для оцінки гарантоздатності може використовуватись імовірність безвідмовної роботи – $P(t)$, яка є імовірністю того що у визначений момент часу система буде у знаходитись у працездатному стані.

При врахуванні всіх показників надійності для оцінки може використовуватись функція готовності – $K_r(t)$, яка є комплексним показником, що враховує безвідмовність, ремонтопридатність (включно з забезпеченням технічного обслуговування), і дорівнює відношенню сумарного часу перебування системи в працездатному стані до загального часу функціонування системи з урахуванням її простоїв, обумовлених проведенням обслуговування та ремонту [63, 89].

В роботі запропоновано використовувати наступні показники:

- імовірність успішного виконання плану польотів - $P_{SPF} = f(Ff, Ma int)$;
- імовірність обслуговування без втрати замовлення - $P_{SWLO} = f(Ff, Ma int, Repair)$.

Живучість поділяється на функціональну, структурну та інформаційну. [158]. Під функціональною живучістю розуміється здатність системи при наявності несприятливих впливів виконувати із передбаченою якістю задану ціль функціонування. Структурна живучість – здатність системи підтримувати в несприятливих умовах системну структуру, необхідну для виконання мети функціонування із заданою якістю. Інформаційна живучість – здатність системи підтримувати доступність, цілісність і конфіденційність інформації на рівні, що дозволяє виконувати із заданою якістю мету функціонування системи, незалежно від зовнішніх і внутрішніх несприятливих впливів і порушень при використанні інформаційних ресурсів [159].

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 дві складові – функціональна та кібербезпека. Для оцінювання функціональної безпеки використовується імовірність небезпечної відмови – $P_{DF}(t)$ [160].

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

Гарантоздатність окремих сервісів оцінюється за формулою:

$$G_S(t) = (P_{SPF}(t) \vee P_{SWLO}(t)) P_D(t) P_{DF}(t) P_{SS}(t). \quad (1.3)$$

В загальному випадку функція гарантоздатності може визначатися:

а) для невідновлюваних систем - ймовірністю події, яка визначається перетином двох незалежних подій – відсутності відмов апаратних і програмних засобів та відмов, обумовлених успішними кібератаками на активи системи. Якщо розглядаються системи з багатоступеневою деградацією функція $G_S(t)$ або її суміжні показники (середній час напрацювання на відмову, інтенсивності відмов тощо) представляються множинами ймовірностей $G_{S_D}(t)$, які враховують часткову втрату працездатності;

б) для відновлюваних систем – функцією готовності, яка визначається сумою ймовірностей знаходження системи в працездатних (частково працездатних) станах, виключаючи стани відмов, внаслідок виникнення дефектів апаратних і прояву дефектів програмних засобів, успішних кібератак на активи системи, а також стани, коли система не використовується – діагностується, відновлюється або знаходиться на профілактичному обслуговуванні.

З урахуванням вимог стандарту IEC 60300-1 Dependability management [161] для забезпечення гарантоздатності використовується ризикорієнтований підхід, згідно якого проводиться оцінювання наслідків невиконання вимог щодо гарантоздатності:

$$R(\bar{G}_S(t)) = (1 - G_S(t))EL(\bar{G}_S(t)), \quad (1.4)$$

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

1.3 Аналіз методів забезпечення гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

1.3.1 Класифікація методів забезпечення гарантоздатності мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Методи забезпечення гарантоздатності технічних систем можна розділити на п'ять основних категорій [161]:

- нормативні, які регулюють порядок роботи з системами і інформацією в нею, і встановлюють відповідальність за його порушення згідно з законодавством;

- організаційні, які визначають перелік заходів та порядок їх виконання персоналом, організацію систем захисту різних видів (фізичного, інформаційного), контролю виконання вжитих заходів та встановлення системи персональної відповідальності за виконання цих заходів;

- інженерно-технічні, які ґрунтуються на використанні відповідних рішень з урахуванням вимог до гарантоздатності;

- технічні, які полягають у впровадженні спеціальних технічних засобів забезпечення гарантоздатності;

- програмно-апаратні, що використовуються в процесах оброблення і передавання інформації.

Забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА потребує розроблення моделей функціонування та оцінювання, що дозволяють визначати їх відповідність функціональним та нефункціональним вимогам, що висуваються до них.

Розроблення моделей застосування БПЛА у складі різних сервісів дозволяє автоматизувати процеси розгортання СОМС БПЛА, які мають обслуговувати відповідні запити на обслуговування з заданими функційними вимогам. Забезпечення виконання нефункційних вимог, а саме гарантоздатності, передбачає розроблення та використання відповідних моделей функціонування СОМС БПЛА, що дозволяють отримувати значення складових властивостей гарантоздатності: функційну надійність, готовність, функційну та кібербезпеку .

Методи моделювання складних технічних систем, до яких відносяться СОМС БПЛА, можна розділити на такі класи [162-164]:

- аналітичні;

- математичні;
- імітаційні.

Аналітичні методи передбачають отримання залежності вихідних змінних від вхідних змінних має аналітичний вигляд, тобто може бути представлена у вигляді відомих аналітичних функцій. Перевагою цього методу моделювання є можливість отримання функції залежності множини вихідних змінних системи від множини вхідних змінних в явному вигляді і застосування до неї методів класичного математичного аналізу. Якщо є можливість побудувати аналітичну модель системи, то завжди віддають перевагу цьому методу моделювання.

Математичні методи моделювання використовуються коли окремі частини моделі можуть бути описані аналітичними залежностями, але знаходження залежності вихідних змінних від вхідних змінних у явному вигляді не є можливим і для отримання результату необхідно виконання певної кількості кроків. Іншими словами, якщо відомий алгоритм відшукування точного розв'язку задачі, але сам розв'язок не може бути записаний в аналітичній формі.

Імітаційні методи моделювання використовуються, якщо система не піддається опису аналітичними залежностями, але процес функціонування можна описати алгоритмом імітації. В процесі імітації відбувається відтворення за допомогою комп'ютерної програми процесу функціонування складної системи в часі й інформація про властивості реальної системи отримуються в результаті багаторазових прогонів розробленої імітаційної моделі.

1.3.2 Аналіз методів і засобів забезпечення гарантоздатності виконання завдань з використанням безпілотних літальних апаратів

Фундаментальні дослідження у галузі гарантоздатності виконання завдань з використанням БПЛА в основному зосереджені на математичному

моделюванні та аналітичних моделях, які використовуються для забезпечення гарантоздатності шляхом проведення оцінювання надійності та безпечності систем з БПЛА та розроблення стратегій їх застосування.

Ніколау та ін. [165] показують, що система пошуку та рятування побудована з кількох БПЛА може забезпечувати значення готовності – 0,91 та точності виявлення – 99,8%. Бритто, Нгуен та інші [120, 121] досліджують використання стохастичних мережі Петрі, дерев відмов для визначення критичних апаратних компонентів та хмарного середовища, які впливають на надійність застосування БПЛА у цивільній, військовій галузях. Крім того, Бабу та ін. [166] досліджують можливість досягнення оптимальних співвідношень між вартістю та надійністю систем на основі БПЛА та пропонують підходи до проектування за застосування таких систем (наприклад, оптимальний розподіл ресурсів та оптимальне резервування для забезпечення гарантоздатності).

Результати аналізу методів галузі забезпечення гарантоздатності застосування систем на основі БПЛА представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати аналізу досліджень у галузі гарантоздатності застосування БПЛА

Автор, джерело	Галузь застосування (опис завдань)	Методи оцінювання	Методи забезпечення
Франко та ін., [114]	не конкретизовано	моделювання, ієрархічні дослідження походження та поширення небезпеки (Hierarchically Performed Hazard Origin and Propagation Studies HiP-HOPS) інструменти	систематичний, контекстно-залежний аналіз надійності; автоматизована генерація артефактів для сертифікації

Кінець таблиці 1.3

Автор, джерело	Галузь застосування (опис завдань)	Методи оцінювання	Методи забезпечення
Ніколау та ін., [165]	Цивільна (пошуково-рятувальна діяльність, ліквідація наслідків стихійних лих)	Марковські моделі, статистичні вимірювання, натурні випробування	проект SESAME: покращена безпека використання кількох БПЛА (готовність – 0,91, точність виявлення - 99,8%); уникнення кіберзагроз та навігаційних ризиків
Бабу та ін. [166]	Цивільний (стільниковий зв'язок, екстрені ситуації)	Марковські процеси, аналітичне оцінювання	використання компромісу між вартістю та надійністю при розгортанні кількох БПЛА; підкреслено необхідність оптимального розподілу ресурсів
Ахмеді та Дженіхін [167]	Цивільна, (спостереження, критично важливі для місії/безпеки)	Міжрівневе моделювання	міжрівневі моделі надійності; виявлення апаратних/програмних несправностей та застосування відмовостійких платформ з самообізнаністю

З аналізу результатів досліджень можна зробити висновок, що забезпечення гарантоздатності – це комплекс взаємопов'язаних та узгоджених між собою різнопланових заходів, спрямованих на прогнозування, врахування та попередження ризиків різного характеру з метою мінімізації їх наслідків.

Система заходів забезпечення гарантоздатності та, у тому числі, керування її складовими (надійністю, функційною безпечністю, кібербезпекою та ін.) описується відповідними концепціями, під якими можуть розглядатися:

- керівні документи (закони, стандарти, нормативні акти) або їх комплекс [104, 168];

- упорядковані принципи, методи та моделі, що складають методологію [75, 169, 170];

- визначені «стратегії» чи «політики» у вигляді задокументованих зв'язки між відмовами та загрозами, виконавцями, нормативно-правовими документами та процесами забезпечення гарантоздатності [108, 171].

Класичне визначення концепції описує її як систему поглядів на явища або процеси, і ця система є первиною, головною, основоположною [172].

Існують різноманітні концепції забезпечення гарантоздатності, які використовуються у різних галузях, зокрема:

- інформаційній [173];
- авіаційній [174];
- адміністративній [171] та ін.

Концепції можна розділити на два класи:

- створення гарантоздатних систем [169, 175];
- управління складовими гарантоздатності в розроблених системах, що функціонують в умовах нормальної експлуатації [109, 168, 176].

Таким чином, 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 також можуть використовувати класичні підходи до розробки моделей системи для визначення її відповідності висунутим вимогам.

В рамках даної роботи використовується підхід, при якому використовується прогнозований стан середовища та вимог як вхідних параметрів моделей гарантоздатних СОМС БПЛА та вирішуються задачі вибору математичного апарату для розроблення та дослідження адекватних аналітичних та математичних моделей та методів.

1.4 Обґрунтування наукової проблеми та методології досліджень

1.4.1 Постановка наукової проблеми та задач досліджень

Ґрунтуючись на результати проведеного аналізу сучасних тенденцій розвитку та математичного апарату оцінювання та забезпечення гарантоздатності, можна визначити, що на сучасному етапі розвитку науки і техніки, існує **об’єктивне протиріччя** між жорсткими вимогами до надійності та безпечності мобільних роботизованих систем для виконання різноманітних послуг та критичних функцій моніторингу ОПН, доставлення вантажів, підтримки комунікацій тощо, та відсутністю концептуальних та математичних моделей, методів та засобів для оцінювання та забезпечення гарантоздатності таких систем.

Викладене вище дозволяє сформулювати актуальну **науково-прикладну проблему** забезпечення гарантоздатності систем на основі безпілотних літальних апаратів, як сервіс орієнтованих мобільних систем, вирішення якої має сприяти усуненню зазначеного протиріччя.

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

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) проаналізувати тенденції розвитку й математичний апарат оцінювання та методи забезпечення гарантоздатності систем на основі безпілотних літальних апаратів і розробити методологію побудови гарантоздатних СОМС БПЛА;

2) удосконалити організаційну модель функціонування та базову

онтологію СОМС БПЛА;

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

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

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

6) розробити та дослідити моделі деградації СОМС БПЛА;

7) розробити метод 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 для виконання різноманітних завдань.

1.5 Вибір методів досліджень

Для розв'язання науково-прикладної проблеми визначеним завданням необхідно співставити відповідні методи досліджень, які зведено в таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 – Відповідність між основними завданнями дослідження та методами, що використовуються

№ з/п.	Завдання досліджень	Методи досліджень, що використовуються
1	Розробити методологію побудови гарантоздатних СОМС БПЛА	Методи системного аналізу, методи теорії надійності та живучості
2	Удосконалити організаційну модель функціонування та базову онтологію СОМС БПЛА	Елементи теорії мультиагентних систем, систем масового обслуговування, методи онтологічного представлення знань
3	Удосконалити та дослідити моделі функціонування СОМС БПЛА та їх таксономію	Методи теорії графів, методи теорії розкладів,
4	Розвинути та дослідити моделі систем масового обслуговування для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА	методи теорії надійності, живучості та масового обслуговування
5	Розвинути та дослідити моделі оцінювання гарантоздатності (функційної надійності, живучості та безпечності та кібербезпеки) СОМС БПЛА та їх таксономію	Методи системного аналізу, методи теорії надійності та живучості, безпечності й відновлення, марковського аналізу
6	Розробити та дослідити моделі деградації СОМС БПЛА	Методи системного аналізу, методи теорії множин, методи теорії надійності та живучості
7	Розробити метод формування структури та складу гарантоздатних СОМС БПЛА	Методи онтологічного представлення та виведення знань, методи оптимізації
8	Розробити структуру та засоби ІТ для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА	Методи системного аналізу

1.6 Методологія проведення дисертаційних досліджень

Методологія дисертаційних досліджень включає наступні етапи.

На першому етапі здійснюється теоретичне обґрунтування, розробляються елементи методологію 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'язків між завданнями, умовами виконання, технічними характеристиками елементів СОМС та виконання функційних та нефункційних вимог.

Заключний, шостий етап полягає у розробленні структури та засоби інформаційної технології забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА, яка базується на розроблених моделях та методах, проводиться систематизація та аналіз результатів практичного впровадження наукових положень та робляться узагальнюючі висновки за результатами дисертаційних досліджень.

1.7 Висновки до першого розділу

Аналіз існуючих підходів щодо застосування БПЛА для моніторингу ПНО показав, що існуючі дослідження концентруються в основному на вирішенні за допомогою БПЛА вузькоспеціалізованих окремих завдань: або тільки розгортання мережі, або тільки вимірювання параметрів, або тільки виконання функцій фото-, відео-, тепловізійного моніторингу тощо.

Фактично відсутні роботи, які б були спрямовані на вирішення питань забезпечення гарантоздатності систем на основі застосування БПЛА при обслуговуванні запитів на виконання завдань, пов'язаних з виконанням завдань різноманітних завдань, зокрема: моніторингу, інспектування охорони, 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 зазначених вчених залишилось ряд важливих питань, пов'язаних із:

- 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-орієнтовних мобільних систем на основі БПЛА.

Крім того, слід відзначити відсутність інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень з розгортання гарантоздатних сервіс-орієнтовних

мобільних систем на основі БПЛА.

Основні наукові результати, що наведені в першому розділі, опубліковано в роботах автора [1, 2, 5, 12, 17, 24, 27, 33], зазначених в анотації.

РОЗДІЛ 2

ЕЛЕМЕНТИ МЕТОДОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ, ВИКОРИСТАННЯ ТА СИСТЕМНІ МОДЕЛІ ГАРАНТОЗДАТНИХ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

2.1 Концепція і структура методології створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

2.1.1 Концепція створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

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.

2.1.2 Структура і взаємозв'язок елементів методології створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Основні елементи методології гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів та їх зв'язок показані на рисунку 2.1, 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 і гарантоздатності (A3);

3) комбінованого використання структурно-компонентного резервування і керованої деградації (A4);

4) гарантованого обслуговування різноманітних запитів на виконання сервісів флотами БПЛА з визначеними вимогами в умовах відмов, кібератак та обмеженої автономності апаратів та 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 холонічної мультиагентної системи (A6) та використовується під час розроблення онтологій (A7, A8, A9) як складової методу визначення структури та складу СОМС БПЛА (A13);

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

– принцип A4 покладений в основу моделей оцінювання гарантоздатності (функційної надійності, безпечності) СОМС БПЛА (1);

– принцип A5 комплексу моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА (A11) та методу визначення структури та складу СОМС БПЛА (A12).

Онтології (A7, A8, A9) та моделі (A10, A11) покладені в основу методу визначення структури та складу СОМС БПЛА (A12).

Інформаційна технологія (A13) складається з способу вибору заходів підвищення гарантоздатності СОМС БПЛА, IDEF0-діаграми інформаційних потоків, інструментальних засобів і базується на методі A12, принципах A2 та A5 та моделях A10-A11, і є інструментарієм для підтримки прийняття рішень щодо складу і вибору параметрів гарантоздатних СОМС БПЛА.

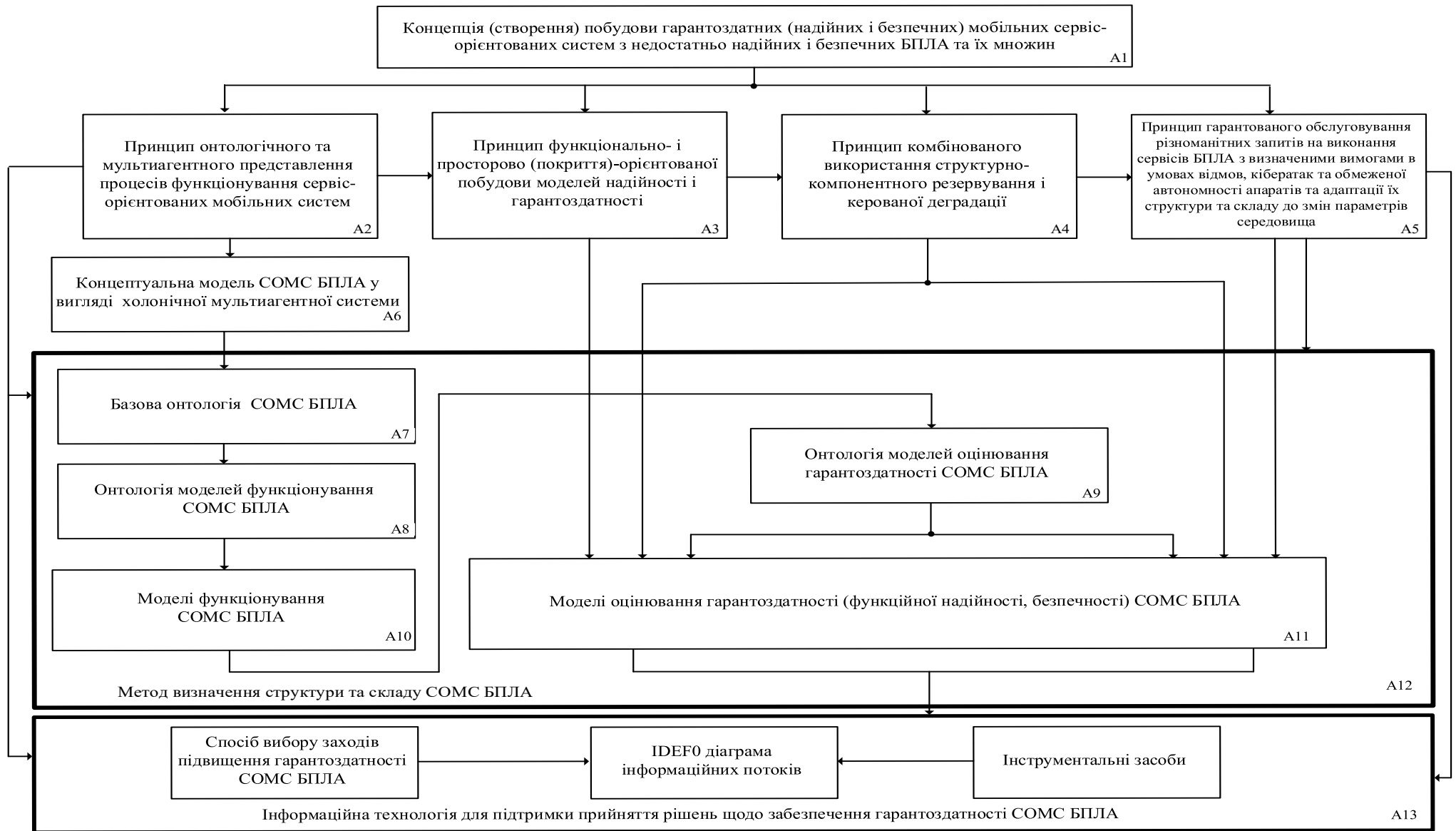


Рисунок 2.1 – Структура і взаємозв'язок елементів методології

2.2 Принципи створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

2.2.1 Принцип онтологічного та мультиагентного представлення процесів функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

У сучасних умовах БПЛА відіграють ключову роль у різних галузях, включаючи розвідку, моніторинг, логістику та сільське господарство. Інтеграція цих пристроїв у СОМС вимагає ефективних методів створення, взаємодії та управління функціонуванням.

Принцип онтологічного та мультиагентного представлення процесів функціонування дозволяє забезпечити інтелектуальність процесів формування, управління, гнучкість та адаптивність таких систем до умов застосування, що швидко змінюються.

Однак висока динамічність мобільних середовищ, неоднорідність пристроїв та необхідність взаємодії багатьох сервісів потребують ефективних методів управління. У роботі використовуються принципи онтологічного та мультиагентного представлення процесів функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем, що дозволяє забезпечити інтелектуалізацію процесу формування структури СОМС, яка забезпечує виконання функційних та нефункційних вимог до них, а також адаптивність таких систем.

Схематичне пояснення процесу формування агентів з БПЛА показано на рисунку 2.2.

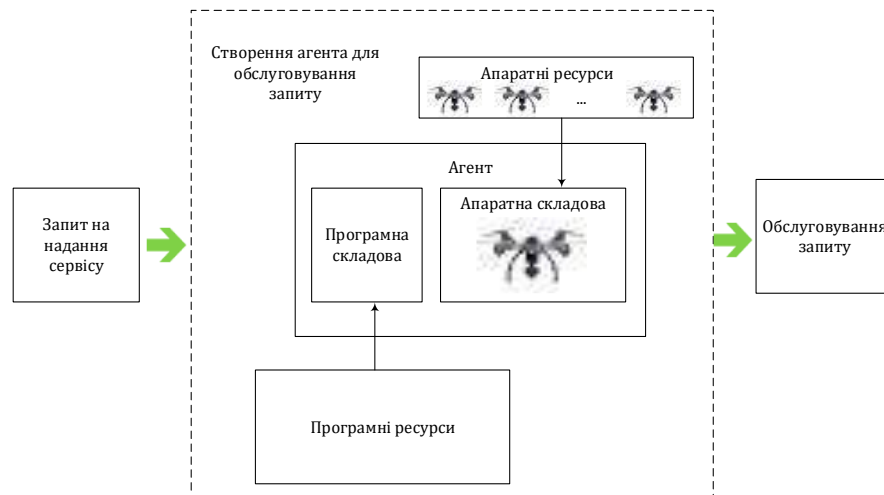


Рисунок 2.2 – Створення агента на основі БПЛА

Онтологічний підхід забезпечує формалізацію знань про предметну область, що особливо важливо для систем з різномірними агентами, під якими розуміються комплекс програмних засобів та безпілотних засобів, та різномірними завданнями, які виконуються. Онтології дозволяють:

- структурувати інформацію про характеристики, можливості та обмеження кожного типу агента;
- забезпечувати семантичну сумісність між різними системами та компонентами, що спрощує інтеграцію та взаємодію;
- автоматизувати процеси пошуку та вибору агентів, адаптуючи їх до поточних завдань та умов експлуатації.

Поєднання онтологічного та мультиагентного підходів дозволяє створювати інтелектуальні системи на основі БПЛА, що забезпечують високим ступенем адаптивності та автономності. Онтології забезпечують єдине уявлення знань, а мультиагентна архітектура - ефективний розподіл завдань та ресурсів.

Основні етапи інтеграції:

- розробка онтології предметної галузі – визначення ключових сутностей, їх властивостей та взаємозв'язків;
- створення мультиагентної системи – визначення агентів, їх ролей та правил взаємодії;

- забезпечення семантичної сумісності - використання онтологій як бази знань для агентів;
- розробка механізмів адаптації – застосування правил логічного виведення та машинного навчання для динамічного налаштування СОМС.

2.2.2 Принцип функціонально- і простороворієнтованої побудови моделей надійності і гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

У сучасних сервіс-орієнтованих системах, що використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА), надійність та гарантоздатність є ключовими характеристиками, що забезпечують успішне виконання поставлених завдань. Для їх досягнення застосовуються функціонально- та просторово-орієнтовані підходи до розробки моделей.

Функціонально-орієнтоване моделювання фокусується на аналізі та забезпеченні надійності окремих елементів та їх взаємодій у системі. У контексті БПЛА це включає:

- визначення критично важливих функцій, відмова яких може призвести до відмови всієї системи;
- розробку стратегій резервування та дублювання для забезпечення безперервності роботи критичних сервісів;
- вивчення впливу навантаження на надійність сервісів та системи в цілому.

Просторово-орієнтоване уявлення полягає у розробці моделей покриття цільової області, що забезпечують оптимальний розподіл ресурсів, мінімізацію впливу відмов, а також просторовий розподіл компонентів системи та їх вплив на надійність. Для систем із БПЛА це включає:

- а) забезпечення стійкої взаємодії між БПЛА та наземними системами забезпечення;

б) оптимізацію маршрутів польоту з урахуванням надійності, що включає:

1) застосування алгоритмів планування покриття цільової області, з урахуванням виникнення відмов та можливості заміщення агентів (БПЛА);

2) оптимізацію розподілу ресурсів, що включає балансування навантаження між агентами, які представляються БПЛА, та перерозподіл завдань у разі виходу з ладу окремих апаратів.

Інтеграція функціонально- та просторово-орієнтованих моделей дозволяє створити комплексний підхід до забезпечення надійності та гарантоспроможності сервіс-орієнтованих систем на основі БПЛА, яке досягається через:

- створення безлічі моделей надійності, що включає моделі з урахуванням як функціонального, так і просторового аналізу відмов;
- впровадження механізмів, що дозволяють системі адаптуватися до умов, що змінюються, і зберігати працездатність мінімізуючи втрати.

2.2.3 Принцип комбінованого використання структурно-компонентного резервування і керованої деградації сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

До сучасних сервіс-орієнтованих мобільних систем, що побудовані на основі БПЛА, пред'являються високі вимоги до гарантоздатності обслуговування замовлень. Це особливо актуально при виконанні автономних операцій в умовах, що динамічно змінюються. У зв'язку з цим виникає необхідність вживання заходів, що забезпечують продовження виконання заданих функцій у разі відмов апаратних і програмних компонентів.

Структурно-компонентне резервування передбачає наявність надлишкових елементів системи, які можуть бути задіяні у разі відмов

основних компонентів і полягає у введенні надмірності в елементи системи, що дозволяє компенсувати відмови та мінімізувати вплив відмов на виконання цільового завдання.

У системах з інтелектуальним управлінням БПЛА та групами автономних наземних платформ резервування може використовуватись для підвищення надійності передачі даних, навігації та управління. Наприклад, при відмові одного з БПЛА його завдання можуть бути розподілені між іншими агентами системи.

Керована деградація, у свою чергу, передбачає часткове зниження функціональності системи для продовження терміну її працездатності, яка передбачає зниження функціональності, або показників якості виконання завдань при виникненні відмов для продовження виконання критично важливих функцій. Цей підхід дозволяє уникнути повної втрати працездатності та підвищити адаптивність мобільних систем. В роботі розглядається Функціональна та просторова деградація.

Функціональна деградація передбачає припинення обслуговування другорядних сервісів та пріоритетне виконання критично важливих завдань, зменшення типів, обсягів та частоти оновлення даних.

Просторова деградація передбачає скорочення зони покриття при відмові частини агентів.

Синергетичне поєднання даних підходів дозволяє досягти високого ступеня відмовостійкості за мінімальних витрат ресурсів за рахунок:

- пріоритетного використання резервних компонентів для виконання критично важливих завдань;
- поступовий перехід до режиму деградації у разі вичерпання резервних ресурсів.

2.2.4 Принцип гарантованого обслуговування різноманітних запитів на виконання сервісів з визначеними вимогами в умовах відмов, кібератак та обмеженої автономності апаратів сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів та адаптації їх структури та складу до змін параметрів середовища

СОМС БПЛА має обслуговувати широкий спектр завдань, включаючи моніторинг, логістику, зв'язок та реагування на надзвичайні ситуації. Гарантоване виконання запитів на обслуговування вимагає високого ступеня стійкості системи до відмов апаратних та програмних компонентів, впливів кібератак та обмеженої автономності окремих агентів (рисунок 2.3).

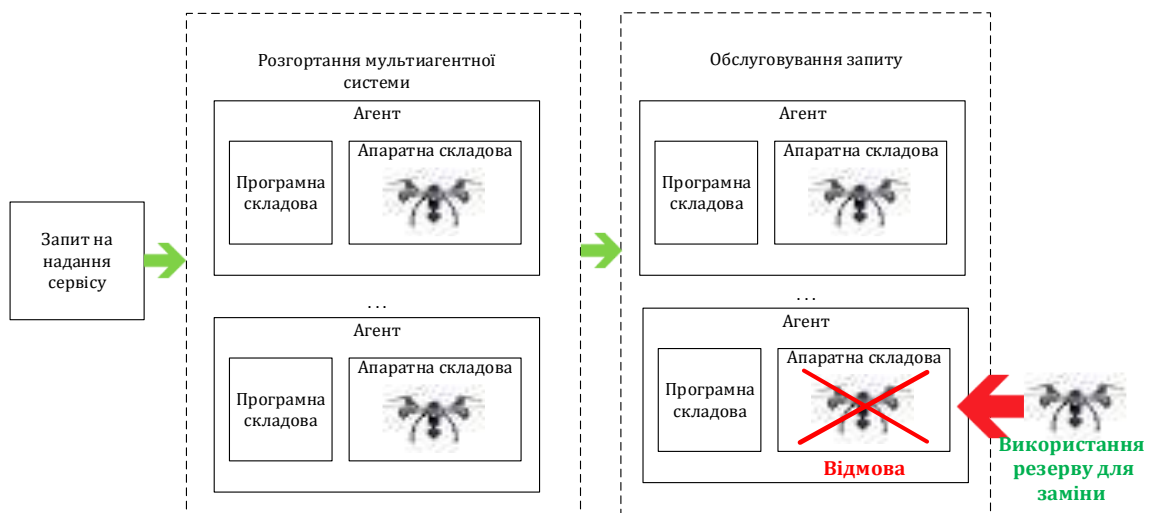


Рисунок 2.3 – Забезпечення гарантоздатності СОМП БПЛА при відмові БПЛА

Важливим завданням є забезпечення гнучкості структури СОМС БПЛА, що дозволяє адаптуватися до динамічних змін параметрів середовища та загроз. Для цього необхідне використання адаптивного перерозподілу ресурсів та управління сервісами.

Гарантоване виконання сервісів можливе за умови чіткого визначення типів запитів та відповідних вимог до їх обслуговування:

- критично важливі – завдання, що вимагають суворого дотримання тимчасових та функціональних параметрів (аварійне реагування, військові операції).

- квазірежимні – завдання, що допускають невеликі відхилення від заданих параметрів (екологічний моніторинг, сільське господарство).

- фонові – завдання, які виконуються за наявності вільних ресурсів (дослідні місії, картографування).

Забезпечення гарантованого обслуговування сервісів СОМС БПЛА в умовах відмов, кібератак та обмеженої автономності апаратів досягається за рахунок:

- проведення періодичного обслуговування для запобігання відмовам та продовження автономності роботи;

- підвищення енергоефективності обслуговування побудовою оптимальних маршрутів;

- розподілу сервісів між агентами СОМС.

- відновлення та резервування – автоматичне включення резервних БПЛА у разі відмови основних активних агентів та усунення несправностей на тих, що відмовили;

- прогнозування та виявлення аномалій для виявлення підозрілих активностей та застосування контрзаходів для протидії кібератакам;

- використання гетерогенних платформ, а саме, комбінування різних типів БПЛА для виконання завдань у заданих умовах із заданими вимогами.

2.3 Онтологічні моделі сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Ситуативне створення структури СОМС БПЛА для конкретних завдань може бути здійснене для великої кількості різних рішень в конкретній

предметній області. Одним з напрямів формалізації таких знань є розробка онтологій.

Онтологія - це формалізоване представлення знань про окрему предметну область (середовище, світ), придатне для автоматизованої обробки. Вона вибирає мову для опису предметної області задачі синтезу і включає машинну інтерпретацію основних формул для розуміння і взаєморозуміння між ними [177].

Мова опису ресурсів (Resource Description Framework, RDF) дозволяє записувати машинно-інтерпретовані твердження у вигляді трійок суб'єкт-предикат-об'єкт, які називаються RDF-трійками. Вони можуть мати різний синтаксис, серед яких - RDF/XML, Turtle, N-Triples, JSON-LD, RDFa та HTML5 Microdata.

В загальному випадку, онтологія представляє собою кортеж вигляду:

$$O = \{C, R, T\}, \quad (2.1)$$

де C - множина понять предметної галузі;

R - множина відношень між поняттями;

T - множина правил виведення (може бути виродженою $T = \emptyset$).

Такі RDF-трійки піддаються машинній інтерпретації і за допомогою правил можуть бути використані для виведення нових тверджень на основі тих, що були сформульовані автоматизованими міркуваннями. Але складні домени вимагають ще більших можливостей представлення, таких як обмеження кардинальності властивостей, обмеження доменів і діапазонів, а також перелічуваних класів, що призвело до появи мови веб-онтологій (англ. *Ontology Web Language, OWL*), яка спеціально розроблена для створення WEB-онтологій з багатим набором моделюючих конструкторів і усуває обмеження розробки RDF-онтологій.

Онтології зазвичай містять класи (поняття), екземпляри цих класів, їхні атрибути (властивості) та значення цих властивостей, а також відношення між класами та екземплярами класів. Крім того, онтологія може містити певні обмеження на використання класів та їх відношень.

Екземпляри (англ. Instances) або індивіди (англ. Individuals) — це основні, низькорівневі компоненти онтології. Екземпляри можуть являти собою як фізичні сутності, в даному випадку моделі, так і абстрактні (чисельні або логічні значення).

Класи (англ. Classes) (або поняття (англ. Concepts) — абстрактні групи, колекції або набори об'єктів. Вони можуть містити в собі екземпляри, інші класи, або ж сполучення й того, і іншого.

Атрибути. Об'єкти в онтології можуть мати атрибути. Кожен атрибут має принаймні ім'я й значення, і використовується для зберігання інформації, що специфічна для об'єкта й прив'язана до нього.

Об'єкти в онтології можуть мати атрибути. Кожен атрибут має принаймні ім'я й значення, і використовується для зберігання інформації, що специфічна для об'єкта й прив'язана до нього.

Важлива роль атрибутів полягає в тому, щоб визначати залежності (відношення) між об'єктами онтології. Зазвичай відношенням є атрибут, значенням якого є інший об'єкт.

В математичній основі онтології лежить дескриптивна логіка, яка передбачає, що будь-яка інформація, висловлена природною мовою, може бути представлена у вигляді ланцюжків триплетів (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Приклад триплету

Онтологія являє собою граф, вершини якого це сутності, а ребра – відносини між сутностями. Вважається, що будь-яке твердження природною мовою можна подати у вигляді простих виразів, з яких можна отримати сутності та відносини між ними.

Властивості в онтологіях представляють відносини між об'єктами. Існує два основних типи властивостей:

- властивості об'єктів (Object properties);
- властивості типів даних (Data properties).

Властивості об'єктів визначають відносини між індивідами.

В онтологіях, що описуються мовою OWL, є ще третій тип властивості – властивості анотації. Властивості анотації можуть використовуватися для додавання інформації (метадані дані про дані) для класів, окремих індивідів та властивостей об'єктів/типів даних.

Існують онтології верхнього рівня, які визначають загальний фундаментальний опис предметної області, онтології предметної області та онтології прикладного рівня. Чим нижчий рівень, тим повніший опис містить онтологія.

Онтологія моделей СОМС відноситься до онтології прикладного рівня і описує зв'язок різноманітних моделей, властивостей (атрибутів) які ці моделі покривають та правил для вибору моделі, або їх сукупності, які найкраще описують функціонування СОМС і дозволяють визначити структура, склад СОМС та отримати оцінку її гарантоздатності з урахуванням найбільшої кількості факторів.

2.3.1 Базова онтологія сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

2.3.1.1 Розроблення базової онтології СОМС БПЛА

Базова онтологія СОМС описує структуру та взаємодію основних складових елементів СОМС при виконанні різних завдань у різних умовах. Нижче наведено приклад розроблення онтології СОМС для виконання завдань інспекції, моніторингу, фізичної безпеки, оцінки післяаварійного стану та розгортання спеціалізованих літаючих мереж на об'єктах атомної енергетики [43, 178].

В онтології використовується наступна ієрархія класів:

- а) тип завдання (Mission type):
 - 1) інспекція та моніторинг (Inspection and Monitoring);
 - 2) розгортання спеціалізованих мереж (Deploying Ad Hoc networks);
 - 3) забезпечення фізичної безпеки (Security);
 - 4) оцінка наслідків надзвичайної ситуації (Emergency Response):
 - вимірювання дози опромінення (Dose rate measurement);
 - пошук радіоактивних джерел (Radiation sources location);
- б) режим функціонування (Mode):
 - 1) звичайний (Normal);
 - 2) післяаварійний (Post-accident);
- в) виконавчі елементи (Performing unit):
 - 1) БПЛА у звичайній комплектації (Simple UAV);
 - 2) БПЛА для розміщення спеціального набору корисного навантаження (Custom UAV);
- г) елементи обслуговування (Support unit):
 - 1) автоматичні обмінно-зарядні станції (АОЗС, Automatic battery maintenance station (ABMS));
- д) корисне навантаження (Payload):

- 1) телевізійна камера (Camera);
 - 2) інфрачервона камера (FLIR);
 - 3) дозиметр (Radiation dosimeter);
 - 4) мережне обладнання (Network equipment);
- е) умови виконання (Environment conditions):
- 1) день (Day);
 - 2) ніч (Night).

Цей перелік класів і підкласів може бути розширений залежно від особливостей завдань системи та основі БПЛА.

Для визначення зв'язків в онтологіях використовуються поняття домена та діапазона властивостей. Домен властивості визначає клас об'єктів, яким може належати суб'єкт, тобто це об'єкт з якого походить властивість. Діапазон визначає об'єкт на який властивість поширюється, тобто куди веде властивість. Опис доменів, властивостей та діапазонів для об'єктів, визначених в онтології, представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Опис властивостей об'єктів, визначених в базовій 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

Кінець таблиці 2.1

Домен	Властивість	Діапазон
Security	Need	Camera; FLIR
Camera	Used	Day
FLIR	Used	Night

Для уточнення онтології до її наступних класів можна додавати індивідами, з конкретними характеристиками. До розробленої онтології було додано індивіди до наступних класів:

- а) до класу «Simple UAV»:
 - 1) Simple UAV 1;
 - 2) Simple UAV 2;
 - 3) Simple UAV 3;
- б) до класу Custom UAV:
 - 1) Custom UAV 1;
 - 2) Custom UAV 2;
- в) до класу ABMS:
 - 1) ABMS 1;
 - 2) ABMS 2;
 - 3) ABMS 2;
- г) до класу Payload:
 - 1) Camera:
 - Camera1;
 - Camera2;
 - 2) FLIR:
 - FLIR1;
 - FLIR2.

Приклади OWL-коди доданих індивідумів для класів «Simple UAV», «Payload» та «ABMS» представлені на рисунку 2.5, рисунку 2.6 та рисунку 2.7, відповідно.

Індивіди класу «Simple UAV» мають властивості даних, які визначають їх льотно-технічні характеристики, а саме:

- тривалість польоту (flightEndurance);
- максимальна швидкість вітру, при якій БПЛА може виконувати польоти (maxWind);
- встановлене корисне навантаження (payload1, payload2).

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1 -->
  <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.5</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">10</ims:maxWind>
  <ims:payload1
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera1</ims:payload1>
  </owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2 -->
  <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.75</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">12</ims:maxWind>
  <ims:payload1
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">FLIR1</ims:payload1>
  </owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3 -->
  <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">1.0</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">15</ims:maxWind>
  <ims:payload2
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera2</ims:payload2>
  </owl:NamedIndividual>

```

Рисунок 2.5 – OWL-коди доданих екземплярів для класу «Simple UAV»

```

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_1 -->
    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_1">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera"/>
    </owl:NamedIndividual>
    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_2 -->
    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_2">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera"/>
    </owl:NamedIndividual> <!--
http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Dosimeter_1 -->
    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Dosimeter_1">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Radiation_dosime
ter"/>
    </owl:NamedIndividual>
    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_1 -->
    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_1">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR"/>
    </owl:NamedIndividual>
    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_2 -->
    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_2">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR"/>
    </owl:NamedIndividual>
    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#LiFi_1 -->
    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#LiFi_1">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Network equipmen
t"/>
    </owl:NamedIndividual>

```

Рисунок 2.6 – OWL-коди доданих екземплярів для класу «Payload»

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_1 -->
  <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_1">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
  </owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_2 -->
  <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_2">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
  </owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_3 -->
  <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_3">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
  </owl:NamedIndividual>

```

Рисунок 2.7 – OWL-коди доданих екземплярів для класу «ABMS»

Для створення онтологій використовувалося програмне забезпечення Protégé. Онтограф розробленої онтології представлений на рисунку 2.8. Повний OWL - код онтології наведено в Додатку А.

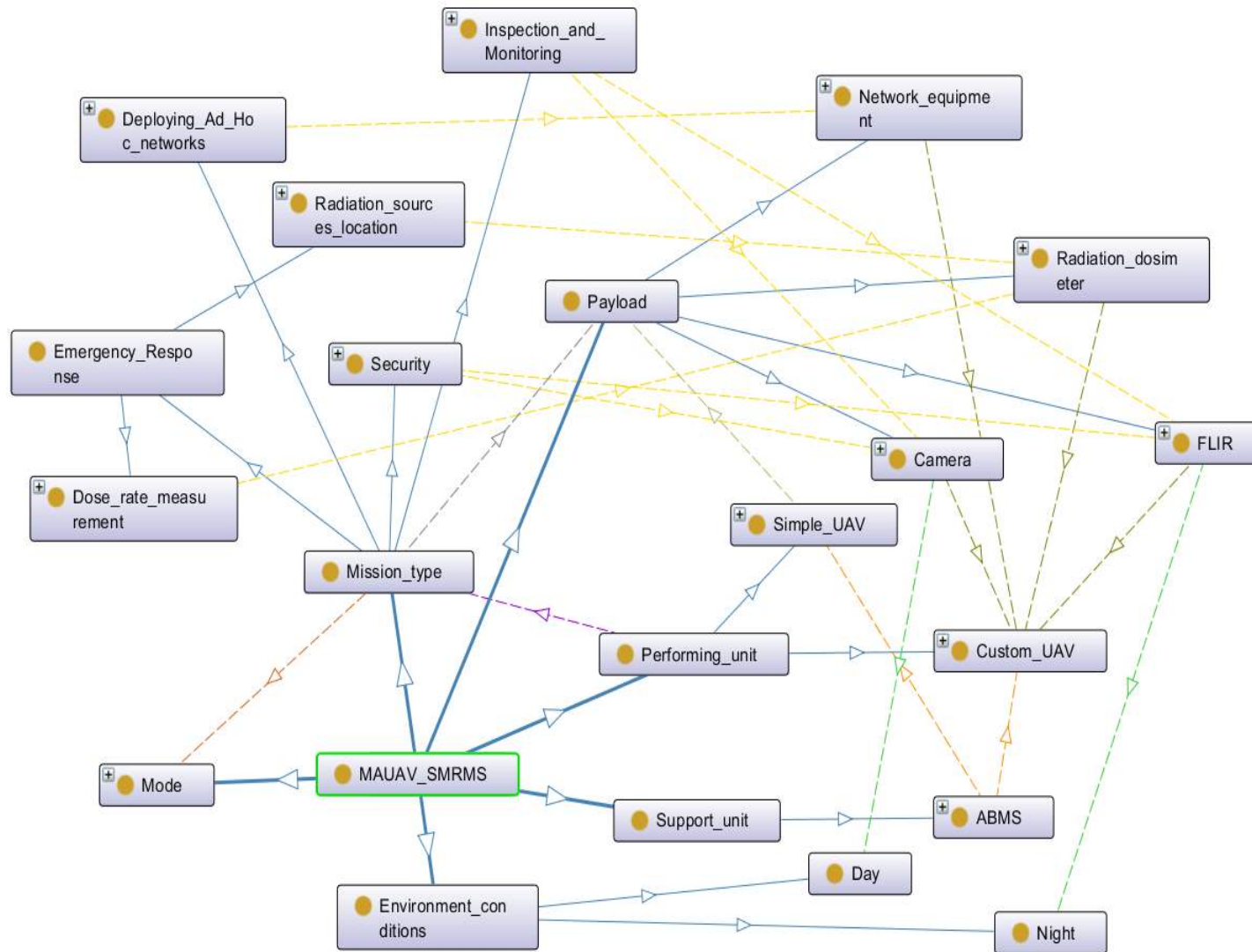


Рисунок 2.8 - Онтограф базової онтології функціонування СОМС БПЛА

2.3.1.2 Дослідження базової онтології СОМС БПЛА

Використання онтології для формування складу СОМС БПЛА здійснюється шляхом трансформації завдання місії в SPARQL-запит. За результатом обробки запиту формується перелік БПЛА, з відповідним корисним навантаженням і автоматичними обмінно-зарядними станціями, у разі необхідності, які можуть обслуговувати вказані БПЛА.

Місце онтології в процесі визначення структури та переліку складових СОМС для виконання завдань показано на рисунку 2.9.

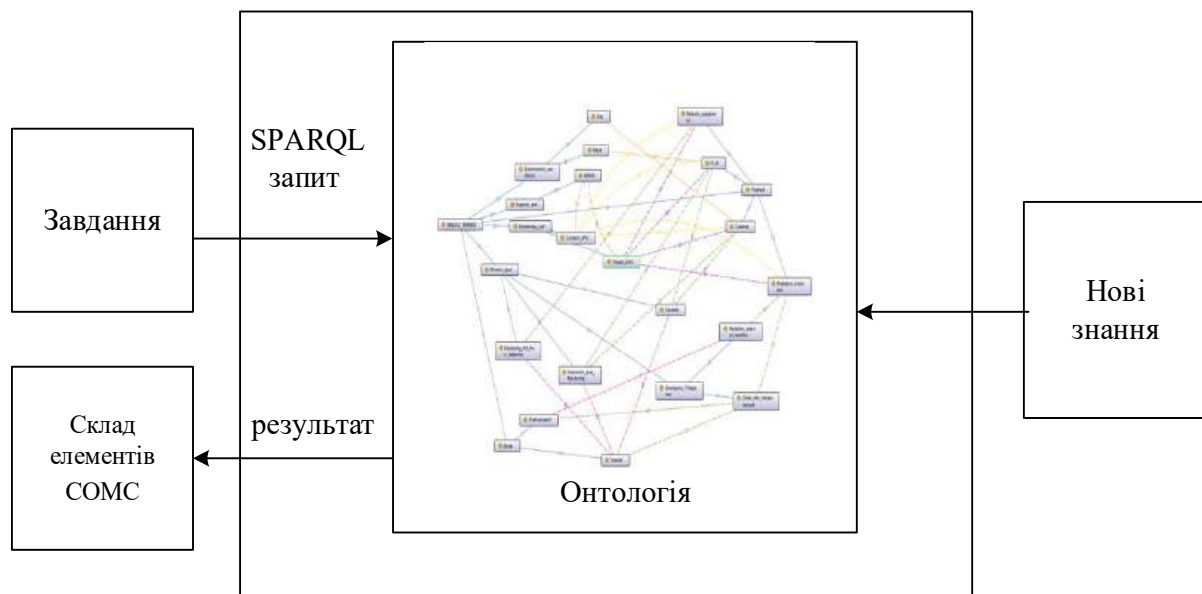


Рисунок 2.9 – Використання онтології в процесі визначення структури та переліку складових для виконання завдань СОМС.

Розглянемо використання онтології для вибору БПЛА та обладнання, необхідного для виконання завдання, тривалість якого має бути не менше 0,8 годин, вночі за вітру, швидкість якого більше 10 м/год.

Для визначення компонентів системи моніторингу до онтології використовується SPARQL-запити [179], структура та зміст якого наведено на рисунку 2.10.

```

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

За результатами запиту формується перелік корисних навантажень, які використовуються при виконанні завдання в нічних умовах, БПЛА, які мають це корисне навантаження і можуть літати при швидкості вітру понад 10 м/с, а також ПРО для обслуговування БПЛА з тривалістю польоту менше 0,8 години.

Додатково до запиту додано фільтр для виведення протоколів, які використовуються для передавання даних (дані про протоколи описуються як властивості даних (Data property) індивідумів UAV).

Результати виконання SPARQL-запиту зведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати запиту SPARLQL

Payload	UAV	ABMS	Protocol
FLIR_1	Simple_UAV_2	ABMS_1	DSM
FLIR_1	Simple_UAV_2	ABMS_2	DSM
FLIR_1	Simple_UAV_2	ABMS_3	DSM

Розглянемо інший приклад використання онтології для вибору обладнання, БПЛА та підсистеми забезпечення, у разі необхідності,

необхідних для виконання завдання охорони периметру тривалістю не менше 2 годин, вночі за вітру, що має швидкість 12 м/с.

Структура та змість SPARQL-запиту до онтології для визначення компонентів СОМС, що зможуть виконувати завдання охорони периметру у визначених умовах, наведено на рисунку 2.11.

```
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 > =12))
?ABMS maintenance ?UAV
FILTER EXISTS ((?UAV :flightEndurance < 2))
```

Рисунок 2.11 – SPARQL-запит до онтології для вибору обладнання, БПЛА та підсистеми забезпечення, необхідних для виконання завдання охорони периметру тривалістю не менше 2 годин, вночі за вітру, що має швидкість 12 м/с

При опрацюванні запиту визначається перелік корисного навантаження, яке використовуються при виконанні завдання в нічних умовах, і БПЛА, які мають це корисне навантаження та можуть виконувати польоти при швидкості вітру більше 12 м/с.

В онтології є лише один екземпляр класу «Simple UAV» – «Simple UAV 2», що може здійснювати польоти при швидкості вітру 12м/с, і який обладнаний камерою FLIR1, що дозволяє виконувати завдання вночі. Максимальна тривалість польоту «Simple UAV 2» складає 0,75 годин, тоді як необхідно виконувати завдання 2 години, що обумовлює використання автоматичної обмінно –зарядної станції, а саме «ABMS 2», яка призначена для обслуговування визначеного екземпляру БПЛА – «Simple UAV 2».

Після визначення переліку обладнання, БПЛА та АОЗС, які мають входити до складу СОМС для виконання визначених завдань, наступним кроком є визначення кількості БПЛА та АОЗС, які забезпечать виконання визначених функційних вимог завдання, наприклад:

- тривалості виконання завдання;
- вимог до періодичності, кількості надання даних тощо.

Для здійснення цього використовується онтологія моделей функціонування СОМС БПЛА, опис якої представлений в п. 2.3.2.

2.3.2 Онтологія моделей функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Онтологія моделей функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів описує взаємозв'язки моделей та атрибутів, які вони покривають. Всі моделі в онтології представляють єдиний клас комплексних моделей, які використовуються для визначення кількісного складу елементів СОМС, який забезпечує виконання функціональних вимог до виконання визначених завдань.

Домени, властивості і діапазони, що використовуються в онтології, представлено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Опис доменів, діапазонів та властивостей об'єктів, визначених в онтології моделей функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Домен	Властивість	Діапазон
Модель	Враховує	Атрибут

До атрибутів, які містяться в онтології моделей функціонування СОМС відносяться:

а) Atr 1 – особливості завдань (сервісів):

- 1) Atr1.1 – одиничні завдання;
- 2) Atr1.2 – потокові завдання;

б) Atr2 - тип покриттів, на яких базується виконання завдань

- 1) Atr2.1 – точкове покриття;
- 2) Atr2.2 – площадне покриття;
- 3) Atr2.3 – часове покриття;
 - Atr2.3.1 – виконання завдань з заданою тривалістю;
 - Atr2.3.2 – доступність цільової області для виконання завдань;

в) Atr3 – характеристики ФБПЛА:

1) Atr3.1 – склад множини БПЛА:

- Atr3.1.1 – одиничні БПЛА;
- Atr3.1.2 – групи БПЛА:
 - Atr3.1.2.1 – рій;
 - Atr3.1.2.2 – зграя;
 - Atr3.1.2.3 – флот;

2) Atr3.2 – обслуговуваність флоту БПЛА:

- Atr3.2.1 – необслуговувані БПЛА;
- Atr3.2.2 – обслуговувані БПЛА:
 - Atr3.2.2.1 – стаціонарні засоби обслуговування;
 - Atr3.2.2.2 – мобільні засоби обслуговування;

г) Atr4 – тип працездатності:

1) Atr4.1.1 – двоступенева;

2) Atr4.1.2 – багатоступенева (деградація);

- Atr4.1.2.1 – тип деградації
 - Atr4.1.2.1.1 – деградація характеристик БПЛА;
 - Atr4.1.3.1.2 – деградація якості місій БПЛА;

- Atr4.1.2.2 – керованість деградації:

- Atr4.1.2.2.1 – некерована;
- Atr4.1.2.2.2 – керована.

Перелік моделей функціонування СОМС та атрибутів, які вони враховують наведено в таблиці 2.4.

Використання онтології для визначення моделі, яка використовується для визначення кількісного складу СОМС, здійснюється шляхом трансформації опису та вимог завдання в перелік атрибутів, які вказуються як параметри фільтрів SPARQL-запиту. За результатом виконання запиту визначається модель, яка враховує найбільшу кількість атрибутів і може використовуватись для визначення кількісного складу СОМС БПЛА, що забезпечує функційні вимоги.

Кожна модель має властивості даних (Data Properties) типу «String», яке містить посилання на програмний інтерфейс (англ. Application Program Interace, API) моделі у вигляді: «https://www.<modelX_X/API/>». API приймає файл у форматі JavaScript Object Notation (JSON-файл), який містить вихідні дані:

- функціональні вимоги;
- типи БПЛА та їх характеристики;
- обладнання БПЛА та їх характеристики;
- типи АОЗС та їх характеристики (у разі необхідності).

Загальна схема отримання даних з зовнішніх моделей та додавання їх до онтології представлена в лістингу 2.1.

Лістинг 2.1 - Загальна схема отримання даних з зовнішніх моделей та додавання їх до онтології

graph TD

A [Онтологія (OWL)] -->|URI, ідентифікатор, опис| B[Виконавець/Rule Engine/Agent]

B -->|Виклик API / Функції| C[Зовнішнє джерело / алгоритм]

C -->|Результат (JSON, XML, значення)| B

B --> |Оновлення онтології чи бази знань| A.

Таблиця 2.4 – Покриття моделями функціонування СОМС БПЛА множини атрибутів

Позначення моделі в онтології	Назва моделі	Атрибути, що враховуються моделями																
		Atr1		Atr2				Atr 3					Atr 4					
		Atr 1.1	Atr 1.2	Atr 2.1	Atr 2.2	Atr 2.3		Atr 3.1			Atr 3.2		Atr 4.1.1	Atr 4.1.2				
						Atr 2.3.1	Atr 2.3.2	Atr 3.1.1	Atr 3.1.2		Atr 3.2.1	Atr 3.2.2		4.1.2.1		4.1.2.2		
								Atr 3.1.2.1	Atr 3.1.2.2		Atr 3.2.2.1	Atr 3.2.2.2		Atr 4.1.2.1.1	Atr 4.1.2.1.2	Atr 4.1.2.2.1	Atr 4.1.2.2.2	
M1_1	Модель СОМС для виконання завдань з урахуванням вимог та обмежень	+		+	+	+		+	+		+	+	+	+				
M1_2	Модель гомогенної СОМС для розгортання літаючої мережі	+		+		+			+			+		+				
M1_3	Модель гетерогенної СОМС для розгортання літаючої мережі	+		+		+				+		+		+				
M1_4	Модель СОМС для завдань доставлення вантажів		+	+				+	+			+				+		+
M1_5	Модель СОМС для моніторингу фізичної безпеки		+		+	+			+			+						
M1_6	Модель СОМС для збирання даних у визначені часові інтервали	+	+	+			+	+	+									
M1_7	Модель апарата обслуговування СОМС з деградацією	+	+	+	+			+							+		+	+

Приклад програмної реалізації запиту з онтології до моделі, отримання даних та додавання їх до бази знань на мові Python наведений в лістингу 2.2.

Лістинг 2.2 – Програмна реалізація запиту з онтології до API моделі та отримання даних

```
import requests
from rdflib import Graph, Namespace, URIRef, Literal

g = Graph()
g.parse("ontology.owl")

for s in g.subjects(predicate=URIRef("http://example.org/dataSourceURI")):
    uri = g.value(subject=s, predicate=URIRef("http://example.org/dataSourceURI"))
    response = requests.get(str(uri))
    # -> Результат з зовнішнього API
    data = response.json()
    # Додається нове знання в онтологію
    g.set((sensor, EX.hasTemperature, Literal(temperature)))
    # Зберігається оновлена онтологія
    g.serialize("ontology.owl", format="owl")
```

Онтограф розробленої онтології моделей функціонування СОМС представлений на рисунку 2.12.

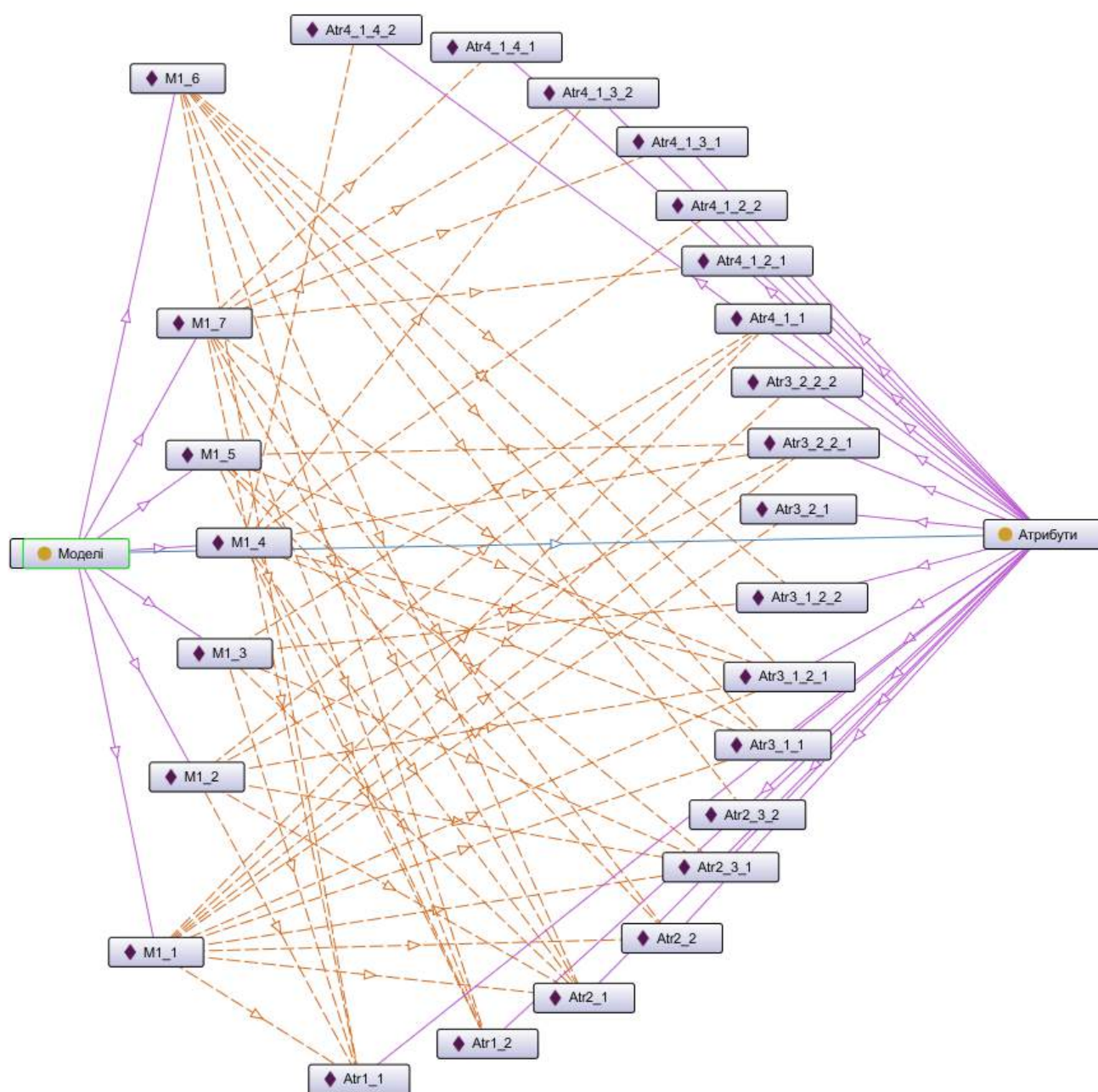


Рисунок 2.12 – Онтограф онтології моделей функціонування СОМС

2.3.3 Онтологія моделей оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Онтологія моделей оцінки гарантоздатності містить на наступні класи моделей:

- моделі систем масового обслуговування (СМО) СОМС;
- маршруто-орієнтовні моделі СОМС;
- комплексні моделі оцінки.

До атрибутів, які враховуються в онтології моделей оцінки гарантоздатності СОМС, відносяться наступні:

а) Atr 1 – особливості завдань (сервісів):

- 1) Atr1.1 – одиничні завдання;
- 2) Atr1.2 – потокові завдання;

б) Atr2 - тип покриттів, на яких базується виконання завдань

- 1) Atr2.1 – точкове покриття;
- 2) Atr2.2 – площадне покриття;
- 3) Atr2.3 – часове покриття;

- Atr2.3.1 – виконання завдань з визначеною тривалістю;
- Atr2.3.2 – доступність цільової області для виконання завдань;

в) Atr3 – характеристики ФБПЛА:

1) Atr3.1 – однорідність флоту БПЛА:

- Atr3.1.1 – одиничні БПЛА;
- Atr3.1.2 – флоти:
 - Atr3.1.2.1 – рій;
 - Atr3.1.2.2 – згряя;

2) Atr3.2 – обслуговуваність флоту БПЛА:

- Atr3.2.1 – необслуговувані БПЛА;
- Atr3.2.2 – обслуговувані БПЛА:

- Atr3.2.2.1 – стаціонарні засоби обслуговування;
- Atr3.2.2.1 – мобільні засоби обслуговування;

г) Atr4 – відмови:

1) Atr4.1 – багатоступеневість працездатності:

- Atr4.1.1 – двоступенева;
- Atr4.1.2 – багатоступенева (деградація);
- Atr4.1.3 – тип деградації:
 - Atr4.1.3.1 – деградація характеристик БПЛА;
 - Atr4.1.3.2 – деградація якості місій БПЛА;
- Atr4.1.4 – керованість деградації:
 - Atr4.1.4.1 – некерована;
 - Atr4.1.4.2 – керована.

2) Atr4.2 – відмови ФБПЛА:

- Atr4.2.1 – відмови БПЛА;
- Atr4.2.2 – відмови підсистеми забезпечення БПЛА;

3) Atr4.3 – причини відмов ФБПЛА:

- Atr4.3.1 – внаслідок фізичних дефектів;
- Atr4.3.2 – внаслідок проектних дефектів;
- Atr4.3.3 – відмови внаслідок кібератак.

В таблиці 2.5 представлені моделі та атрибути, які вони покривають.

Для уточнення моделей оцінки гарантоздатності до їх опису в онтології окрім властивостей об'єктів додано властивості даних (Data properties), які дозволяють обирати модель за додатковими параметрами:

- а) атомарність апарата обслуговування в СМО;
- б) кількість апаратів обслуговування в СМО;
- в) кількість АОЗС;
- г) кількість маршрутів;
- д) характеристики маршрутів:
 - кількість ділянок на маршруті;

- рівність ділянок на маршрутах;
- є) кількість основних БПЛА;
- ж) кількість резервних БПЛА.

Перелік моделей оцінки гарантоздатності СОМС та атрибутів, які вони враховують наведено в таблиці 2.5.

Використання онтології для визначення моделі, яка використовується для оцінки гарантоздатності СОМС, здійснюється шляхом трансформації опису та вимог до гарантоздатності функціонування СОМС в перелік атрибутів, які вказуються як параметри фільтрів SPARQL-запиту. За результатом виконання запиту визначається модель, яка враховує найбільшу кількість атрибутів і може використовуватись для визначення гарантоздатності виконання завдань СОМС.

Аналогічно до онтології моделей функціонування, кожна модель також має властивості даних (Data Properties) типу «String», яке містить посилання на програмний інтерфейс (англ. Application Program Interace, API) моделі у вигляді: «https://www.<modelX_X/API/>». API приймає JSON-файл, який містить вихідні дані:

- нефункціональні вимоги;
- чисельність БПЛА та їх надійнісні характеристики;
- чисельність АОЗС та їх надійнісні характеристики (у разі необхідності).

Порядок виведення знань з онтології аналогічний описаному в п. 3.2.1.

Онтограф розробленої онтології моделей оцінки гарантоздатності СОМС представлений на рисунку 2.13.

Таблиця 2.5 - Перелік моделей оцінки гарантоздатності СОМС та атрибутів, які вони враховують

Позначення моделі в онтології	Клас моделей	Модель або її мнемоніка	Атрибути, що враховуються моделями																							
			Atr1		Atr2				Atr 3						Atr 4											
			Atr 1.1	Atr 1.2	Atr 2.1	Atr 2.2	Atr 2.3		Atr 3.1		Atr 3.2		Atr 4.1				Atr 4.2		Atr 4.3							
							Atr 2.3.1	Atr 2.3.2	Atr 3.1.1	Atr 3.1.2		Atr 3.2.1	Atr 3.2.2		Atr 4.1.1	Atr 4.1.2	Atr 4.1.3		Atr 4.1.4		Atr 4.2.1	Atr 4.2.2	Atr 4.3.1	Atr 4.3.2	Atr 4.3.3	
Atr 3.1.2.1	Atr 3.1.2.2	Atr 3.2.2.1	Atr 3.2.2.2	Atr 4.1.3.1	Atr 4.1.3.2	Atr 4.1.4.1	Atr 4.1.4.2																			
M2_1_1	Моделі СОМС у вигляді систем масового обслуговування	M/M/1		+	+	+			+				+													
M2_1_2		M/M/N		+	+	+	+		+				+													
M2_1_3		(M/M/N):(F)		+	+	+	+		+				+								+		+			
M2_1_4		(M/M/N(U)):(F)		+	+	+	+		+				+		+						+		+			
M2_1_5		(M/M/N):(F/S)		+	+	+	+		+				+		+						+		+			
M2_2_1	Маршруто-орієнтовні моделі СОМС	S(1[4],1)	+	+	+				+					+							+					
M2_2_2		S(2[2],1)	+	+	+				+					+							+					
M2_2_3		S(2[2],2)	+	+	+				+					+							+					
M2_2_4		S(n[m],2)	+	+	+				+					+							+					
M2_2_5		S(2(m ₁ ,m ₂),1)	+	+	+				+					+							+					
M2_2_6		S(1[4],0)	+	+	+				+					+							+		+			
M2_2_7		S(2[2],0)	+	+	+				+					+							+		+			
M2_2_8		S(2[2],0,1)	+	+	+				+				+	+	+						+					
M2_2_9		S(2[2],0,2)	+	+	+				+				+	+	+						+					
M2_2_10		S(1[3],1,0,1)	+	+	+				+				+		+						+					
M2_2_11		S(1[3],1,0,2)	+	+	+				+				+		+						+					

Продовження таблиці 2.5

Позначення моделі в онтології	Клас моделей	Модель або її мнемоніка	Атрибути, що враховуються моделями																						
			Atr1		Atr2				Atr 3						Atr 4										
			Atr 1.1	Atr 1.2	Atr 2.1	Atr 2.2	Atr 2.3		Atr 3.1		Atr 3.2		Atr 4.1				Atr 4.2		Atr 4.3						
							Atr 2.3.1	Atr 2.3.2	Atr 3.1.1	Atr 3.1.2		Atr 3.2.1	Atr 3.2.2		Atr 4.1.1	Atr 4.1.2	Atr 4.1.3		Atr 4.1.4		Atr 4.2.1	Atr 4.2.2	Atr 4.3.1	Atr 4.3.2	Atr 4.3.3
Atr 3.1.2.1	Atr 3.1.2.2	Atr 3.2.2.1	Atr 3.2.2.2	Atr 4.1.3.1	Atr 4.1.3.2	Atr 4.1.4.1	Atr 4.1.4.2																		
M2_3_1	Комплекси моделей СОМС	Модель оцінки безпеки СОМС	+		+	+	+	+				+			+	+	+	+		+					+
M2_3_2		Модель СОМС для виконання моніторингу на базі БПЛА, Інтернету речей та ДП на промислових об'єктах як багаторівневих систем для різних режимів експлуатації	+	+	+		+		+	+	+	+			+		+	+		+			+	+	

Кінець таблиці 2.5

Позначення моделі в онтології	Клас моделей	Модель або її мнемоніка	Атрибути, що враховуються моделями																				
			Atr1		Atr2				Atr 3						Atr 4								
			Atr 1.1	Atr 1.2	Atr 2.1	Atr 2.2	Atr 2.3		Atr 3.1		Atr 3.2		Atr 4.1				Atr 4.2		Atr 4.3				
							Atr 2.3.1	Atr 2.3.2	Atr 3.1.1	Atr 3.1.2		Atr 3.2.1	Atr 3.2.2		Atr 4.1.1	Atr 4.1.2	Atr 4.1.3		Atr 4.1.4		Atr 4.2.1	Atr 4.2.2	Atr 4.3.1
Atr 3.1.2.1	Atr 3.1.2.2	Atr 3.2.2.1	Atr 3.2.2.2	Atr 4.1.3.1	Atr 4.1.3.2	Atr 4.1.4.1	Atr 4.1.4.2																
M2_3_3		Модель СОМС для моніторингу з використанням граничних обчислень	+		+	+				+				+	+	+	+		+	+	+	+	+
M2_3_4		Модель апарата обслуговування СОМС з деградацією	+	+	+	+			+					+	+	+	+		+		+	+	+

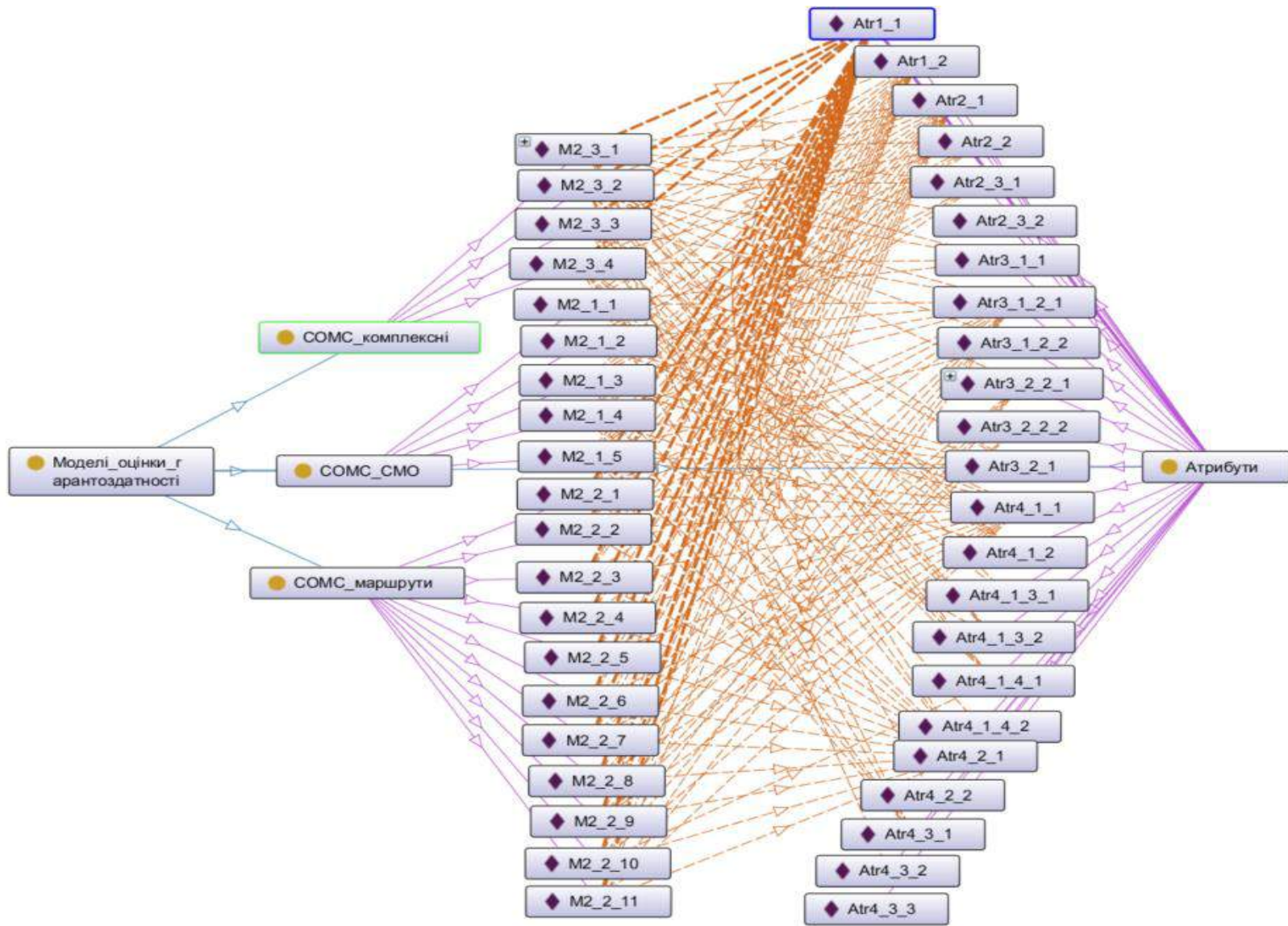


Рисунок 2.13– Онтограф онтології моделей оцінки гарантоздатності COMC

2.4 Концептуальна модель сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів у вигляді мультиагентної системи

На даний час при організації і управління складними системами сформувався клас так званих холонічних мультиагентних систем (ХМАС) [180], які базуються на концепції холізму [181, 182], засновником якої вважається Артур Кестлер У 1970 році він запровадив термін «холон» і розвинув концепцію холархії як ієрархічної системи, що складається з напівавтономних субцілісностей, які називаються холонами.

Холон за Кестлером - це одночасно цілісна частина і частина більшого цілого, що допомогло вирішити філософську суперечку про те, що реальніше - частини або ціле. Він критикував редукціонізм і пропонував бачити будь-яку систему як відкриту ієрархію із самоврядними рівнями.

В рамках цієї концепції цілісність системи створюється в результаті динамічної взаємодії автономних компонент – холонів, кожен з яких в свою чергу може бути системою (підсистемою або окремим об'єктом) і складатися з інших холонів. При появі всередині системи нових завдань холони можуть здійснювати постійний аналіз своїх потреб і можливостей, конкурувати між собою і кооперуватися для досягнення поставлених цілей.

У системному підході частини та ціле протиставляються, а холон поєднує їх, виявляючи властивості і частини, і цілого. Це означає, що холон не просто елемент, а система сама по собі, що має власну внутрішню організацію та функцію, яка взаємодіє з іншими холонами через комунікацію¹.

Роль холону в управлінні полягає в тому, що він виступає вузлом організації, що має відносну автономію і здатний приймати рішення, координувати дії та адаптуватися. Холони створюють холархію — ієрархічну систему, де управління розподілено і виникає самоузгодження без жорсткої централізації. Це забезпечує гнучкість, стійкість та адаптивність системи в

цілому. Кожен холон в управлінській структурі може бути одночасно виконавцем, координатором та контролером залежно від рівня та контексту

Роль холону суттєво підвищує ефективність систем завдяки наступним аспектам [181]:

- поєднання автономії та інтеграції. Холон одночасно є автономним та інтегрованим в систему, що дозволяє приймати рішення локально на рівні холонів, враховуючи специфіку та умови, при цьому зберігаючи координацію з іншими частинами системи. Це забезпечує гнучкість та адаптивність управління в мінливих умовах середовища;

- гнучка структура управління (гетерархія). Холонічні системи будуються як гібрид ієрархії та мережових відносин, де холони можуть взаємодіяти «по горизонталі» через переговори рівноправних партнерів та формувати тимчасові ієрархії для вирішення довгострокових завдань. Ця гетерархічна база з елементами самоорганізації підвищує оперативність та адаптивність системи;

- самоорганізація та еволюція управління. Управління розглядається не як зовнішній директивний процес, а як внутрішня властивість системи, де холони еволюційно пристосовуються до змін, обмінюються інформацією та ресурсами, що сприяє стійкості та життєздатності всієї системи;

- підвищення життєздатності та стійкості. Автономні холони, володіючи інформацією та здатністю приймати рішення, зменшують ризики збоїв, прискорюють реакції на зовнішні впливи та ефективно використовують ресурси, підтримуючи цілісність організації;

- роль керуючих холонів як експертів. Окремі холони керування можуть виконувати функції керування, підтримки та консультування, забезпечуючи доступ до загальносистемної інформації, що посилює якість прийняття рішень основною мережею холонів.

Загальний вигляд концептуальної моделі холонічної мультиагентної системи представлений на рисунку 2.14.

Завдання Вимоги Умови

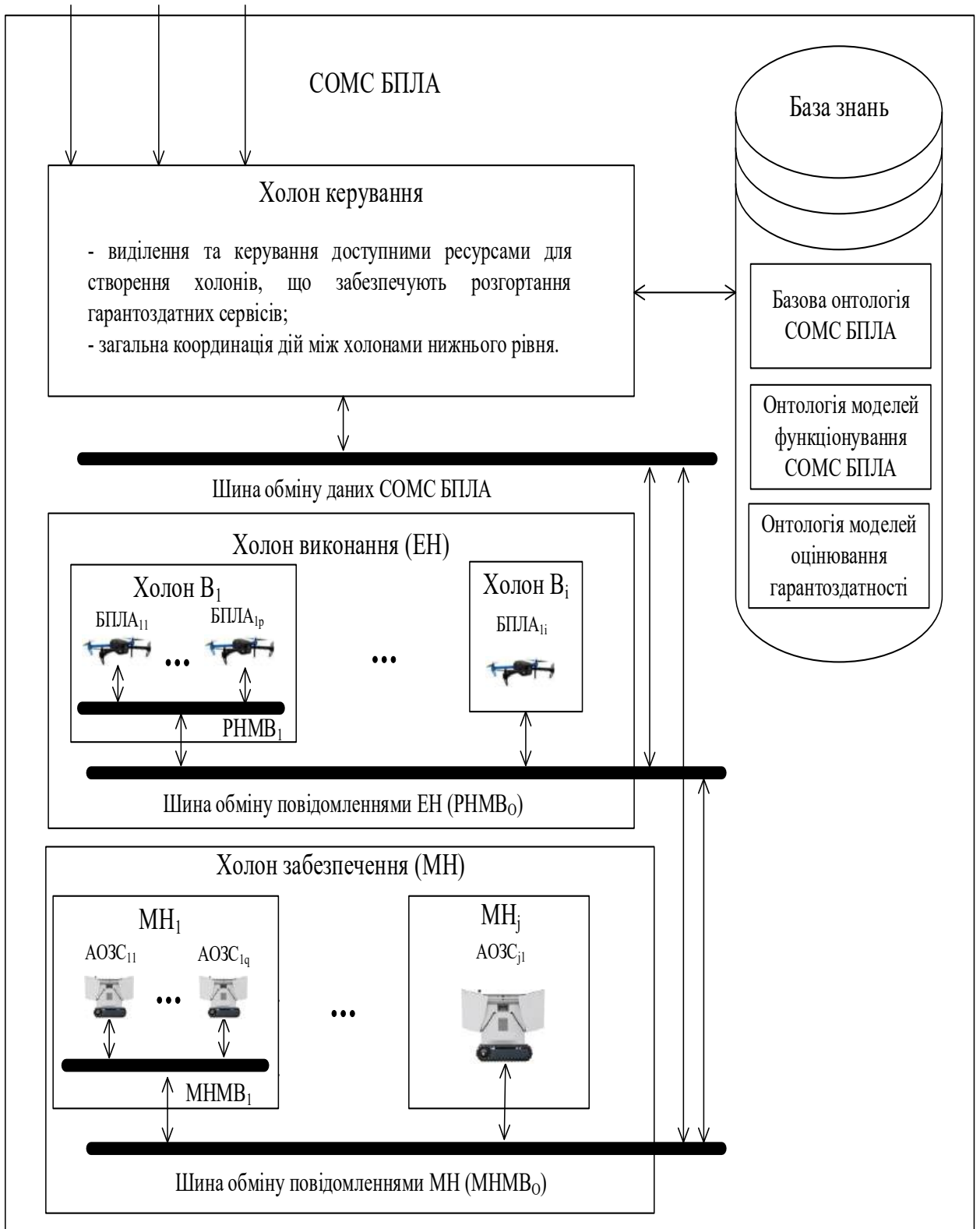


Рисунок 2.14 – СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи

СОМС БПЛА у вигляді багаторівневої ХМАС складається з трьох рівнів холонів, кожен з яких в свою чергу може складатися з декількох інших холонів [183, 184]:

- холон керування, який обробляє потік завдань, виділяє ресурси для їх виконання з урахуванням вимог та умов;

- холон виконання завдань, яких може складатися з декількох холонів, що представлені агентами-БПЛА;

- холон забезпечення виконання завдань, складові якого можуть бути представлені системами заряджання (заміни) джерел живлення БПЛА холону виконання завдань.

Обмін інформацією в СОМС може здійснюватися як між холонами на одному рівня, так і між холонами різних рівнів, а також через загальну базу знань. Схема інформаційного обміну в ХМАС будується за принципом децентралізованого взаємодії автономних агентів-холонів, кожен із яких представляє функціональний чи фізичний елемент системи.

Основні компоненти та їх взаємодія у ХМАС включають:

- 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, холоном керування, холоном забезпечення).

- холон забезпечення, що здійснює обслуговування холонів виконання. Він має обмінюватися інформацією з іншими холонами стосовно свого поточного стану, місцезнаходження, можливостей по обслуговуванню;

- 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 приймають участь у обслуговуванні запиту, а також холоном керування;

- загальна база знань та мета всієї системи і окремих холонів, які доступні для всіх холонів та забезпечують узгодженість дій.

Для обміну інформацією між агентами в холонічних системах використовуються спеціалізовані протоколи та моделі взаємодії, що забезпечують:

- асинхронний обмін повідомленнями, де агенти-холони передають один одному структуровані повідомлення - мовні акти (перформативи), такі як запити (Request), повідомлення (Inform) та відповіді, забезпечуючи діалог та координацію без жорсткої синхронізації;

- використання стандартів типу FIPA (англ. Foundation for Intelligent Physical Agents), які задають набір мовних актів, протоколи ведення переговорів та формати повідомлень, забезпечуючи сумісність та передбачуваність комунікації між агентами-холонами;

- динамічне формування кооперативних груп (доменів кооперації) агентів-холонів, серед яких вибирається координатор, керуючий обміном та узгодженням даних, що допомагає створювати ієрархії та розподіляти відповідальність у мультиагентній системі;

- впровадження внутрішніх ринків або контрактних мереж, де агенти-холони обмінюються інформацією, оцінюють завдання та домовляються про виконання робіт, що формує механізм саморегуляції та ефективного розподілу ресурсів;

- використання онтологій та загальної бази знань, які забезпечують єдиний семантичний простір для інтерпретації даних, запобігають дублювання та сприяють спільному розумінню інформації серед агентів-холонів.

В таблиці 2.6 наведено опис основних даних, які використовуються та якими обмінюються холони в процесі обслуговування запитів.

Таблиця 2.6 – Опис основних даних, які використовуються та якими обмінюються холони в процесі обслуговування запитів

Тип холону	Опис даних/дії	Напрямок (кому та від кого надходить)
Холон керування	Запит на розгортання сервісу (тип сервісу, вимоги, умови)	Вхідний (-)
	Створення екземпляру місії	Вихідний (базова онтологія)
	Додавання даних до екземпляру місії	Вихідний (базова онтологія)
	Запит отримання даних з зовнішніх API	Вихідний (API зовнішніх сервісів)
	Відповіді з даними від зовнішніх API	Вхідний (API сервісу прогнозування)
	Завдання на розгортання сервісу	Вихідний (холону керування, холону обслуговування)
Холон виконання	Завдання на розгортання сервісу	Вхідний (від холону керування)
	Проточний стан виконання завдання	Вихідний (холону керування, холону обслуговування)
	Поточний технічний стан БПЛА	Вихідний (холону керування, холону обслуговування та іншим БПЛА холону виконання)
	Запит на обслуговування БПЛА	Вихідний (холону обслуговування)
	Поточне місце знаходження БПЛА	Вихідний (холону обслуговування та іншим БПЛА холону та інших холонів)
Холон обслуговування	Завдання на розгортання сервісу	Вхідний (від холону керування)
	Проточний стан виконання завдання	Вихідний (холону керування, холону виконання)
	Поточний технічний стан АОЗС	Вихідний (холону керування, іншим АОЗС холону виконання та іншим БПЛА холону виконання)
	Запит на обслуговування БПЛА	Вхідний (БПЛА холону виконання)

Кінець таблиці 2.6

Тип холону	Опис даних/дії	Напрямок (кому та від кого надходить)
Холон обслуговування	Поточне місце знаходження АОЗС	Вихідний (БПЛА холону виконання та іншим АОЗС холону та інших холонів)
	Кількість зайнятих каналів на АОЗС	Вихідний (БПЛА холону виконання та іншим АОЗС холону та інших холонів)
	Тип БПЛА, що можуть обслуговуватись на АОЗС	Вихідний (БПЛА холону виконання та іншим АОЗС холону та інших холонів)

При розгортанні ХМАС необхідно визначати функцію задоволення для агентів, які дозволяють стимулювати їх до дії при обслуговуванні запитів. При цьому для різних типів запитів функції задоволення будуть різними. Так при виконанні завдань моніторингу (спостереження, картографування, пошуку об'єктів) агент отримує більше «задоволення», якщо:

- він охоплює більшу площу S_{coverage} (покриття сенсорів/камери);
- збирає корисні дані з достатньою якістю Q_{data} (роздільність, відсутність шуму, правильний кут огляду);
- мінімізує перетини з іншими агентами Overlap (щоб не дублювати роботу);
- зберігає достатній запас енергії E_{ret} для повернення на стартовий майданчик.

Приклад функції «задоволення» при виконанні завдань моніторингу:

$$U_{\text{monitor}}(i) = w_1 S_{\text{coverage}}(i) + w_2 Q_{\text{data}}(i) + w_3 \text{Overlap}(i) + w_4 E_{\text{ret}}(i), \quad (2.2)$$

де $w_1 \dots w_4$ — вагові коефіцієнти ($\sum w = 1$), що відображають відносну важливість показника.

При виконанні завдань інспектування (контроль інфраструктури, об'єктів, стану обладнання) агент «задоволений», якщо:

- він інспектував більше об'єктів/точок, $N_{inspect}$;
- перевірка виконана з потрібною точністю $Q_{inspect}$ (кутом огляду, висотою, освітленістю);
- час виконання t_{task} мінімізований;
- уникнув зіткнень та дотримався безпечних траєкторій Safe.

Варіант функції задоволення агента при виконанні завдань інспектування:

$$U_{inspect}(i) = w_{1i}N_{inspect}(i) + w_{2i}Q_{inspect}(i) + w_{3i}t_{task}(i) + w_{4i}Safe(i) \quad (2.3)$$

Таким чином, функція задоволення агентів-БПЛА може формулюватися як баланс між:

- якістю виконаного завдання (покриття, точність, кількість об'єктів);
- витратами ресурсів (енергія, час, ризики).

Для АОЗС, що обслуговує БПЛА, функція задоволення може бути описана виразом:

$$U_{ABRAS}(j) = w_{1j}f_{load}(j) + w_{2j}f_{energy}(j) + w_{3j}f_{response}(j) + w_{4j}f_{prior}(j), \quad (2.4)$$

де $f_{load}(j)$ - коефіцієнт завантаженості або ефективності використання АОЗС;

$f_{energy}(j)$ - енергетична ефективність (наприклад, баланс між спожитою і переданою енергією);

$f_{\text{response}}(j)$ - швидкість реагування (інверсія середнього часу обслуговування);

$f_{\text{prior}}(j)$ - врахування пріоритетності місій БПЛА, які обслуговуються;

$w_{1j} \dots w_{4j}$ — вагові коефіцієнти ($\sum w=1$), що відображають відносну важливість критеріїв.

Застосування запропонованої концептуальної моделі СОМС БПЛА дозволяє створювати гнучку структуру, що забезпечує її масштабування при надходженні запитів на виконання різних завдань, застосовуючи для цього автономні холони, без необхідності виконання складних процедур синтезу з урахуванням вимог до сервісів та умов виконання.

2.5 Моделі розгортання сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

2.5.1 Моделі сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів для виконання завдань з урахуванням вимог та обмежень

Модель функціонування СОМС БПЛА для виконання завдань з урахуванням вимог та обмежень дозволяє призначена високорівневого опису функціонування, який дозволяє визначати базові підходи до визначення структури та складу СОМС з урахуванням вимог, що пред'являються, а саме: розмір цільової зони (наприклад, кількість наземних об'єктів, з яких збираються дані, або площі зони для обстеження), віддаленості цільових об'єктів (районів), частота передачі, обсяг даних, що передаються, тривалість виконання завдань (наприклад, обстеження за час не більше ніж, або розгортання бездротової мережі на час не менше ніж заданий) [184].

Якщо розглядати БПЛА як вид транспорту для вантажу, а все що збирається та передається/переміщується БПЛА у вигляді вантажу, то СОМС у загальному вигляді можна розглядати як систему збирання та

транспортування даних. Такий підхід дає змогу застосувати апарат теорії транспортних систем для аналізу функціонування СОМС.

Безпілотні літальні апарати утворюють транспортну підсистему у складі СОМС та розглядаються як:

- поодинокі БПЛА (приклад простої СОМС, коли не висуваються ніякі вимоги та обмеження) (рисунок 2.15);

- гомогенна група (рій) БПЛА (СОМС з обмеженнями на час (періодичність) збору та передавання даних). Прикладом може бути група БПЛА, що виконує завдання зі збирання та передавання даних з кількох джерел - цільових точок (ЦТ) (рисунок 2.16) або рій БПЛА, що виконує передавання даних на кризовий центр з розгортанням літаючої бездротової мережі (ЛБМ) (рисунок 2.17);

- гомогенна сукупність груп (роїв) однотипних БПЛА (наявність вимоги безперервного тривалого збирання і передавання, або вимоги до швидкості передавання даних). Наприклад, кілька роїв БПЛА, що здійснюють передавання інформації, у режимі позмінної роботи (один рій БПЛА змінює інший), або кілька роїв БПЛА, які передають інформацію паралельно для забезпечення необхідної швидкості передавання даних (рисунок 2.18).

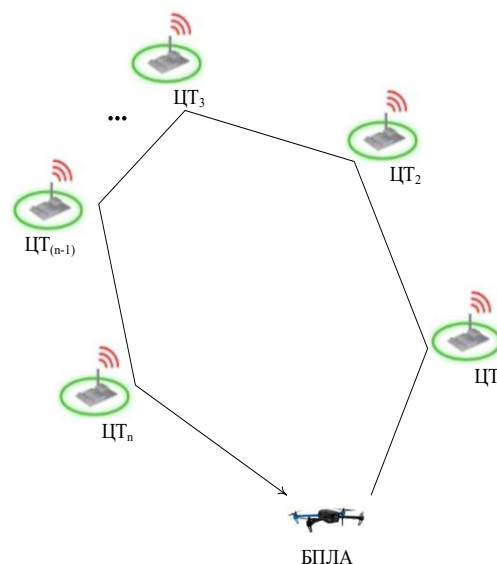


Рисунок 2.15 – Приклад простої СОМС, що виконує завдання моніторингу

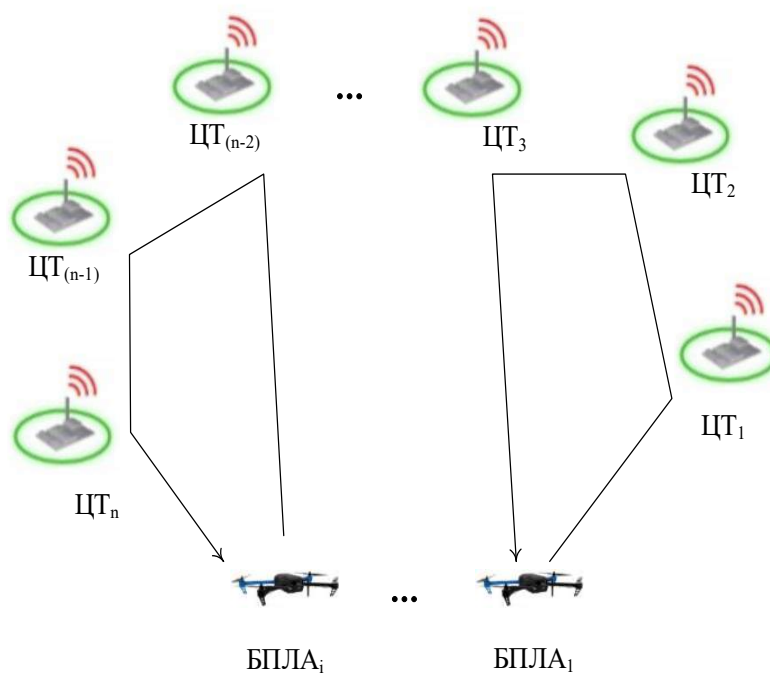


Рисунок 2.16 – СОМС з гомогенною групою БПЛА

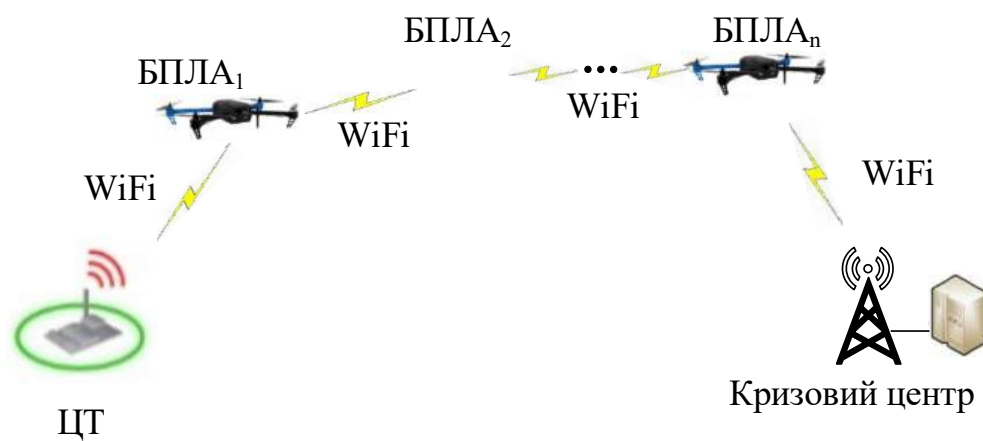


Рисунок 2.17 – СОМС для передавання даних з розгортанням літаючої бездротової мережі

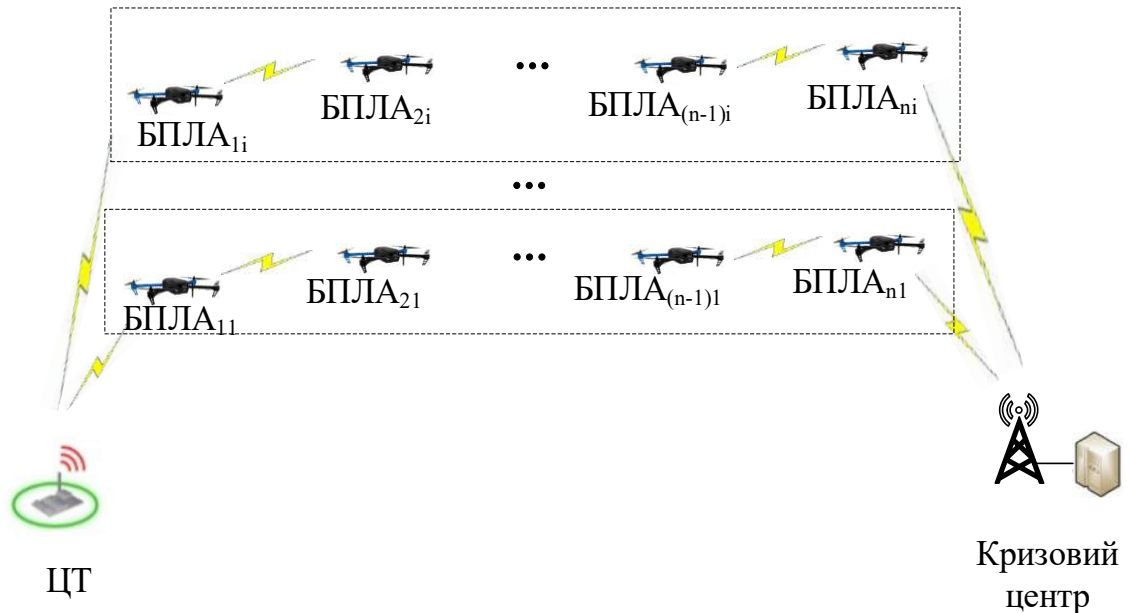


Рисунок 2.18 – СОМС, що використовує кілька роїв БПЛА, які утворюють декілька паралельних каналів передавання інформації для забезпечення необхідної швидкості

При використанні у складі СОМС БПЛА мультироторного типу (МБПЛА) з електричними двигунами може виникнути необхідність відновлення заряду бортових джерел живлення в процесі виконання завдань. Це завдання можна виконати за допомогою АОЗС, які розглядаються як підсистема забезпечення функціонування транспортної системи.

Розміщення зарядних/змінних станцій на повітряних платформах дає змогу швидко переміщатися між цільовими точками маршруту та уникати проблем, пов'язаних із пошкодженими дорогами.

На структуру та склад системи моніторингу впливають такі чинники:

- розміри зони моніторингу (кількість цільових точок (k) для моніторингу, їхні координати $(x_k; y_k)$, що використовуються для розрахунку маршрутів БПЛА);
- інтервал збирання та передавання даних (ΔT);
- тривалість роботи системи моніторингу (t_{oper});
- необхідна швидкість передачі даних (C_{req});
- необхідний відстань для передавання даних ($D_{(MS-CrS)}$).

- льотно-технічні характеристики БПЛА (швидкість (V_{UAV}), максимальна тривалість польоту (E_{UAV}), максимальна маса корисного навантаження, спосіб створення підйомної сили (МБПЛА, літаковий БПЛА (ЛБПЛА)); склад і технічні характеристики бортової апаратури контролю БПЛА (тип корисного навантаження, розпізнавальна здатність, смуга огляду);

- Склад і технічні характеристики обладнання бездротового передавання даних (швидкість передавання даних ($C_{wireless_UAV}$), дальність дії обладнання бездротового передавання даних ($R_{wireless_UAV}$);

- характеристики району моніторингу (тип і характеристики поверхні, наявність перешкод і завад для польоту й передавання даних) і несприятливі (небезпечні) зовнішні збурення, що впливають на функціонування систем моніторингу (висока температура, задимлення, іонізуюче випромінювання тощо), які можуть вплинути на максимальний час польоту БПЛА, маршрути польоту, дальність передавання даних, оперативність збирання інформації;

- характеристики підсистеми обслуговування (швидкість АОЗС (V_{ABRAS}), час заміни батареї (t_{bat_repl}).

Загальний алгоритм дій при формуванні структури та складу СОМС показано на рисунку 2.21. Залежно від вимоги до інтервалу отримання даних алгоритм розглядає наступні варіанти формування СОМС:

- а) жодних обмежень немає - проста система з одним БПЛА
- б) необхідність безперервного тривалого передавання даних - лінія зв'язку від декількох БПЛА;
- в) встановлюються тимчасові рамки отримання даних - система з декількох БПЛА, що забезпечує збір і передачу даних у необхідні терміни.

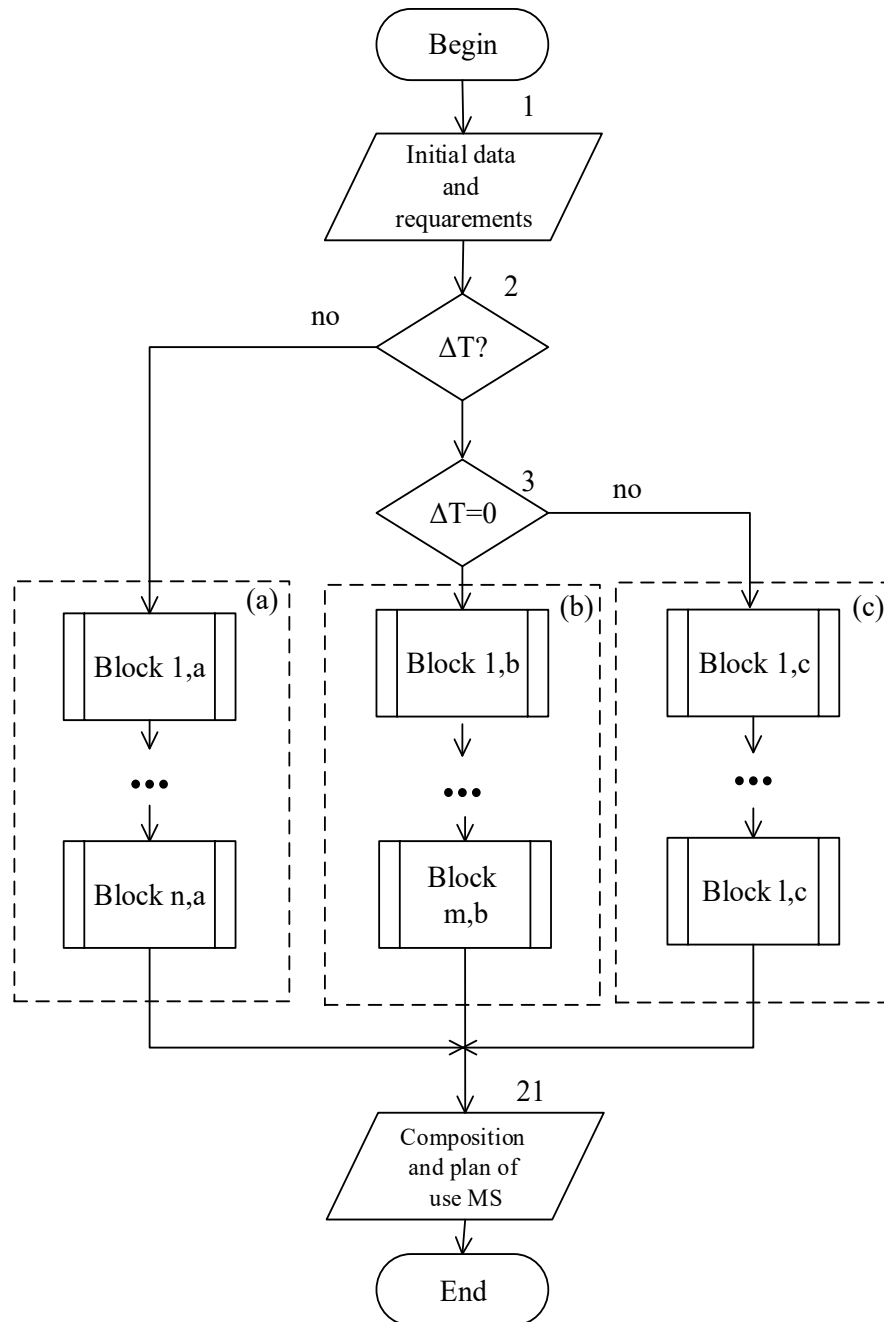


Рисунок 2.19 – Загальний алгоритм обґрунтування складу системи моніторингу та планування її використання

Гілка алгоритму (a) для СОМС (без будь-яких обмежень) показана на рисунку 2.20 і включає такі кроки.

Планується маршрут польоту БПЛА (рисунок 2.20, блок 1) і час польоту за маршрутом порівнюється з максимальною тривалістю польоту БПЛА (рисунок 2.20, блок 2).

За більшої тривалості польоту за маршрутом визначаються параметри підсистеми забезпечення (рисунок 2.20, блок 3).

Також визначаються необхідна кількість АОЗС і точки їхнього розташування (рисунок 2.20) [185].

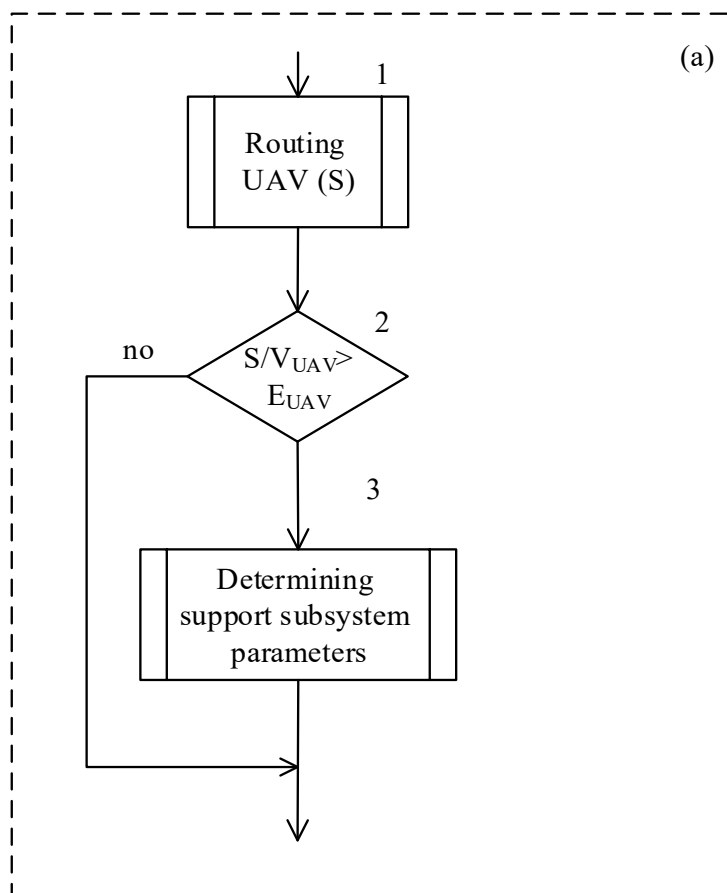


Рисунок 2.20 – Алгоритмічна гілка (а) для СОМС без будь-яких обмежень

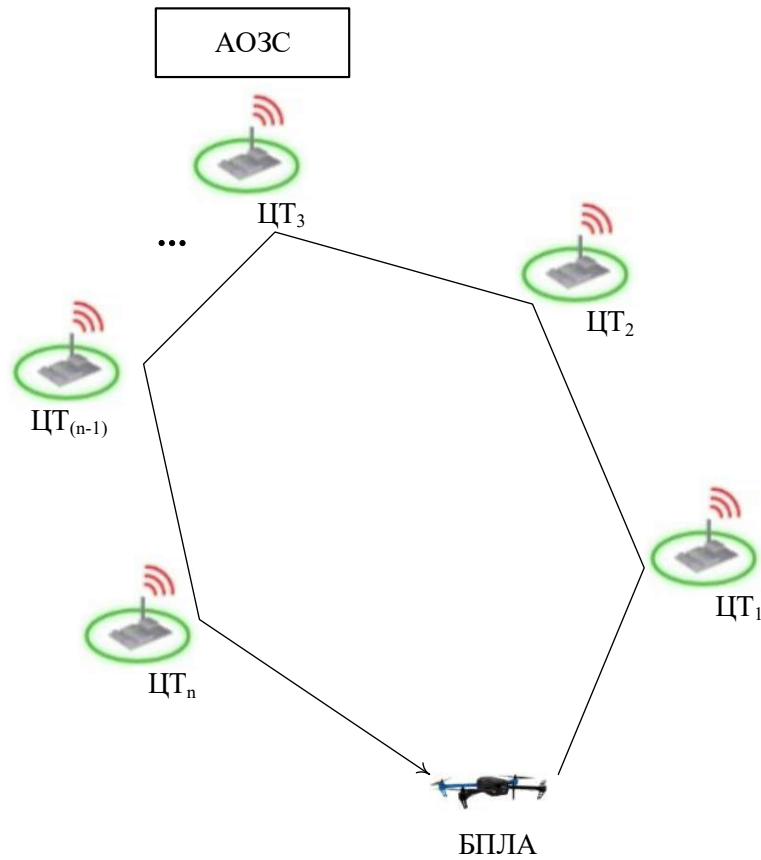


Рисунок 2.21 – Приклад простої системи моніторингу з БПЛА і АОЗС

Гілка алгоритму для структури (б) (потрібне довгострокове передавання даних) показана на рисунку 2.22 і включає такі кроки.

Першим кроком гілки алгоритму є визначення кількості БПЛА, необхідної для формування лінії передавання даних (рисунок 2.22, блок 1). Кількість БПЛА для бездротового сегмента (рою БПЛА) розраховується як:

$$n = \frac{D_{(MS-CrS)}}{R_{\text{wireless_UAV}}} \quad (2.5)$$

де, $D_{(MS-CrS)}$ — відстань між цільовою точкою і кризовим центром;

$R_{\text{wireless_UAV}}$ - дальність дії бортового бездротового мережевого обладнання БПЛА.

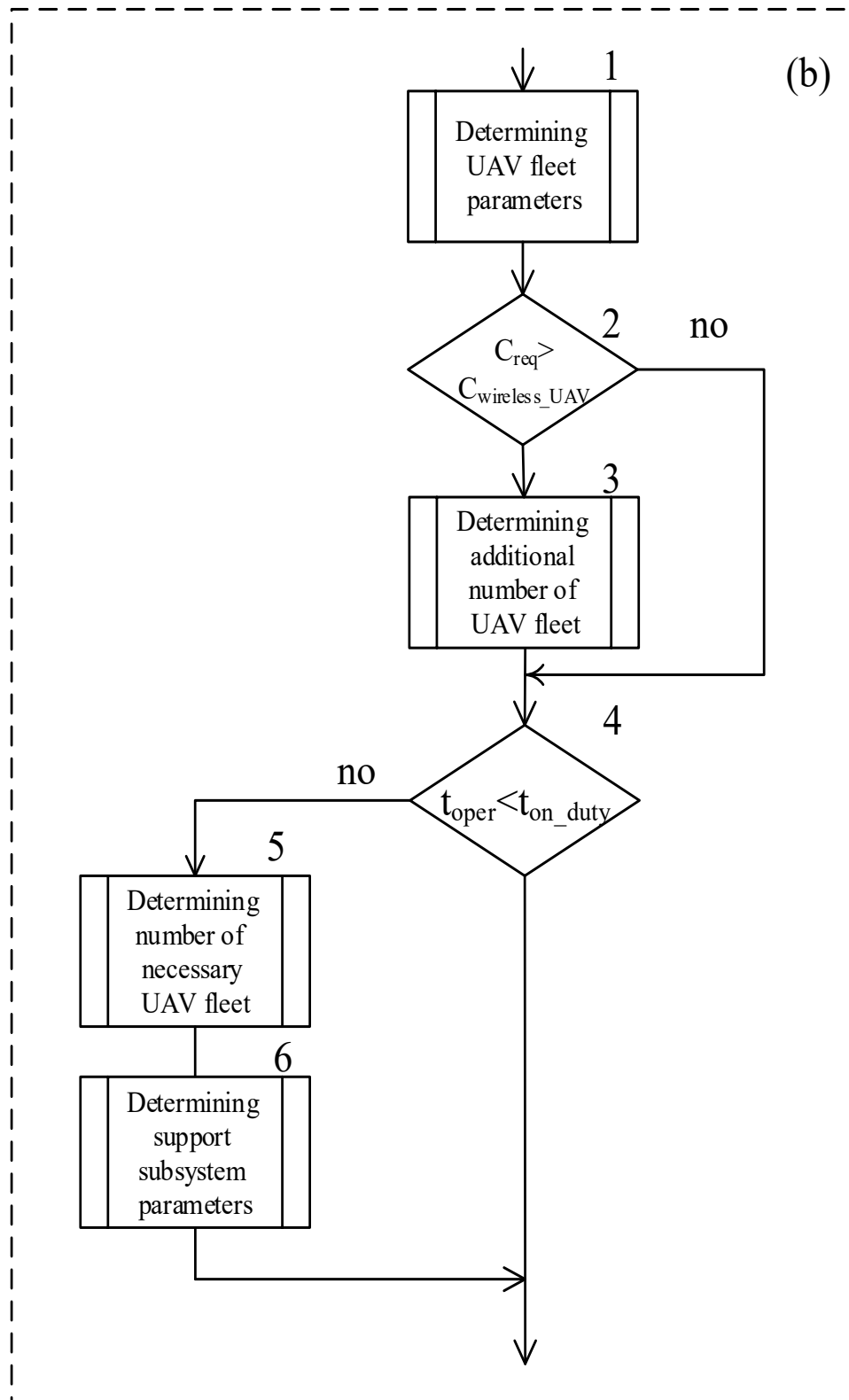


Рисунок 2.22 – Гілка алгоритму (б) для СОМС з вимогою тривалого передавання даних

На другому етапі перевіряється умова забезпечення необхідної швидкості передавання даних (рисунок 2.22, блок 2).

Якщо умова не виконується (рисунок 2.20, блок 3), то кількість додаткових флотів БПЛА розраховується як:

$$m = \frac{C_{\text{req}}}{C_{\text{wireless_UAV}}} - 1 \quad (2.6)$$

де, C_{req} – необхідна швидкість передавання даних із наземної станції

$C_{\text{wireless_UAV}}$ – швидкість передавання даних бездротового обладнання, встановленого на БПЛА;

Після цього необхідний час безперервного тривалого передавання даних порівнюється з максимальною тривалістю польоту БПЛА (рисунок 2.22, блок 4).

Тривалість чергування парку БПЛА можна визначити за таким виразом:

$$t_{\text{on_duty}} = E_{\text{UAV}} - \frac{2 \max[S_{\text{UAV}1} ; \dots ; S_{\text{UAV}n}]}{V_{\text{UAV}}} - t_{\text{wireless_conf}} \quad (2.7)$$

де E_{UAV} – максимальна тривалість польоту БПЛА;

$S_{\text{UAV}1} ; \dots ; S_{\text{UAV}n}$ – дальність польоту для $\text{UAV}_1, \dots, \text{UAV}_n$ між точкою розташування в бездротовому сегменті та місцем розташування АОЗС;

V_{UAV} – швидкість БПЛА;

$t_{\text{wireless_conf}}$ – час налаштування бездротової мережі.

Для забезпечення безперебійної роботи системи на базі БПЛА пропонується використовувати змінний графік роботи роїв БПЛА. Необхідну кількість роїв (змін) БПЛА для забезпечення безперебійної роботи системи моніторингу можна визначити як (рисунок 2.22, блок 5):

$$l = 1 + \frac{t_{oper}}{t_{on_duty} + t_{repl_bat}} \quad (2.8)$$

де t_{oper} – потрібний час функціонування системи;

t_{on_duty} – максимальний час польоту БПЛА;

t_{repl_bat} - час заміни батареї на АОЗС.

В кінці визначаються параметри підсистеми забезпечення для цього випадку. Визначаються необхідна кількість АОЗС, їхні параметри та місця розташування [186].

Гілку алгоритму для структури (с) (з вимогами до часових меж отримання даних) представлено на рисунку 2.23.

Перший крок (рисунок 2.23, блок 1) аналогічний першому кроку гілки алгоритму для структури (а) (рисунок 2.21, блок 1).

Далі час польоту за маршрутом порівнюється з часовими межами отримання даних (рисунок 2.23, блок 2).

Якщо час польоту за маршрутом більший, то цільова область ділиться на частини (рисунок 2.23, блок 3, блок 6) і для кожної частини плануються маршрути руху БПЛА (рисунок 2.23, блок 4), доки час польоту БПЛА за маршрутом для кожної частини не стане меншим або дорівнюватиме необхідним часовим рамкам отримання даних (рисунок 2.23, блок 5).

Після цього маршрутний час польоту кожного БПЛА порівнюється з максимальним часом польоту БПЛА (рисунок 2.23, блок 7).

За більшої тривалості польоту за маршрутом визначають параметри підсистеми забезпечення – кількість та місця розташування АОЗС (рисунок 2.23, блок 8).

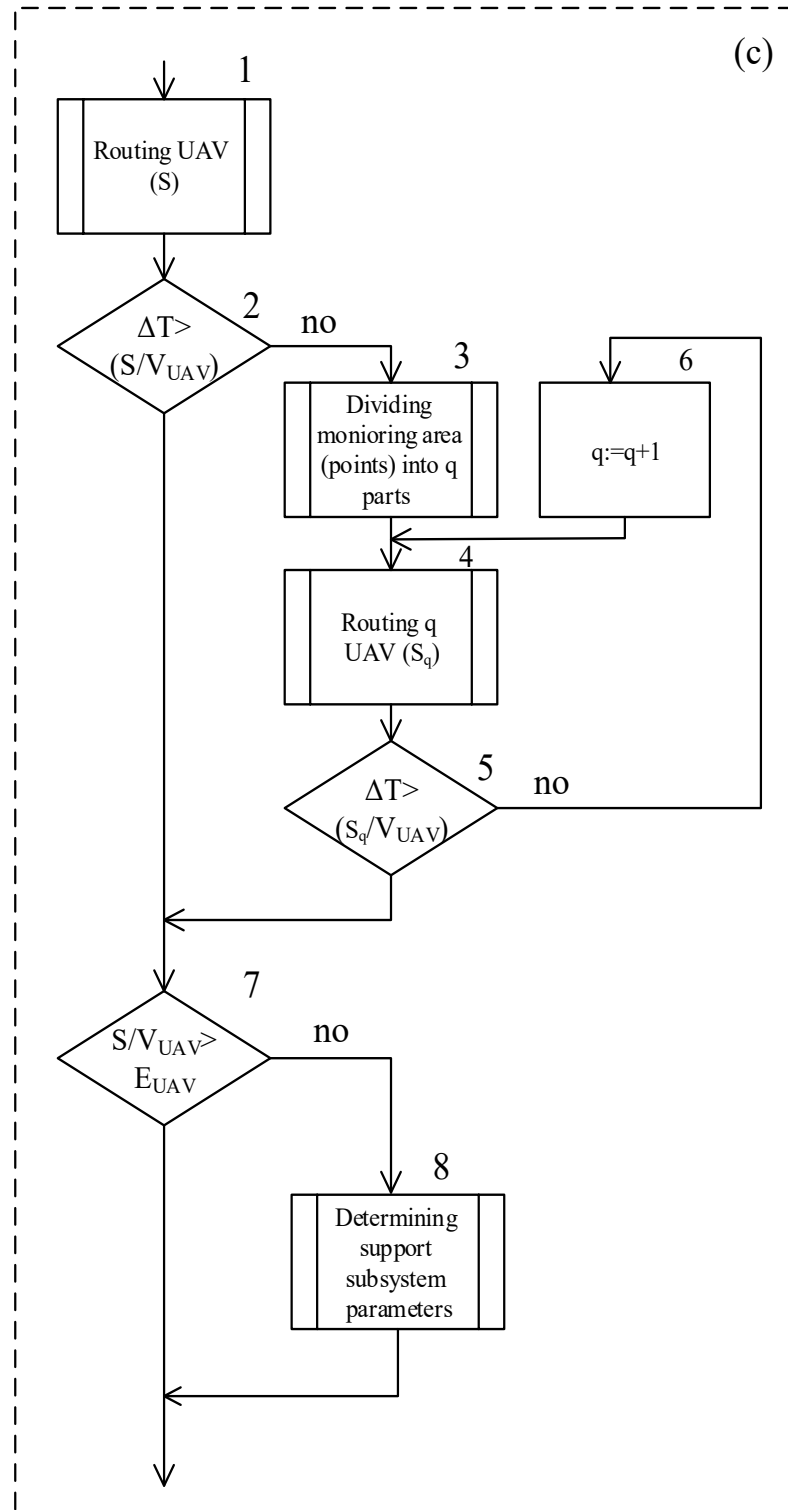


Рисунок 2.23 – Гілка алгоритму (с) для системи моніторингу з часовими рамками отримання даних

Очевидно, що час, необхідний для відвідування всіх об'єктів на маршруті, має бути мінімізовано. Це можна сформулювати як задачу комівояжера (англ. Traveling Salesman Problem, TSP) за відсутності будь-яких додаткових обмежень [187].

Однак у БПЛА може не вистачити заряду батареї для виконання своєї місії без переміщення АОЗС для заміни батареї, коли об'єкти розкидані по великій площі. У такому разі БПЛА може замінити батарею за допомогою АОЗС безпосередньо на маршруті. Це призводить появи версії задачі з кількома комівояжерами, які рухаються різними маршрутами - БПЛА і АОЗС.

Для розв'язання подібних задач використовуються такі методи [191, 192]:

- теорія графів;
- теорія транспортних системи (методи розв'язання задачі комівояжера і задачі про кількох комівояжерів)
- математичні моделі оптимізації (еволюційні алгоритми);
- планування робіт з обслуговування.

Використання цих методів дає змогу планувати й оцінювати можливості СОМС при виконанні описаних завдань.

2.5.2 Модель гомогенної сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів для виконання завдань моніторингу

При розробці моделі функціонування гомогенної СОМС для виконання завдань моніторингу розглядається наступний сценарій. Унаслідок аварії на Запорізькій АЕС пошкоджено дротові мережі, що зв'язують 11 вимірювальних станцій (англ. Measuring Station, MS) із кризовим центром. Необхідно провести обліт 11 вимірювальних станцій для збору з них даних радіаційного контролю для передавання на кризовий центр (рисунок 2.24).

Обладнання WiFi, розміщене на вимірювальних станціях і вбудоване обладнання WiFi мультироторного БПЛА DJI Mavic 2 Enterprise Dual дають змогу виконати цю місію через з'єднання між MS і БПЛА, який зависає на MS протягом необхідного часу для збирання даних. Для БПЛА майданчик розміщення є початковою та кінцевою точкою маршруту.

Підсистема обслуговування БПЛА представлена гелікоптером SL-231 Scout, здатним працювати в безпілотному режимі, який використовується як платформа для розміщення АОЗС.

Скорочення, символи та позначення, які використовуються, зведені в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Скорочення, символи та позначення

Скорочення/символ	Позначення
CrC	кризовий центр
DH/DQ	депо для АОЗС / для БПЛА
MS	вимірювальна станція
NPP	атомна електростанція
	місце розташування MS
	місце розташування MS, на якій замінюється акумулятор БПЛА
	АОЗС, яка розміщена на безпілотному гелікоптері SL-231 Scout
	БПЛА
	депо БПЛА
--->	маршрут БПЛА
—>	маршрут АОЗС

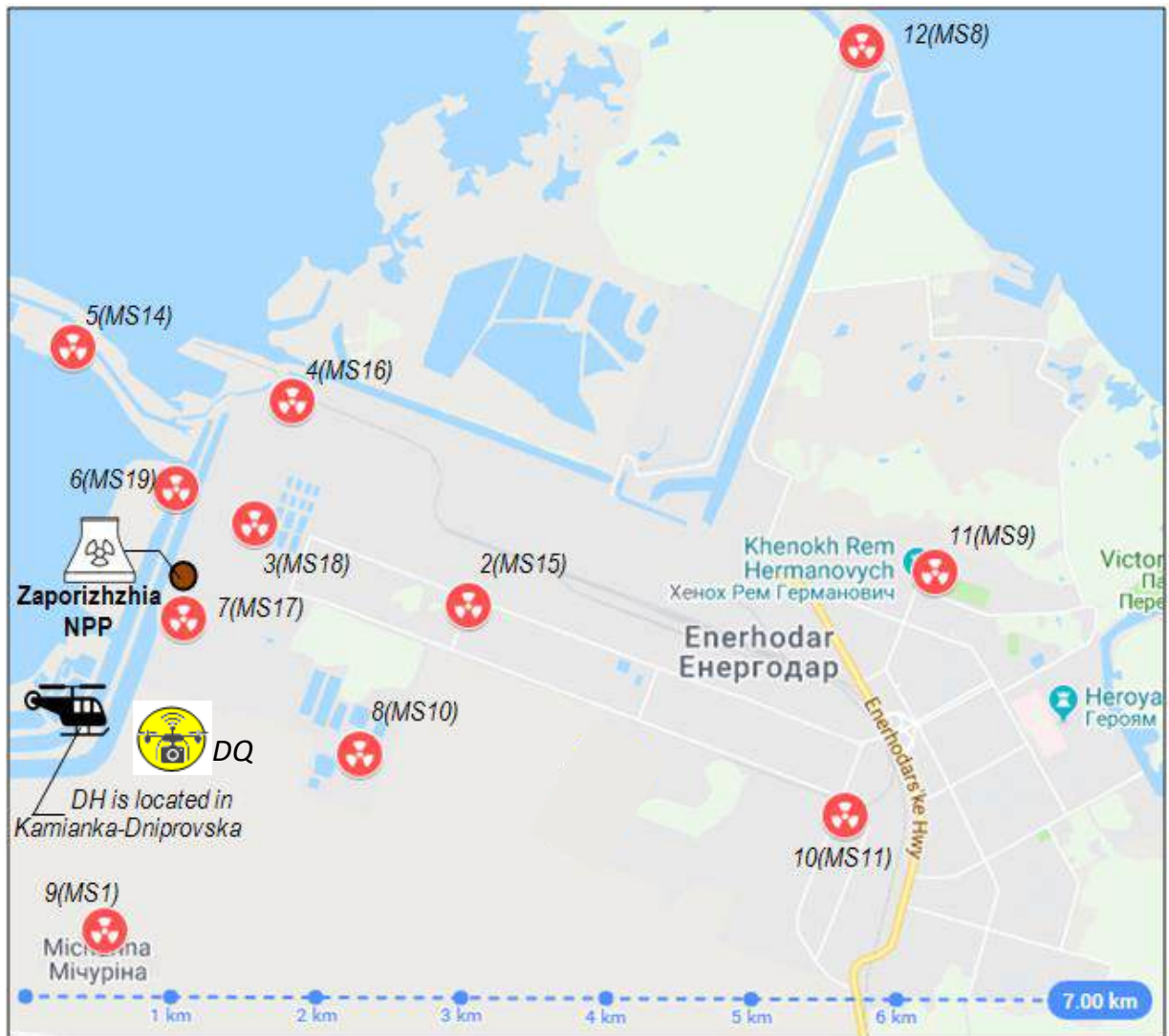


Рисунок 2.24 – Схема сценарію використання СОМС для виконання моніторингу

Припущення та вихідні дані:

- ABRAS повинен прибувати в точку заміни батареї не менше ніж за 0,03 год до початку моніторингу БПЛА і вилітати з місця заміни батареї на 0,03 год пізніше БПЛА, щоб уникнути аварії в повітрі;
- час збору даних з кожної MS - 0,05 год;
- час заміни батареї - 0,03 год;
- швидкість польоту БПЛА - 40 км/год;
- швидкість польоту ABRAS - 100 км/год;
- максимальна тривалість польоту БПЛА - 0,63 год.

Відстані між цільовими точками, якими є місця розташування вимірювальних станцій та майданчика для БПЛА наведено в таблиці 2.7.

Визначено вимогу – необхідно отримувати дані з усіх MS не рідше ніж один раз на годину.

Розв'язуючи задачу комівояжера методом еволюційного розв'язання в Excel для побудови маршруту польоту БПЛА для відвідання всіх MS, був знайдений найкоротший можливий маршрут для БПЛА, який злітає з депо, відвідує кожен MS рівно один раз і повертається назад у депо розміщення БПЛА (рисунок 2.25).

Маршрут наступний: DQ-MS1-MS10-MS15-MS11-MS9 (точка заміни батареї № 1)-MS8-MS16-MS14-MS19-MS18 (точка заміни батареї № 2)-MS17-DQ. Загальний час польоту за маршрутом становить 1,27 год.

Таблиця 2.8 – Відстані між місцями розташування вимірювальних станцій та майданчика БПЛА, км

Цільова точка	Цільова точка											
	DQ	MC8	MC14	MC16	MC19	MC18	MC15	MC9	MC17	MC10	MC11	MC1
DQ	0	6.92	3.16	2.75	2.02	1.86	2.31	5.39	1.12	1.27	4.57	1.16
MC8	6.92	0	5.85	4.89	5.64	5.34	4.75	3.68	6.16	6.03	5.35	8.07
MC14	3.16	5.85	0	1.49	1.25	3.77	3.27	6.17	2.05	3.48	6.24	4.04
MC16	2.75	4.89	1.49	0	0,79	0,71	1.88	6.16	4.48	2.41	4.82	3.7
MC19	2.02	5.64	1.25	0,79	0	0,56	2.21	5.24	0,91	2.3	5.16	3.12
MC18	1.86	5.34	3.77	0,71	0,56	0	1.59	4.71	0,85	1.79	4.54	3.03
MC15	2.31	4.75	3.27	1.88	2.21	1.59	0	3.25	1.96	1.27	2.99	3.39
MC9	2.31	3.68	6.17	6.16	5.24	4.71	3.25	0	5.23	4.15	1.83	6.26
MC17	1.12	6.16	2.05	4.48	0,91	0,85	1.96	5.23	0	1.56	4.76	2.27
MC10	1.27	6.03	3.48	2.41	2.3	1.79	1.27	4.15	1.56	0	3.39	2.16
MC11	4.57	5.35	6.24	4.82	5.16	4.54	2.99	1.83	4.76	3.39	0	5.17
MC1	1.16	8.07	4.04	3.7	3.12	3.03	3.39	6.26	2.27	2.16	5.17	0

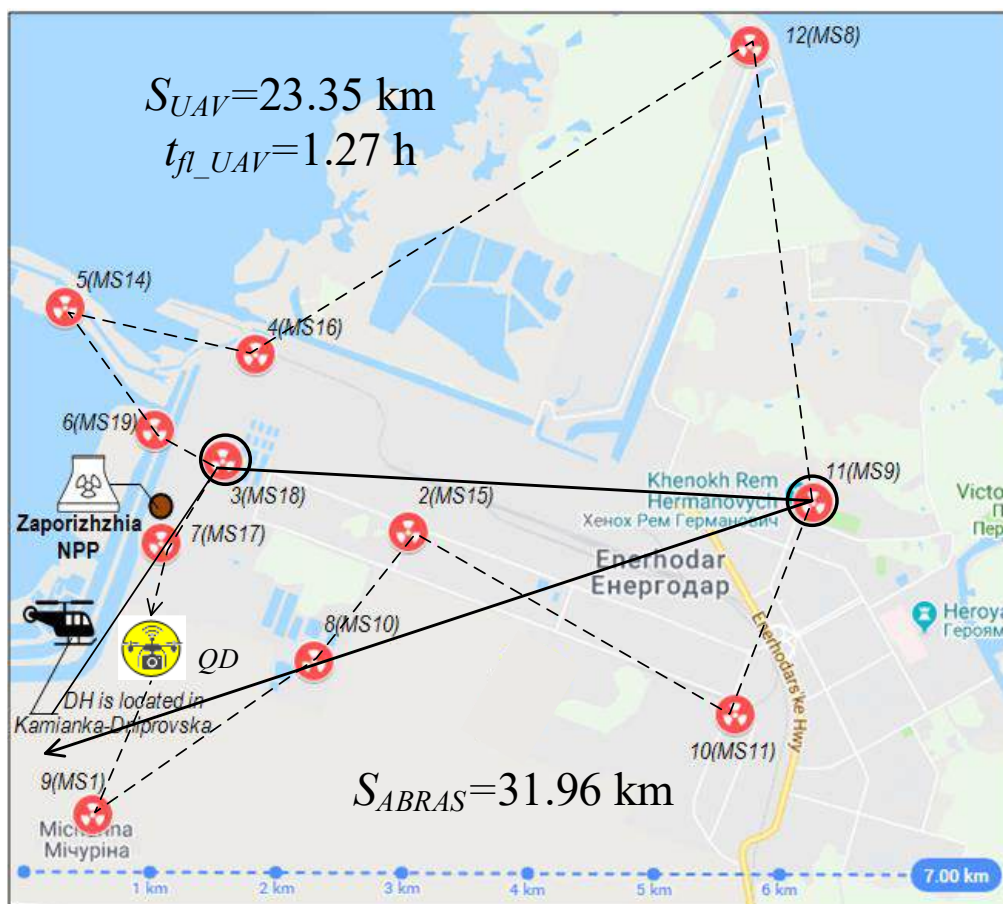


Рисунок 2.25 – Найкоротший можливий маршрут для БПЛА (який відвідує кожен МС тільки один раз) і маршрут АОЗС

Якщо розглядати маршрут через призму вимог, то необхідно розділити маршрут на частини, оскільки час польоту за маршрутом становить понад одну годину.

На першому етапі кількість вимірювальних пунктів розділилася на дві частини. Підхід до поділу цільової області показано на рисунку 2.26. Кути векторів від початку системи координат до точок розташування кожного об'єкта використовуються для нумерації об'єктів у порядку зростання значення кута. Початок системи координат розташовується так, щоб охоплювати всі об'єкти. Після цього кількість елементів ділиться на частини. Кількість об'єктів у кожній ділянці не має відрізнятись більш ніж на один.

Шляхом поділу виходять дві множини MS:

- перша множина містить шість MS (MS8, MS14, MS16, MS17, MS18, MS19);

- друга множина містить п'ять MS (MS1, MS9, MS10, MS15).

Маршрути польоту для двох БПЛА, кожен з яких відвідує кожен MS однієї з множин з, і маршрут для АОЗС показані на рисунку 2.24.

Найкоротший можливий маршрут для БПЛА, який відвідує кожен MS першого набору, наступний: DQ-MS18-MS16-MS8 (там знаходиться пункт заміни акумулятора)-MS14-MS19-MS17-DQ. Загальний час польоту за маршрутом становить 0,82 год.

Найкоротший можливий маршрут для БПЛА, що відвідує кожен MS другого набору, такий: DQ-MS1-MS10-MS15-MS11-MS9 (там же розташований пункт заміни акумулятора)-DQ. Загальний час польоту за маршрутом становить 0,65 год (рисунок 2.27).

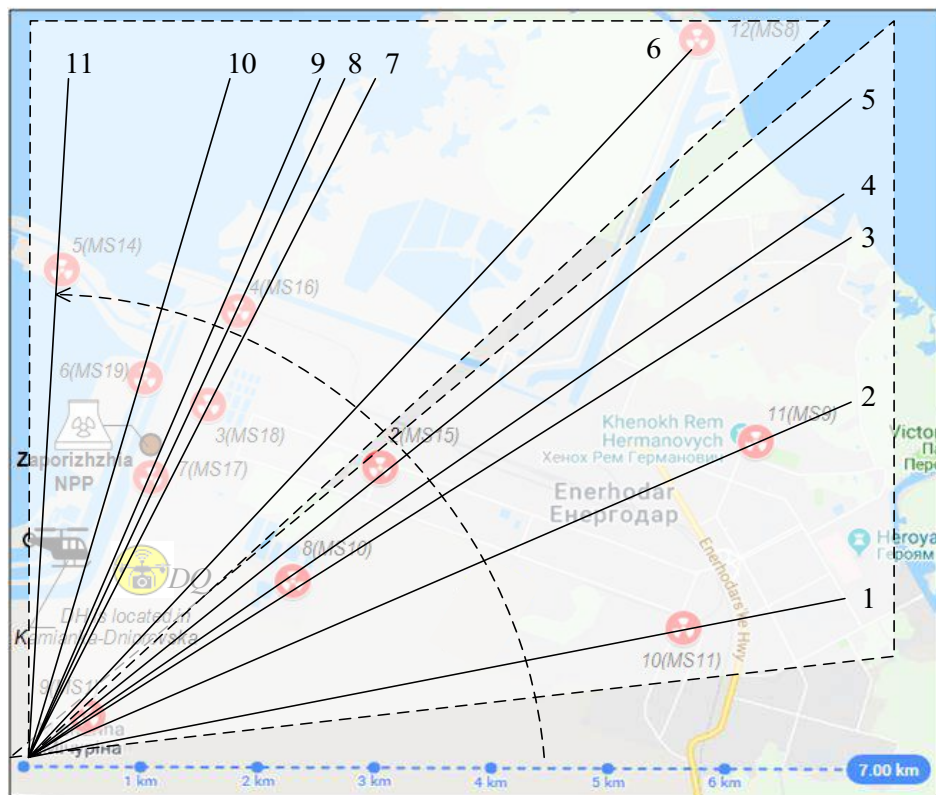


Рисунок 2.26 – Ілюстрація підходу до поділу цільової області

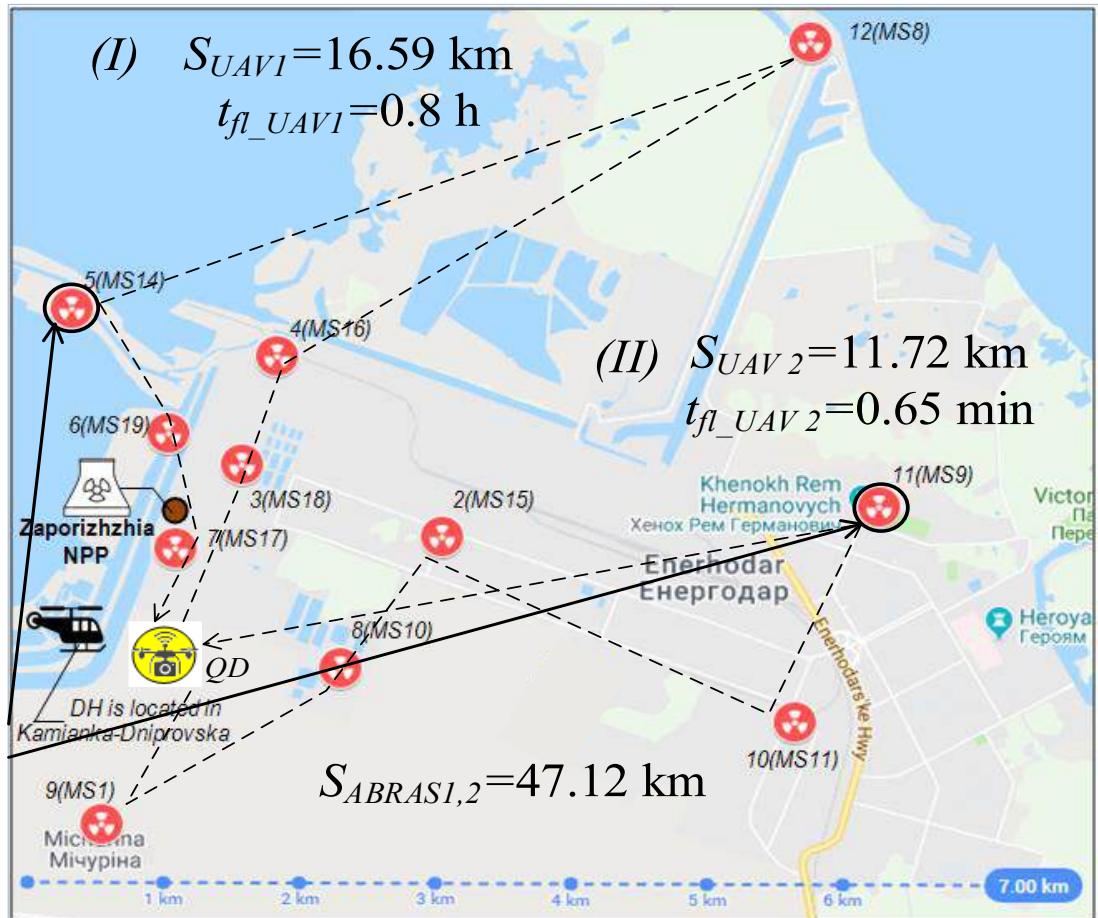


Рисунок 2.27 – Найкоротші можливі маршрути для БПЛА, які відвідують кожену МС однієї з множин та маршрут АОЗС

Таким чином, час отримання даних від MS після поділу цільової області становить менше однієї години і задовольняє вимогу, але для заміни батареї в цьому випадку необхідно два ABRAS. Загальний маршрут ABRAS1 і ABRAS2 становить 47,12 км.

Діаграма Ганта дії БПЛА і АОЗС представлена на рисунку 2.28. З аналізу діаграми Ганта, можна дійти висновку, що періоди, необхідні для заміни батарей БПЛА, перетинаються. Це вимагає використання двох АОЗС. Однак при цьому в другого БПЛА є запас часу для виконання обльоту з виконанням вимог, який дорівнює:

$$(\Delta T - t_{oper}) = 1 - 0.65 = 0.35 \text{ год.}$$

В такому випадку, якщо другий БПЛА злетить на 0,28 год пізніше, то часу на заміну батарей і часу польоту між точками заміни вистачить і при використанні однієї АОЗС.

Час виконання обльоту БПЛА2 буде менший ніж визначені обмеження, які становлять одну годину.

$$t_{w_UAV2} + t_{fl_UAV2} = 0.28 + 0.65 = 0.93 \text{ год.}$$

де t_{w_UAV2} - час очікування БПЛА2 перед зльотом;

t_{fl_UAV2} - час польоту за маршрутом БПЛА2.

Діаграму Ганта завдань для двох БПЛА і АОЗС зі зміною часу зльоту БПЛА2 представлено на рисунку 2.29.

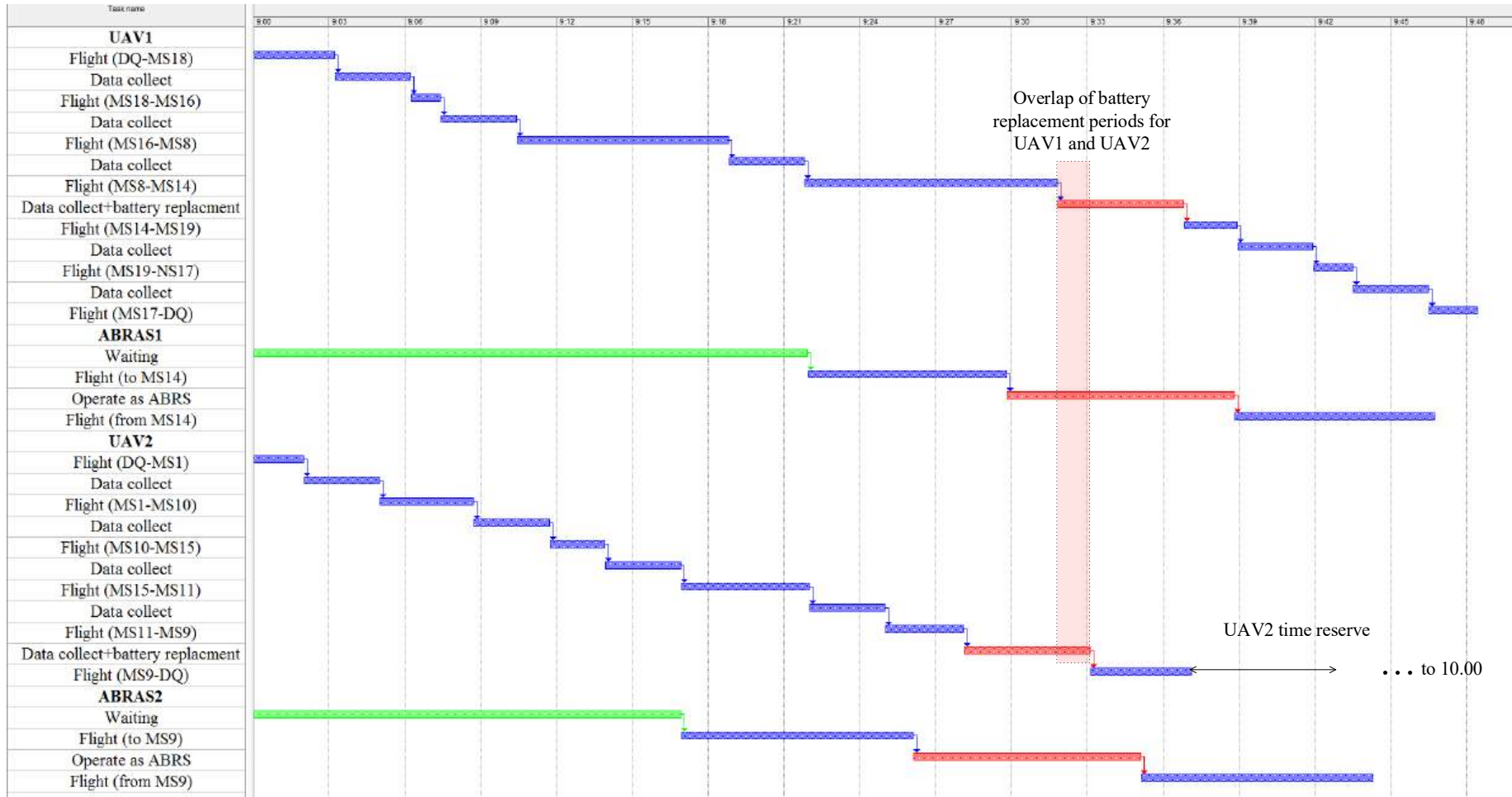


Рисунок 2.29 – Діаграма Ганта завдань для двох БПЛА, які відвідують кожен МС з двох визначених множин, і для АОЗС

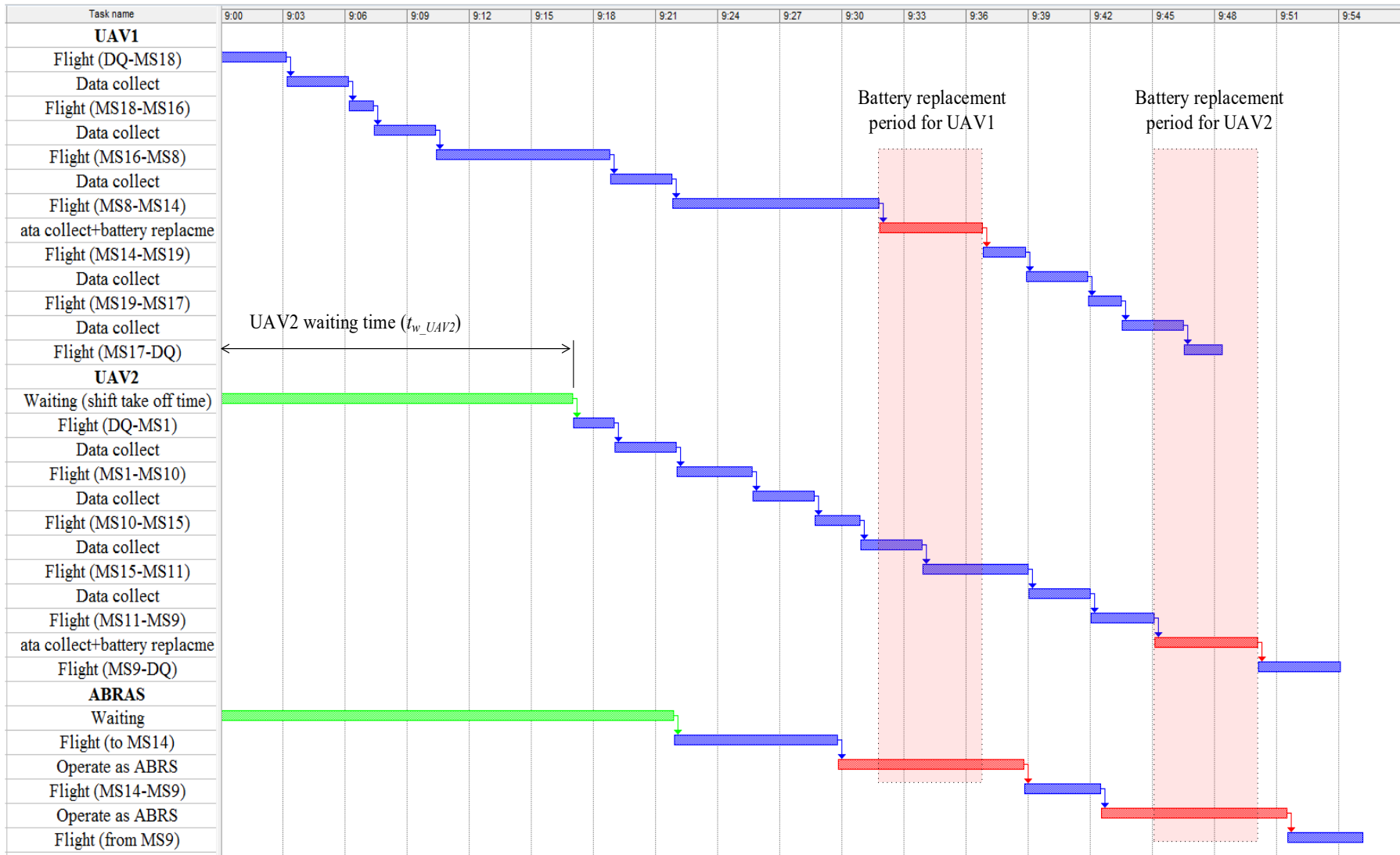


Рисунок 2.29 – Діаграма Ганта завдань для БПЛА і АОЗС зі зміною часу зльоту БПЛА2

Довжина маршруту польоту АОЗС у такому випадку становитиме всього 34,72 км замість 57,1 км у разі використання двох АОЗС (рисунок 2.30).

Таким чином, використання оптимізації дає змогу отримати збалансоване рішення з погляду ресурсомісткості обох складових системи моніторингу: БПЛА як транспортної підсистеми і АОЗС як підсистеми забезпечення.

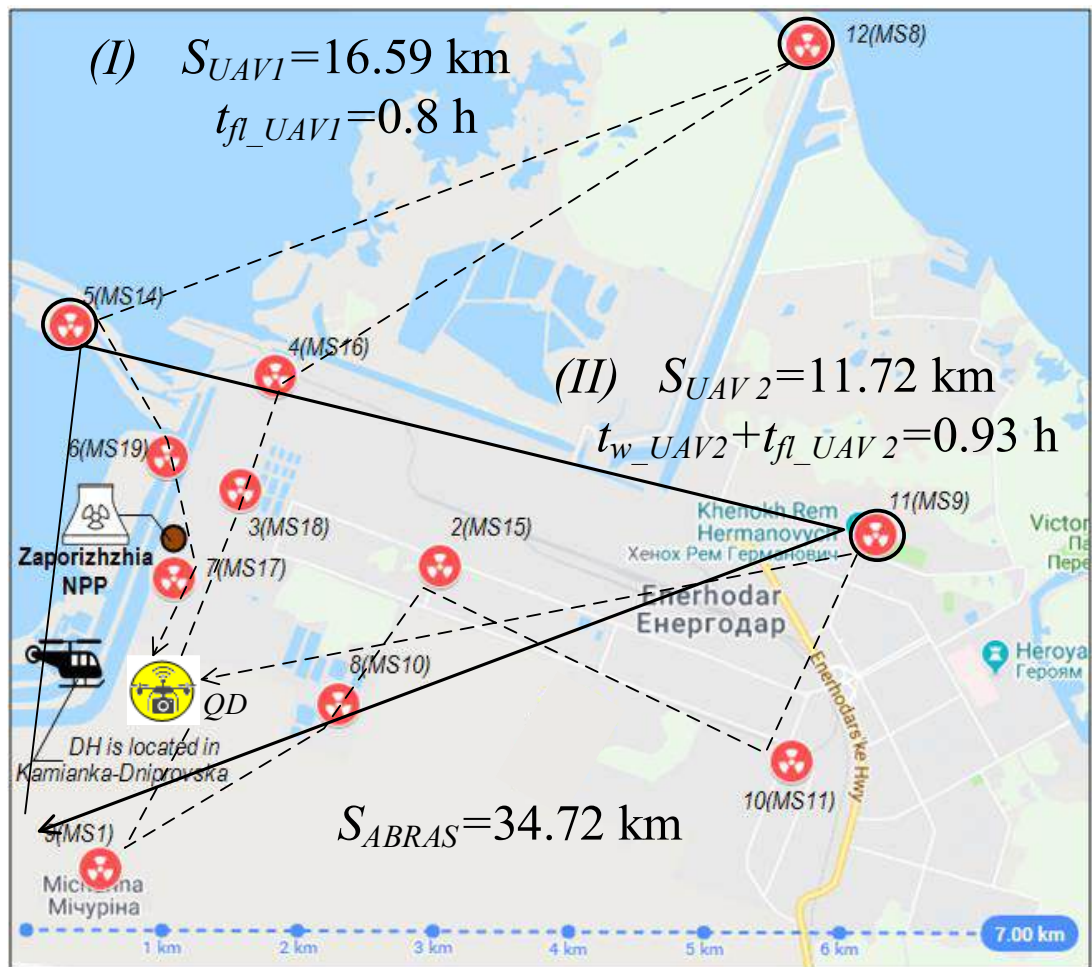


Рисунок 2.30 – Оптимальний результат використання БПЛА і АОЗС

2.5.3 Модель гетерогенної сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів для розгортання літаючої мережи

Для побудови функціонування гетерогенної СОМС для розгортання літаючої мережи використовувався наступний сценарій. Внаслідок аварії на АЕС пошкоджена провідна мережа, яка з'єднує вимірювальну станцію (MS) безпосередньо з кризовим центром (CrS) [7, 190].

Щоб продовжувати надавати CrS необхідні дані від MS, розгортається літаюча бездротова мережа (рисунок 2.31), що складається з n БПЛА мультироторного типу ($MUAV_{1R}, \dots, MUAV_{(n-1)R}, MUAV_{nRG1}$) та одного БПЛА літакового типу ($AUAV_{RG2}$). $MUAV_{1R}, \dots, MUAV_{(n-1)R}$ діють як повторювачі, $MUAV_{nRG1}$ діє як шлюз для отримання та зберігання даних від $MUAV_{(n-1)R}$ і, будучи точкою зустрічі (RP), як ретранслятор для пересилання даних до $AUAV_{RG2}$. Останній БПЛА, який спілкується з $MUAV_{nRG1}$ протягом призначеного часу його патрулювання, діє як шлюз для отримання та зберігання даних від $MUAV_{nRG1}$ і як ретранслятор для пересилання даних до CrS.

Для розгортання літаючої бездротової мережи використовуються такі бездротові технології:

- WiFi (IEEE 802.11) для зв'язку MS-UAV і UAV-UAV.
- мережа з низьким енергоспоживанням (LoRaWAN) для зв'язку UAVRG2-CrS.

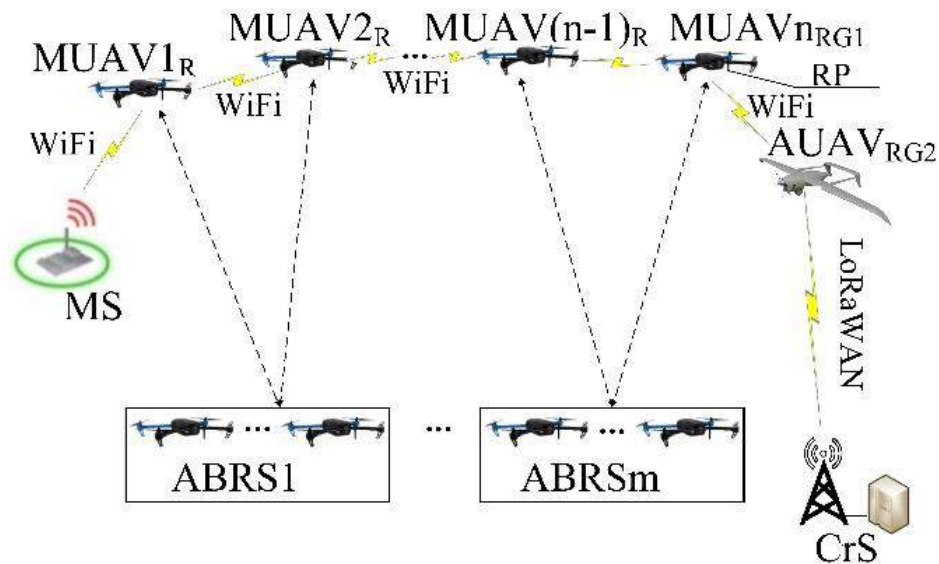


Рисунок 2.31 – Схема розгортання літаючої бездротової мережі з АОЗС для передачі даних від вимірювальної станції до кризового центру до CrS під час післяаварійного моніторингу АЕС

Таким чином, всередині ЛБМ є два сегменти:

- сегмент WiFi, що включає обладнання WiFi MS, бортове обладнання WiFi MUAV та бортове обладнання WiFi AUAV;
- сегмент LoRaWAN, що включає обладнання LoRaWAN БАПЛА та обладнання LoRaWAN CrS.

MUAV1R, ..., MUAV(n-1)R, MUAVnRG1 утворюють рій МБПЛА.

Для забезпечення постійного тривалого функціонування (без переривання процесів збирання та передавання даних) ЛБМ під час виконання місій післяаварійного моніторингу АЕС використовується АОЗС. Припускається, що можливості АОЗС дозволяють обслуговувати всі БПЛА одночасно. Тривалість роботи (час чергування) для рою МБПЛА можна визначити за таким виразом:

$$t_{on_duty} = E_{MUAV} - \frac{2 \max[S_{MUAV1R}; \dots; S_{MUAV(n-1)R}; S_{MUAVnRG1}]}{V_{MUAV}} - t_{WiFi_conf} \quad (2.9)$$

де E_{MUAV} - тривалість польоту МБПЛА;

$S_{MUAV1R}; \dots; S_{MUAV(n-1)R}; S_{MUAVnRG1}$ - відстань польоту $MUAV1R/$
 $\dots/MUAV(n-1)R/MUAVnRG1$ між точкою його розташування в сегменті WiFi та
 АОЗС;

V_{MUAV} - швидкість польоту МБПЛА;

t_{WiFi_conf} - час конфігурації мережі WiFi.

Для забезпечення безперебійної роботи ЛБМ пропонується використовувати графік чергування роїв МБПЛА. Кількість роїв МБПЛА (змін) для забезпечення безперебійної роботи UEWN можна визначити за формулою:

$$k = 1 + \frac{\frac{2S_{MUAV_way}}{V_{MUAV}} + t_{repl_bat} + t_{WiFi_conf}}{t_{on_duty}} \quad (2.10)$$

Загальне число МБПЛА в сегменті розгортання WiFi мережі розраховується по формулі:

$$n = \frac{D_{(MS-RP)}}{R_{WiFi}} \quad (2.11)$$

де $D_{(MS-RP)}$ - відстань між MS і точкою рандеву;

R_{WiFi} - радіус дії бортового обладнання WiFi, що розміщене на МБПЛА.

Розглянемо приклад розгортання літаючої бездротової мережі з АОЗС для передачі даних з MS14, що входить до складу АСУ ТП Запорізької атомної електростанції (ЗАЕС) (Україна), на кризовий центр (CrS), розташований на південній околиці м. Енергодар (рисунок 2.32).

Дев'ять МБПЛА: MUAV1R, ..., MUAV8R, MUAV9RG1, які оснащені обладнанням WiFi, та один БПЛА літакового типу – AUAVRG2; утворюють WiFi сегмент ЛБМ. Сегмент LoRaWAN ЛБМ утворюється за допомогою обладнання LoRaWAN, розміщеного на AUAVRG2 та кризовому центрі - CrS.

Час польоту кожного БПЛА становить 0,5 години. Радіус дії бортового обладнання WiFi БПЛА становить близько 0,12 км. Таким чином, сегмент WiFi мережі ЛБМ має довжину близько 1,8 км. Бортове обладнання LoRaWAN AUAV має радіус дії близько 5 км. Таким чином, сегмент LoRaWAN ЛБМ також має довжину близько 5 км.

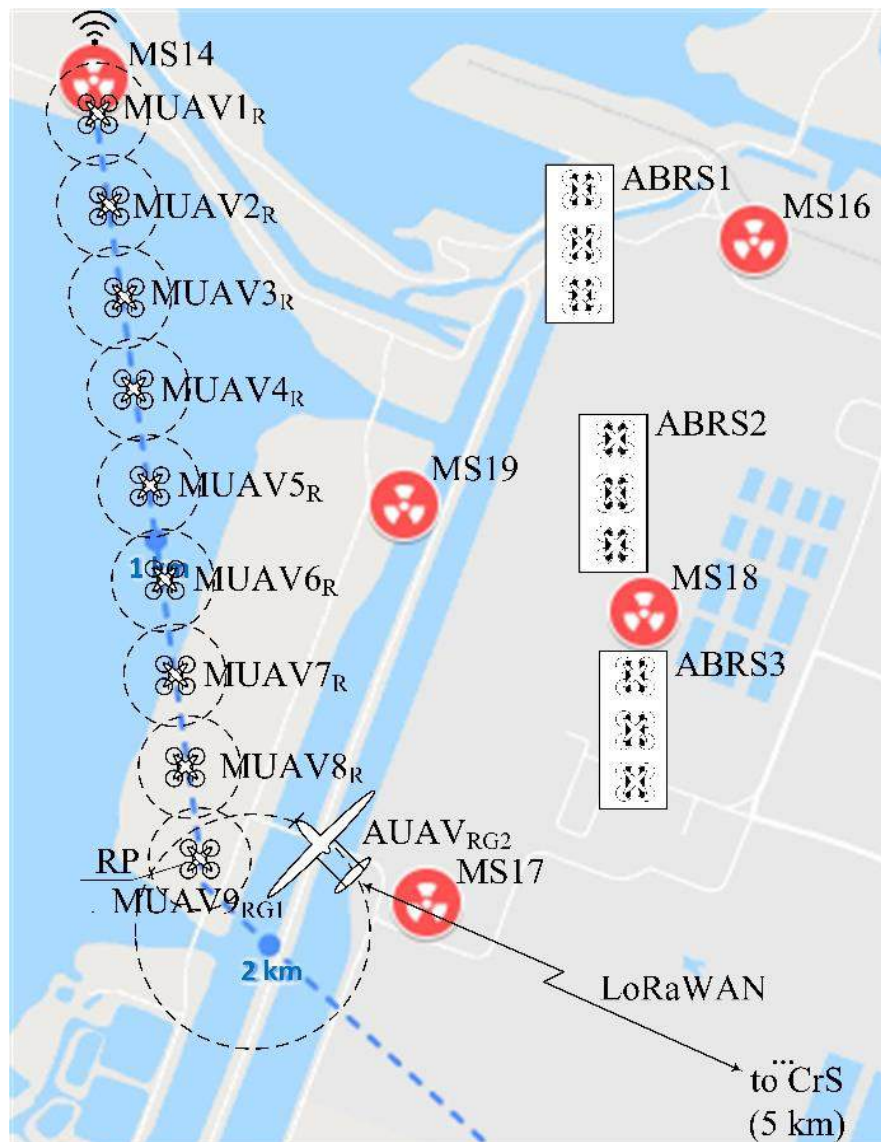


Рисунок 2.32 – Схема розгортання ЛБМ та АОЗС для передавання даних з MS14 до CrS у ході моніторингу

Для забезпечення безперервної роботи ЛБМ 2 рої МБПЛА (кожен з яких складається з 9 МБПЛА) працюють відповідно до змінного графіка. Розгорнуто 3 АОЗС, кожна з яких може обслуговувати 3 МБПЛА одночасно. Припустимо, що відстань польоту для кожного МБПЛА між його точкою розташування в сегменті WiFi і АОЗС становить близько 1 км ($S_{MUAV1R} = S_{MUAV2R} = \dots = S_{MUAV8R} = S_{MUAV9RG1} = S_{MUAV} = 1$ км).

У цьому випадку графік чергування роїв МБПЛА складається з наступних етапів (рисунок 2.33):

- переліт кожного МБПЛА рою з АОЗС до точки його розташування в сегменті WiFi (Fly_on);
- налаштування конфігурації мережі WiFi (WiFi_conf);
- прийом та передача даних (On_duty);
- переліт кожного МБПЛА флоту з точки його розташування в сегменті WiFi до АОЗС (Fly_out);
- заміна батареї (Repl_bat);
- очікування кожним роєм МБПЛА польоту до точки свого розташування в сегменті WiFi (Waiting).

Час очікування вильоту рою МБПЛА до точки свого місцезнаходження в сегменті WiFi розраховується за формулою:

$$t_{\text{wait}} = t_{\text{on_duty}} - \frac{2S_{\text{MUAV}}}{V_{\text{MUAV}}} - t_{\text{WiFi_conf}} - t_{\text{repl_bat}}. \quad (2.12)$$

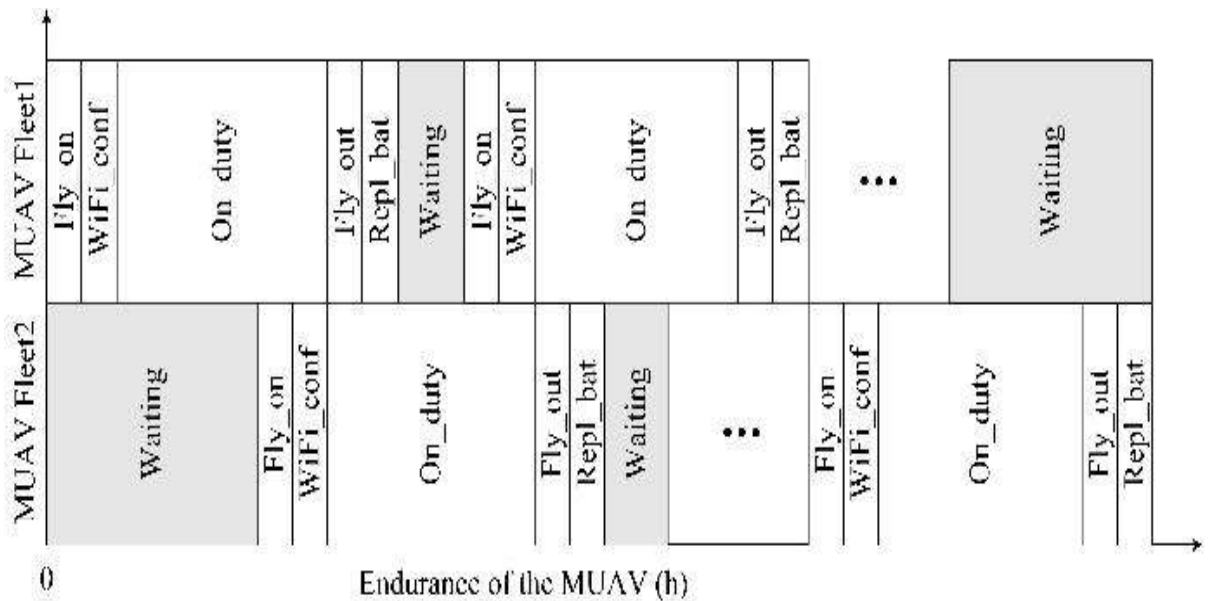


Рисунок 2.33 – Графік чергування двох роїв МБПЛА під час розгортання ЛБМ у ході післяаварійного моніторингу на ЗАСС

Оцінимо, як відстань польоту МПЛА між точкою його розташування в сегменті WiFi та АБРС впливають на:

- час чергування рою МБПЛА;
- час очікування вильоту рою МБПЛА до точки свого місцезнаходження в сегменті WiFi;

- кількість роїв МБПЛА для забезпечення безперервної роботи ЛБМ. Результати дослідження представлені на рисунку 2.34 - рисунку 2.36 і отримані для таких вихідних даних: $t_{\text{MUAV}} = 0,5$ год, $v_{\text{MUAV}} = 40$ км/год, $t_{\text{repl_bat}} = 0,017$ год, $t_{\text{WiFi_conf}} = 0,017$ год).

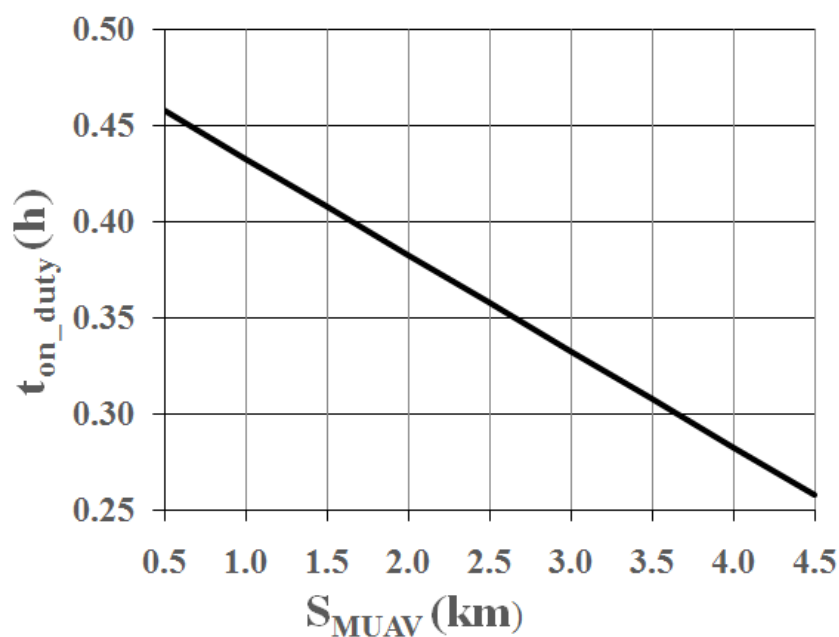


Рисунок 2.34 – Залежність часу чергування рою МБПЛА від відстані польоту БПЛА між точкою його місцезнаходження в сегменті WiFi та АОЗС.

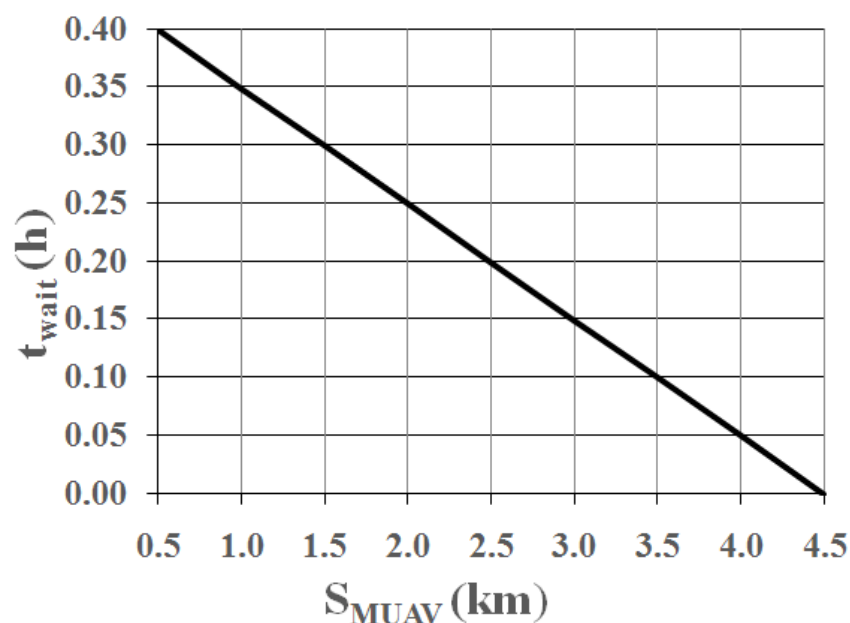


Рисунок 2.35 – Залежність часу очікування польоту МБПЛА до точки його розташування у сегменті WiFi від відстані польоту МБПЛА між точкою його розташування у сегменті WiFi та АОЗС

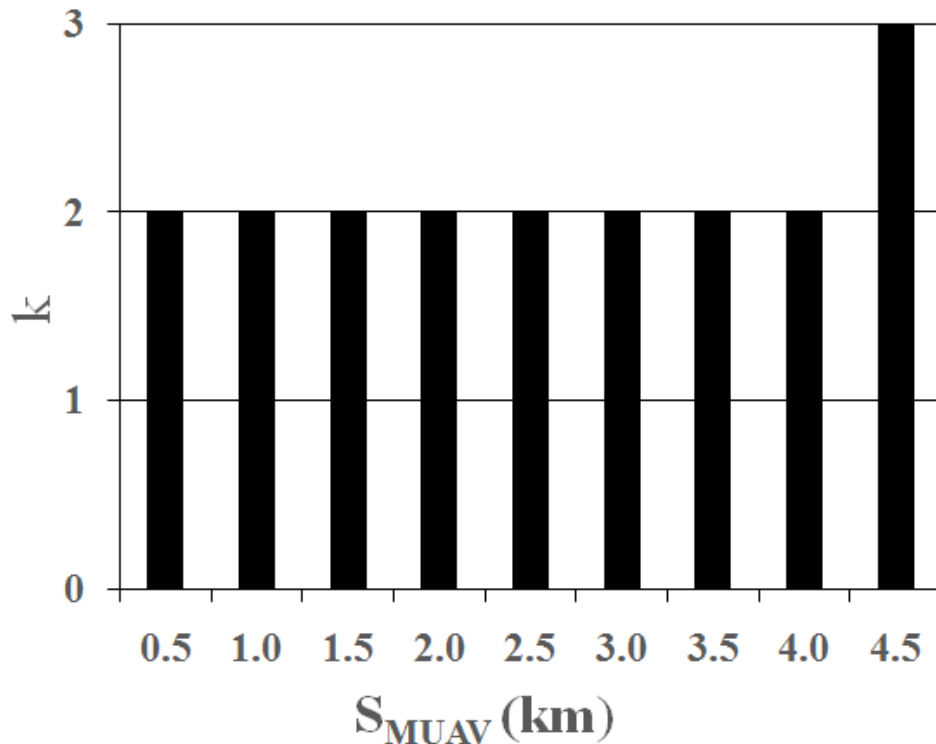


Рисунок 2.36 – Діаграма залежності відстані польоту МБПЛА між точкою його розташування в сегменті WiFi і АОЗС і кількості роїв МБПЛА, що забезпечують безперервну роботу ЛБМ

Якщо на АОЗС батареї БПЛА не замінювати, а заряджати з'являються розриви у функціонуванні бездротової мережі, які обумовлені тим, що $t_{charge_bat} \gg t_{repl_bat}$ і у такому випадку батареї МБПЛА одного рою не встигають заряджатися та прибути на місце в мережі на момент часу коли час чергування МБПЛА (On_duty) другого рою вичерпано (рисунок 2.37).

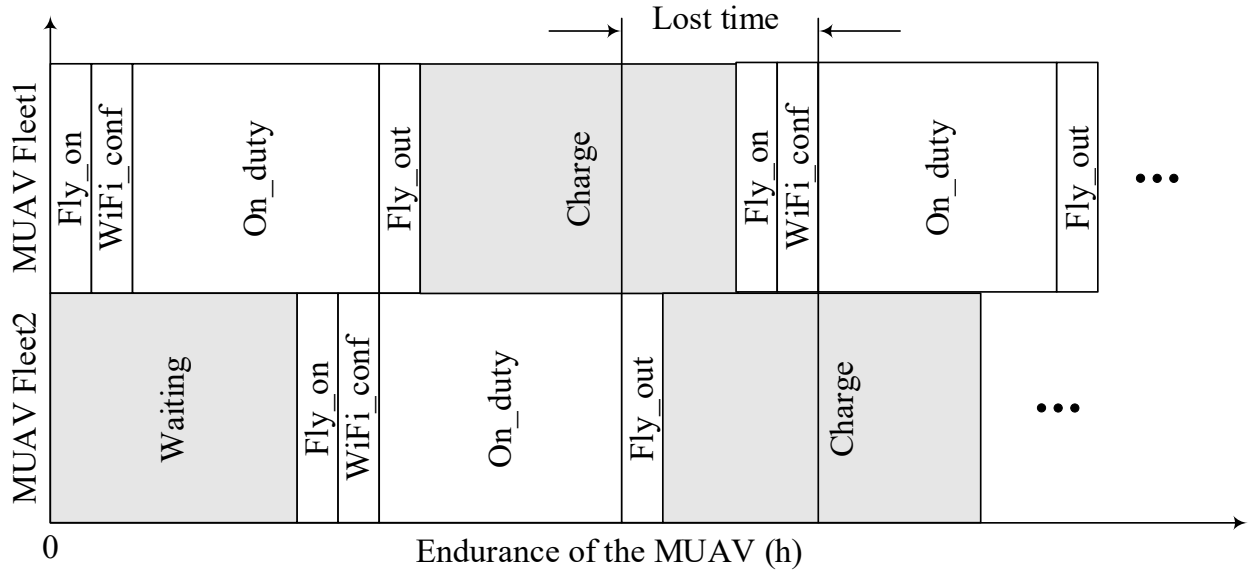


Рисунок 2.37– Графік функціонування для 2 роїв БПЛА, при здійсненні заряджання бортових батарей замість їх заміни

За таких умов чисельність роїв (змін) МБПЛА для забезпечення безперервної роботи ЛБМ потребує збільшення. Графік чергування для збільшеної чисельності роїв МБПЛА при заряджанні МБПЛА (Charge) замість заміни (Rep1_bat) показаний на рисунку 2.38.

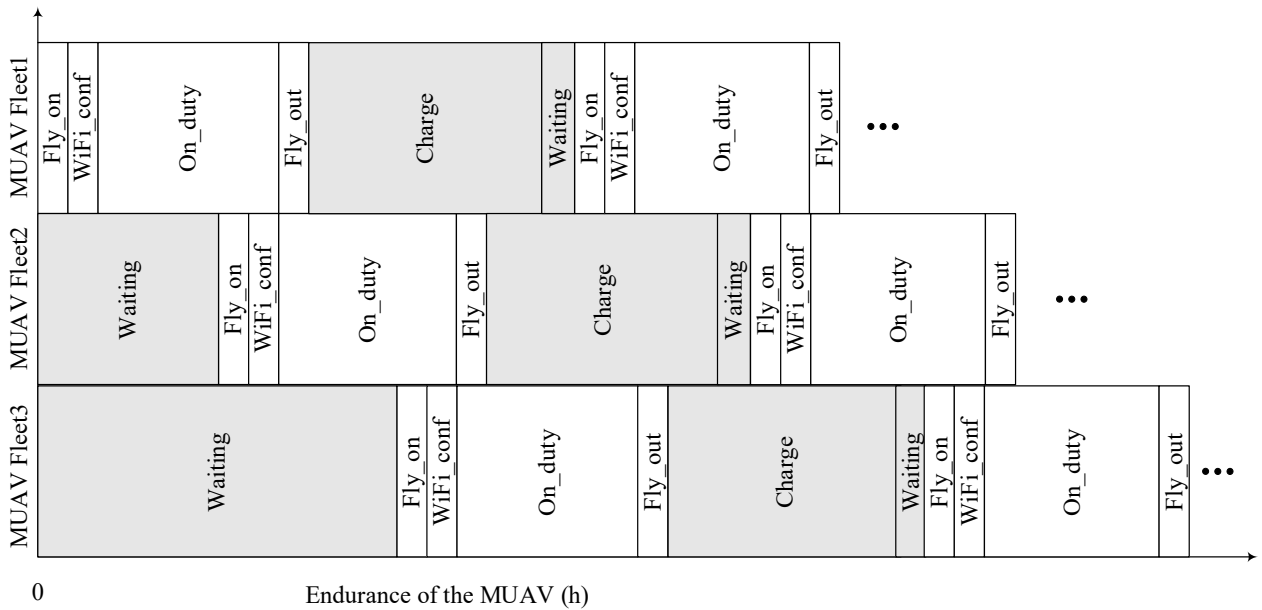


Рисунок 2.38 – Графік чергувань 3-х роїв БПЛА, що забезпечують безперервну роботу ЛБМ під час виконання місій моніторингу

В таких умовах АОЗС може бути розглядається як багатоканальна система масового обслуговування (СМО), яка забезпечує безперервне функціонування БЛМ, розгорнута на основі роїв МБПЛА.

Для прикладу, що розглядається, функціонування АОЗС можна представити у вигляді СМО з 6-ма каналами обслуговування.

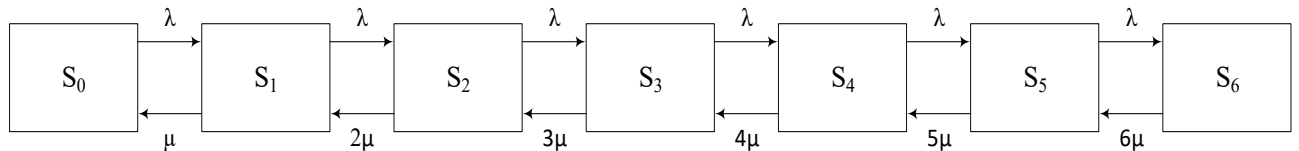


Рисунок 2.39 – Модель роботи АОЗС у вигляді 6-канальної системи масового обслуговування (λ - інтенсивність потоку МБПЛА, яким необхідно зарядити батарею; μ - інтенсивність обслуговування МБПЛА, які потребують заряджання акумуляторних батарей)

Інтенсивність потоку МБПЛА, яким необхідно зарядити батарею, визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{z}{t_{\text{on_duty}} - \frac{2S_{\text{MUAV_way}}}{V_{\text{MUAV}}} - t_{\text{WiFi_conf}}}, \quad (2.13)$$

де z - кількість БПЛА, які обслуговуються (заряджаються) на АОЗС. В даному випадку $z=6$.

Інтенсивність обслуговування МБПЛА, які потребують заряджання батарей, визначається за формулою:

$$\mu = \frac{z}{t_{\text{charge_bat}}}, \quad (2.14)$$

Коефіцієнт зайнятості каналів визначається як:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (2.15)$$

Імовірність того, що всі канали обслуговування АОЗС вільні, визначається за формулою:

$$P_0 = \left(\sum_{n=0}^n \frac{\rho^n}{n!} \right)^{-1}, \quad (2.16)$$

n – кількість каналів обслуговування АОЗС.

Імовірність того, що всі канали АОЗС зайняті, дорівнює:

$$P_n = \frac{\rho^n}{n!} P_0. \quad (2.17)$$

Середня кількість зайнятих каналів обслуговування АОЗС:

$$n_b = \rho(1 - P_n). \quad (2.18)$$

Коефіцієнт завантаження каналів АОЗС:

$$k_b = \frac{\rho}{n}(1 - P_n). \quad (2.19)$$

Результати дослідження залежності середньої кількості зайнятих каналів обслуговування АОЗС від часу заряджання акумуляторної батареї МБПЛА, відстані польоту МБПЛА між його точкою розташування в сегменті WiFi та АОЗС представлені на рисунку 2.40 та рисунку 2.41 відповідно. При

розрахунках використовувались наступні вихідні дані: $E_{\text{MUAV}} = 0,5$ год,
 $v_{\text{MUAV}} = 40$ км/год, $t_{\text{WiFi_conf}} = 0,017$ год.

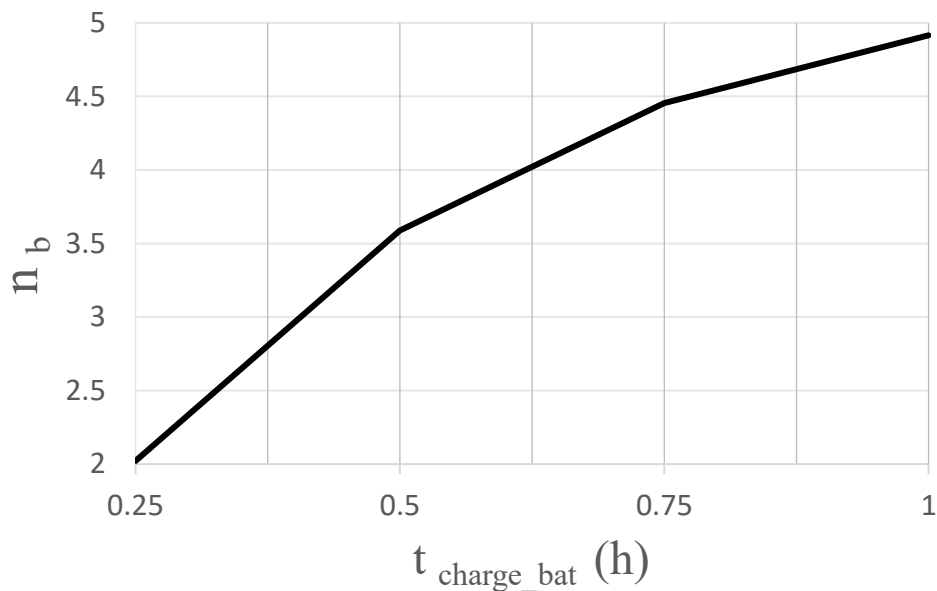


Рисунок 2.40 – Залежність середньої кількості зайнятих каналів обслуговування АОЗС від часу заряджання акумуляторної батареї БПЛА

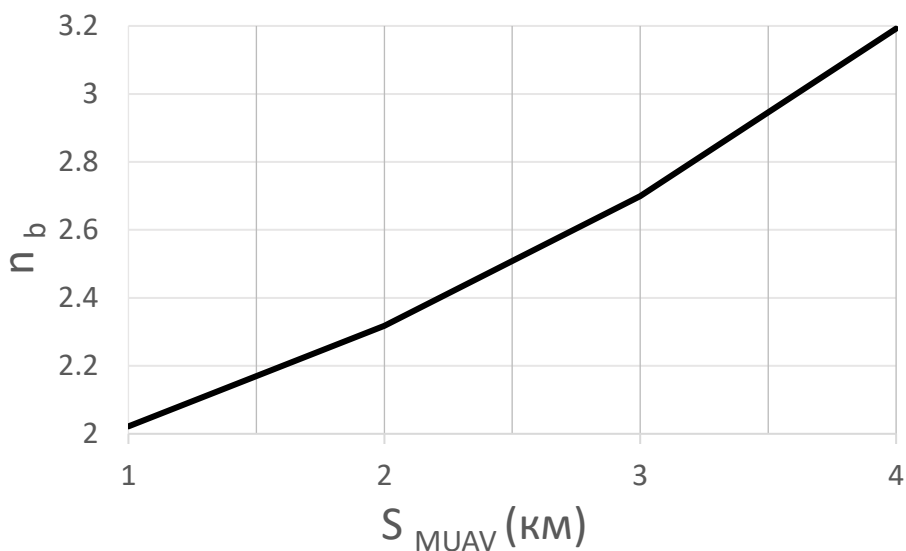


Рисунок 2.41 – Залежність середньої кількості зайнятих каналів обслуговування АОЗС від дальності польоту БПЛА між точкою його розташування в сегменті WiFi та АОЗС

На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки:

- скорочення часу заряду кожного БПЛА АОЗС з 1 до 0,25 години; зменшення кількості каналів зайнятості АОЗС на 40% (2 канали замість 5 каналів);
- збільшення дальності польоту БПЛА між точкою його розташування в сегменті WiFi та АОЗС з 1 до 4 км збільшення кількості каналів зайнятості АОЗС в 1,6 рази (3,2 каналу замість 2 каналів);
- зростання дальності польоту БПЛА між точкою його місцезнаходження в сегменті WiFi та АОЗС з 0,5 до 4,5 км призводить до відсоткового зменшення часу чергування груп БПЛА на 43,5 % (0,26 год замість 0,46 год);
- час очікування вильоту БПЛА до точки його розташування у сегменті WiFi дорівнює нулю при відстані польоту БПЛА між точкою його розташування у сегменті WiFi та АОЗС 4,5 км;
- якщо відстань польоту БПЛА між точкою його місцезнаходження в сегменті WiFi та АОЗС перевищує 4,5 км, то для забезпечення безперервної роботи ЛМБ необхідно використовувати більше 2 груп БПЛА.

2.5.4 Модель сервіс-орієнтованої мобільної системи на основі безпілотних літальних апаратів для моніторингу фізичної безпеки

В рекомендаціях з організації фізичного захисту об'єктів атомної енергетики закладено необхідність реалізації концепції безперервного захисту за рахунок створення суцільного поля спостереження за зоною обмеженого доступу, або периметру захищеної зони [191].

Кількість БПЛА, яка необхідна для цього визначається з урахуванням розмірів зони перегляду камери БПЛА, яка залежить від характеристик оптичного навантаження та вимог до розрізнявальної здатності (рисунок 2.38).

Якщо розглядати застосування БПЛА як додатковий елемент системи фізичного захисту, то такий підхід є дуже витратним, крім того використання БПЛА як основної системи може бути неможливим в умовах природних явищ, що унеможливають здійснення польотів, наприклад при швидкості вітру більше ніж 10-15 м/с, або в умовах, що приводять до обледеніння елементів конструкції БПЛА.

В основу побудови системи фізичного захисту покладено три складові [191]:

- виявлення;
- затримка;
- реагування.

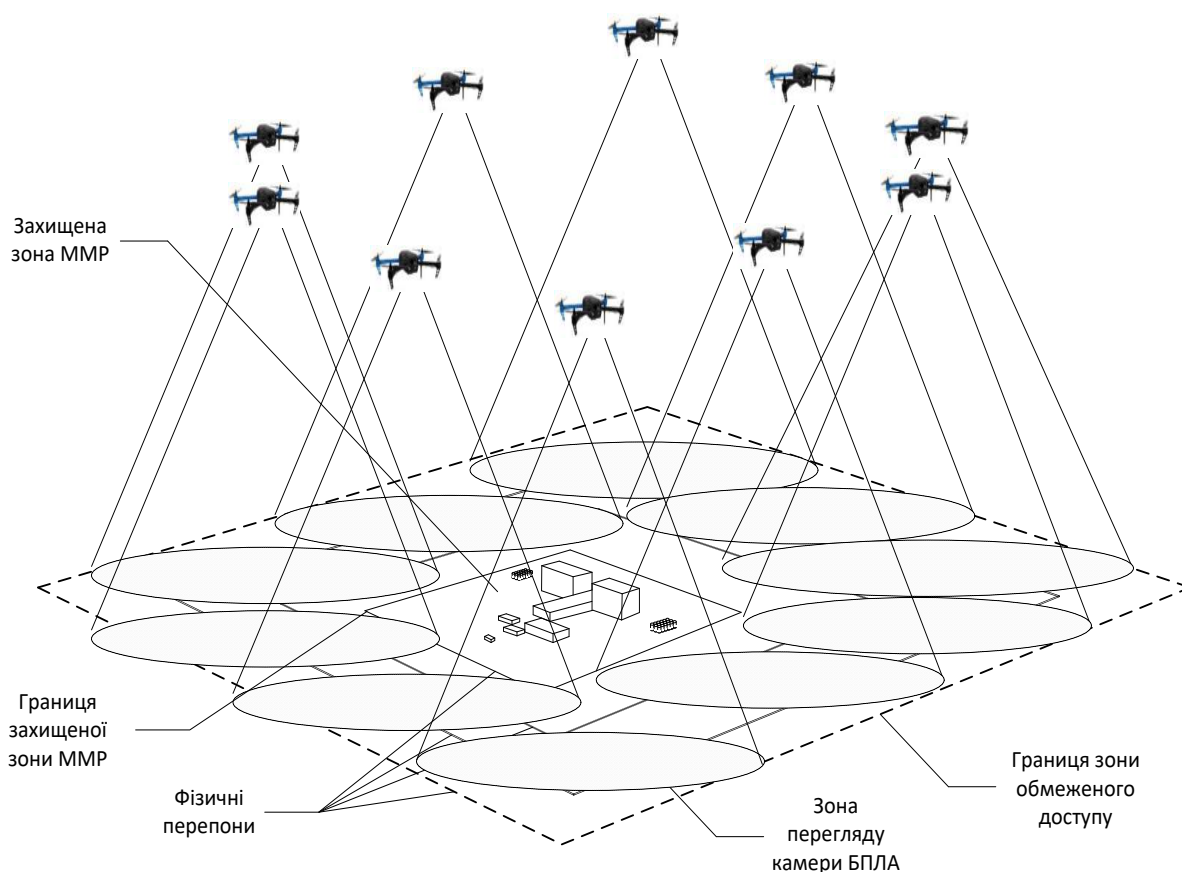


Рисунок 2.42 – Модель повного покриття зони обмеженого доступу засобами моніторингу БПЛА

При цьому затримка використовується також для підвищення імовірності виявлення, тому при розробці комплексу заходів з фізичного захисту навколо захисної зони ММР розміщують декілька перепон різного типу, наприклад:

- сітка «рабиця», як перший (зовнішній) рівень;
- огорожа з колючого дроту, як другий рівень;
- малозамітна перепона, як третій рівень;
- бетонний паркан, як останній (внутрішній) рівень;

Комплекс перепон характеризується стійкістю до проникнення T_d , яка визначається сумарним часом, необхідним для їх додання:

$$T_d = \sum_{i=1}^{n_0} t_{o_c_i}, \quad (2.20)$$

де $t_{o_c_i}$ - середній час додання i -ї перепони;

n_0 – кількість перепон.

Для забезпечення умов виявлення порушника необхідно здійснювати моніторинг периметру з інтервалом T_m меншим ніж стійкість комплексу перепон, тобто має виконуватись умова:

$$\frac{T_d}{T_m} > 1. \quad (2.21)$$

Інтервал моніторингу залежить від розмірів периметру захищеної зони об'єкта, кількості та льотно-технічних характеристик БПЛА, які рухаються по маршруту (вважається, що БПЛА розташовані по всьому маршруту рівномірно), і визначається за формулою:

$$T_m = \frac{P_z}{m_{UAV} V_{UAV}}, \quad (2.22)$$

де P_z - периметр захищеної зони;

V_{UAV} - швидкість БПЛА;

m_{UAV} – кількість БПЛА на маршруті.

Таким чином, для забезпечення умов виявлення порушника (2.21) необхідно щоб кількість БПЛА, що знаходяться на маршруті, відповідала умові:

$$m_{UAV} > \frac{P_z}{T_d V_{UAV}}. \quad (2.23)$$

Зазвичай тривалість виконання завдань моніторингу є значно більшою, ніж максимальна тривалість польоту БПЛА, тому виникає необхідність у періодичній заміні, або заряджанні бортових джерел живлення БПЛА. Для забезпечення безперервності процесу моніторингу у такому випадку необхідно використання додаткових БПЛА, які будуть продовжувати виконувати завдання замість БПЛА, які обслуговуються. Функціонування БПЛА при виконанні завдань з фізичного захисту за такою схемою представлено на рисунку 2.43.

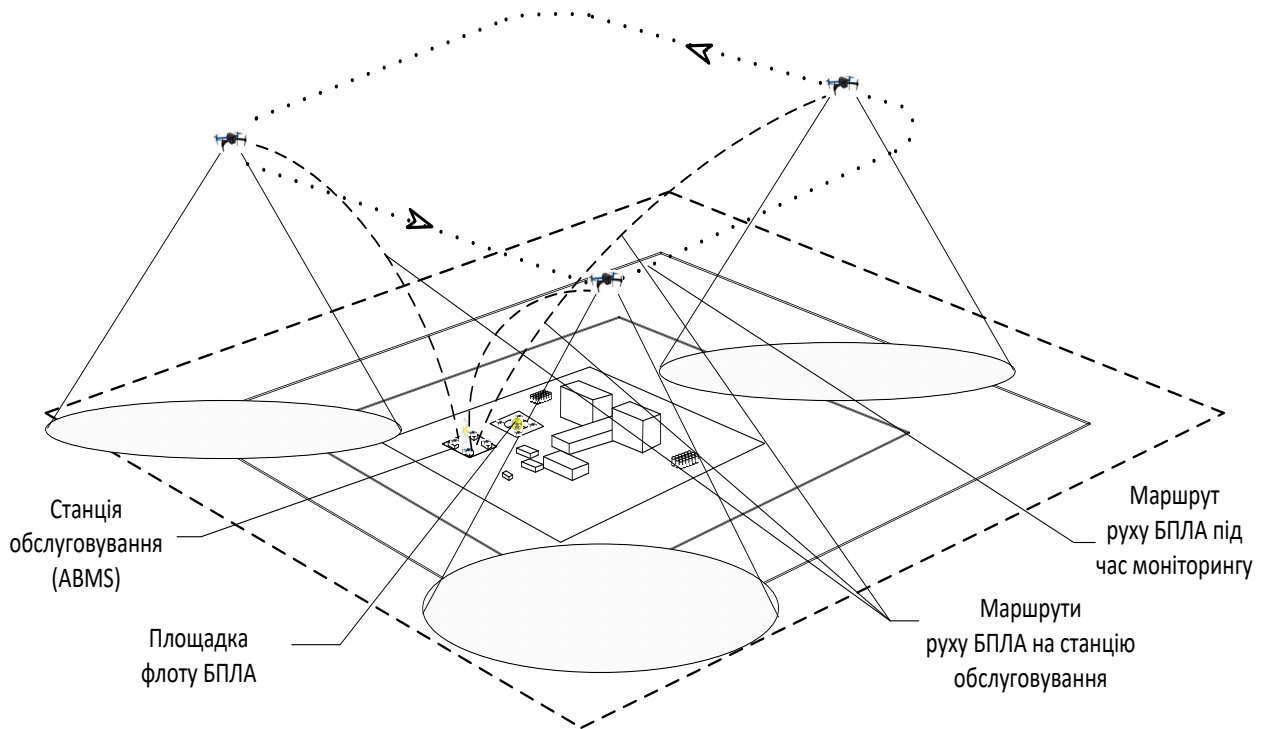


Рисунок 2.43– Модель періодичного моніторингу зони обмеженого доступу засобами БПЛА

Зазвичай в складі системи моніторингу використовуються група БПЛА, з однаковими характеристиками, тому потребувати обслуговування вони будуть всі одночасно, і необхідно залучати додаткову групу такої ж чисельності.

Час виконання завдання з моніторингу одним БПЛА визначається за формулою:

$$t_{\text{mon}} = E_{\text{UAV}} - \frac{2S_{\text{UAV}}}{V_{\text{UAV}}} - t_{\text{conf}}, \quad (2.24)$$

де E_{UAV} - середній час польоту БПЛА;

S_{UAV} - відстань яку долає БПЛА від точки на маршруті до станції обслуговування (вважається, що всі точки маршруту рівновіддалені від станції);

t_{conf} - час необхідний для підключення БПЛА після обслуговування до системи моніторингу.

Чисельність роїв БПЛА, яка необхідна для виконання завдань з фізичної безпеки у складі СОМС визначається за формулою:

$$k_{\text{UAV_swarm}} = \left\lceil 1 + \frac{\frac{2S_{\text{UAV}}}{V_{\text{UAV}}} + t_{\text{conf}} + t_{\text{repl_bat}}}{t_{\text{mon}}} \right\rceil, \quad (2.25)$$

де $t_{\text{repl_bat}}$ - час необхідний для заміни бортового джерела живлення БПЛА.

Загальна кількість БПЛА, що має залучатися до холону виконання завдань фізичного захисту в складі СОМС визначається за формулою:

$$m_{\Sigma} = k_{\text{UAV_swarm}} \cdot m_{\text{UAV}}. \quad (2.65)$$

Значення $k > 1$ вказує на необхідність створення в складі СОМС холону забезпечення. Тип станції визначається при виконанні SPARLQL запит до онтології, а кількість АОРС залежить від кількості каналів обслуговування БПЛА та визначається як:

$$m_{\text{ABRAS}} = \left\lceil \frac{m_{\text{UAV}}}{n_{\text{ch}}} \right\rceil, \quad (2.27)$$

де n_{ch} - кількість каналів обслуговування БПЛА на одній станції обраного типу.

2.5.5 Модель сервіс-орієнтованої мобільної системи на основі безпілотних літальних апаратів для збирання даних у визначені часові інтервали

Для випадка здійснення збору та передачі даних з однієї вимірювальної станції, який розглянуто в пп. 2.5.4, достатньо використання лише одного БПЛА літакового типу, який забезпечує функціонування бездротового шлюзу та передачу даних до кризового центру.

Розглянемо випадок, коли дротові лінії зв'язку пошкоджено на чотирьох вимірювальних станціях (рисунок 2.44) [192].

Від кожної вимірювальної станції, з якою порушена лінія зв'язку, розгортається літаюча бездротова мережа (ЛБМ) WiFi з МБПЛА. Передачу накопичених за час функціонування кожної бездротової мережі з МБПЛА (MUAV) забезпечує БПЛА літакового типу (AUAV).

Час початку та закінчення функціонування кожної бездротової мережі залежить від:

- початку розгортання мережі;
- ємності акумуляторів БПЛА;
- віддалення автоматичних зарядно-замінних станцій, які здійснюють заміну акумуляторів на МБПЛА, від місця МБПЛА в мережі, що розгортається.

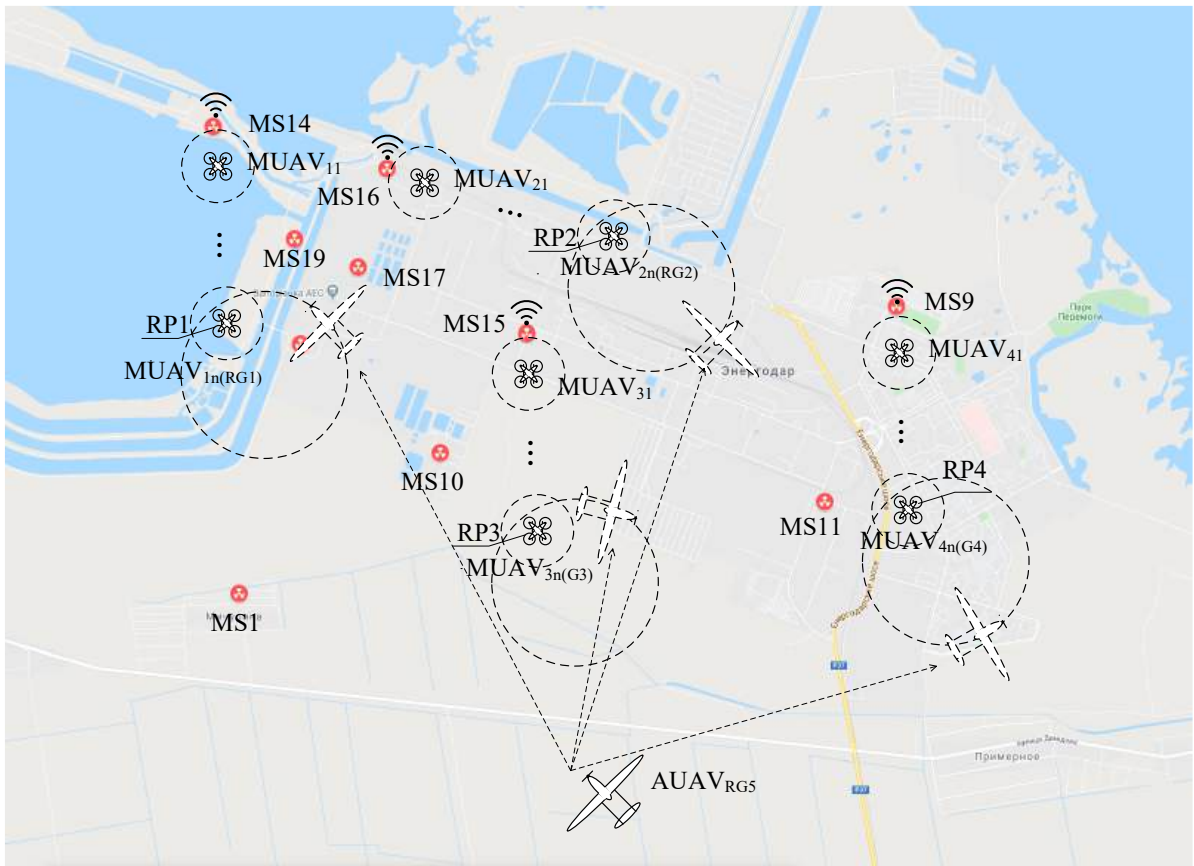


Рисунок 2.44 – Система збору та передачі даних від чотирьох вимірювальних станції

Наприкінці функціонування кожної бездротової мережі необхідно передавати накопичені дані на БПЛА літакового типу для подальшої передачі до кризового центру. Час передачі даних описується визначається інтервалом $(t_i^s; t_i^e)$, де t_i^s - час початку функціонування шлюзу в i -й точці рандеву, t_i^e - час закінчення функціонування шлюзу в i -й точці рандеву. Під час функціонування системи, що розглядається можуть виникати випадки коли ці інтервали пересікаються, тобто виконується умова:

$$(t_i^s; t_i^e) \cap (t_j^s; t_j^e) \neq \emptyset; i, j \in (\overline{1, n}); i \neq j. \quad (2.28)$$

За таких умов одного БПЛА літакового типу для забезпечення отримання та передачі даних недостатньо.

Для визначення кількості БПЛА літакового типу, необхідних для отримання даних в точках “рандеву” з чотирма бездротовими безпілотними мережами, пропонується використовувати класичну задачу розфарбування графа.

Існує велика кількість евристичних алгоритмів розфарбування графа (таблиця 2.9) [193-200]. Велику практичну цінність на даний момент представляють наступні:

- жадібний алгоритм розфарбування (Greedy-Colour);
- розфарбування з обміном кольорами (Colour-with-Interchange);
- послідовне розфарбування графа без упорядкування його вершин (Random- Sequential-Colour);
- послідовне розфарбування графа з упорядкуванням його вершин по спадаючій їх ступенів (Largest-First-Colour);
- послідовне розфарбування графа починаючи з вершин максимальних ступенів (Smallest-Last-Colour);
- розфарбування з обміном кольорами без упорядкування вершин графа (Random-Sequential-Interchange-Colour);
- розфарбування з обміном кольорами з упорядкуванням вершин графа по спадаючій їх ступенів (Largest-First-Interchange-Colour);
- розфарбування з обміном кольорами починаючи з вершин максимальних ступенів графа (Smallest-Last-Interchange -Colour);
- жадібне розфарбування графа, де його вершини упорядковуються таким чином, що у кожної є принаймні одна сусідня, пофарбована в попередній колір (Connected-Sequential-Colour);
- послідовне розфарбування з динамічним упорядкуванням вершин графа (Saturation-Colour);
- жадібне розфарбування незалежних підмножин (Greedy Independent Sets-Colour). Необхідно відзначити, що всі ці алгоритми являють собою послідовність простих алгоритмічних дій, умовних переходів і циклів без використання будь-яких бітових або математичних операцій.

Таблиця 2.9 – Посилання та методи розфарбування графів, що в них розглядаються

Посилання	Методи розфарбування графів,що розглядаються
[193]	жадібний алгоритм розфарбування (Greedy-Colour)
[194]	розфарбування з обміном кольорами (Colour-with-Interchange)
	послідовне розфарбування графа без упорядкування його вершин (Random- Sequential-Colour)
	розмальовка з обміном квітами з упорядкуванням вершин графа за спаданням їх ступенів (Largest-First-Interchange-Colour)
[195]	послідовне розфарбування з динамічним упорядкуванням вершин графа (Saturation-Colour)
[196]	послідовне розфарбування графа з упорядкуванням його вершин зі спадання їх ступенів (Largest-First-Colour)
[197]	послідовне розфарбування графа починаючи з вершин максимальних ступенів (Smallest-Last-Colour)
[198]	розфарбування з обміном квітами без упорядкування вершин графа (Random-Sequential-Interchange-Colour)
[199]	розфарбування з обміном квітами починаючи з вершин максимальних ступенів графа (Smallest-Last-Interchange-Colour)
[200]	жадібне розфарбування графа, де його вершини впорядковуються таким чином, що кожна має принаймні одну сусідню, пофарбовану в попередній колір (Connected-Sequential-Colour)

Для розв'язання задачі, що розглядається, пропонується алгоритм розфарбування графа, побудований на бітових операціях над матрицею суміжності [201].

Вихідні дані для розрахунків. Для передачі даних на БПЛА літакового типу з кожної бездротової мережі необхідно 4 хвилини. Часові інтервали передачі даних що отримані від контрольно вимірювальних постів складають:

- для бездротової мережі, що збирає інформацію з контрольно-вимірювального поста №14 (точка “рандеву” №1) – (00.10; 00.14);

- для бездротової мережі, що збирає інформацію з контрольно-вимірювального поста №15 (точка “рандеву” №3) – (00.14; 00.19);

- для бездротової мережі, що збирає інформацію з контрольно-вимірювального поста №16 (точка “рандеву” №1) – (00.12; 00.17);

- для бездротової мережі, що збирає інформацію з контрольно-вимірювального поста №6 (точка “рандеву” №4) – (00.08; 00.13).

У якості допущень приймається, що час, необхідний на переміщення БПЛА літакового типу між точками “рандеву” не враховується (вважається, що відстані між точками “рандеву” та швидкість БПЛА літакового типу дозволяють забезпечувати своєчасне прибуття в потрібну точку та отримати дані).

На першому кроці будується неорієнтований граф (рисунок 2.45), який й описується виразом:

$$G = (V, E), \quad (2.29)$$

де V - множина вершин (відповідають точкам “рандеву”);

E - множина ребер між вершинами.

Вершини мають ребра якщо перетинаються часові інтервали передачі даних у відповідних точках “рандеву”.

Для наведених вихідних даних можна визначити наступне:

$$V = \{1, 2, 3, 4\}$$

$$E = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 1), (2, 3), (3, 1), (3, 2), (3, 4), (4, 1), (4, 3)\}.$$

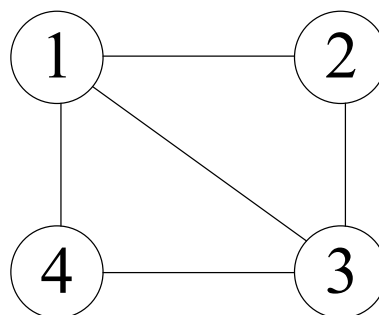


Рисунок 2.45 – Граф, що відповідає вихідним даним

Наступним кроком є будова для отриманого графа $G=(V,E)$ матриці суміжності A розміром $n \times n, n=4$, для якої значення елементу a_{ij} відповідає наявності ребра з i -ої вершини графа в j -у, $a_{ij} \in \{0,1\}$. Будь яка вершина суміжна з собою тому на головній діагоналі знаходяться одиниці. Для графа, представленого на рисунку 2.41 матриця суміжності має вигляд:

$$A := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Після цього, на сформованій матриці суміжності, починаючи з першого рядка A ($i=1$) здійснюється пошук першої суміжної нефарбованої вершини, для якої $a_{1j} = 0$. Для матриці, що аналізується, всі елементи першого рядка дорівнюють одиниці. В такому випадку номер першого рядка додається до першої кольорової групи.

Далі проводиться подібна процедура для другого рядка ($i=2$). В другому рядку суміжною нефарбованою вершиною є вершина з номером 4: $a_{24} = 0, j=4$.

Відповідно до порядку дій, визначеному в алгоритмі, здійснюємо додавання другого рядка до четвертого для отримання оновленої строки матриці:

$$\begin{array}{r} 1 \ 1 \ 1 \ 0 \\ \vee \\ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \\ \hline 1 \ 1 \ 1 \ 1 \end{array}$$

Всі елементи оновленого рядка a_{2j} матриці дорівнюють одиниці, тому

вершини з номерами 2 та 4 додаються до другої кольорової групи.

Наступним аналізується третій рядок ($i = 3$). Всі елементи третього рядка дорівнюють одиниці тому його номер додається до третьої кольорової групи.

Таким чином, для забезпечення збору та передачі даних від контрольно-вимірювальних постів №9, №14, №15, №16, необхідно три БПЛА літакового типу, з яких:

- перший БПЛА літакового типу забезпечує отримання даних від контрольно-вимірювальних постів №9, №15 (точки “рандеву” №4 та №3);
- другий БПЛА літакового типу забезпечує отримання даних від контрольно-вимірювального посту №14 (точка “рандеву” №1);
- третій БПЛА літакового типу забезпечує отримання даних від контрольно-вимірювального посту №16 (точка “рандеву” №3).

За отриманими результатами сформовано таблицю 2.10

Таблиця 2.10 – Порядок застосування БПЛА літакового типу для збирання даних

Вимірювальна станція	Точка "рандеву"	БПЛА літакового типу
MS9	RP4	AUAV _{RG1}
MS14	RP1	AUAV _{RG2}
MS15	RP3	AUAV _{RG1}
MS16	RP2	AUAV _{RG3}

2.6 Висновки до другого розділу

Розглянуто концепцію, принципи, моделі і методи методології побудови гарантоздатних сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі БПЛА та визначено їх взаємозв'язки.

Запроновано концептуальну модель СОМС БПЛА у вигляді мультиагентної системи, яка описує структуру системи, властивості та взаємозв'язки холонів-агентів. 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.

Розроблено аналітичні моделі для опису процесів розгортання 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 – типи моделей». Показано що застосування мультиагентного підходу може дозволити зменшити загальну кількість ресурсів, яка необхідна для розгортання сервісу.

Описано процес вибору необхідних моделей на основі онтологічного представлення даних, що дозволяє вибирати необхідні засоби для розгортання сервісів, моделі для розрахунку кількісних показників СОМС БПЛА та моделі оцінювання гарантоздатності для забезпечення виконання вимог до сервісів.

Визначено послідовність дій при обґрунтуванні складу СОМС БПЛА для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, яка дозволяє знаходити близьке до оптимального компромісного рішення щодо складу СОМС для різних варіантів використання БПЛА та АОЗС, як холонів системи.

Описано приклади використання запропонованих моделей для формування структури та складу СОМС БПЛА при виконанні завдань моніторингу та у складі системи фізичного захисту ММР з врахуванням функціональних вимог.

Основні наукові результати, що наведені в першому розділі, опубліковано в роботах автора [4, 6, 8, 9, 10, 18, 24, 25, 33], зазначених в анотації.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛІ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

3.1 Класифікація моделей систем масового обслуговування для опису функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА

3.1.1 Обґрунтування класифікаційних ознак

Одним з основних математичних апаратів, який дозволяє описувати та оцінювати функціонування систем, які надають сервіси з обслуговування замовлень, є теорія систем масового обслуговування (СМО) [202, 203]. Опис функціонування СОМС БПЛА моделями СМО дозволяє використовувати відомі підходи при проведенні досліджень функціонування та оцінки гарантоздатності таких систем.

В загальному вигляді СМО описуються системою позначень Кендалла-Лі, яка має вигляд [204]:

$$(A/B/C):(D/Q/K), \quad (3.1)$$

де А – тип вхідного потоку замовлень;

В – тип потоку обслуговування;

С – канальність СМО ($C=1 \dots n, \infty$);

D – правило (пріоритетність) оброблення черги (FCFS (first come, first served), LCFS (last come, first served), SIRO (server in random order), SRPT (shortest remaining processing time), LRPT (longest remaining processing time), RR (round-robin) та інші);

Q – розмір черги з замовлень ($Q=0 \dots p, \infty$);

K – кількість джерел замовлень ($K=1 \dots r$).

В роботі розглядаються різні моделі СМО:

- без втрат замовлень, які обслуговуються;
- з втратами замовлень, які обслуговуються, через відмови БПЛА.

Параметри А та В можуть приймати такі позначення:

М – найпростіший потік подій (показовий розподіл), коефіцієнт варіації $v=1$;

E_k – потік Ерланга k -го порядку, $v= k^{-1/2}$;

D – детермінований (регулярний) потік, $v= 0$;

G – потік загального вигляду (довільний розподіл), $0 \leq v < \infty$;

H_k – гіперекспоненційний розподіл k -го порядку.

В основу класифікації моделей СМОС, окрім вище наведених, покладені наступні додаткові признаки:

- кількість БПЛА в складі каналу обслуговування. Різні види замовлень можуть вимагати різної конфігурації каналів обслуговування. Наприклад, для доставлення невеликих вантажів достатньо одного БПЛА, у той час як для виконання завдань пошуку (моніторингу) та розгортання ЛБМ необхідні рої з декількох БПЛА;

- можливість відмов та відновлення БПЛА (в роботі розглядається система з необмеженим відновленням);

- використання резервних БПЛА;

- необхідність обслуговування БПЛА під час обробки замовлення, через необхідність заряджання (заміни) бортових джерел живлення БПЛА для забезпечення тривалого функціонування.

Для виконання обслуговування БПЛА під час обробки замовлень використовуються автоматичні обмінно-зарядні станції (англ. Automatic Battery Replacement Stations, ABRAS).

Моделі СМО, які представлені в роботі передбачають використання в складі окремих каналів обслуговування або одиночних БПЛА або роїв однотипних БПЛА, які виконують однакові функції.

3.1.2. Фасетна класифікація моделей СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів

Фасетна класифікація моделей СМО СМС БПЛА з позначенням моделей, які розглядаються в роботі наведена на рисунку 3.1.

Для більш точного опису моделей з урахуванням представленої класифікації пропонується мнемоніка:

$$(A/B/C(U)):(D/Q/K):(F/S)/R, \quad (3.2)$$

де U – кількість БПЛА в складі апарату обслуговування ($U=1..u$);

F – врахування в моделі можливості відмов БПЛА та їх відновлення;

S – врахування в моделі необхідності обслуговування БПЛА під час виконання замовлень;

R – врахування в моделі використання резервних БПЛА.

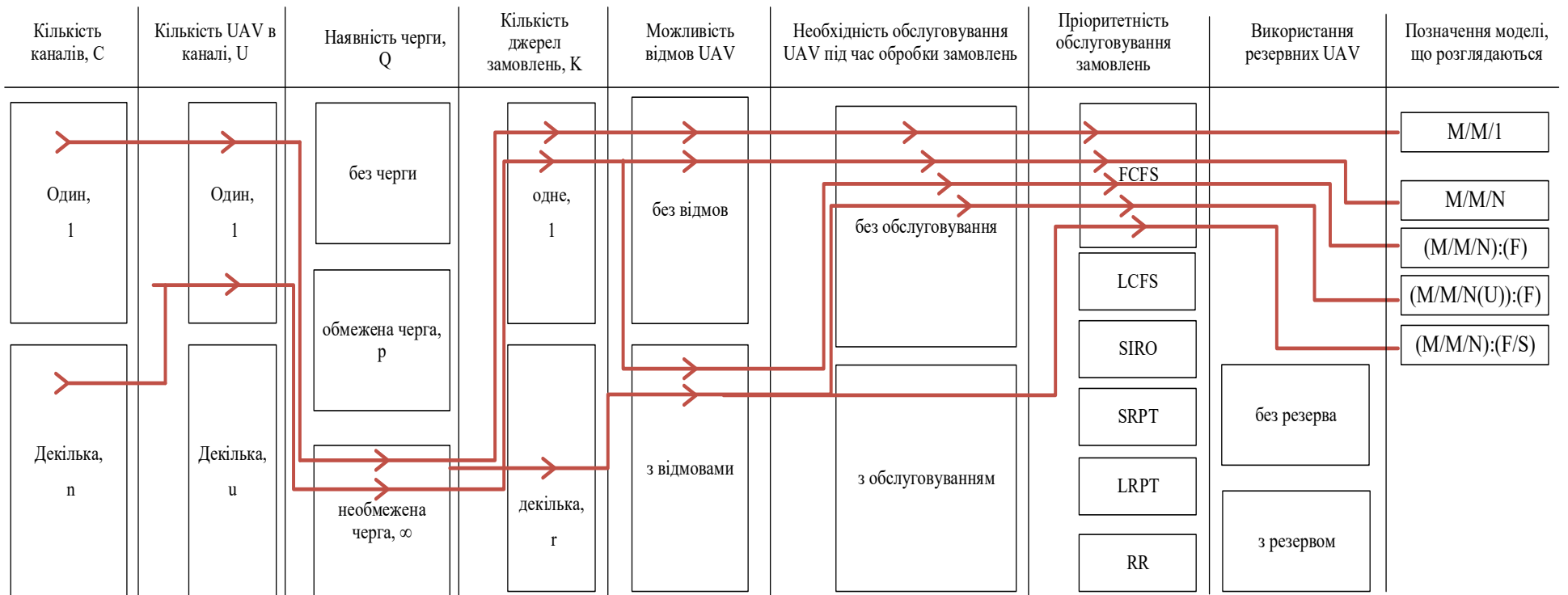


Рисунок 3.1 – Класифікація моделей СМО СОМС БПЛА.

3.2 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/1)

Модель СМОС БПЛА у вигляді СМО яка описується нотацією (М/М/1), представляє СМО з найпростішим потоком замовлень, які обробляються одним UAV за час, що описується показовим розподілом. Розмір черги – необмежений.

В даній моделі в якості апарату обслуговування можуть бути використані як одиночні БПЛА так і рої БПЛА, які розглядаються як один апарат обслуговування. На рисунку 3.2 представлений марковський граф, який описує стани, в яких може перебувати СМОС БПЛА, та переходи між станами, де λ це інтенсивність потоку замовлень, а μ - інтенсивність обробки замовлень.

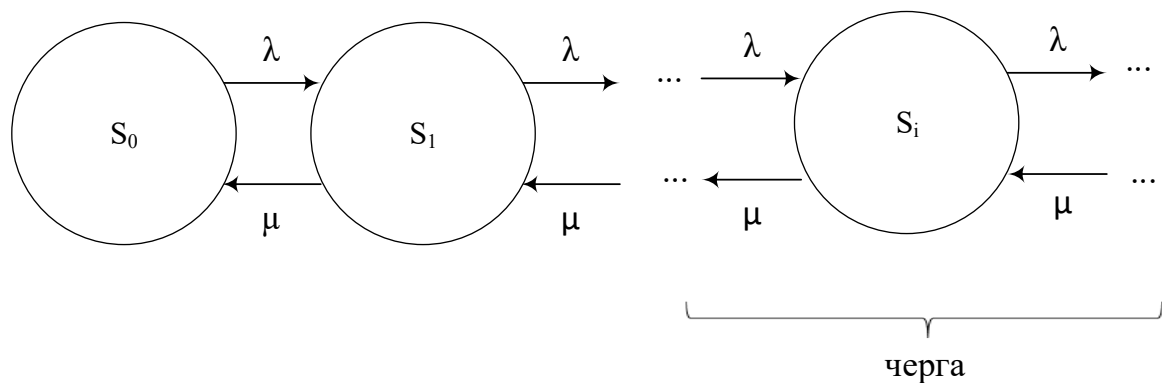


Рисунок 3.2 – Марковський граф моделі СМО СМОС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/1).

Опис станів моделі СМОС БПЛА у вигляді СМО, яка описується нотацією М/М/1, приведений в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/1).

Стан	Опис стану
S_0	в системі відсутні замовлення.
S_1	в системі обробляється одне замовлення.
S_i	в системі обробляються i замовлень, з яких $(i-1)$ знаходяться в черзі.

3.3 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Н)

Модель СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/Н), представляє СМО з потоком замовлень, які обробляються N БПЛА за час, що описується показовим законом розподілу. Розмір черги – необмежений. В даній моделі в якості апаратів обслуговування можуть бути використані як одиночні БПЛА так і рої БПЛА, які розглядаються як один апарат обслуговування. На рисунку 3.3 представлений марковський граф, який описує стани, в яких може перебувати СОМС БПЛА, та переходи між станами.

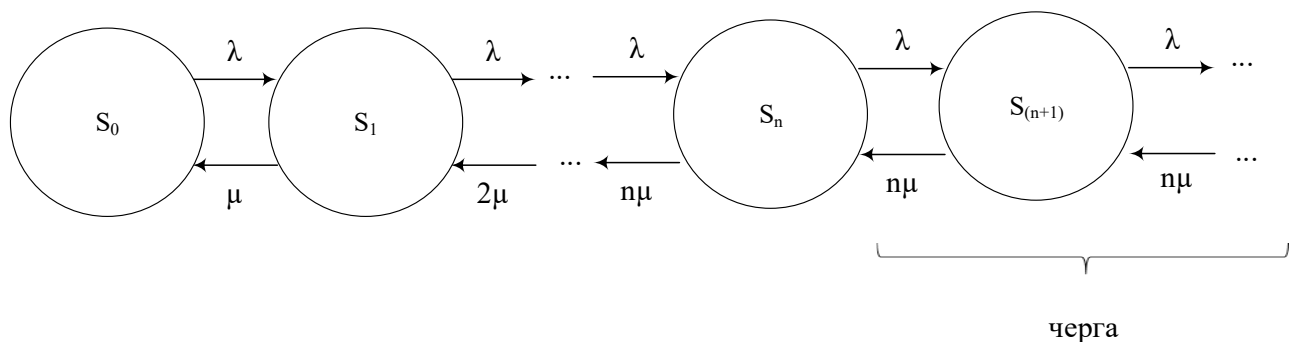


Рисунок 3.3 – Марковський граф моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/Н).

Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/Н), приведений в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/Н).

Стан	Опис стану
S_0	в системі відсутні замовлення.
S_1	в системі обробляється одне замовлення.
S_n	в системі обробляються n замовлень, черга відсутня.
$S_{(n+1)}$	в системі заходяться (n+1) замовлень, n замовлень обробляються, одне замовлення в черзі.

Моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотаціями (М/М/1) та (М/М/Н) є нескладними, для досліджень яких використовується відомі аналітичні вирази [205].

3.4 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Н):(F)

3.4.1 Розроблення моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Н):(F)

Модель СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/Н):(F), представляє СМО з потоком замовлень, які обробляються N БПЛА за час, що описується показовим законом розподілом. Розмір черги – необмежений. Модель передбачає використання в якості апаратів обслуговування як одиночних БПЛА так і роїв БПЛА. Під час обробки замовлень можливе виникнення відмов БПЛА, після виникнення яких вони відновлюються, при цьому виникнення відмови навіть одного БПЛА в складі рою приводить до припинення функціонування всього рою та до втрати замовлення. На рисунку 3.4 представлений марковський граф, який описує стани, в яких може перебувати система, та переходи між станами моделі СМО СОМС БПЛА, яка

описується нотацією $(M/M/N):(F)$, де λ_f це інтенсивність відмов БПЛА, а μ_f - інтенсивність відновлення БПЛА.

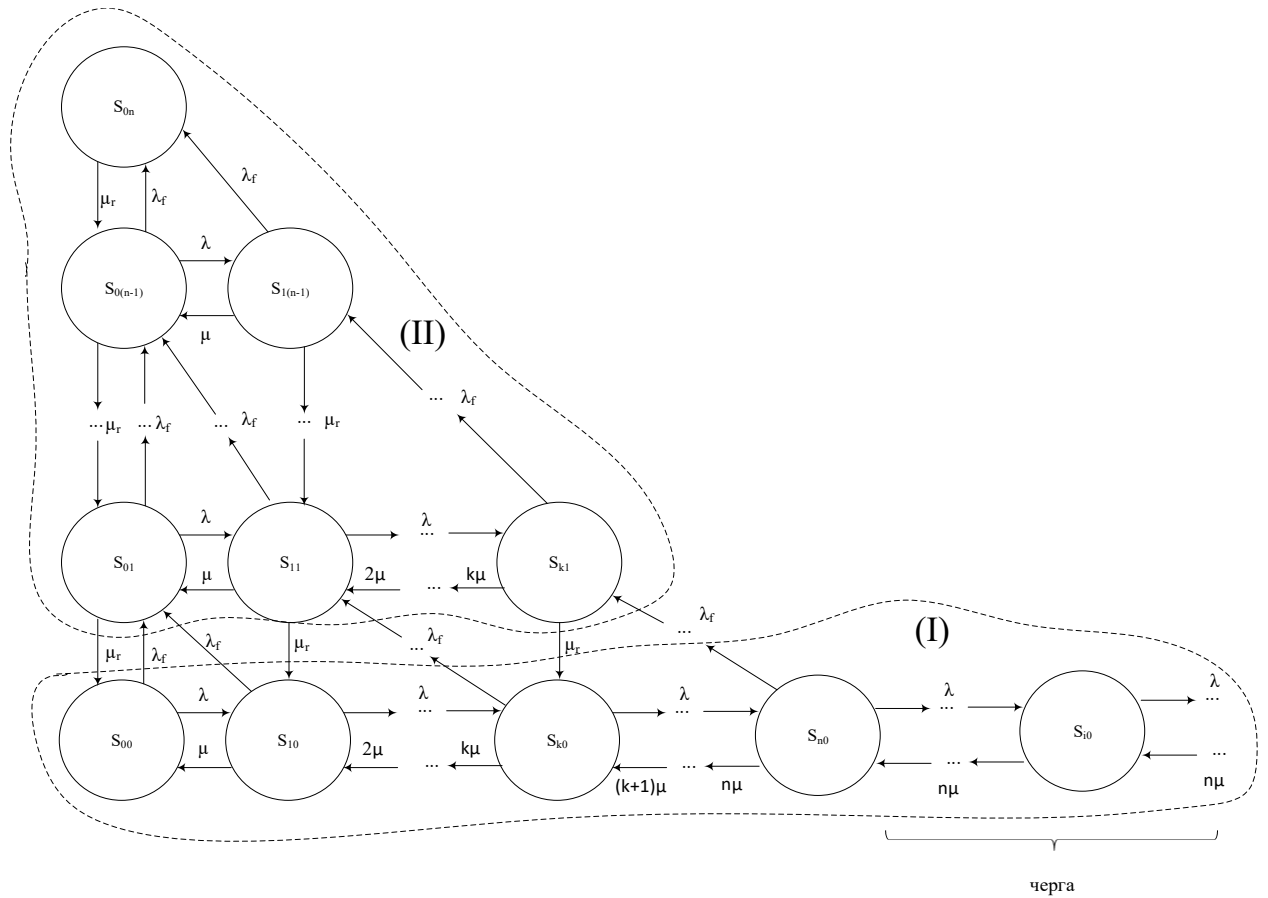


Рисунок 3.4 – Марковський граф моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/N):(F)$.

Множина станів (I) містить стани, що описують функціонування СОМС БПЛА у вигляді СМО з справними БПЛА. Множина станів (II) містить стани, що описують функціонування СОМС БПЛА у вигляді СМО з несправними БПЛА, що приводить до втрати замовлень.

Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/N):(F)$, приведений в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (M/M/N):(F)

Стан	Опис стану
S_{00}	в системі відсутні замовлення, всі засоби (БПЛА) справні.
S_{10}	в системі обробляється одне замовлення, всі засоби (БПЛА) справні.
S_{k0}	в системі обробляються k замовлень, всі засоби (БПЛА) справні.
S_{n0}	в системі обробляються n замовлень, всі засоби (БПЛА) справні.
S_{i0}	в системі знаходяться i замовлень, обробляються n замовлень, всі засоби (БПЛА) справні, (i-n) замовлень знаходяться в черзі.
S_{01}	в системі відсутні замовлення, один засіб (БПЛА) несправний.
S_{11}	в системі обробляється одне замовлення, один засіб (БПЛА) несправний.
S_{k1}	в системі обробляються k замовлень, один засіб (БПЛА) несправний.
$S_{0(n-1)}$	в системі відсутні замовлення, (n-1) засобів (БПЛА) несправні.
$S_{1(n-1)}$	в системі обробляється одне замовлення, (n-1) засобів (БПЛА) несправні.
S_{0n}	в системі відсутні замовлення, всі засоби (n БПЛА) несправні.

Дана модель є більш складною у порівнянні з моделями СМО СОМС БПЛА, яка описується нотаціями M/M/1 та M/M/N, та потребує додаткового дослідження для отримання математичних залежностей, які дозволять оцінити основні параметри функціонування системи, яка описується такою моделлю.

3.4.2 Дослідження моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Н):(F)

Розглянемо модель СОМС БПЛА у вигляді СМО, яка описується мнемонікою (М/М/Н):(F) на прикладі моделі, яка описується мнемонікою (М/М/3):(-/0/-):(F) в якій 3 БПЛА, що можуть відмовляти та відновлюватися, обробляють найпростіший потік замовлень без черги. На рисунку 3.5 представлений марковський граф, який описує станів цієї моделі та переходи між ними.

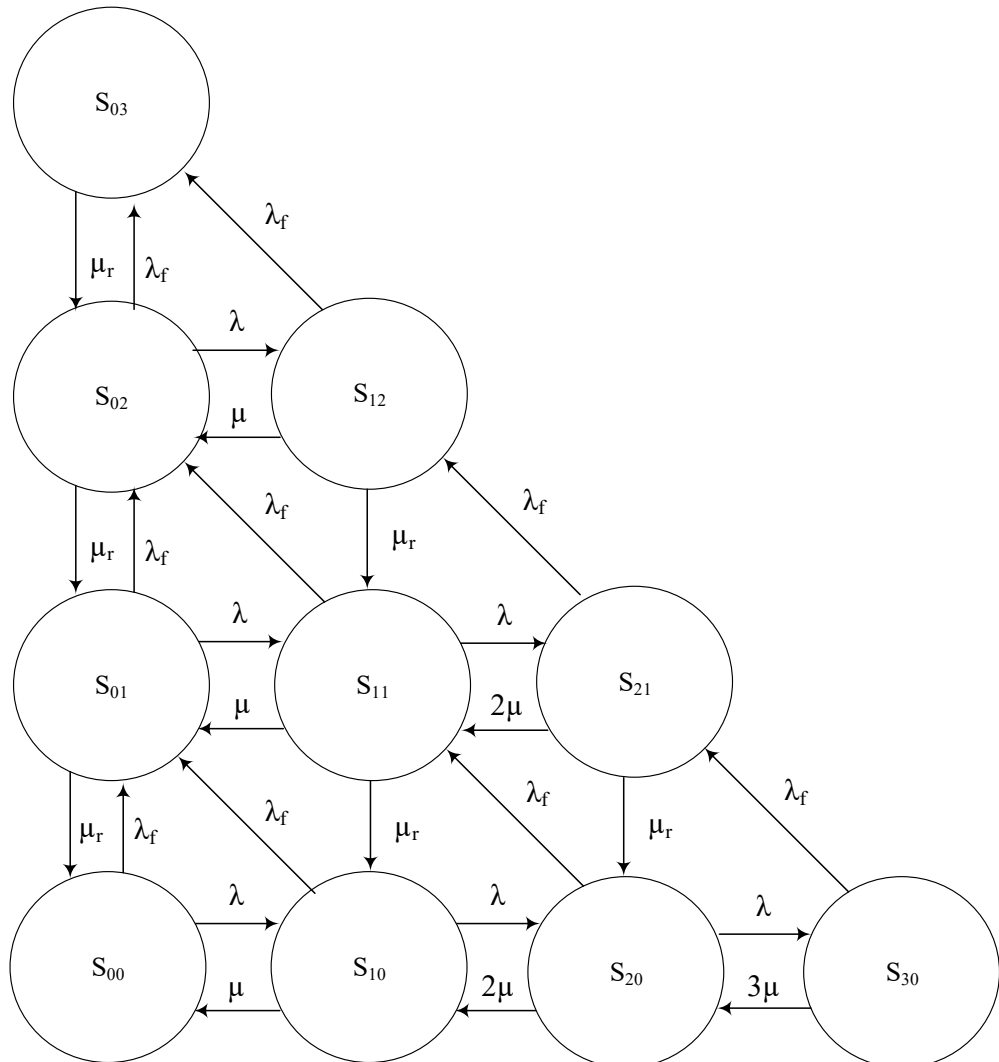


Рисунок 3.5 – Марковський граф моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/3):(-/0/-):(F).

Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/3):(-/0/-):(F)$, приведений в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/3): (-/0/-):(F)$

Стан	Опис стану
S_{00}	в системі відсутні замовлення, всі БПЛА справні.
S_{10}	в системі обробляється одне замовлення, всі засоби (БПЛА) справні.
S_{20}	в системі обробляються 2 замовлення, всі БПЛА справні.
S_{30}	в системі обробляються 3 замовлення, всі БПЛА справні.
S_{11}	в системі обробляється одне замовлення, один БПЛА несправний.
S_{21}	в системі обробляються 2 замовлення, один БПЛА несправний.
S_{12}	в системі обробляються 1 замовлення, два БПЛА несправні.
S_{01}	в системі відсутні замовлення, один БПЛА несправний.
S_{02}	в системі відсутні замовлення, 2 БПЛА несправні.
S_{03}	в системі відсутні замовлення, 3 БПЛА несправні

Імовірностей перебування системи, що описується моделлю СМО $(M/M/3): (-/0/-):(F)$, визначаються з використанням системи рівнянь Колмогорова-Чепмена, де P_{ij} – імовірність перебування системи у стані S_{ij} :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{00}}{dt} = -(\lambda + \lambda_f)P_{00}(t) + \mu_r P_{01}(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_{10}}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + \mu)P_{10}(t) + \lambda P_0(t) + \mu_r P_{11}(t) + 2\mu P_{20}(t); \\ \frac{dP_{20}}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + 2\mu)P_{20}(t) + \lambda P_1(t) + \mu_r P_{21}(t) + 3\mu P_{30}(t); \\ \frac{dP_{30}}{dt} = -(\lambda_f + 3\mu)P_{30}(t) + \lambda P_{20}(t); \\ \frac{dP_{01}}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + \mu_r)P_{01}(t) + \lambda_f P_0(t) + \lambda_f P_{10}(t) + \mu_r P_{02}(t) + \mu P_{11}(t); \\ \frac{dP_{11}}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + \mu + \mu_r)P_{11}(t) + \lambda P_{01}(t) + \lambda_f P_{20}(t) + 2\mu P_{21}(t) + \mu_r P_{12}(t); \\ \frac{dP_{21}}{dt} = -(\lambda_f + 2\mu + \mu_r)P_{21}(t) + \lambda P_{11}(t) + \lambda_f P_{30}(t); \\ \frac{dP_{02}}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + \mu_r)P_{02}(t) + \lambda_f P_{01}(t) + \lambda_f P_{11}(t) + \mu_r P_{03}(t) + \mu P_{12}(t); \\ \frac{dP_{12}}{dt} = -(\lambda_f + \mu + \mu_r)P_{12}(t) + \lambda P_{02}(t) + \lambda_f P_{11}(t); \\ \frac{dP_{03}}{dt} = -\mu_r P_{03}(t) + \lambda_f P_{02}(t) + \lambda_f P_{12}(t) \end{array} \right. \quad (3.3)$$

де P_{ij} – імовірність перебування системи у стані S_{ij} .

Для стаціонарного режиму з врахуванням рівняння нормування система рівнянь (3.3) трансформується до вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 -(\lambda + \lambda_f)P_{00} + \mu_r P_{01} + \mu P_{10} = 0; \\
 -(\lambda + \lambda_f + \mu)P_{10} + \lambda P_{00} + \mu_r P_{11} + 2\mu P_{20} = 0; \\
 -(\lambda + \lambda_f + 2\mu)P_{20} + \lambda P_{10} + \mu_r P_{21} + 3\mu P_{30} = 0; \\
 -(\lambda_f + 3\mu)P_{30} + \lambda P_{20} = 0; \\
 -(\lambda + \lambda_f + \mu + \mu_r)P_{11} + \lambda P_{01} + \lambda_f P_{20} + 2\mu P_{21} + \mu_r P_{12} = 0; \\
 -(\lambda_f + 2\mu + \mu_r)P_{21} + \lambda P_{11} + \lambda_f P_{30} = 0; \\
 -(\lambda + \lambda_f + \mu_r)P_{02} + \lambda_f P_{01} + \lambda_f P_{11} + \mu_r P_{03} + \mu P_{12} = 0; \\
 -(\lambda_f + \mu + \mu_r)P_{12} + \lambda P_{02} + \lambda_f P_{11} = 0; \\
 -\mu_r P_{03} + \lambda_f P_{02} + \lambda_f P_{12} = 0; \\
 P_{00} + P_{10} + P_{20} + P_{30} + P_{01} + P_{11} + P_{21} + P_{02} + P_{12} + P_{03} = 1.
 \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Для наступних вихідних даних:
 $\lambda = 0.5 \text{ h}^{-1}$; $\lambda_f = 0.001 \text{ h}^{-1}$; $\mu = 0.4 \text{ h}^{-1}$; $\mu_r = 0.5 \text{ h}^{-1}$, значення фінальних імовірностей перебування системи в відповідних станах дорівнюють:

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 0.298; P_1 = 0.372; P_2 = 0.232; P_3 = 0.097; \\
 P_{01} &= 9.5 \cdot 10^{-4}; P_{11} = 7.019 \cdot 10^{-4}; P_{21} = 3.44 \cdot 10^{-4}; \\
 P_{02} &= 2.527 \cdot 10^{-6}; P_{12} = 2.181 \cdot 10^{-6}; P_{03} = 9.416 \cdot 10^{-9}.
 \end{aligned}$$

3.5 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Н(U)): (F)

3.5.1 Розроблення моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (М/М/Н(U)): (F)

Модель СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (М/М/Н(U)): (F) (М/М/Н[U]): (F) представляє СМО з потоком замовлень, які обробляються N роями, кожний з яких складається з U БПЛА за час, що описується показовим законом розподілу. Розмір черги – необмежений. Під час обробки замовлень БПЛА можуть відмовляти та відновлюватися.

Виконання різних типів завдань можуть бути описані різними стратегіями зміни станів системи внаслідок відмов БПЛА в роях. Одна стратегія може передбачати втрату замовлення, що оброблялось, наприклад при розгортанні літаючих бездротових мереж. Поведінка системи з такою стратегією майже не відрізняється від поведінки системи $(M/M/N):(F)$.

Але існують стратегії зміни станів, при яких відмови БПЛА можуть лише погіршувати продуктивність системи, наприклад, зменшувати інтенсивність оброблення замовлень у випадку пошуку об'єктів у визначеному районі, коли відмови БПЛА призводять до збільшення часу пошуку тими БПЛА, які є справними. В такому разі втрата замовлення відбувається лише після відмови всіх БПЛА в рої. На рисунку 3.6 представлений марковський граф, який описує станів моделі СМО $(M/M/N[U]):(F)$, де $\mu_1, \mu_{(u-1)}$ – інтенсивності обслуговування замовлень при виникненні відмови одного та $(u-1)$ БПЛА відповідно.

Множина станів (I) містить стани, що описують функціонування системи з справним БПЛА. Множина станів (II) містить стани, що описують функціонування системи з несправним БПЛА у складі роїв, але це не приводить до втрати замовлень. Множина станів (III) містить стани, що описують функціонування системи з несправним БПЛА, які приводять до втрат замовлень.

Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/N(U):(F))$ приведений в таблиці 3.5.

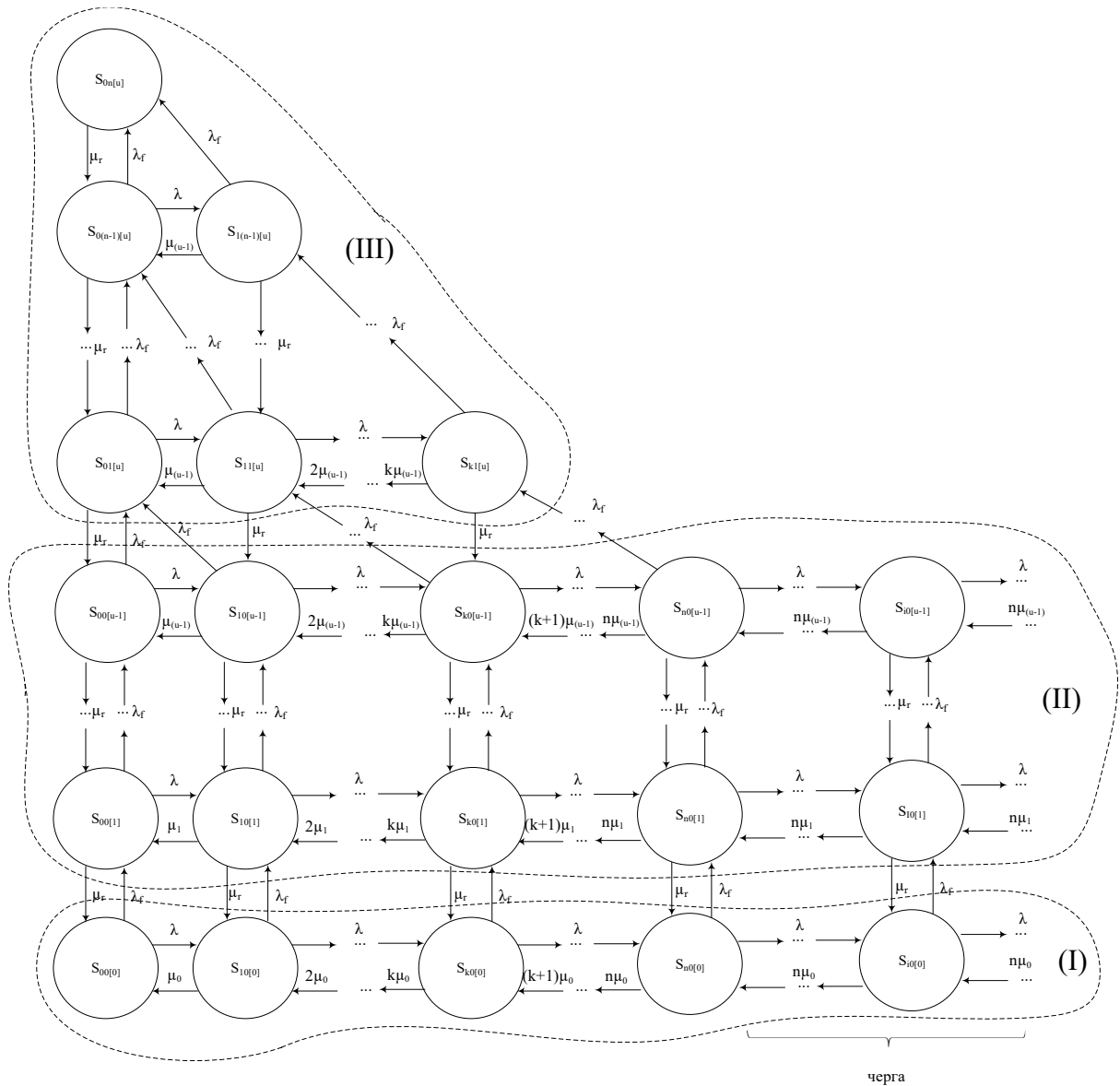


Рисунок 3.6 – Марковський граф моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/N(U)): (F)$.

Таблиця 3.5 – Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/N(U)): (F)$

Стан	Опис стану
$S_{00(0)}$	в системі відсутні замовлення, всі засоби (всі БПЛА в рядах) справні
$S_{10(0)}$	в системі обробляється одне замовлення, всі засоби (всі БПЛА в групах) справні
$S_{10(1)}$	в системі обробляється одне замовлення, один БПЛА в одному році несправний

Кінець таблиці 3.5.

Стан	Опис стану
$S_{10(u-1)}$	в системі обробляється одне замовлення, $(u-1)$ БПЛА в одному рої несправний
$S_{k0(0)}$	в системі обробляються k замовлень, всі БПЛА в роях справні
$S_{k0(1)}$	в системі обробляються k замовлень, один БПЛА в кожному з k роїв несправний
$S_{k0(u-1)}$	в системі обробляються k замовлень, $(u-1)$ БПЛА в кожній з k груп несправний
$S_{n0(0)}$	в системі обробляються n замовлень, всі БПЛА в роях справні
$S_{n0(1)}$	в системі обробляються n замовлень, один БПЛА в кожній з n груп несправний
$S_{n0(u-1)}$	в системі обробляються n замовлень, $(u-1)$ БПЛА в кожній з n груп несправний
S_{i00}	в системі знаходяться i замовлень, обробляються n замовлень, всі БПЛА в роях справні, $(i-n)$ замовлень знаходяться в черзі
$S_{i0(1)}$	в системі обробляються n замовлень, один БПЛА в кожній з n груп несправний, $(i-n)$ замовлень знаходяться в черзі
$S_{i0(1)}$	в системі обробляються n замовлень, один БПЛА в кожній з n груп несправний, $(i-n)$ замовлень знаходяться в черзі
$S_{i0(u-1)}$	в системі обробляються n замовлень, $(u-1)$ БПЛА в кожній з n груп несправний, $(i-n)$ замовлень знаходяться в черзі
$S_{01(u)}$	в системі відсутні замовлення, один засіб несправний (u БПЛА в одному рої несправні)
$S_{11(u)}$	в системі обробляється одне замовлення, один засіб несправний (u БПЛА в одному рої несправні)
$S_{k1(u)}$	в системі обробляються k замовлень, один засіб несправний (u БПЛА в одному рої несправні)
$S_{0(n-1)(u)}$	в системі відсутні замовлення, $(n-1)$ засобів несправні (u БПЛА в $(n-1)$ рої несправні)
$S_{1(n-1)(u)}$	в системі обробляється одне замовлення, $(n-1)$ засобів несправні (u БПЛА в $(n-1)$ рої несправні)
$S_{0n(u)}$	в системі відсутні замовлення, всі n засобів несправні (u БПЛА в кожному рої несправні)

3.6 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (M/M/N):(F/S)

3.6.1 Розроблення моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (M/M/N):(F/S)

Модель СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (M/M/N):(F/S), 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 обробки замовлень можливе виникнення відмов БПЛА, після виникнення яких вони відновлюються. В наслідок виникнення відмов БПЛА замовлення, яке виконувалось втрачається. Виникнення відмови одного БПЛА в складі рою приводить до припинення функціонування всього рою та до втраті замовлення. Під час обробки замовлень БПЛА потребують обслуговування (заряджання або заміни бортових джерел живлення) після якого продовжується обробка замовлення. На рисунку 3.7 представлений марковський граф, який описує стани, в яких може перебувати система, та переходи між станами моделі (M/M/N):(F/S), де λm це інтенсивність потоку вимог обслуговування БПЛА, а μ_m - інтенсивність обслуговування БПЛА.

Множина станів (I) містить стани, що описують функціонування системи з справними БПЛА. Множина станів (II) містить стани, що описують функціонування системи з несправними БПЛА. Множина станів (III) містить стани, що описують функціонування системи з справним БПЛА, які обслуговуються. Множина станів (IV) містить стани, що описують функціонування СМО з несправним БПЛА та справними, які обслуговуються.

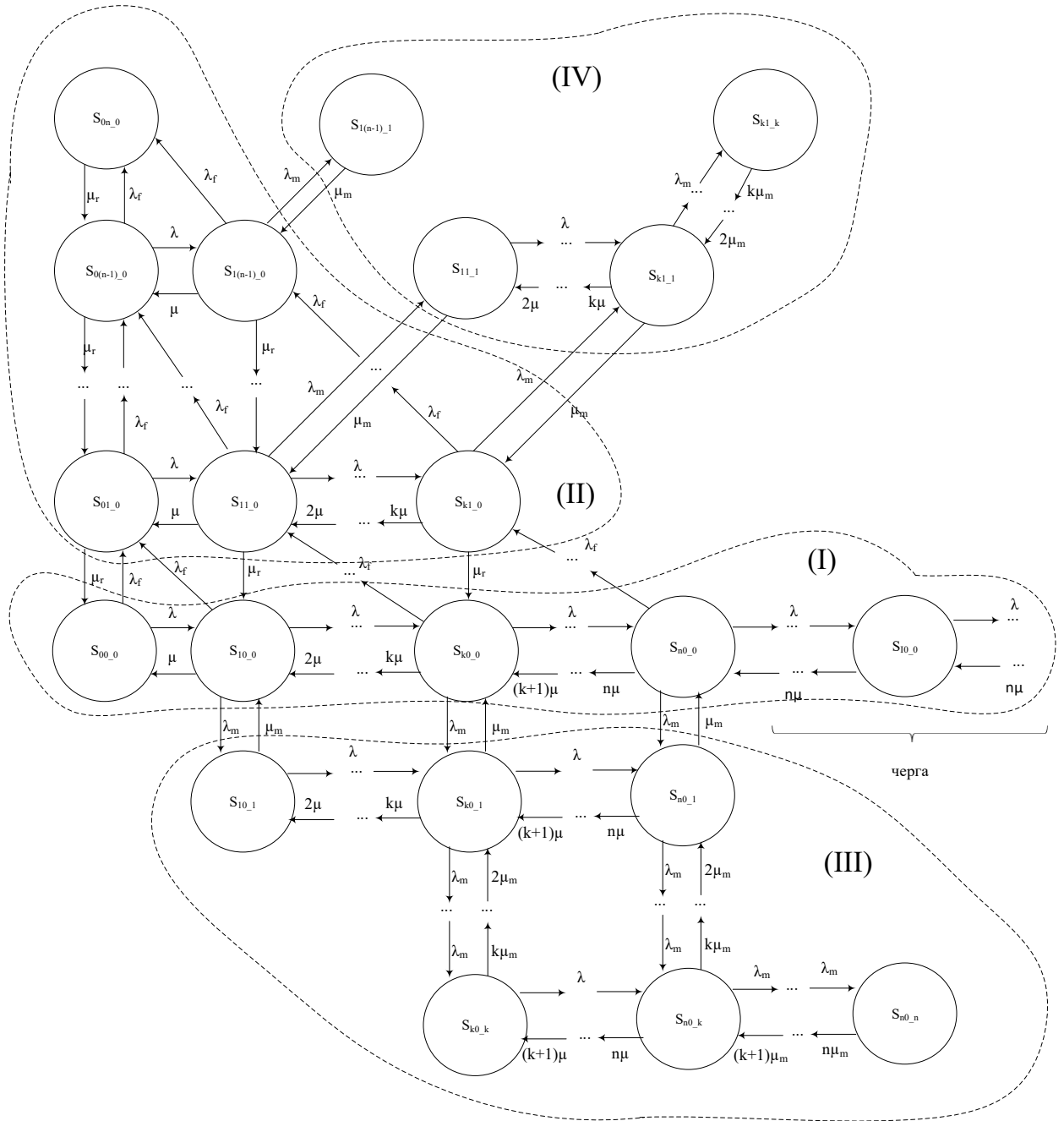


Рисунок 3.7 - Марковський граф моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/N):(F/S)$.

Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/N):(F/S)$, приведений в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 - Опис станів моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією (M/M/N):(F/S)

Стан	Опис стану
S_{00_0}	в системі відсутні замовлення, всі засоби (БПЛА) справні, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
S_{10_0}	в системі обробляється одне замовлення, всі засоби (БПЛА) справні, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
S_{k0_0}	в системі обробляються k замовлень, всі засоби (БПЛА) справні, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
S_{n0_0}	в системі обробляються n замовлень, всі засоби (БПЛА) справні, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
S_{i0_0}	в системі знаходяться i замовлень, обробляються n замовлень, всі , жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування засоби (БПЛА) справні, (i-n) замовлень знаходяться в черзі.
S_{01_0}	в системі відсутні замовлення, один засіб (БПЛА) несправний, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
S_{11_0}	в системі обробляється одне замовлення, один засіб (БПЛА) несправний (одне замовлення втрачене), жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
S_{k1_0}	в системі обробляються k замовлень, один засіб (БПЛА) несправний, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
$S_{0(n-1)_0}$	в системі відсутні замовлення, (n-1) засобів (БПЛА) несправні, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
$S_{1(n-1)_0}$	в системі обробляється одне замовлення, (n-1) засобів (БПЛА) несправні, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
S_{0n_0}	в системі відсутні замовлення, всі засоби (n БПЛА) несправні, жоден засіб (БПЛА) на потребує обслуговування.
S_{10_1}	в системі обробляється одне замовлення, всі засоби (БПЛА) справні, один з засобів (БПЛА) обслуговується (заряджається).

Кінець таблиці 3.6

Стан	Опис стану
S_{11_1}	в системі обробляється одне замовлення, один засіб (БПЛА) несправний, один з засобів (БПЛА) обслуговується (заряджається).
S_{k0_1}	в системі обробляються k замовлень, всі засоби (БПЛА) справні, один з засобів (БПЛА) обслуговується (заряджається).
S_{k1_1}	в системі обробляються k замовлень, один засіб (БПЛА) несправний, один з засобів (БПЛА) обслуговується (заряджається) .
S_{k1_k}	в системі обробляються, k замовлень один засіб (БПЛА) несправний, k засобів (БПЛА) обслуговується (заряджається).
S_{k0_k}	в системі обробляються k замовлень, всі засоби (БПЛА) справні, k засобів (БПЛА) обслуговуються (заряджаються).
S_{n0_1}	в системі обробляються n замовлень, всі засоби (БПЛА) справні, один з засобів (БПЛА) обслуговується (заряджається).
S_{n0_k}	в системі обробляються n замовлень, всі засоби (БПЛА) справні, k засобів (БПЛА) обслуговуються (заряджаються).
S_{n0_n}	в системі обробляються n замовлень, всі засоби (БПЛА) справні, n засобів (БПЛА) обслуговуються (заряджаються).

3.6.2 Дослідження моделі СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів (M/M/N):(F/S)

Розглянемо модель СМО СМС БПЛА, яка описується нотацією (M/M/N):(F/S) на прикладі моделі, яка описується нотацією (M/M/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 3.8 представлений марковський граф, який описує станів цієї моделі та переходи між ними.

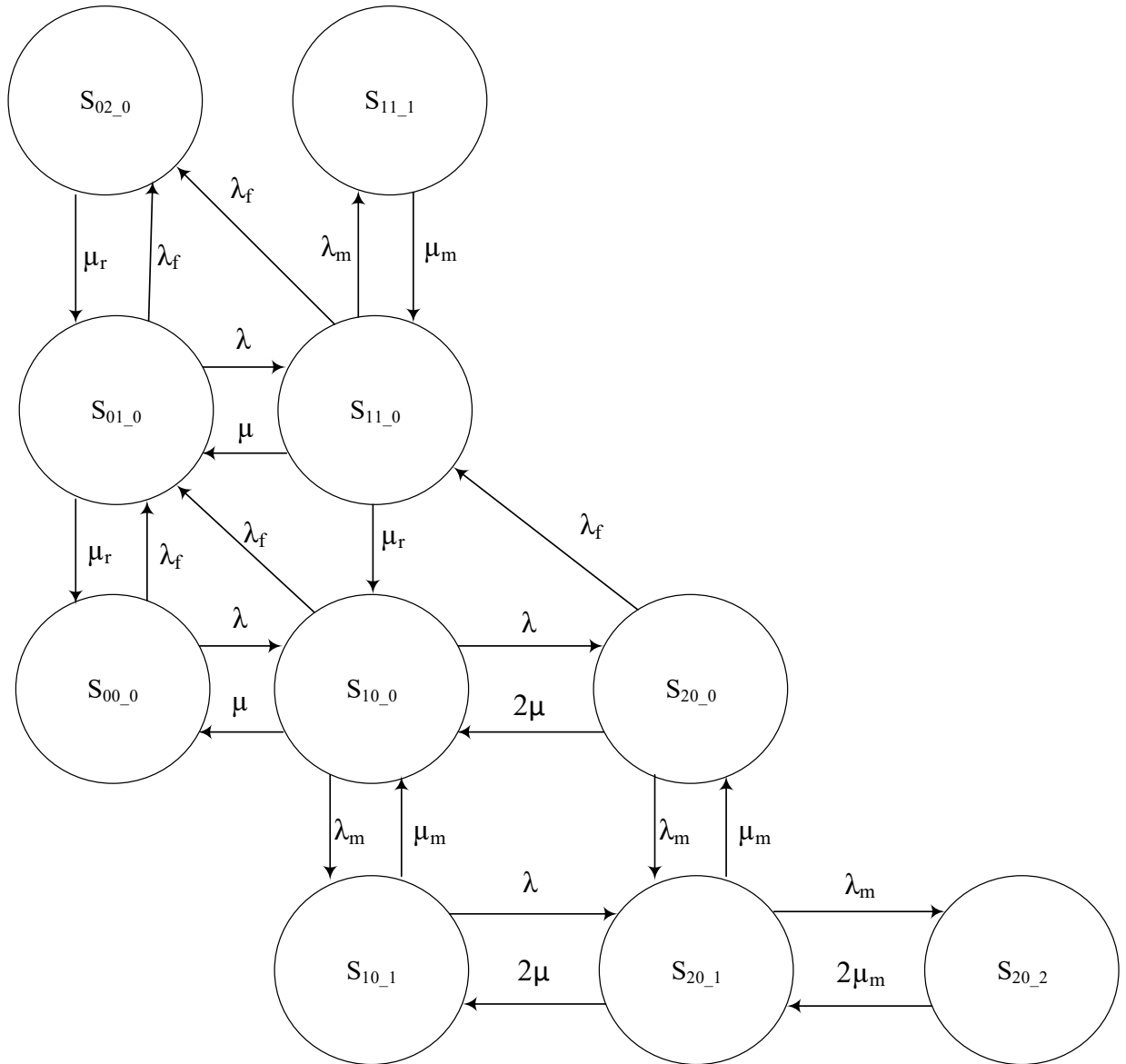


Рисунок 3.8 – Марковський граф моделі СМО СОМС БПЛА, яка описується нотацією $(M/M/3):(-/0/-):(F/S)$.

Система рівнянь Колмогорова-Чепмена для моделі СМО $(M/M/2):(-/0/-):(F/S)$, має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dP_{00}(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_f)P_{00}(t) + \mu_r P_{01}(t) + \mu P_{10}(t); \\
 \frac{dP_{10}(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + \mu + \lambda_m)P_{10}(t) + \lambda P_0(t) + \mu_r P_{11}(t) + 2\mu P_2(t) + \mu_m P_{10_1}(t); \\
 \frac{dP_{10_1}(t)}{dt} = -(\lambda + \mu_m)P_{10_1}(t) + \lambda_m P_{10}(t) + 2\mu P_{20_1}(t); \\
 \frac{dP_{20}(t)}{dt} = -(\lambda_f + 2\mu + \lambda_m)P_2(t) + \lambda P_1(t) + \mu_m P_{2_1m}(t); \\
 \frac{dP_{20_1}(t)}{dt} = -(\lambda_m + \mu_m + 2\mu)P_{20_1}(t) + \lambda_m P_{20}(t) + \lambda P_{10_1}(t) + 2\mu_m P_{20_2}(t); \quad (3.5) \\
 \frac{dP_{20_2}(t)}{dt} = -2\mu_m P_{20_2}(t) + \lambda_m P_{20_1}(t); \\
 \frac{dP_{01}(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_f + \mu_r)P_{01}(t) + \lambda_f P_{00}(t) + \lambda_f P_{10}(t) + \mu_r P_{02}(t) + \mu P_{11}(t); \\
 \frac{dP_{11}(t)}{dt} = -(\lambda_f + \mu + \mu_r + \lambda_m)P_{11}(t) + \lambda P_{01}(t) + \lambda_f P_{20}(t) + \mu_m P_{11_1}(t); \\
 \frac{dP_{11_1}(t)}{dt} = -\mu_m P_{11_1}(t) + \lambda_m P_{11}(t); \\
 \frac{dP_{02}(t)}{dt} = -\mu_r P_{02}(t) + \lambda_f P_{01}(t) + \lambda_f P_{11}(t).
 \end{array} \right.$$

Для стаціонарного режиму з додаванням рівняння нормування система (3.5) трансформується до виду:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 -(\lambda + \lambda_f)P_{00} + \mu_r P_{01} + \mu P_{10} = 0; \\
 -(\lambda + \lambda_f + \mu + \lambda_m)P_{10} + \lambda P_{00} + \mu_r P_{11} + 2\mu P_{20} + \mu_m P_{10_1} = 0; \\
 -(\lambda + \mu_m)P_{10_1} + \lambda_m P_{10} + 2\mu P_{20_1} = 0; \\
 -(\lambda_f + 2\mu + \lambda_m)P_{20} + \lambda P_{10} + \mu_m P_{20_1} = 0; \\
 -(\lambda_m + \mu_m + 2\mu)P_{20_1} + \lambda_m P_{20} + \lambda P_{10_1} + 2\mu_m P_{20_2} = 0; \\
 -2\mu_m P_{20_2} + \lambda_m P_{20_1} = 0; \\
 -(\lambda_f + \mu + \mu_r + \lambda_m)P_{11} + \lambda P_{01} + \lambda_f P_{20} + \mu_m P_{11_1} = 0; \\
 -\mu_m P_{11_1} + \lambda_m P_{11} = 0; \\
 -\mu_r P_{02} + \lambda_f P_{01} + \lambda_f P_{11} = 0; \\
 P_{00} + P_{10} + P_{20} + P_{01} + P_{11} + P_{02} + P_{10_1} + P_{20_1} + P_{20_2} + P_{11_1} = 1.
 \end{array} \right. \quad (3.6)$$

На рисунку 3.9 - рисунку 3.14 представлені графіки зміни фінальних імовірностей перебування системи у різних станах в залежності від зміни інтенсивності:

- надходження потоку замовлень (рисунок 3.9);
- обробки потоку замовлень (рисунок 3.10);
- виникнення відмов БПЛА (рисунок 3.11);
- відновлення БПЛА (рисунок 3.12);
- потоку надходження БПЛА на обслуговування (рисунок 3.13);
- обслуговування БПЛА (рисунок 3.14).

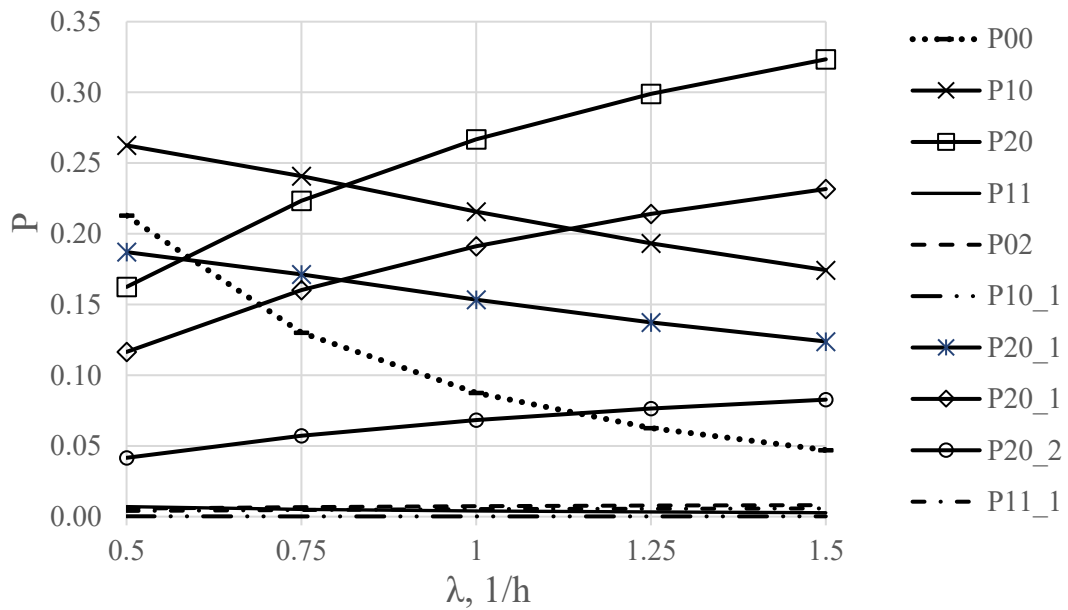


Рисунок 3.9 – Графік залежності фінальних імовірностей перебування системи у різних станах в залежності від інтенсивності надходження потоку замовлень.

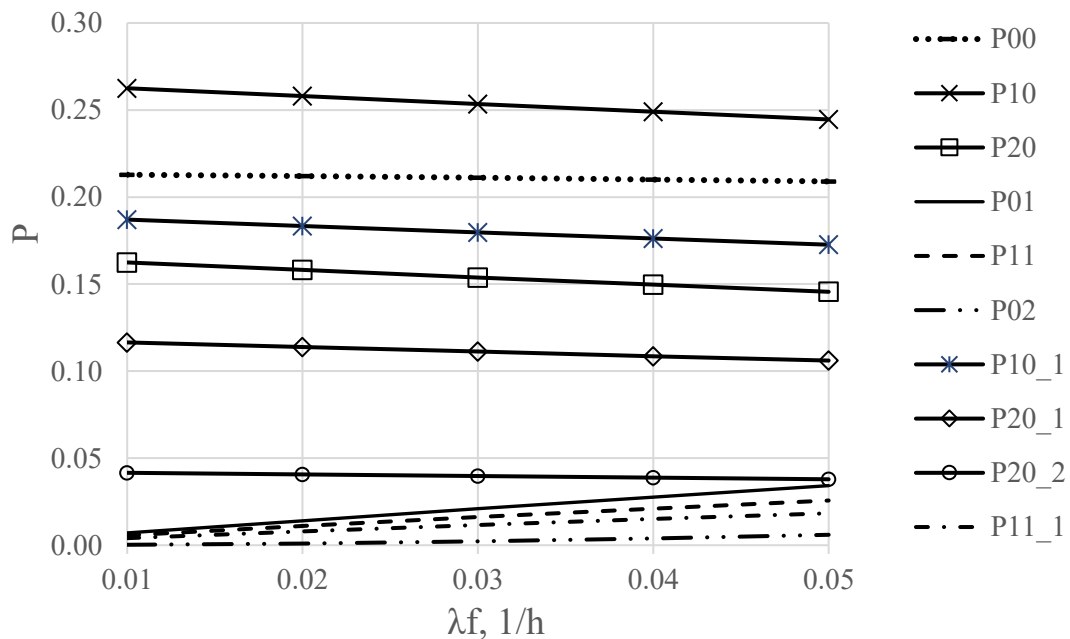


Рисунок 3.10 – Графік залежності фінальних імовірностей перебування системи у різних станах в залежності від інтенсивності виникнення відмов БПЛА.

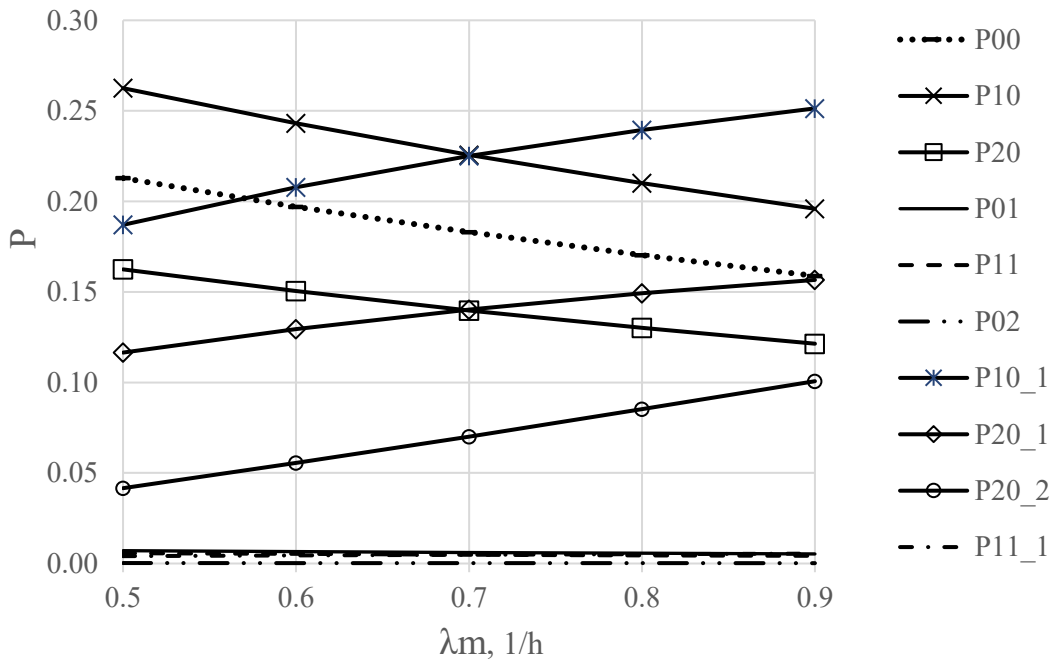


Рисунок 3.11 – Графік залежності фінальних імовірностей перебування системи у різних станах в залежності від інтенсивності потоку надходження БПЛА на обслуговування.

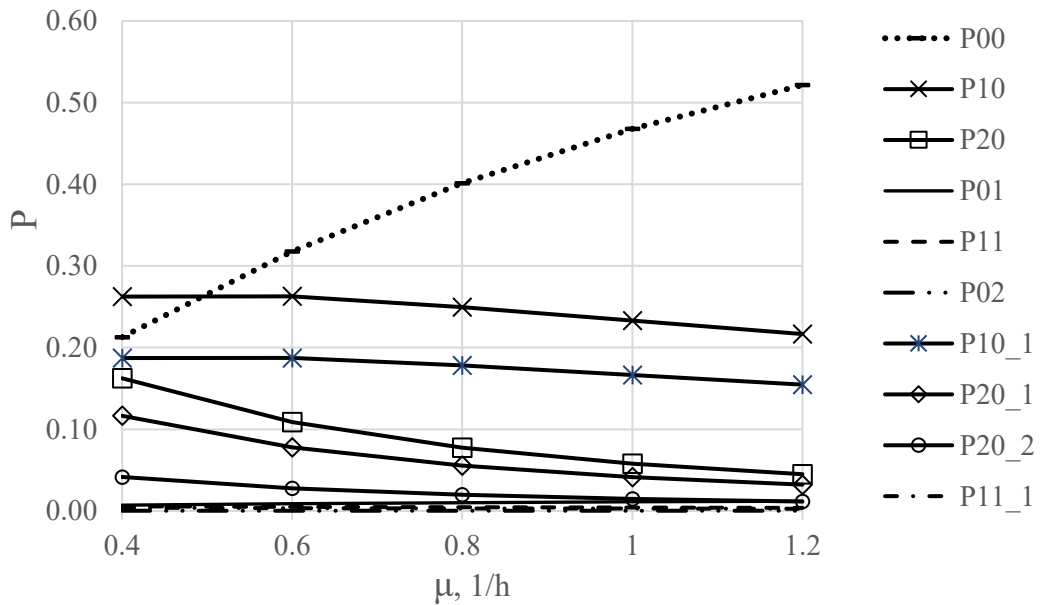


Рисунок 3.12 – Графік залежності фінальних імовірностей перебування системи у різних станах в залежності від інтенсивності обробки потоку замовлень.

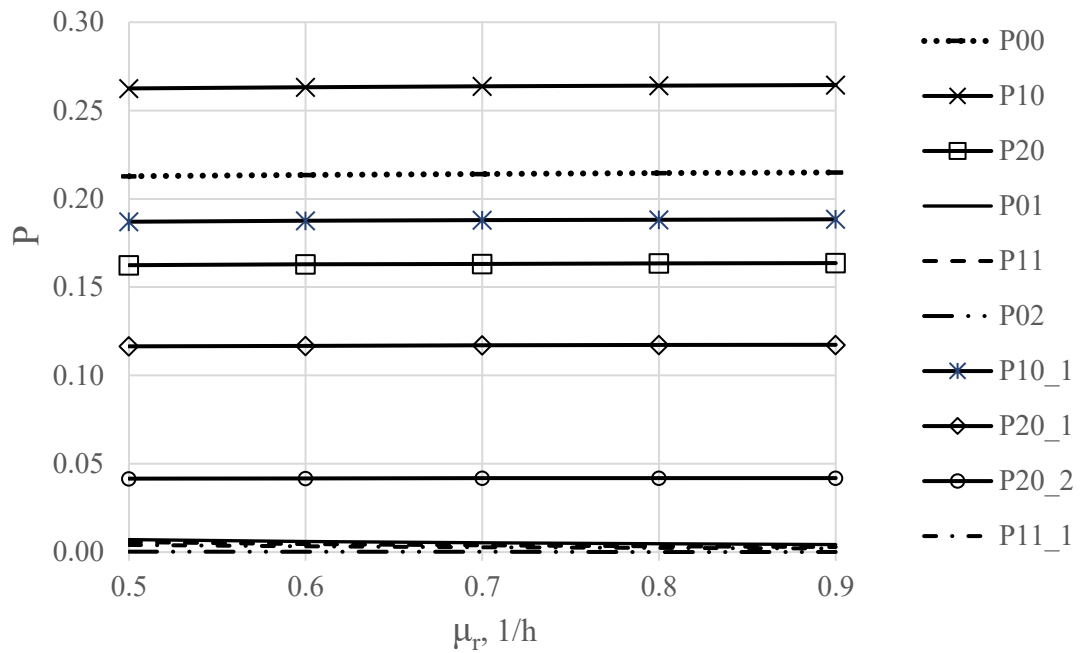


Рисунок 3.13 – Графік залежності фінальних імовірностей перебування системи у різних станах в залежності від інтенсивності відновлення несправних БПЛА.

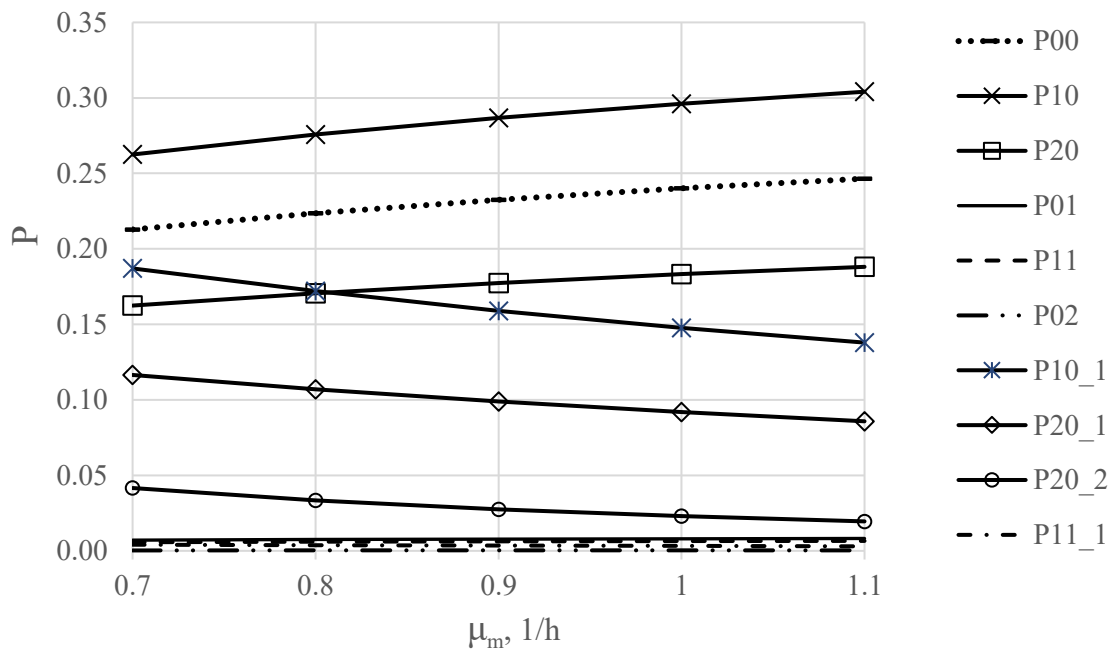


Рисунок 3.14 – Графік залежності фінальних імовірностей перебування системи у різних станах в залежності від інтенсивності обслуговування БПЛА.

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

- зміна інтенсивностей виникнення відмов БПЛА та їх усунення істотно не впливає на зміну фінальних імовірностей перебування системи у різних станах;

- найбільші зміни фінальних імовірностей перебування системи у різних станах відбуваються при змінах інтенсивностей потоків надходження замовлень та їх обробки;

- при змінах будь яких інтенсивностей потоків в системі значення фінальних імовірностей перебування системи у станах з відмовами: P_{01_0} ; P_{11_0} ; P_{02_0} ; P_{11_1} , мають малі значення і знаходяться в межах від 0.00008 до 0,034.

3.7 Висновки до третього розділу

Запропоновано моделі систем масового обслуговування для дослідження функціонування та оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА.

Вдосконалення моделей полягає у врахування можливості відмов внаслідок фізичних причин та кібератак, параметрів процесів відновлення та профілактичного обслуговування БПЛА, що дозволяє підвищити точність оцінювання часткових/окремих показників гарантоздатності, обґрунтувати склад СОМС БПЛА і комплекс засобів для забезпечення гарантоздатності надання сервісів з урахуванням можливих відмов БПЛА.

Описано приклад використання запропонованих моделей для дослідження функційної надійності сервісу з урахуванням відмов БПЛА на їх обслуговування в процесі обслуговування потоку замовлень. Показано, 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, що дозволяє визначати необхідну кількість та продуктивність БПЛА, що формують апарати обслуговування, а також чисельність підсистеми їх обслуговування.

Основні наукові результати, що наведені в першому розділі, опубліковано в роботах автора [8, 12, 15, 37], зазначених в анотації.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

4.1 Маршрутоорієнтовні моделі оцінки функційної надійності СОМС БПЛА

4.1.1 Маршрутоорієнтовні моделі оцінки функційної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів без деградації та обслуговування

Класифікація маршрутоорієнтовних моделей оцінки функційної надійності СОМС БПЛА, які враховують різні сценарії маршрутизації з використанням як основних БПЛА (англ. Main Drone, MD) так і резервних БПЛА (англ. Redundant Drone, RD) без врахування необхідності їх обслуговування та деградації представлена на рисунку 4.1. Дані моделі відносяться до моделей оцінки функційної надійності точкового покриття цільової області і дозволяють врахувати кількість БПЛА, що виконують завдання, їх надійність, особливості виконання завдань покриття, а саме:

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

Моделі описуються кортежем:

$$\{S(n[m],r)\} \quad (4.1)$$

де n — кількість маршрутів (дорівнює кількості основних БПЛА);

m – кількість ділянок на маршруті;

r – кількість резервних БПЛА.

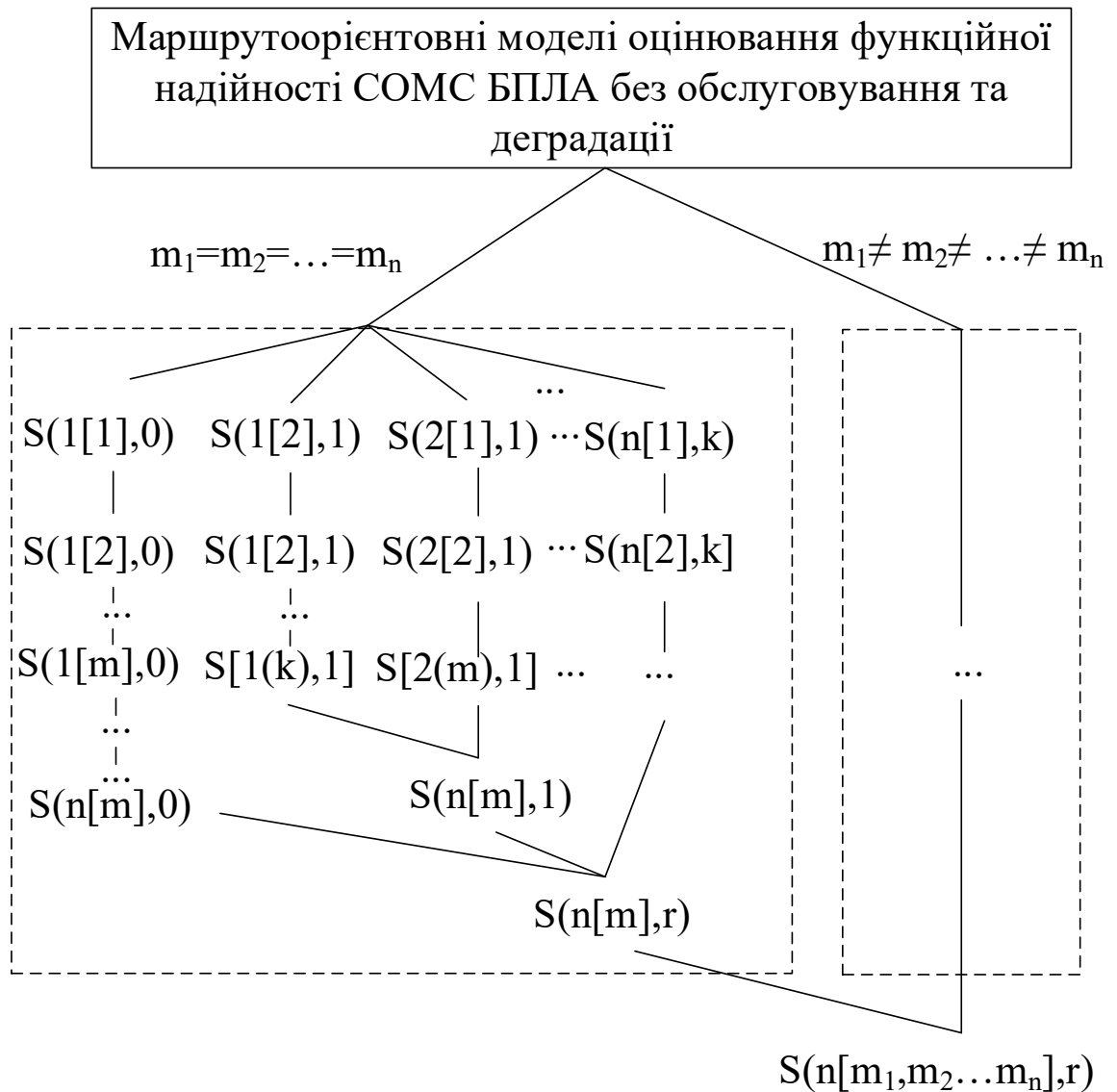


Рисунок 4.1 – Класифікація маршрутоорієнтовних моделей оцінювання функційної надійності СОМС БПЛА без обслуговування та деградації

4.1.1.1 Розроблення маршрутоорієнтовних моделей оцінки функційної надійності СОМС БПЛА без обслуговування та деградації

Використання СОМС БПЛА для виконання завдань покриття цільової області, до яких можна віднести різноманітні завдання моніторингу, має певні особливості [206, 207]:

- умови навколишнього середовища можуть відрізнятися від нормальних умов використання БПЛА (дим, висока температура, радіація);

- зовнішні умови можуть залежати від особливостей ділянки маршруту БПЛА;

- показники надійності БПЛА можуть погіршуватися, як через фізичне старіння, так і через негативний вплив зовнішнього середовища;

- комерційні БПЛА часто використовуються як складові частини систем моніторингу без повного дотримання вимог до їх надійності.

Тому при застосування СОМС БПЛА для ви необхідно забезпечити необхідний рівень її надійності, враховуючи перелічені вище особливості, можливість відмов БПЛА, характеристики цільової області (кількість маршрутів, ділянок маршрутів) та інші параметри.

При використанні БПЛА у складі СОМС необхідно:

- забезпечити максимальну ефективність проведення моніторингу АЕС з наявними ресурсами;

- визначити мінімальні ресурси для забезпечення необхідної функційної надійності виконання місії.

У випадку ресурсами є кількість БПЛА, а показником є ймовірність успішного виконання плану польоту (англ. Successful Fulfillment of Plan, SFP) – PSFP для покриття цільової області.

При розробці моделей враховується, що на попередньому етапі здійснено розбиття цільової області, визначено чисельність основних БПЛА для забезпечення виконання функційних вимог з урахуванням обмежень, наприклад, необхідного часу для збору даних з вимірювальних станцій, які розміщені в цільовій області. Через можливість відмов основних БПЛА необхідно у складі СОМС мати резервні БПЛА, які забезпечать виконання завдання при відмові основних.

Можуть використовуватись два варіанти розгортання резервних БПЛА:

- розміщення разом з основними БПЛА;
- розміщення на майданчику, яке розташоване окремо від майданчику для основних БПЛА.

Загальна модель СОМС БПЛА, що використовується для виконання завдань обльоту цільових точок – вимірювальних станцій, показана на рисунку 4.2, де:

- $MS_{i_{k_i}}$ це k -та вимірювальна станція, яка розташована на i -му маршруті ($i = 1 \dots n$, $k_i = 1 \dots m$);

- $L_{i_{(f_i-1),f_i}}$ це довжина ділянки i -го маршруту від вимірювальної станції $MS_{i_{f_i-1}}$ до вимірювальної станції $MS_{i_{f_i}}$. Наприклад, $L_{i_{0,1}}$ – ділянка i -го маршруту від майданчика розміщення БПЛА до вимірювальної станції MS_{i_1} , а $L_{i_{1,2}}$ – довжина ділянки маршруту від MS_{i_1} до MS_{i_2} .

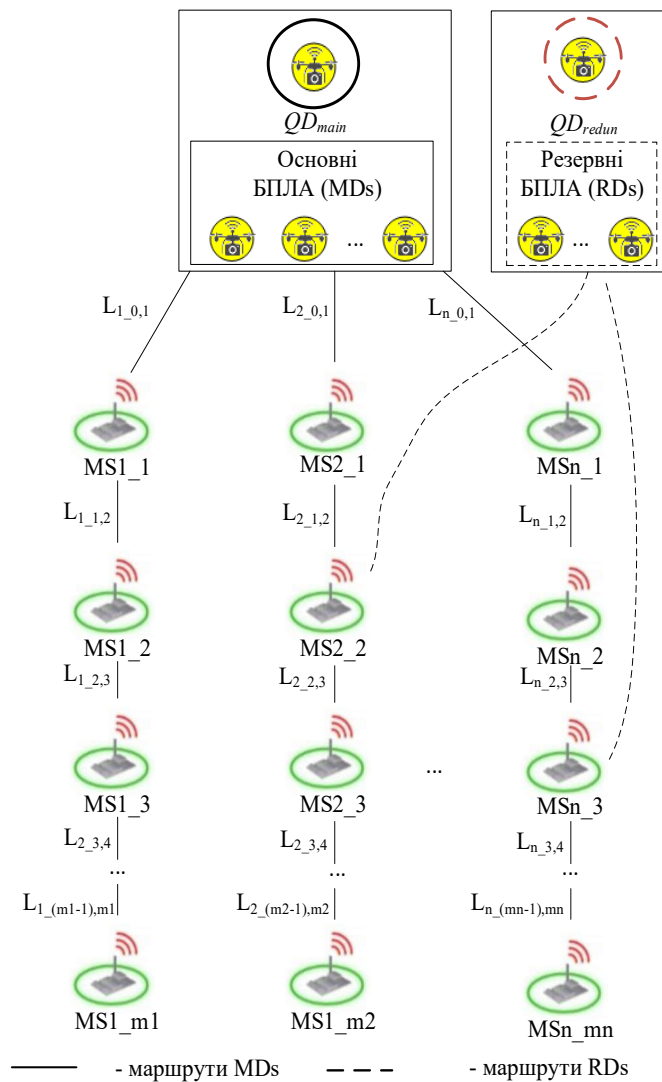


Рисунок 4.2 – Загальна модель СОМС БПЛА, що використовується для виконання завдань обльоту цільових точок

Модель S(2[2],1)

Модель, що описує використання 2 основних та 1 резервного БПЛА для обльоту 2 маршрутів з 2 вимірювальними станціями на кожному, показана на рисунку 4.3.

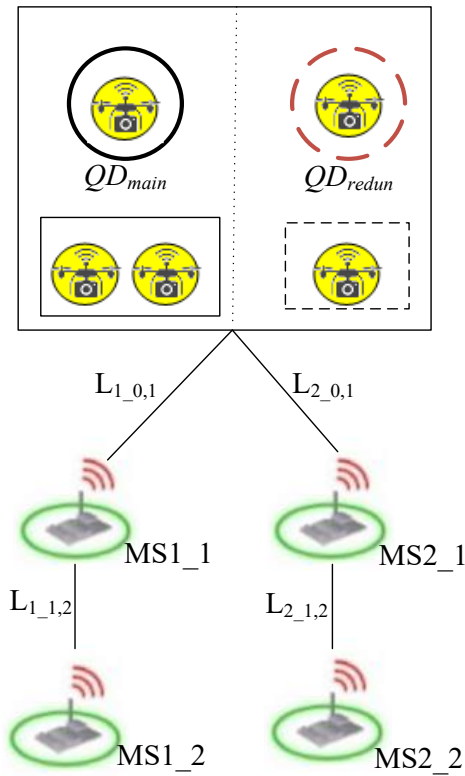


Рисунок 4.3 – Графічне представлення моделі S(2[2],1)

Позначимо через P_{MD} і P_{RD} імовірність безвідмовної роботи основних та резервних БПЛА відповідно і використаємо припущення, що $L_{1,0,1}=L_{1,1,2}=L_{2,0,1}=L_{2,1,2}$; $P_{RD}=1$.

У цьому випадку ймовірність успішного виконання плану польоту визначається як:

$$P_{SPF(S(2[2],1))} = \left(P_{MD}^2 + 2P_{MD}(1 - P_{MD})P_{MD} \right) P_{MD}^2 + P_{MD}^2 2P_{MD}(1 - P_{MD})P_{MD}^2 = 3P_{MD}^4 - 2P_{MD}^6. \quad (4.2)$$

Якщо БПЛА має повертається на майданчик, ймовірність успішного виконання плану польоту визначається як:

$$P_{SPF}(S(2[2],1)) = (P_{MD}^2 + 2P_{MD}(1 - P_{MD})P_{MD})P_{MD}^2 + P_{MD}^2 P_{MD}(1 - P_{MD})P_{MD}^2 P_{ret}^2 = (3P_{MD}^4 - 2P_{MD}^6)P_{ret}^2, \quad (4.3)$$

де P_{ret} – ймовірність успішного повернення БПЛА на .

для $P_{MD} = P_{ret} = 0.9$ імовірність успішного виконання плану польоту дорівнює: $P_{SPF}(S(2[2],1)) = 0.9054$.

Якщо резервні БПЛА розгортаються окремо від основних БПЛА та $P_{RD} < 1$, ймовірність успішного виконання плану польоту визначається як:

$$P_{SPF}(S(2[2],1)) = (P_{MD}^2 + 2P_{MD}(1 - P_{MD})P_{MD}P_{RD}) \times P_{MD}^2 + P_{MD}^2 2P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD}P_{MD}^2 = P_{MD}^4 (3 - 2P_{MD}^2 P_{RD}). \quad (4.4)$$

Модель S (2[2],2)

Модель, що описує використання 2 основних і 2 резервних БПЛА для польотів по 2 маршрутах з 2 вимірювальним станціями в кожному, показана на рисунку 4.4.

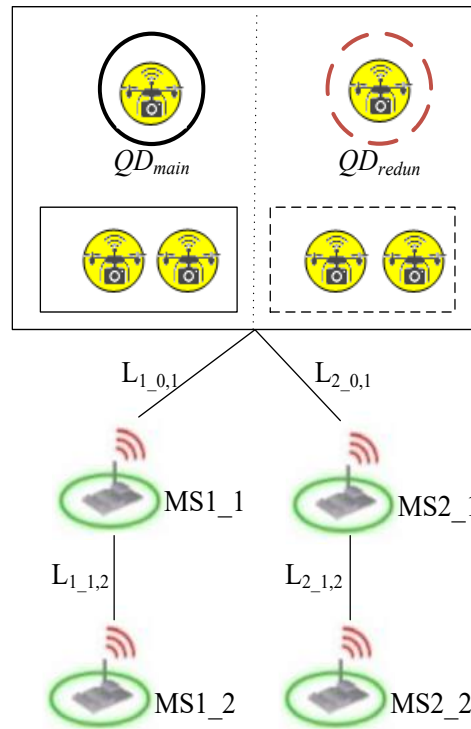


Рисунок 4.4 – Графічне представлення моделі $S(2[2],2)$

При допущенні, що, ймовірність успішного виконання плану польоту визначається як:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{SPF}}(S(2[2],2) &= P_{\text{MD}}^4 + 2P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{MD}}P_{\text{MD}}^2 + \\
 &+ P_{\text{MD}}^2P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{MD}}P_{\text{MD}} + \\
 &+ 2P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{MD}}P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{MD}}^2 = \\
 &= P_{\text{MD}}^4 + 2P_{\text{MD}}^4(1 - P_{\text{MD}}) + 2P_{\text{MD}}^5(1 - P_{\text{MD}}) + 2P_{\text{MD}}^5(1 - P_{\text{MD}})^2 = \\
 &= P_{\text{MD}}^4(1 + 2(1 - P_{\text{MD}})(1 + P_{\text{MD}} + P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}}))).
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Якщо $P_{\text{RD}} < 1$, ймовірність успішного виконання плану польоту визначається як:

$$\begin{aligned}
P_{\text{SPF}}(S(2[2],2)) &= P_{\text{MD}}^4 + 2P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{MD}}P_{\text{MD}}^2P_{\text{RD}} + \\
&\quad + P_{\text{MD}}^2 2P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{MD}}P_{\text{MD}}P_{\text{RD}} + \\
&\quad + 2P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{MD}}P_{\text{MD}}(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{MD}}^2P_{\text{RD}}^2 = \\
&= P_{\text{MD}}^4 + 2P_{\text{MD}}^4(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{RD}} + 2P_{\text{MD}}^5(1 - P_{\text{MD}})P_{\text{RD}} + \\
&\quad + 2P_{\text{MD}}^5(1 - P_{\text{MD}})^2P_{\text{RD}}^2 = \\
&= P_{\text{MD}}^4(1 + 2P_{\text{RD}}(1 - P_{\text{MD}})(1 + P_{\text{MD}} + P_{\text{MD}}P_{\text{RD}}(1 - P_{\text{MD}}))).
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Модель $S(n[m],2)$

Імовірність успішного виконання плану польоту для узагальненої моделі використання n основних та одного резервного БПЛА для обльоту n маршрутів із m вимірювальних станцій на кожному при $P_{\text{RD}} = 1$ визначається за формулою:

$$P_{\text{SPF}}(S(n[m],1)) = P_{\text{MD}}^{nm} + nP_{\text{MD}}^{(n-1)m}P_{\text{MD}}^{(m-1)}(1 - P_{\text{MD}}). \tag{4.7}$$

Модель $S(2(m1,m2),1)$

Модель, що описує використання 2 основних та 1 резервний БПЛА для обльоту 2 маршрутів з $m1$ та $m2$ вимірювальних станцій ($m1 \neq m2$) у першому та другому маршрутах відповідно, показана на рисунку 4.5.

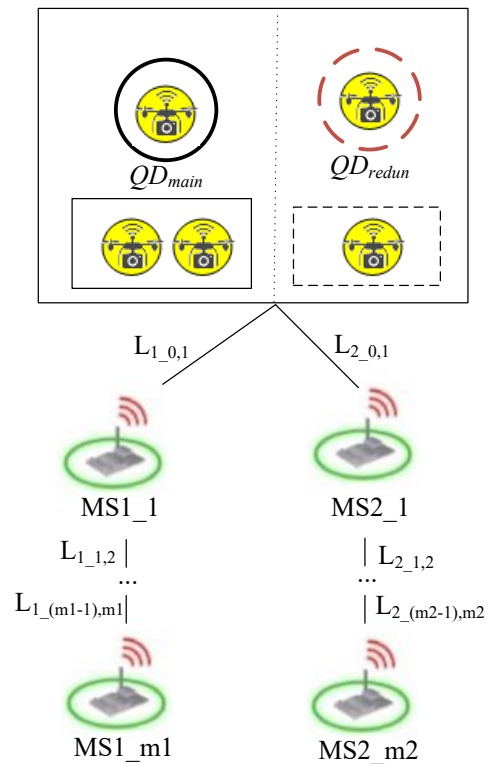


Рисунок 4.5 – Графічне представлення моделі $S(2[m_1, m_2], 1)$

Імовірність успішного виконання плану польоту для даної моделі при $P_{RD} = 1$ визначається за формулою:

$$P_{SPF}(2[m_1, m_2], 1) = P_{SPF}(2[m_1], 1) + p_{MD}^{2m_1} + p_{MD}^{2m_1} \left(p_{MD}^{(m_2 - m_1)} + (m_2 - m_1)(1 - p_{MD}) p_{MD}^{m_2} \right). \quad (4.8)$$

4.1.1.2 Дослідження маршрутоорієнтованих моделей оцінювання функціональної надійності $S(1[4], 1)$, $S(2[2], 1)$ та $S(2[2], 2)$

При проведенні дослідження розглядається СОМС БПЛА, що виконати завдання відвідування для збирання даних 4-х вимірювальних станцій, для збору інформації. Для виконання завдань розглядаються варіанти, які описуються наступними моделями:

- $S(2[2], 1)$ (рисунок 4.3);

- S (2[2],2) (рисунок 4.4);
- S(1[4],1) (рисунок 4.6).

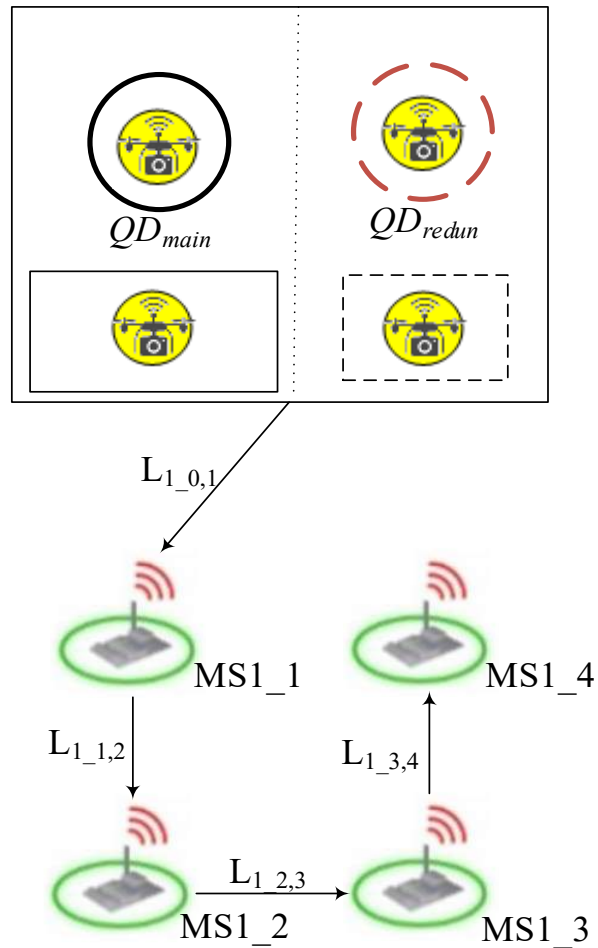


Рисунок 4.6 – Графічне представлення моделі S(1[4],1)

Допущення та вихідні дані, які використовувались при розрахунках:
 $L_{1,0,1}=L_{1,1,2}=L_{2,0,1}=L_{2,1,2}$; $P_{MD} = 0.9$ і $P_{RD} = 1$.

Результати розрахунків імовірності успішного виконання плану польоту з використанням різних варіантів виконання завдання, які описуються моделями S(1[4],1, S(2[2],1) та S (2[2],2), представлені на рисунку 4.7.

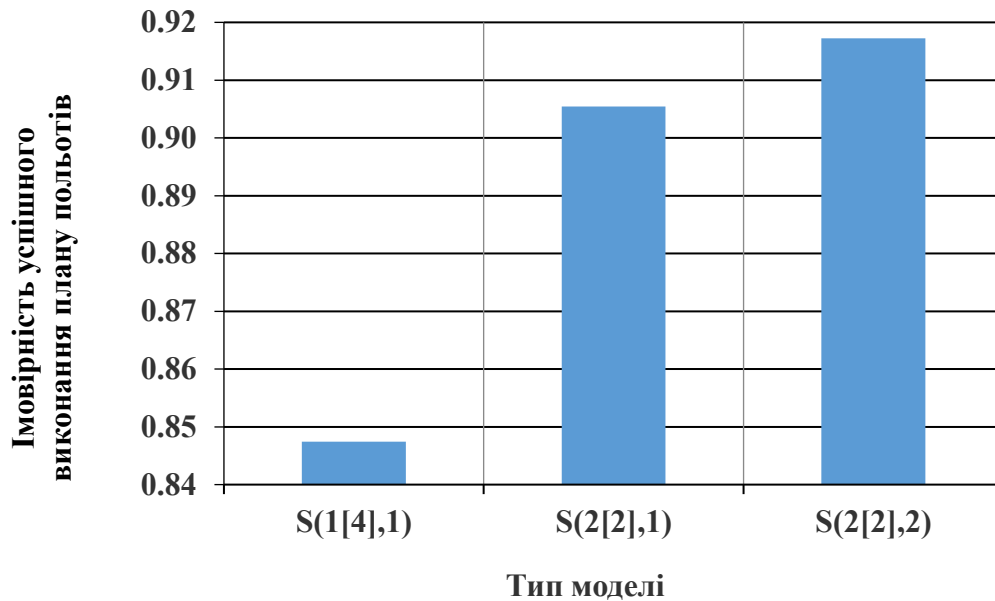


Рисунок 4.7 – Значення імовірності виконання плану польоту при використанні різних варіантів виконання завдань, які описуються моделями S(1[4],1), S(2[2],1), S(2[2],2)

Аналіз отриманих результатів показує, що серед варіантів виконання завдань, найбільше значення імовірності успішного виконання забезпечує варіант, описується моделлю S(2[2],2). Також використанням підходу до визначення функційної надійності дозволяє обирати варіант виконання завдання, який забезпечує виконання встановлених вимог до функційної надійності. Наприклад, якщо необхідно забезпечити імовірність успішного виконання плану не нижче ніж 0,9 варіант, що описується моделлю S(2[2],1), забезпечує це з меншими витрата Відповідно до цієї моделі кількість ресурсів: загальна кількість БПЛА, яка використовується менше ніж для варіанта з моделлю S(2[2],2) - три БПЛА замість чотирьох.

4.1.2 Маршрутоорієнтовні моделі оцінки функційної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів з деградацією та обслуговуванням

4.1.2.1 Розроблення маршрутоорієнтовних моделей оцінки функційної надійності СОМС БПЛА з обслуговуванням та деградацією

Представлення БПЛА, як об'єкта, що може деградувати, і який може входити до складу холонів СОМС, як елемент, відмова якого може не приводити по припинення виконання завдань (див. п.п. 3.5.1), дозволяє розглядати ситуації коли під час виконання завдань відбувається неповне виконання всіх вимог, які висуваються до завдання, і/або відбувається погіршення якості їх виконання. В такому разі можна розглядати випадки деградації якості виконання завдань СОМС БПЛА. Кількість рівнів деградації завдань визначається кількістю різноманітних параметрів, які можуть деградувати.

Деградація якості виконання завдань СОМС БПЛА може бути полягати у:

- неповному покритті цільової області (наприклад, невиконання польотів по окремих маршрутах з усього плану, або невідвідування окремих цільових точок на маршрутах). Також можуть бути ситуації, коли цільові точки (райони) при цьому можуть мати як однаковий, так і різний ступінь важливості (ваги);
- неповному виконанні всіх функцій (наприклад, автономний збір даних при неможливості одночасного передавання їх в інформаційний центр).
- неповному виконанні функцій обслуговування БПЛА (неповне відновлення) і т.п.

При цьому час виконання завдань з використанням БПЛА обмежений ємністю їх бортових батарей і, у випадках, коли тривалість завдання перевищує максимальний час польоту БПЛА необхідно розгортання АОЗС для

проведення обслуговування БПЛА, яке полягає у заміні або заряджанні бортових батарей.

Фасетна класифікація варіантів СОМС при виконанні завдань з деградацією їх якості, що враховує різноманітність складу СОМС БПЛА, обслуговування та деградацію параметрів наведена на рисунку 4.8.

Тип сервісу БПЛА	Наявність резерва	Наявність підсистеми обслуговування	Структура СОМС БПЛА	Параметри, що деградують	
З одним БПЛА	З резервними БПЛА	з АОЗС	гомогенна	кількість маршрутів	з урахування ваги параметрів
Група БПЛА	без резервних БПЛА	Без АОЗС	гетерогенна	кількість цільових точок на маршруті	без урахування ваги параметрів
				кількість функцій, що виконуються	
				кількість АОЗС, що використовуються	

Рисунок 4.8 – Фасетна класифікація варіантів СОМС БПЛА при виконанні завдань з деградацією їх якості

Класифікація враховує різні аспекти розгортання і складові СОМС, а саме використання:

- однотипних і різнотипних БПЛА;
- резервних БПЛА;
- АОЗС, необхідних для тривалого функціонування СОМС БПЛА;
- різних параметри якості виконання завдань, які можуть деградувати.

Також слід враховувати, що різні параметри якості виконання можуть мати різну вагу (важливість) при оцінці.

Для врахування деградації якості виконання завдань розроблено множину моделей для оцінки функційної надійності СОМС на основі БПЛА з урахуванням різних параметрів.

Для опису запропонованих моделей використовується кортеж даних виду:

$$\{S(n[m], r, b, d)\}, \tag{4.9}$$

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 з урахуванням обслуговування БПЛА та деградації якості виконання завдань приведена на рисунку 4.9.

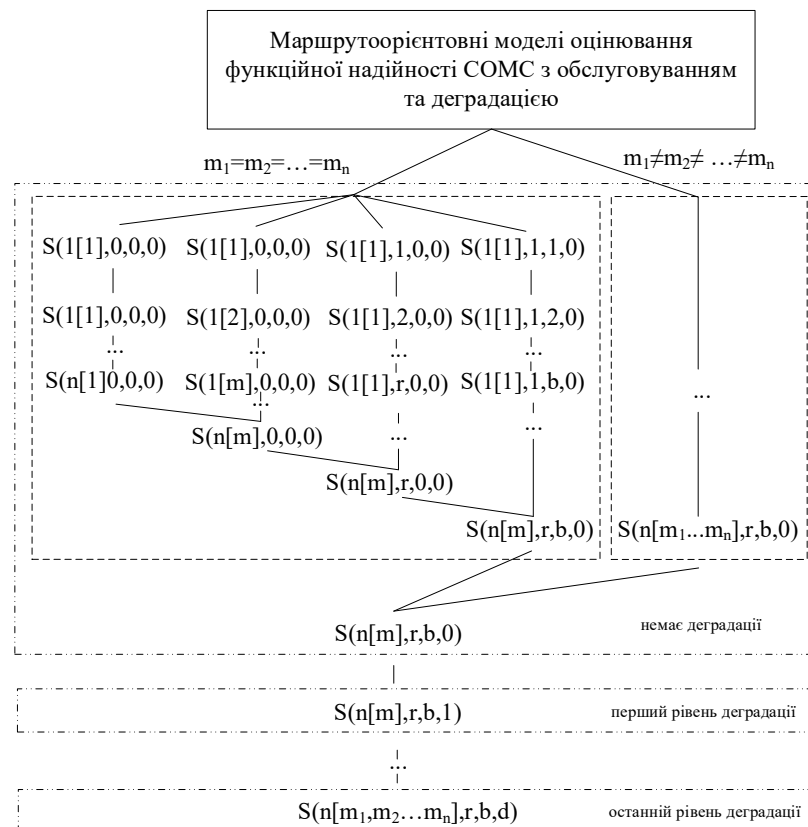


Рисунок 4.9 – Класифікація моделей оцінювання функційної надійності СОМС з урахуванням обслуговування БПЛА та деградації якості виконання завдань

Розглянемо приклад використання СОМС з обслуговуванням БПЛА. Припустимо, що при виконанні завдання СОМС БПЛА передбачено розподіл цільових точок, якими є вимірювальні станції (MS), на групи та виділення окремих роїв БПЛА для обльоту відповідної призначеної групи для відвідування всіх MS в її складі.

Загалом флот БПЛА може включати як основні БПЛА (MD), так і резервні (RD). Кожен з RD має вилетіти точки, де MD припинив польот через відмові, і продовжити виконання завдання замість нього. Необхідно відзначити, що кількість роїв БПЛА дорівнює кількості маршрутів польоту.

Для тривалого періодичного виконання завдання необхідно періодично заряджати бортові батареї БПЛА або на площадці розміщення БПЛА (QD), або на допомогою АОЗС, які розміщені у визначених місцях.

Відповідно до першого варіанту, кожен БПЛА, після відвідування всіх цільових точок (MS) на маршруті повертається до площадки розміщення, де бортовий акумулятор заряджається або замінюється на заряджений, і повторює політ по маршруту. Графічний опис виконання СОМС БПЛА завдання з обльоту цільових точок з підзарядкою акумуляторів на площадці розміщення показана на рисунку 4.10 де:

- $MS_{i_k_i} \in MS$ k групи MS і де $i = 1, \dots, n$, $f_i = 1, \dots, m_i$;

- $L_{i_{(f_i-1), f_i}}$ довжина ділянки маршруту від точки (f_{i-1}) до точки f_i .

Наприклад, $L_{i_{0,1}}$ – ділянка маршруту від площадки розміщення БПЛА групи і до MS_{i_1} , а $L_{i_{1,2}}$ – довжина ділянки маршруту від MS_{i_1} до MS_{i_2} .

Відповідно до другого способу обслуговування бортових батареї, кожен БПЛА, відвідавши всі цільові MS на своєму маршруті, повинен відвідати АОЗС, зарядити або замінити бортовий акумулятор і повторити свій маршрут у зворотному напрямі, починаючи з останньої відвіданої MS. Графічний опис виконання СОМС БПЛА завдання з обльоту цільових точок з підзарядкою акумуляторів на АОЗС показана на рисунку 4.11.

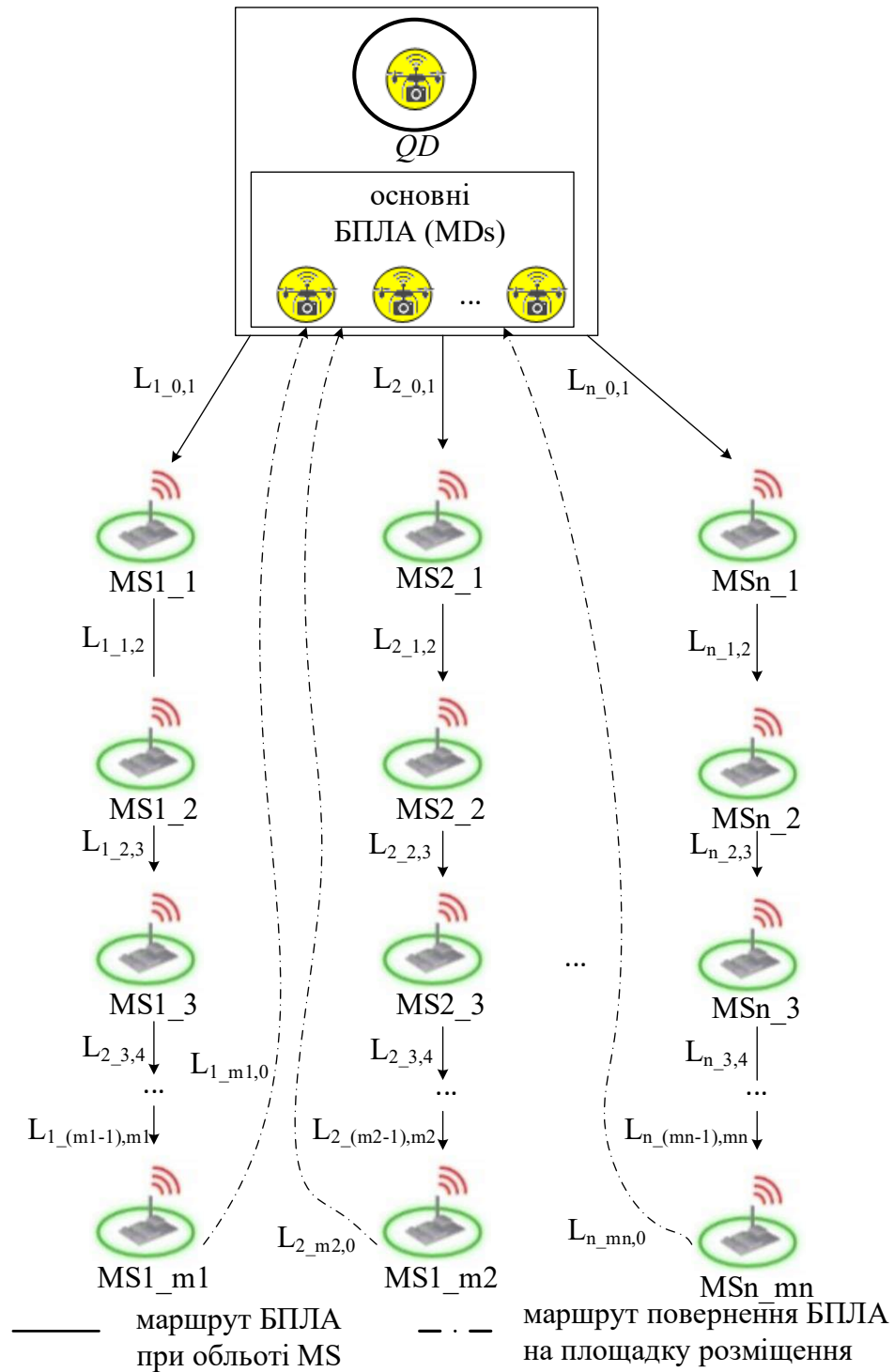


Рисунок 4.10 – Графічне представлення моделі СОМС БПЛА для виконання завдання з обльоту цільових точок з підзарядкою бортових батарей на площадці розміщення

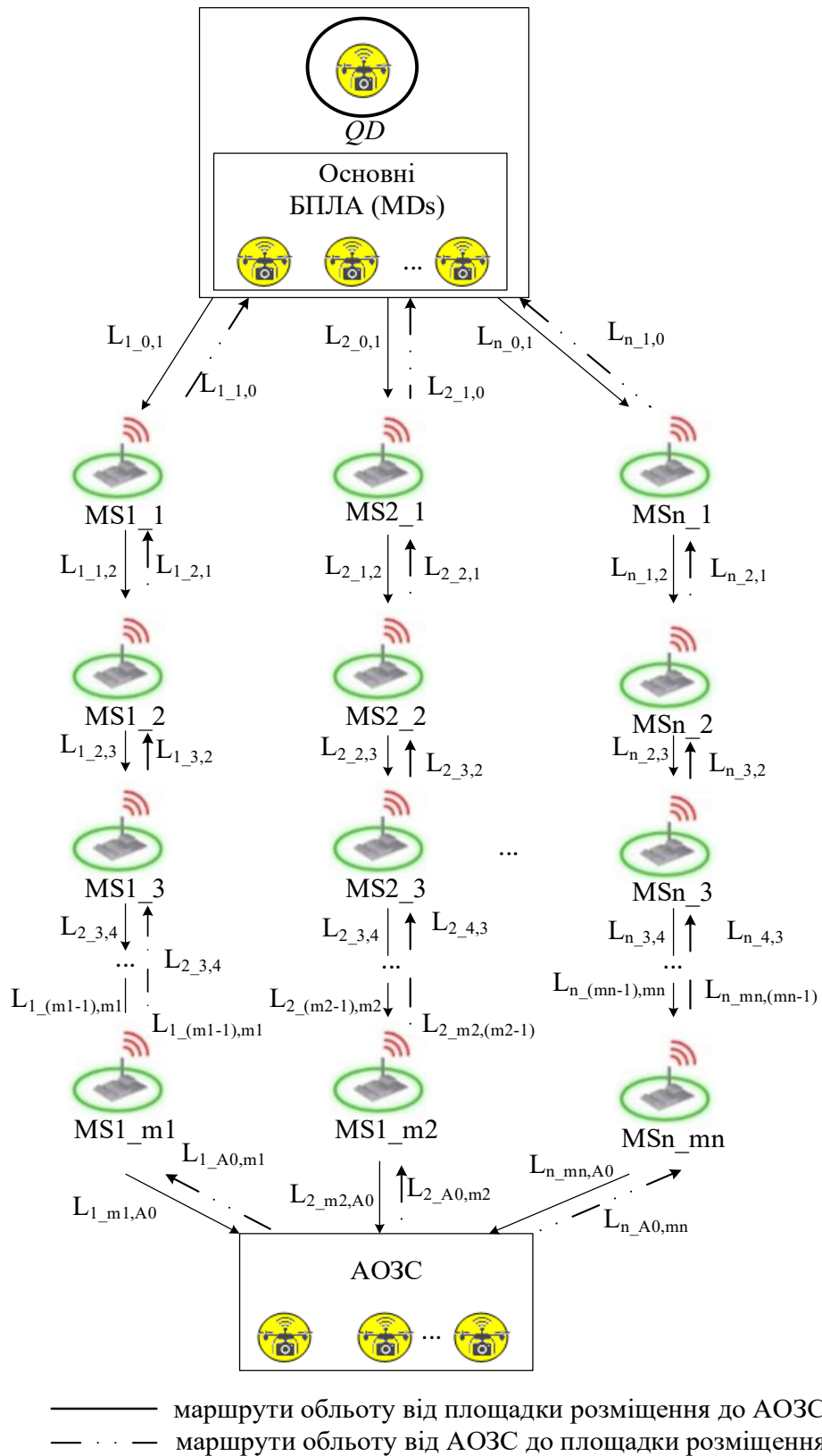


Рисунок 4.11 – Графічне представлення моделі СОМС БПЛА для виконання завдання з обльоту цільових точок з підзарядкою бортових батарей на АОЗС

Для опису моделей оцінки функціональної надійності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів з обслуговуванням використовується кортеж виду $\{S(n[m],r,b)\}$.

При розробці моделей приймаються наступні припущення :

- в моделях не враховується використання резервних БПЛА, але враховуються різні способи руху БПЛА при обльоті цільових точок і заряджати свої батареї.

- при виконання завдання передбачає дворазове відвідування всіх цільових точок.

В якості показник оцінки якості виконання завдання використовується ймовірність успішного виконання плану польоту - P_{SFP} , як імовірність виконання всіх запланованих дій на маршруті польоту.

Модель $S(1[4],0,0)$

Найпростіша модель, що описує використання одного БПЛА для польоту по одному маршруту, який містить чотири цільових точки, показана на рисунку 4.12.

Визначимо P_{MD} як функцію надійності БПЛА на окремій ділянці маршруту; P_{ret} - ймовірність успішного повернення БПЛА на площадку розміщення; P_{QD} - функція надійності обладнання для обслуговування БПЛА на площадці розміщення. Функція надійності є постійною протягом місії.

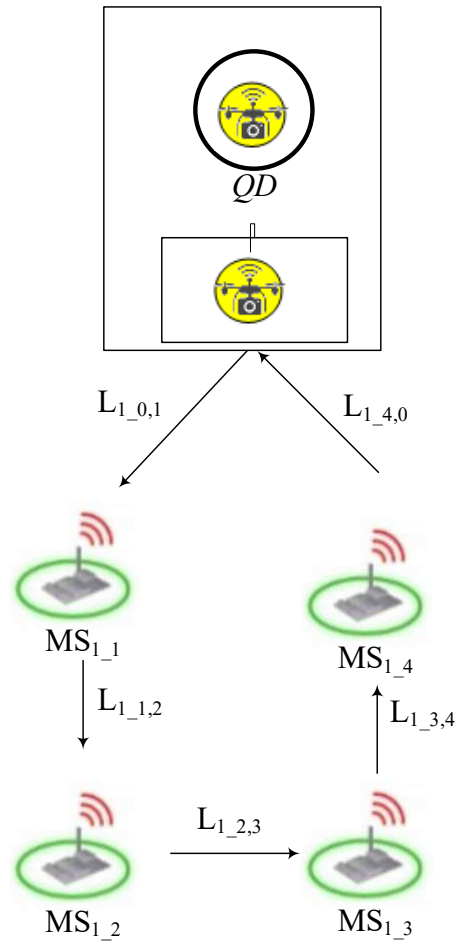


Рисунок 4.12 – Графічне представлення моделі $S(1[4],0,0)$

Припустимо, що $L_{1_0,1} = L_{1_1,2} = L_{2_0,1} = L_{2_1,2}$.

У цьому випадку ймовірність успішного виконання плану об'льоту визначається як:

$$P_{\text{SPF}(S(1[4],0,0))} = (P_{\text{MD}}^4 P_{\text{ret}})^2 P_{\text{QD}}. \quad (4.101)$$

Для $P_{\text{MD}} = P_{\text{ret}} = P_{\text{QD}} = 0.9$ імовірність успішного виконання плану польоту дорівнює $P_{\text{SPF}(S(1[4],0,0))} = 0.314$.

Модель $S(2[2],0,0)$

Модель, що описує використання двох БПЛА для польоту по двох маршрутах з двома цільовими точками в кожному показана на рисунку 4.13.

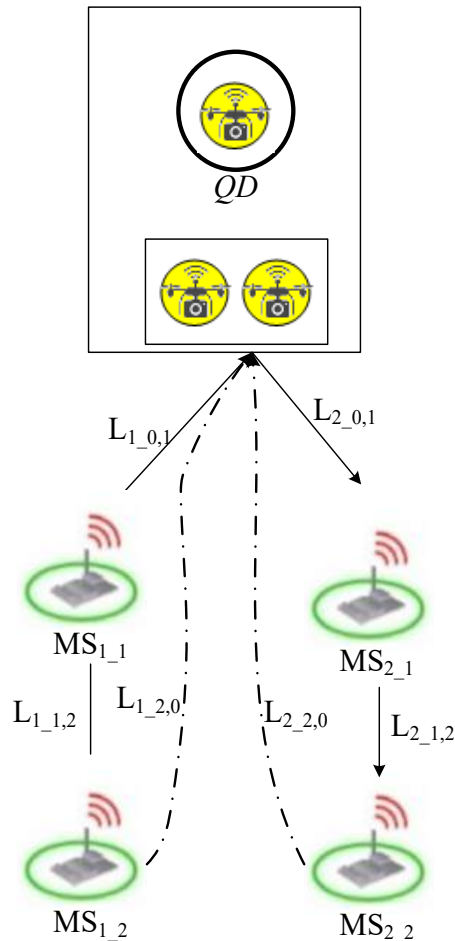


Рисунок 4.13 – Графічне представлення моделі $S(2[2],0,0)$

Припустимо, що $L_{1,0,1} = L_{1,1,2} = L_{2,0,1} = L_{2,1,2}$.

У цьому випадку ймовірність успішного виконання плану польоту визначається як:

$$P_{SPF}(S(2[2],0,0)) = (p_{MD}^2 p_{ret})^4 p_{QD} \quad (4.11)$$

Для $P_{MD} = P_{ret} = P_{QD} = 0.9$ ймовірність успішного виконання плану обльоту дорівнює $P_{SPF}(S(2[2],0,0)) = 0.254$.

Модель $S(2[2],0,1)$

Модель, що описує використання 2 БПЛА для польоту по 2 маршрутах з 2 цільовими точками в кожному і обслуговуванням акумуляторів на АОЗС показано на показана на рисунку 4.14.

Відповідно до цієї моделі, кожен БПЛА, після обльоту цільових точок на маршруті має обслуговувати акумулятор на АОЗС, а у разі відмови АОЗМ має повертатися на площадку розміщення, звідки після обслуговування акумулятора повторити обліт маршрут починаючи від в першої цільової точки.

Ймовірність успішного виконання плану польоту для моделі $S(2[2],0,1)$ визначається як:

$$P_{SPF}(S(2[2],0,1)) = P_{MD}^{12} P_{ABMS} + (P_{MD}^2 P_{ret})^2 P_{QD} (1 - P_{ABMS}), \quad (4.12)$$

де P_{ABMS} є функція надійності АОЗС.

Для $P_{MD} = P_{ret} = P_{QD} = P_{ABRAS} = 0.9$ ймовірність успішного виконання плану обльоту дорівнює $P_{SPF}(S(2[2],0,1)) = 0.302$.

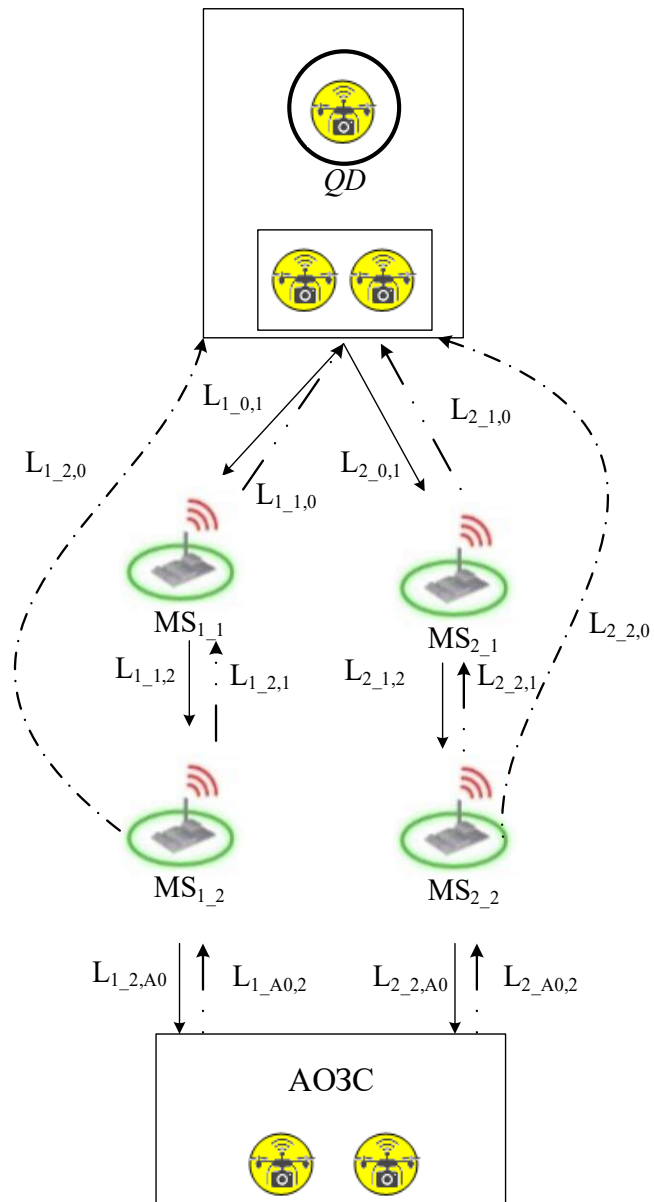


Рисунок 4.14 – Графічне представлення моделі $S(2[2],0,1)$

Модель $S(2[2],0,2)$

Модель, що описує використання 2 БПЛА для польоту по 2 маршрутах з 2 цільовими точками в кожному і використання 2 АОЗС для обслуговуванням акумуляторів показана на рисунку 4.15.

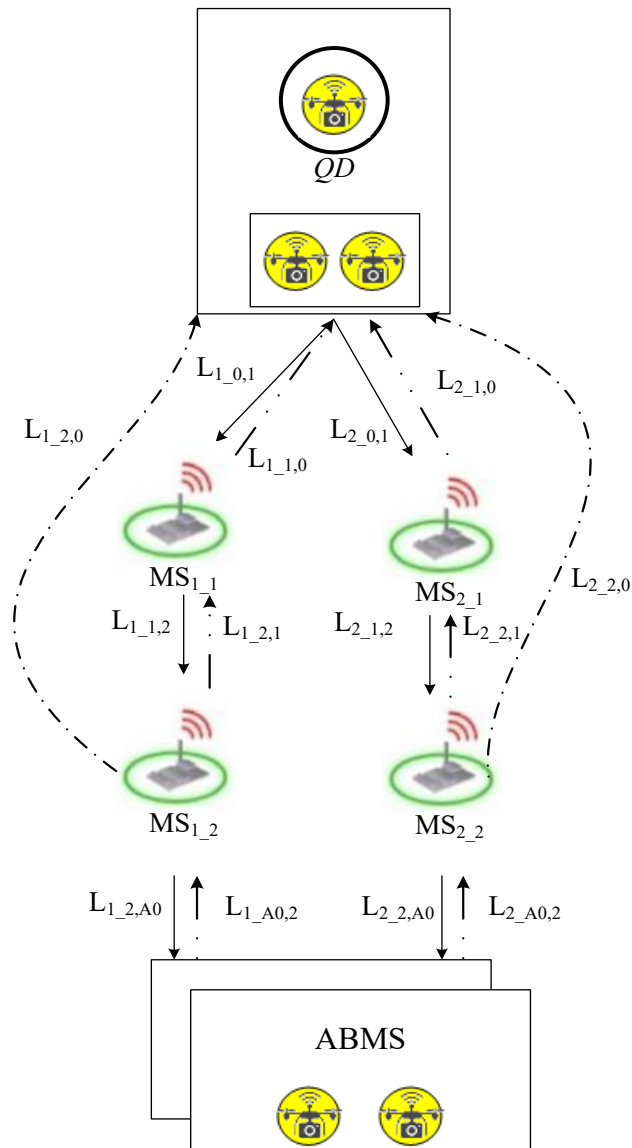


Рисунок 4.15 – Графічне представлення моделі $S(2[2],0,2)$

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

$$P_{SPF}(S(2[2],0,2)) = P_{MD}^{12} P_{ABRAS}^2 + P_{MD}^{12} P_{ABRAS} (1 - P_{ABRAS}) + (P_{MD}^4 P_{ret}^2)^2 P_{QD} (1 - P_{ABRAS})^2. \quad (4.13)$$

Для $P_{MD} = P_{ret} = P_{QD} = P_{ABRAS} = 0.9$ імовірність успішного виконання плану польоту дорівнює $P_{SPF}(S(2[2],0,2)) = 0.327$.

4.1.2.2. Дослідження маршрутоорієнтовних моделей оцінки функціональної надійності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів з обслуговуванням

Нижче наведено результати дослідження імовірності успішного виконання плану польоту (P_{SPF}) СОМС БПЛА при виконання завдання збирання даних з чотирьох вимірювальних станцій для різних варіантів організації виконання, які описуються моделями: $S(1[4],0,0)$, $S(2[2],0,0)$, $S(2[2],0,1)$ та $S(2[2],0,2)$. При проведенні розрахунків використовувались наступні припущення та вихідні дані: $L_{1_0,1} = L_{1_1,2} = L_{2_0,1} = L_{2_1,2}$, $P_{QD} = P_{ABRAS} = P_{ret} = 0.9$, $P_{MD} = [0,5 \dots 1]$. Отримані результати представлені на рисунку 4.16.

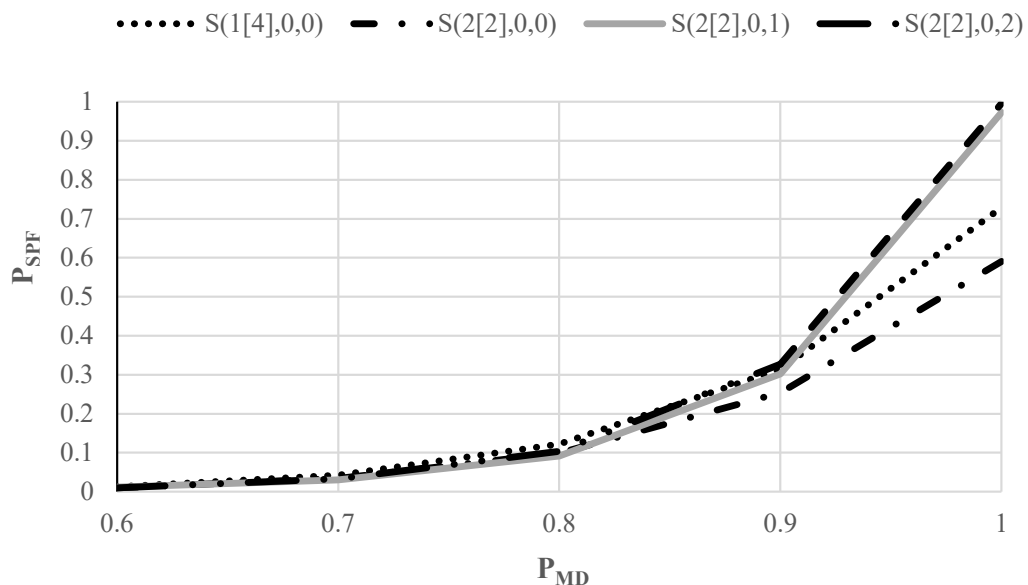


Рисунок 4.16 – Залежність імовірності успішного виконання плану польоту СОМС БПЛА для різних варіантів організації виконання завдань, які описуються моделями: $S(1[4],0,0)$, $S(2[2],0,0)$, $S(2[2],0,1)$ та $S(2[2],0,2)$

Розклад польотів БПЛА для періодичного збирання даних з організацією обслуговування бортових джерел живлення при використанні варіантів, що

описуються моделями: $S(1[4],0,0)$, $S(2[2],0,0)$, $S(2[2],0,1)$, $S(2[2],0,2)$ представлено на рисунку 4.17 де:

- «Fly to MS1(2)_1(2)» - політ по 1(2) маршруту до 1(2) вимірювальної станції ;
- «Data collect MS1(2)_1(2)» - збирання даних на 1(2) маршрутів з 1(2) вимірювальної станції;
- «Fly to ABRAS» - політ до АОЗС;
- «Change battery» - заміна батарей;
- «Return to QD» - повернення на майданчик розміщення.

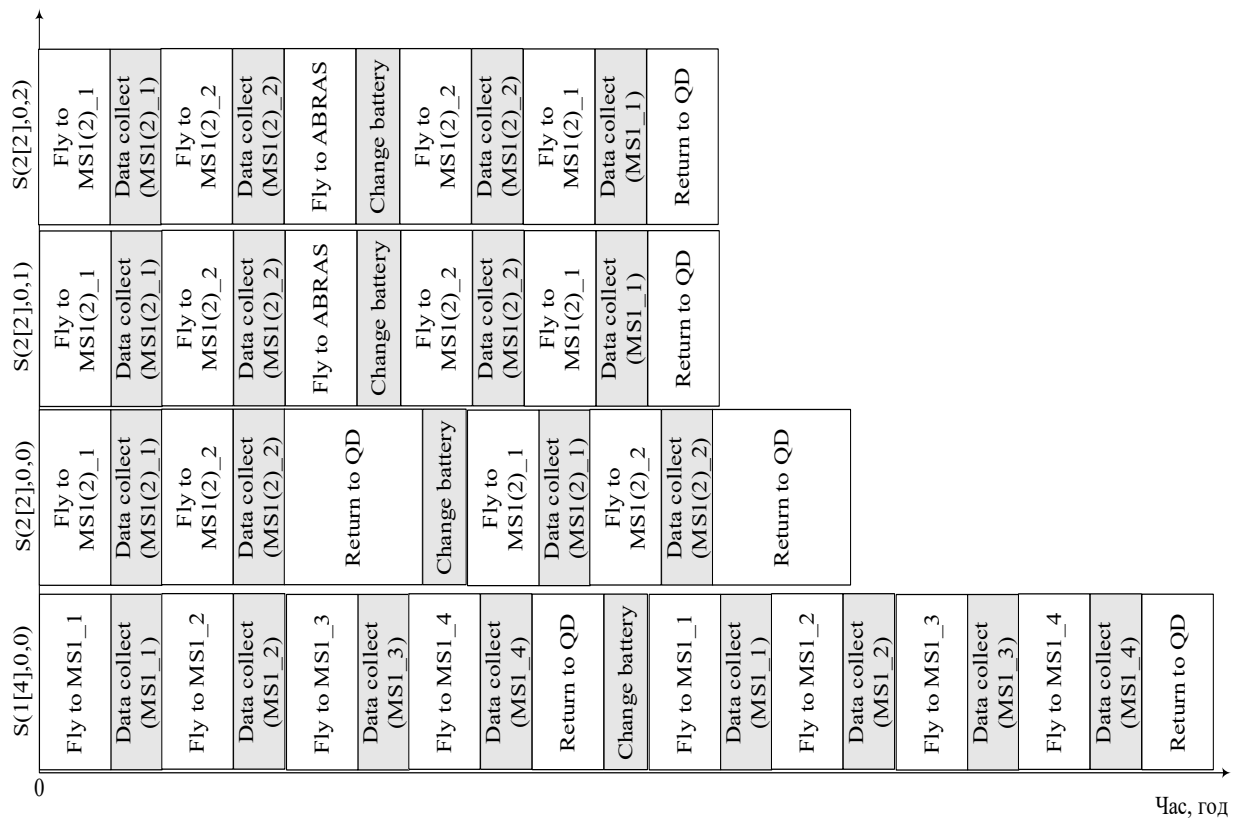


Рисунок 4.17 – Розклад польотів БПЛА для періодичного збирання даних з організацією обслуговування бортових батарей при використанні варіантів, що описуються моделями: $S(1[4],0,0)$, $S(2[2],0,0)$, $S(2[2],0,1)$, $S(2[2],0,2)$

4.2 Моделі оцінювання функціональної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів з деградацією

4.2.1 Модель безпілотного літального апарату з деградацією

Безпілотний літальний апарат 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 (англ. Multi-State Systems, MSS), або системи з деградацією [208, 209]. Опис БПЛА як об'єкта з деградацією може розширити можливості дослідження функціонування БПЛА в складних фізичних та інформаційних умовах.

Розглянемо будову БПЛА мультироторного типу з чотирма двигунами, високорівневу схему якого можна описати кортежем [210]:

$$\text{БПЛА} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Польотний_контролер / Flight_controller;} \\ \text{Барометр / Pressure_sensor;} \\ \text{AHRS;} \\ \text{Радіо_передавач \& приймач;} \\ \text{Контролер_живлення;} \\ \text{Батарея;} \\ \text{Контролер_двигуна}_i (i = 1 \dots q); \\ \text{Двигун}_i (i = 1 \dots q); \\ \text{Навігаційна_система (GPS, CVS);} \\ \text{Корисне_навантаження (M, V, T)} \end{array} \right\}, \quad (4.14)$$

де AHRS – система відліку висоти та курсу (англ. Attitude and Heading Reference Systems);

GPS – глобальна система позиціонування (англ. Global Positioning System);

CVS – система комп'ютерного зору (Computer Vision System);

M – корисне навантаження для проведення вимірювань (наприклад, дозиметр);

V – корисне навантаження для передавання відеоданих (камера);

T – корисне навантаження для передавання даних (WiFi модуль);

q - кількість двигунів БПЛА.

Аналіз робіт, пов'язаних з оцінкою надійності БПЛА та функціонування його компонентів [211], показав, що під час польоту БПЛА можливі відмови окремих компонентів БПЛА, які не призводять до відмови всього БПЛА.

Коли такі компоненти відмовляють, відбувається або зниження функціональності, наприклад збій корисного навантаження, або зниження льотно-технічних характеристик, наприклад, погіршення точності руху по маршруту у разі збою окремих навігаційних систем, або зниження стабільності та швидкості польоту при відмові одного з двигунів.

Таким чином, наступні події можуть лише знизити якість місії, але не призвести до припинення її виконання:

- відмова декількох типів корисного навантаження, коли принаймні один знаходиться в справному стані;
- відмова одного з контролерів двигуна, або відмова одного з двигунів;
- відмова систем навігації: GPS або CVS.

Таким чином, БПЛА як деградуючий об'єкт можна представити як сукупність (рисунок 4.18):

- ключових компонентів, відмови яких призводить до припинення виконання місії/завдання;

- деградуючих компонентів різного роду, відмови яких призводить до зниження характеристик БПЛА і, як наслідок, до погіршення ефективності виконання завдань.

Залежно від комбінації компонентів, що відмовляють можна отримати різні моделі надійності БПЛА з деградацією. У даному дослідженні розглядається тільки відмови корисного навантаження і навігаційних систем.

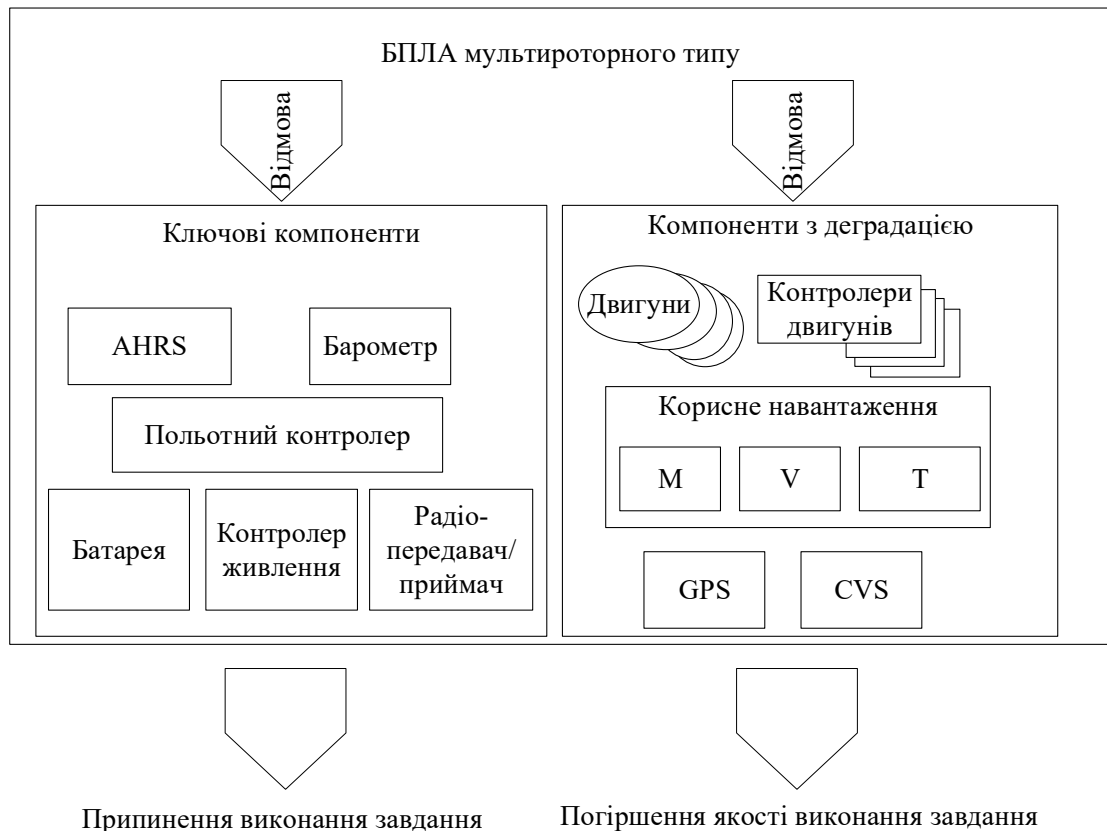


Рисунок 4.18 – БПЛА як набір компонентів двох типів: ключових та деградуючих

Аналітичні моделі надійності отримують за допомогою структурних діаграм надійності. У загальному вигляді модель надійності багатокомпонентного БПЛА описується формулою:

$$P_{MS_UAV} = F(S_C, S_{NS}(GPS, CVSS), S_P(V, M, T)), \quad (4.15)$$

де S_C - стан ключових компонентів (Core-компонентів);

$S_{NS}(GPS, CVS)$ - стан навігаційної системи, визначений станами GPS і CVS;

$S_p(V, M, T)$ - це стани корисного навантаження (стани 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 4.19.

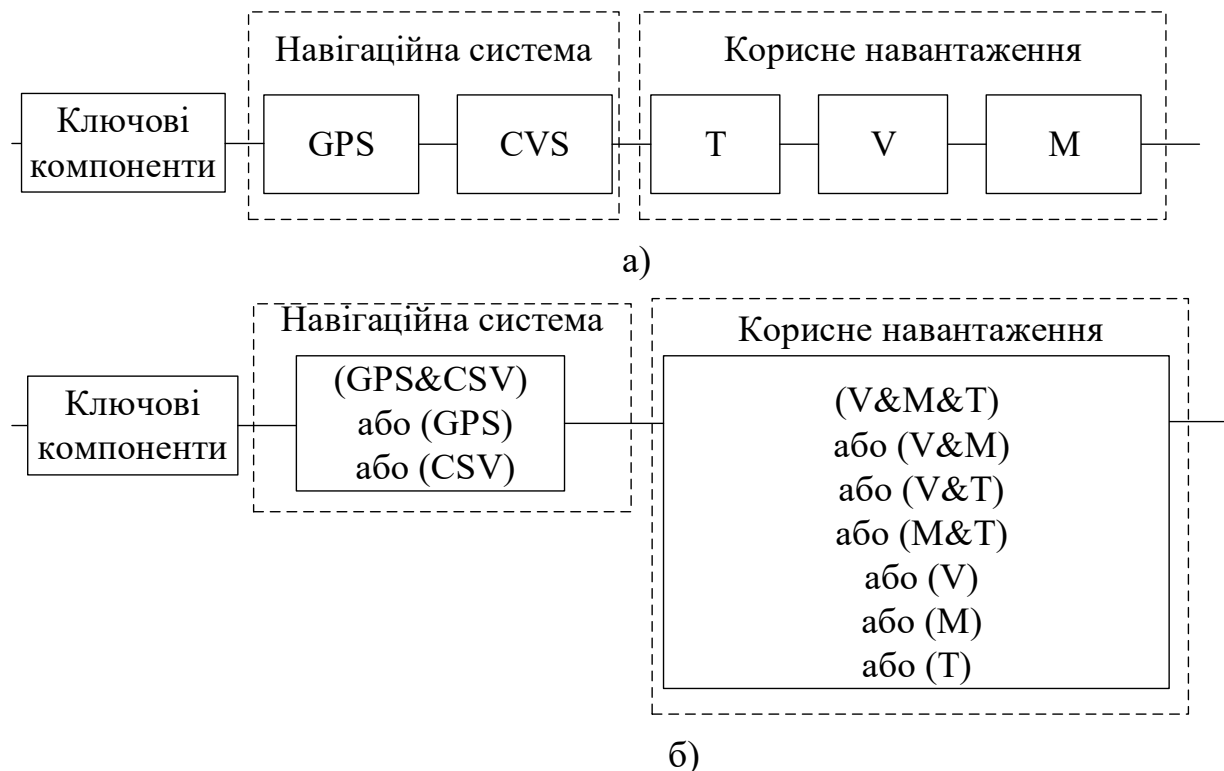


Рисунок 4.19 – Структурні схеми надійності БПЛА:

а) як об'єкта з двома станами б) як об'єкта з деградацією

Графічне пояснення процесу деградації показано на рисунку 4.20 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: $\bar{M}, \bar{V}, \bar{T}$. Через імовірнісну природу виникнення відмов реальні випадки процесів деградації можуть відрізнятися та бути представлені різними діаграмами.

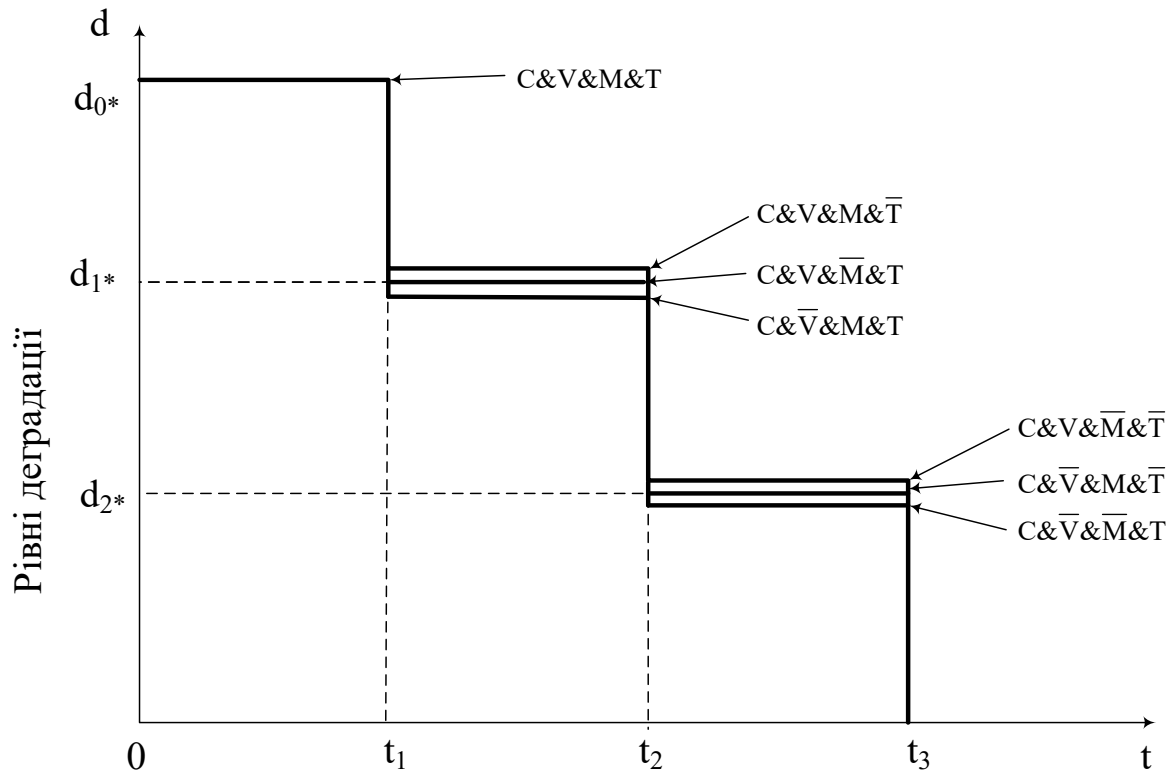


Рисунок 4.20 – Графічне пояснення процесу деградації, що спричинена відмовами корисного навантаження БПЛА

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:

$$\begin{aligned}
P_{d_0^*}^P &= P_C P_M P_V P_T; \\
P_{d_1^*}^P &= P_{d_1^*(M \& V \& \bar{T})}^T + P_{d_1^*(M \& \bar{V} \& T)}^V + P_{d_1^*(\bar{M} \& V \& T)}^M; \\
P_{d_1^*(M \& V \& \bar{T})}^T &= P_C P_M P_V (1 - P_T); \\
P_{d_1^*(M \& \bar{V} \& T)}^V &= P_C P_M (1 - P_V) P_T; \\
P_{d_1^*(\bar{M} \& V \& T)}^M &= P_C (1 - P_M) P_V P_T; \\
P_{d_2^*}^P &= P_{d_2^*(M \& \bar{V} \& \bar{T})}^{V \& \bar{T}} + P_{d_2^*(\bar{M} \& V \& \bar{T})}^{M \& \bar{T}} + P_{d_2^*(\bar{M} \& \bar{V} \& T)}^{M \& \bar{V}}; \\
P_{d_2^*(M \& \bar{V} \& \bar{T})}^{V \& \bar{T}} &= P_C P_M (1 - P_V) (1 - P_T); \\
P_{d_2^*(\bar{M} \& V \& \bar{T})}^{M \& \bar{T}} &= P_C (1 - P_M) P_V (1 - P_T); \\
P_{d_2^*(\bar{M} \& \bar{V} \& T)}^{M \& \bar{V}} &= P_C (1 - P_M) (1 - P_V) P_T,
\end{aligned} \tag{4.16}$$

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);

$P_{d_1^*(M \& V \& \bar{T})}^T$ - імовірність перебування БПЛА у стані відмови корисного навантаження для передавання даних;

$P_{d_1^*(M \& \bar{V} \& T)}^V$ - імовірність перебування БПЛА у стані відмови відеокамери;

$P_{d1*(\overline{M\&V\&T})}^M$ - імовірність перебування БПЛА у стані відмови вимірювального корисного навантаження;

$P_{d2*(\overline{M\&\overline{V}\&\overline{T}})}^{V\&\overline{T}}$ - імовірність перебування БПЛА у стані відмови відеокамери та корисного навантаження для передавання даних;

$P_{d2*(\overline{M\&V\&\overline{T}})}^{M\&\overline{T}}$ - імовірність перебування БПЛА у стані відмови вимірювального корисного навантаження та корисного навантаження для передавання даних;

$P_{d2*(\overline{M\&\overline{V}\&T})}^{M\&\overline{V}}$ - імовірність перебування БПЛА відмови відеокамери та вимірювального корисного навантаження.

Графічне пояснення процесу деградації БПЛА при відмові різних видів навігаційних систем показано на рисунку 4.21. у вигляді однієї з можливих траєкторій деградації, де t_1, t_2 є стохастичні моменти часу, коли виникають відмови різних видів навігаційних систем БПЛА: $\overline{GPS}, \overline{CVS}$.

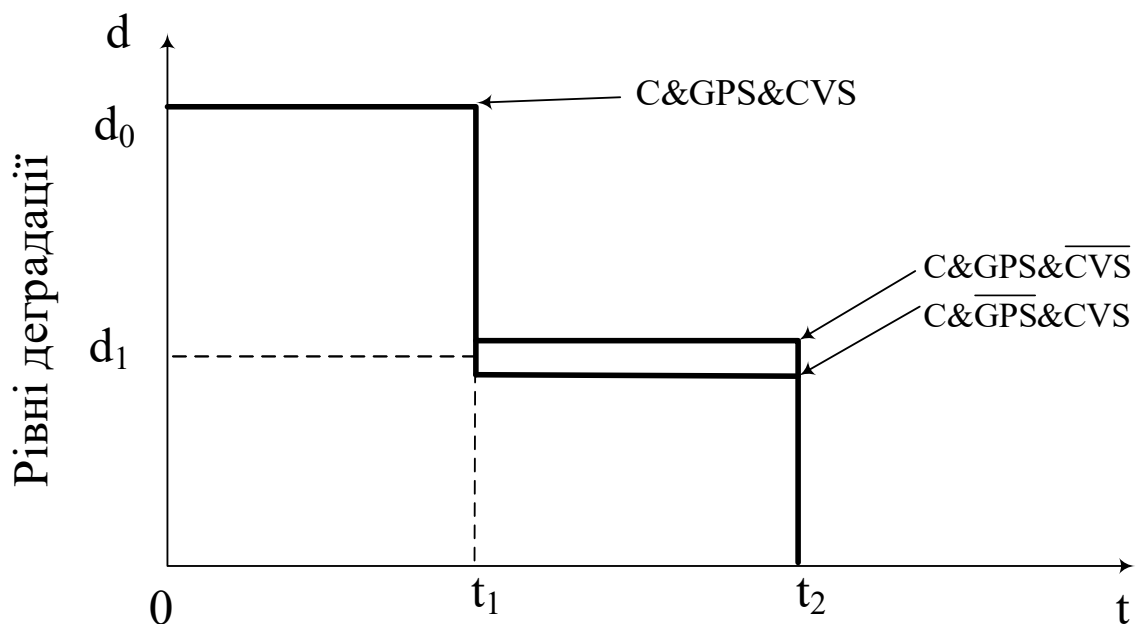


Рисунок 4.21 – Графічне пояснення процесу деградації БПЛА внаслідок відмов різних видів навігаційних систем

Імовірності різних рівнів деградації навігаційних систем; $P_{d_0}^{NS}$, $P_{d_1}^{NS}$; визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}
 P_{d_0}^{NS} &= P_C P_{GPS} P_{CVS}; \\
 P_{d_1}^{NS} &= P_{d_1}^{NS}(\overline{GPS \& CVS}) + P_{d_1}^{NS}(\overline{GPS} \& CVS) = \\
 &= P_C P_{GPS} (1 - P_{CVS}) + P_C (1 - P_{GPS}) P_{CVS},
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

де $P_{d_0}^{NS}$ - ймовірність перебування БПЛА у стані коли основні компоненти та всі види навігаційних систем БПЛА працездатні (рівень деградації - d_0^{**});

$P_{d_1}^{NS}$ - ймовірність перебування БПЛА у стані коли основні компоненти та один з видів навігаційних систем БПЛА працездатні (рівень деградації - d_1^{**});

$P_{d_1}^{NS}(\overline{GPS \& CVS})$ - перебування БПЛА у стані відмови CVS;

$P_{d_1}^{NS}(\overline{GPS} \& CVS)$ - перебування БПЛА у стані відмови GPS.

P_{GPS}, P_{CVS} - ймовірність працездатного стану GPS і CVS відповідно.

Графічне пояснення процесу деградації БПЛА внаслідок відмов корисного навантаження і навігаційних систем показано на рисунку 4.22. у вигляді однієї з можливих траєкторій деградації, де t_1, t_2, t_3, t_4 є стохастичні моменти часу, коли виникають відмови різних видів як корисного навантаження так і навігаційних систем БПЛА: $\overline{M}, \overline{V}, \overline{T}, \overline{GPS}, \overline{CVS}$.

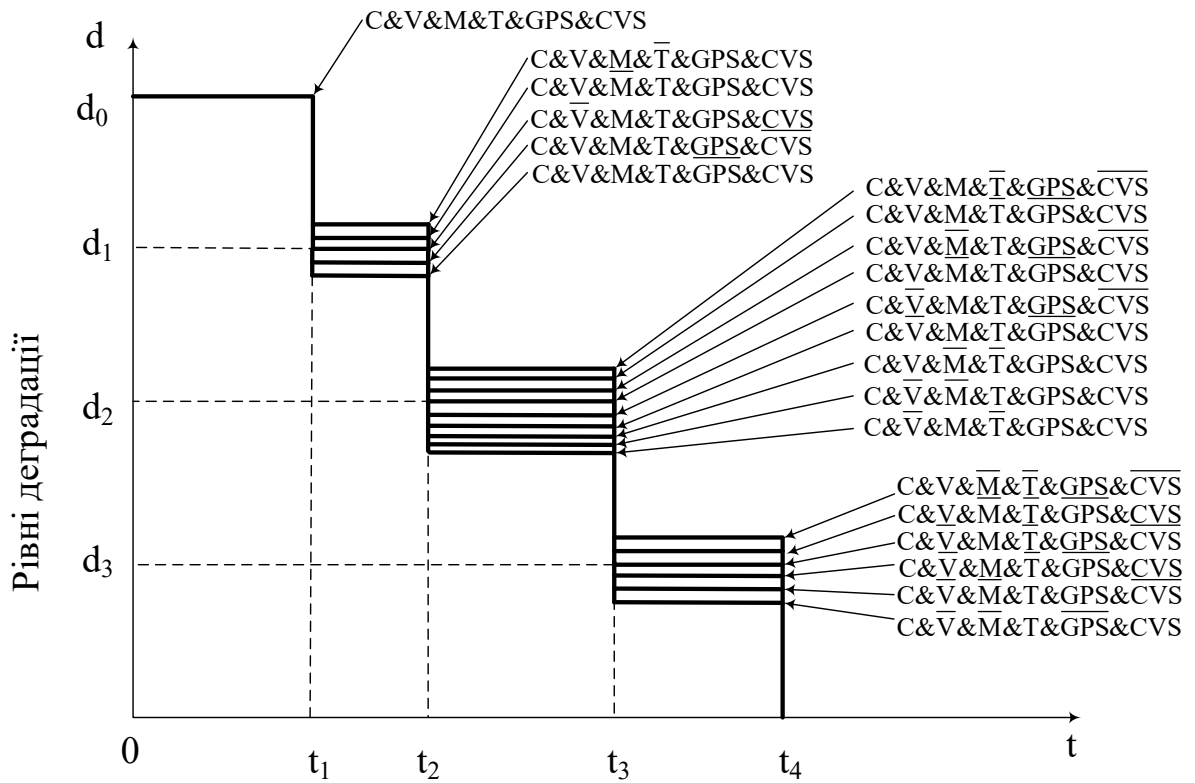


Рисунок 4.22 – Графічне пояснення процесу деградації БПЛА внаслідок відмов як корисного навантаження так і навігаційних систем

Імовірності різних рівнів деградації БПЛА внаслідок відмов корисного навантаження та навігаційних систем: $P_{d_0}, P_{d_1}, P_{d_3}$; визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}
P_{d_0} &= P_C P_M P_V P_T P_{GPS} P_{CVS}; \\
P_{d_1} &= P_C P_M P_V (1 - P_T) P_{GPS} P_{CVS} + \\
&+ P_C P_M (1 - P_V) P_T P_{GPS} P_{CVS} + P_C (1 - P_M) P_V P_T P_{GPS} P_{CVS} + \\
&+ P_C P_M P_V P_T P_{GPS} (1 - P_{CVS}) + P_C P_M P_V P_T (1 - P_{GPS}) P_{CVS}; \\
P_{d_2} &= P_C P_M (1 - P_V) (1 - P_T) P_{GPS} P_{CVS} + \\
&+ P_C (1 - P_M) P_V (1 - P_T) P_{GPS} P_{CVS} + \\
&+ P_C (1 - P_M) (1 - P_V) P_T P_{GPS} P_{CVS} + \\
&+ P_C P_M P_V (1 - P_T) P_{GPS} (1 - P_{CVS}) + \\
&+ P_C P_M (1 - P_V) P_T P_{GPS} (1 - P_{CVS}) + \\
&+ P_C (1 - P_M) P_V P_T P_{GPS} (1 - P_{CVS}) + \\
&+ P_C P_M P_V (1 - P_T) (1 - P_{GPS}) P_{CVS} + \\
&+ P_C P_M (1 - P_V) P_T (1 - P_{GPS}) P_{CVS} + \\
&+ P_C (1 - P_M) P_V P_T (1 - P_{GPS}) P_{CVS}; \\
P_{d_3} &= P_C P_M (1 - P_V) (1 - P_T) P_{GPS} (1 - P_{CVS}) + \\
&+ P_C (1 - P_M) P_V (1 - P_T) P_{GPS} (1 - P_{CVS}) + \\
&+ P_C (1 - P_M) (1 - P_V) P_T P_{GPS} (1 - P_{CVS}) + \\
&+ P_C P_M (1 - P_V) (1 - P_T) (1 - P_{GPS}) P_{CVS} + \\
&+ P_C (1 - P_M) P_V (1 - P_T) (1 - P_{GPS}) P_{CVS} + \\
&+ P_C (1 - P_M) (1 - P_V) P_T (1 - P_{GPS}) P_{CVS},
\end{aligned} \tag{4.18}$$

де P_{d_0} - ймовірність перебування БПЛА у стані коли основні компоненти та всі види корисного навантаження і навігаційних систем БПЛА працездатні (рівень деградації - d_0);

P_{d_1} - ймовірність перебування БПЛА у стані коли основні компоненти та один з видів корисного навантаження або/та навігаційних систем БПЛА відмовили (рівень деградації - d_1);

P_{d_3} - ймовірність перебування БПЛА у стані коли основні компоненти та один з видів корисного навантаження та навігаційних систем БПЛА працездатні (рівень деградації – d_3).

4.2.2 Розроблення моделей оцінювання функціональної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів з деградацією

Під час виконання завдань СОМС можуть виникати нестравності як окремих елементів БПЛА, так і відмови БПЛА, які можуть призводити до деградації якості виконання завдання. При цьому можна розділяти два види деградації:

- функційну, коли погіршується якість реалізації або зменшення кількості функцій, що виконуються;
- просторову, коли зменшується покриття цільової області.

Графічне пояснення ефективності системи з деградацією показано на рисунку 4.23. Для оцінювання якості виконання завдань СОМС БПЛА використовується ймовірність успішного виконання плану польоту.

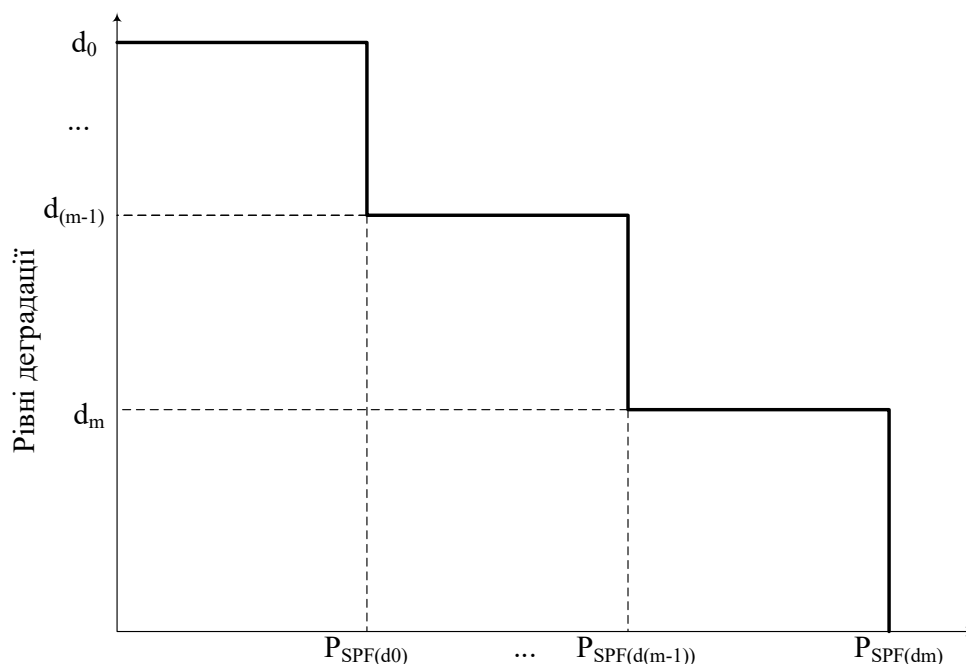


Рисунок 4.23 – Графічне пояснення ефективності системи з деградацією/

Імовірність виконання місії СОМС БПЛА з деградацією інтерпретується як площа фігури під ламаною та визначається за формулою:

$$P_E = \sum_{i=0}^k \left(P_{SPF}(d_i) - P_{SPF}(d_{(i+1)}) \right) L_i + P_{SPF}(d_0), \quad (4.19)$$

де i – рівні деградації ($i=0\dots k$);

$L_i = (d_i)/(i+1)$ – показник деградації (при $i = 0$ - розглядається стан системи без погіршення властивостей, при $i \geq 1$ - розглядається стан системи з погіршенням властивостей).

Розглянемо модель найбільш простого прикладу виконання завдання СОМС БПЛА з деградацією, що полягає у застосуванні одного БПЛА, для моніторингу за двома цільовими точками (ЦТ), графічне представлення якого наведено на рисунку 4.24.

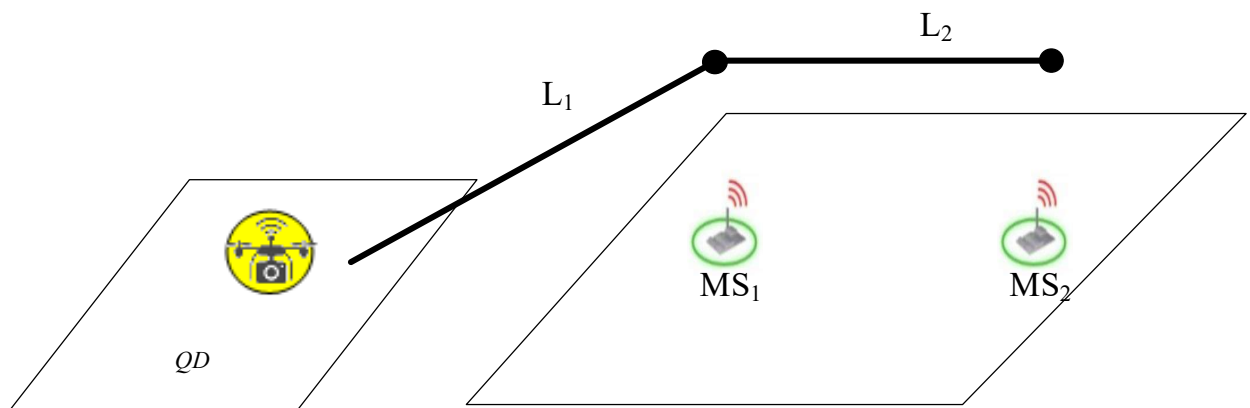


Рисунок 4.24 – Графічне представлення виконання завдання СОМС БПЛА з деградацією, яке полягає у застосуванні одного БПЛА, для моніторингу за двома цільовими точками

Припущення, які приймалися при розробці моделі:

- корисне навантаження БПЛА для вимірювання та передавання відео може відмовляти. Крім того, при виконанні завдання можна повністю або частково покривати цільові точки;

- успішне виконання місії передбачає отримання принаймні два типи даних з однієї цільової точки і один вид даних з іншої.

Повний набір подій повністю працездатних та частково працездатних станів БПЛА представлено в таблиці 4.1, де:

- $L_{1(2)}$ - ділянки маршруту між цільовими точками;

- $MD_{TP1(2)}$ - дані вимірювань;

$VD_{TP1(2)}$ - відеодані, отримані в цільових точках

- 0/1 вихідний стан компонента БПЛА: 0 - несправний, 1 - справний.

Таблиця 4.1 – Повний набір повних і частково оновлених подій для компонентів БПЛА, які можливі

Стан компонентів на ділянці L_1			Стан компонентів на ділянці L_2			Тип даних та ділянки, з яких отримано дані	
Core	M	V	Core	M	V	TP_1	TP_2
1	1	1	1	1	1	MD_{TP1}, VD_{TP1}	MD_{TP2}, VD_{TP2}
1	1	1	0	1	1	MD_{TP1}, VD_{TP1}	-, -
0	1	1	0	1	1	-, -	-, -
1	1	1	1	0	1	MD_{TP1}, VD_{TP1}	-, VD_{TP2}
1	0	1	1	0	1	-, VD_{TP1}	-, VD_{TP2}
1	1	1	1	1	0	MD_{TP1}, VD_{TP1}	$MD_{TP2}, -$
1	1	0	1	1	0	$MD_{TP1}, -$	$MD_{TP2}, -$
1	1	1	0	0	1	MD_{TP1}, VD_{TP1}	-, -
1	0	1	0	0	1	-, V_{TP1}	-, -
1	1	1	0	1	0	MD_{TP1}, VD_{TP1}	-, -
1	1	0	0	1	0	$M_{TP1}, -$	-, -

Події, які описують отримання двох типів даних принаймні з однієї цільової точки та принаймні одного типу даних з іншої цільової точки, виділені сірим кольором.

Графічне пояснення зв'язку стану корисного навантаження БПЛА та деградації якості виконання завдання показано на рисунку 4.25.

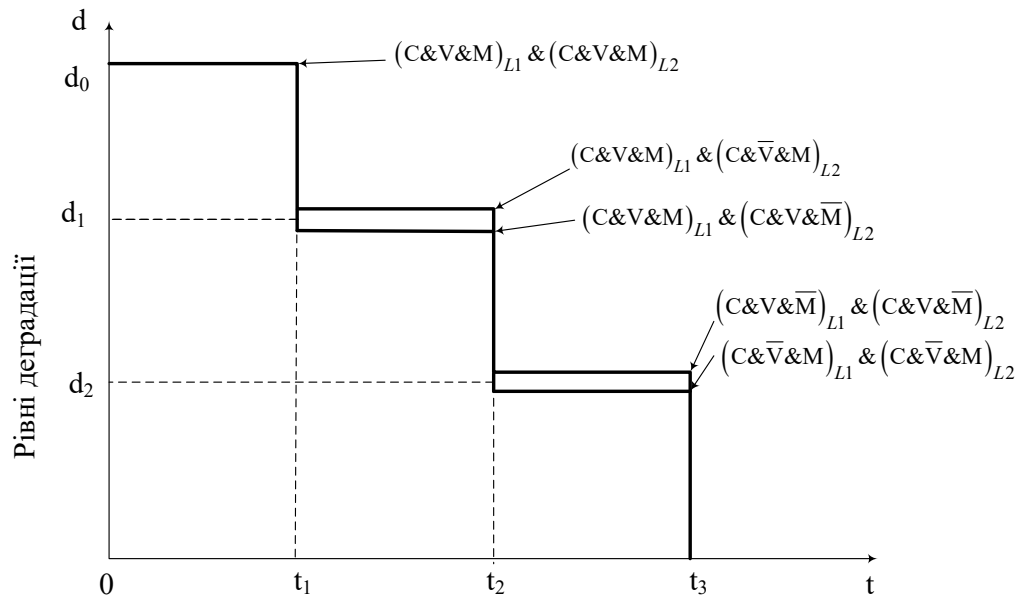


Рисунок 4.25 - Графічне пояснення зв'язку стану корисного навантаження БПЛА та деградації якості виконання завдання

Імовірність того, що СОМС БПЛА перебуває в станах, які дозволяють отримати всі типи даних з усіх цільових точок (рівень d_0) визначається за формулою:

$$P_{(2\&2)} = (P_C P_M P_V)^2. \quad (4.20)$$

Імовірність того, що система СОМС БПЛА перебуває в станах, які дозволяють отримати два види даних принаймні з однієї цільової точки, і принаймні один тип даних з іншої цільової точки (рівень d_1) розраховується за формулою:

$$P_{(2\&1)} = (P_C P_V)^2 P_M (1 - P_M) + (P_C P_M)^2 P_V (1 - P_V). \quad (4.21)$$

Імовірність того, що система моніторингу на базі БПЛА перебуває в станах, які дозволяють їй отримати принаймні один тип даних з усіх цільових точок (рівень d_2) розраховується за формулою:

$$P_{(1\&2)} = (P_C P_M)^2 (1 - P_V) + (P_C P_V)^2 (1 - P_M). \quad (4.22)$$

Імовірність виконання місії з погіршенням якості СОМС БПЛА визначається площею під кривою, яка описує деградацію (рисунок 4.25) та для різних рівнів деградації визначається як:

$$P_{E(2\&2)} = P_{(2\&2)}, \quad (4.23)$$

$$P_{E(1\&2)} = P_{(2\&2)} + P_{(1\&2)}, \quad (4.24)$$

$$P_{E(2\&1)} = P_{(1\&2)} + P_{(2\&1)}. \quad (4.25)$$

Значення $P_{(2\&2)}, P_{(2\&1)}, P_{(1\&1)}$ для наступних вихідних даних: $P_C = 0.99$; $P_M = P_V = 0.975$; наведено на рисунку 4.26.

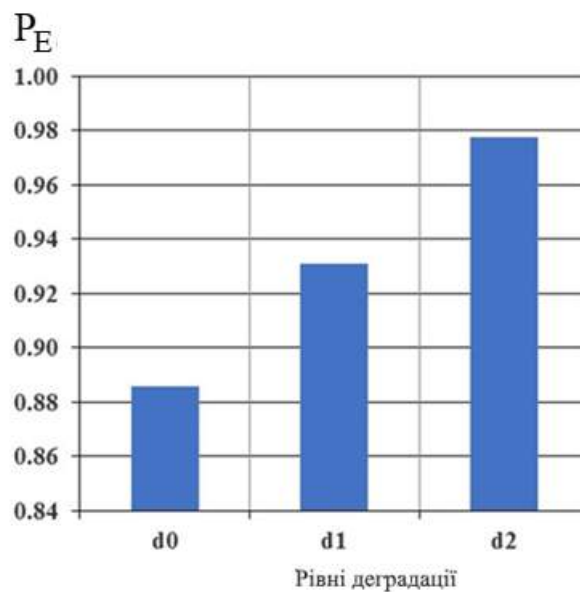


Рисунок 4.26 – Діаграма значень імовірності виконання завдань з урахуванням різних ступенів деградації

Дана модель функціонування СОМС БПЛА описується кортежем виду $S(1[2],0,0,3)$.

У подальшому розглядаються варіанти функціонування СОМС БПЛА, які описуються моделями $S(1[2],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,1)$, $S(2[2],1,0,0)$, $S(2[3],1,0,0)$ та $S(2[3],1,2,0)$ [209], які описують різні варіанти виконання завдань найпростішого до складного. В моделях, що розглядаються, обслуговування БПЛА не передбачено.

4.2.2.1. Модель СОМС БПЛА $S(1[2],1,0,0)$

Модель, що описується кортежем $S(1[2],1,0,0)$ описує просту модель функціонування СОМС БПЛА з ідентичними одним основним і одним резервним БПЛА. У цій моделі здійснюється один маршрут із 2 цільовими точками – вимірювальними станціями (англ. Measuring Station, MS). Графічний опис моделі наведено на рисунку 4.27.

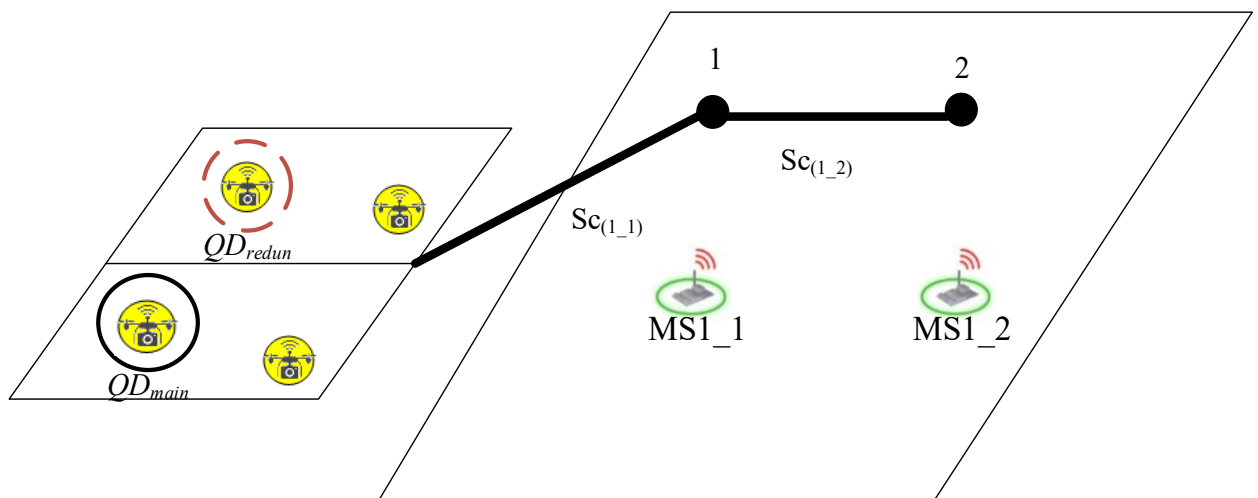


Рисунок 4.27 – Графічний опис моделі $S(1[2],1,0,0)$

Імовірність успішного виконання плану польоту для моделі $S(1[2],1,0,0)$ визначається за формулою:

$$P_{SPF(S(1[2],1,0,0))} = P_{MD}^2 + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD}^2 + (1 - P_{MD})P_{RD}^2, \quad (4.26)$$

де P_{MD}, P_{RD} – ймовірність успішного польоту основного БПЛА (резервного БПЛА) між двома сусідніми цільовими точками.

4.2.2.2. Модель СОМС БПЛА $S(1[3],1,0,0)$

Графічний опис моделі, яка описується кортежем $S(1[3],1,0,0)$ і передбачає використання з 1 основним БПЛА та 1 резервним БПЛА для 1 маршруту з 3 цільовими точками, наведено на рисунку 4.28.

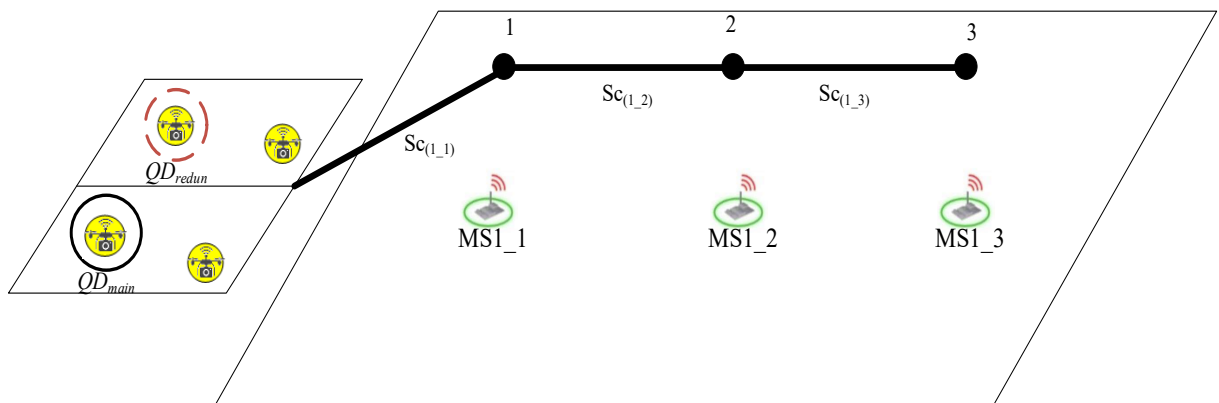


Рисунок 4.28 – Графічний опис моделі $S(1[3],1,0,0)$

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

$$P_{SPF(S(1[3],1,0,0))} = P_{MD}^3 + P_{MD}^2(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + (1 - P_{MD})P_{RD}^3. \quad (4.27)$$

4.2.2.3. Модель СОМС БПЛА $S(1[3],1,0,1)$

Модель, яка описується кортежем $S(1[3],1,0,1)$, описує виконання завдання з одним рівнем деградації та застосуванням 1 основного та 1 резервного БПЛА для польоту по 1 маршруту з 3 цільовими точками, показана

на рисунку 4.29. Деградація якості виконання завдання полягає у неповному відвідуванні всіх цільових точок-вимірювальних станцій. Для даної моделі дані з однієї станції можуть не збиратися.

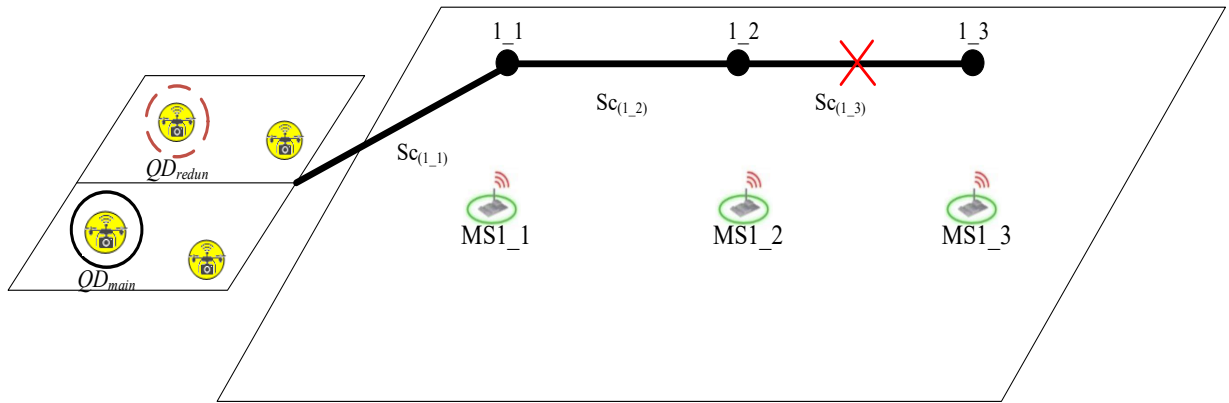


Рисунок 4.29 – Графічний опис моделі $S(1[3],1,0,1)$

Графічний опис процесу деградації ефективності СОМС БПЛА варіанті виконання завдання, що описується моделлю $S(1[3],1,0,1)$, наведено на рисунку 4.30.

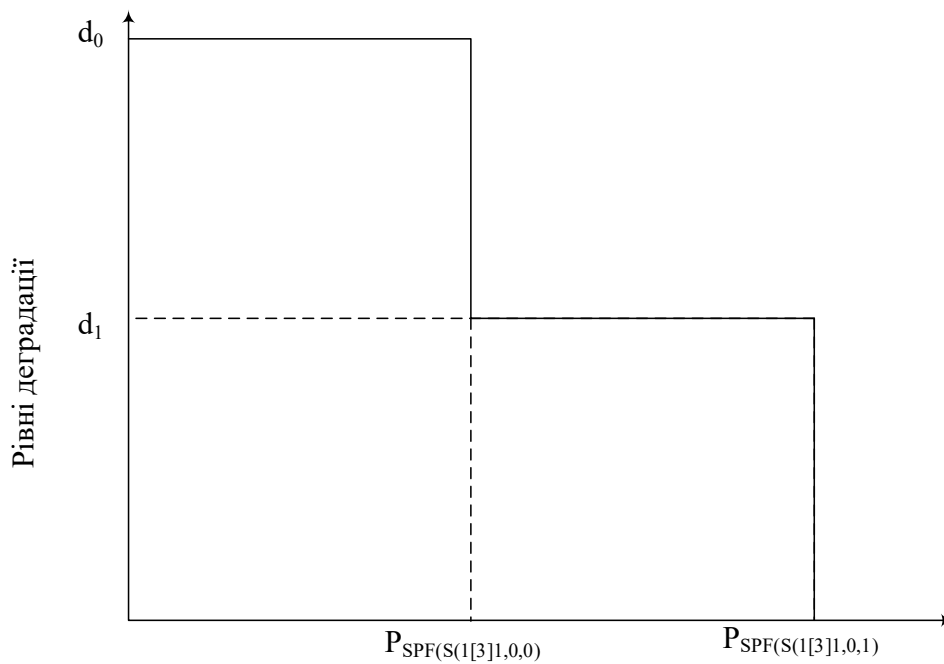


Рисунок 4.30 – Графічний опис процесу деградації ефективності для моделі $S(1[3],1,0,1)$

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

$$P_{S(1[3],1,0,1)} = P_{SPF(S(1[3],1,0,0))} + L_1 \left(P_{SPF(S(1[3],1,0,1))} - P_{SPF(S(1[3],1,0,0))} \right). \quad (4.28)$$

Для даного випадку $k=2$; $L_1=(k-1)/k = 1/2=0,5$.

З аналізу графічного представлення моделей $S(1[3],1,0,1)$ та $S(1[2],1,0,2)$ можна дійти висновку, що для даної моделі $P_{SPF(S(1[3],1,0,1))} = P_{SPF(S(1[2],1,0,0))}$,

тоді:

$$P_{S(1[3],1,0,1)} = P_{MD}^3 + P_{MD}^2(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + \\ + (1 - P_{MD})P_{RD}^3 + 0,5(P_{MD}^2 + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD} + (1 - P_{MD})P_{RD}^2 - \\ - (P_{MD}^3 + P_{MD}^2(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + (1 - P_{MD})P_{RD}^3)). \quad (4.29)$$

4.2.2.4. Модель СОМС БПЛА $S(1[3],1,0,2)$

Модель, яка описується кортежем $S(1[3],1,0,2)$, 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 4.31. Деградація якості виконання завдання полягає у можливості збирання даних лише з однієї вимірювальної станції.

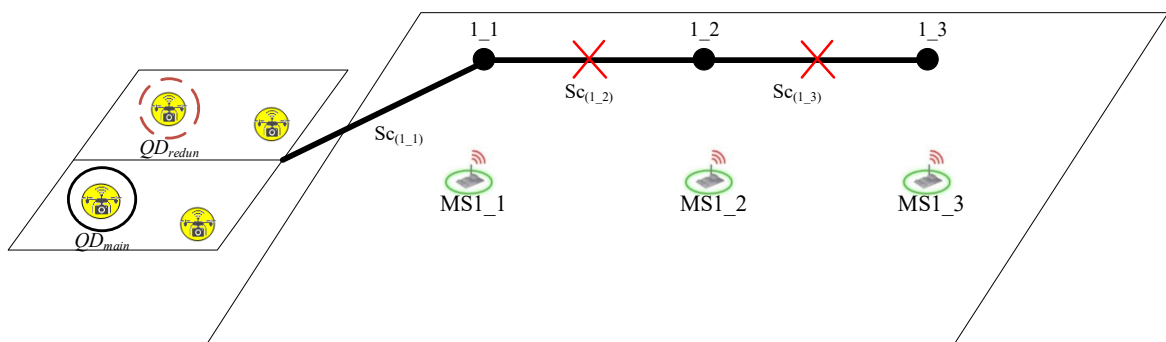


Рисунок 4.31 –Графічний опис моделі $S(1[3],1,0,2)$

Графічний опис процесу деградації ефективності СОМС БПЛА варіанті виконання завдання, що описується моделлю $S(1[3],1,0,2)$, наведено на рисунку 4.32.

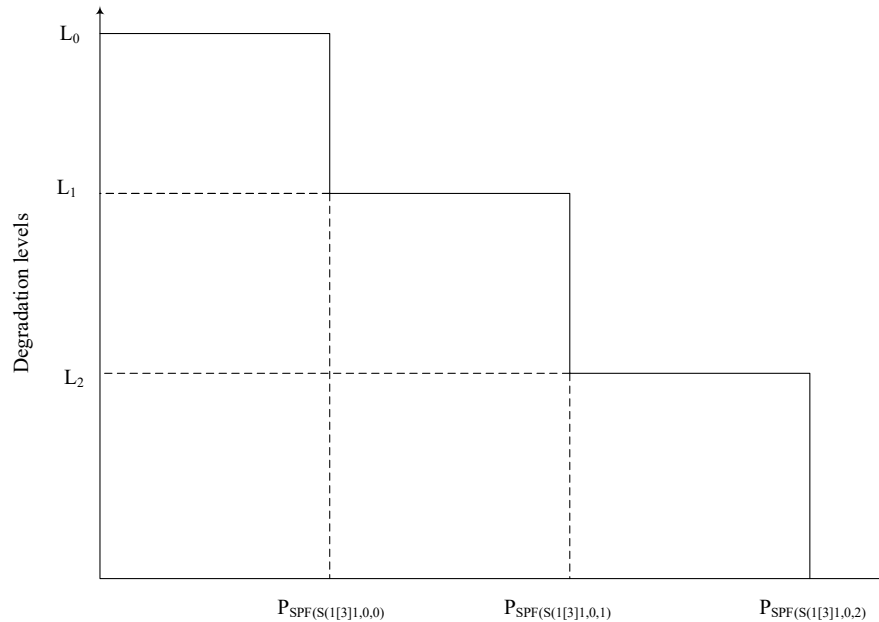


Рисунок 4.32 – Графічний опис процесу деградації ефективності для моделі $S(1[3],1,0,2)$.

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

$$P_{S(1[3],1,0,2)} = P_{SPF(S(1[3],1,0,0))} + L_1 \left(P_{SPF(S(1[3],1,0,1))} - P_{SPF(S(1[3],1,0,0))} \right) + L_2 \left(P_{SPF(S(1[3],1,0,2))} - P_{SPF(S(1[3],1,0,1))} \right). \quad (4.30)$$

Для даного випадку $k=3$; $L_1 = (k-1)/k = 2/3 = 0,67$; $L_2 = (k-2)/k = 1/3 = 0,33$.

З урахуванням того, що $P_{SPF(S(1[3],1,0,1))} = P_{SPF(S(1[2],1,0,0))}$ та

$$P_{SPF(S(1[3],1,0,2))} = P_{SPF(S(1[1],1,0,0))} = P_{MD} + (1 - P_{MD})P_{RD}:$$

$$\begin{aligned}
E_{S(1[3],1,0,2)} = & P_{MD}^3 + P_{MD}^2(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + \\
& + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + (1 - P_{MD})P_{RD}^3 + \\
& + 0,67(P_{MD}^2 + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD} + (1 - P_{MD})P_{RD}^2 - \\
& - P_{MD}^3 + P_{MD}^2(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD}^3 + \\
& + (1 - P_{MD})P_{RD}^3) + 0,33(P_{MD} + (1 - P_{MD})P_{RD} - \\
& - (P_{MD}^2 + P_{MD}(1 - P_{MD})P_{RD} + (1 - P_{MD})P_{RD}^2)).
\end{aligned} \tag{4.31}$$

4.2.3 Дослідження моделей оцінювання функційної надійності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів з деградацією

Проаналізуємо ефективність застосування СОМС БПЛА з деградацією, функціонування яких описується моделями $S(1[3],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,1)$, $S(1[3],1,0,2)$. Цей результат отримано за таких вихідних даних:

Графіки залежності функційної надійності моделей $S(1[3],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,1)$, $S(1[3],1,0,2)$ від часу виконання завдань для наступних вихідних даних: $P_{MD} = e^{-\lambda_{MD} \cdot t}$; $P_{RD} = e^{-\lambda_{RD} \cdot t}$; $\lambda_{MD} = 0,02$ 1/год; $\lambda_{RD} = 0,01$ 1/год; $t = 0 \dots 10$ год; представлено на рисунку 4.33.

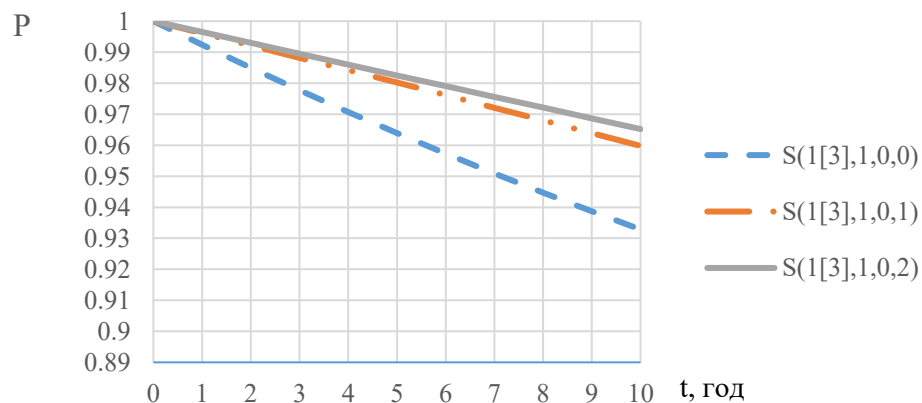


Рисунок 4.33 – Результат оцінки залежності ефективності СОМС, що описуються моделями $S(1[3],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,1)$, $S(1[3],1,0,2)$ від часу виконання завдань

Графіки залежності ефективності моделей $S(1[3],1,0,0)$ $S(1[3],1,0,1)$, $S(1[3],1,0,2)$ від інтенсивності відмов основних БПЛА для наступних вихідних даних: $P_{MD}=e^{-\lambda_{MD} \cdot t}$; $P_{RD}=e^{-\lambda_{RD} \cdot t}$; $\lambda_{MD}=0,005 \dots 0,025$ 1/ГОД; $\lambda_{RD}=0,01$ 1/ГОД; $t=10$ год; наведено на рисунку 4.34.

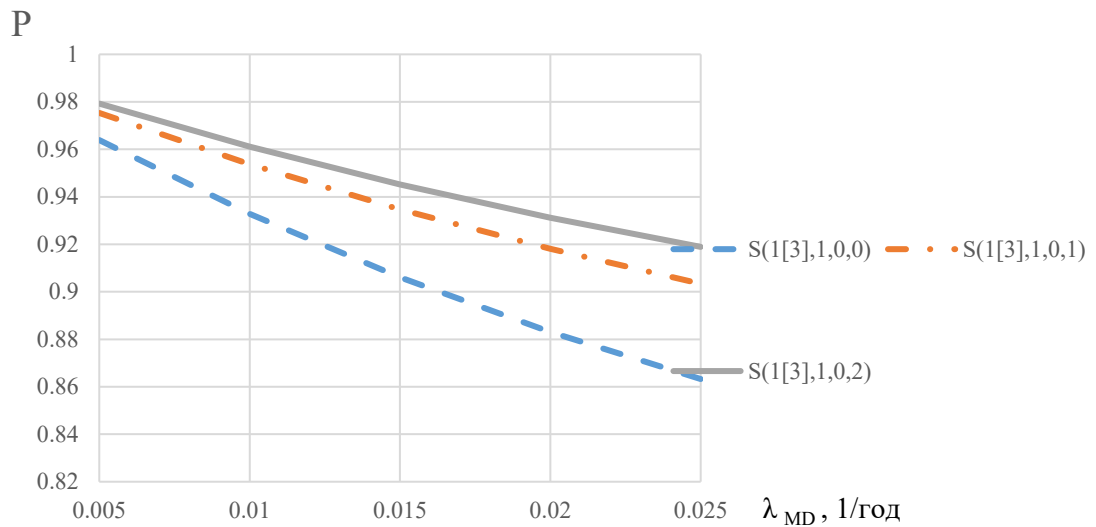


Рисунок 4.34 – Результат оцінки залежності ефективності СОМС, що описуються моделями $S(1[3],1,0,0)$ $S(1[3],1,0,1)$, $S(1[3],1,0,2)$ від надійності основного БПЛА

На наступному етапі оцінюється залежності ефективності моделей $S(1[3],1,0,0)$ $S(1[3],1,0,1)$, $S(1[3],1,0,2)$ від інтенсивності відмов резервних БПЛА для наступних вихідних даних: $P_{MD}=e^{-\lambda_{MD} \cdot t}$; $P_{RD}=e^{-\lambda_{RD} \cdot t}$; $\lambda_{MD}=0,02$ л/ГОД; $\lambda_{RD}=0,005 \dots 0,025$ 1/ГОД; $t=10$ год; наведено на рисунку 4.35.

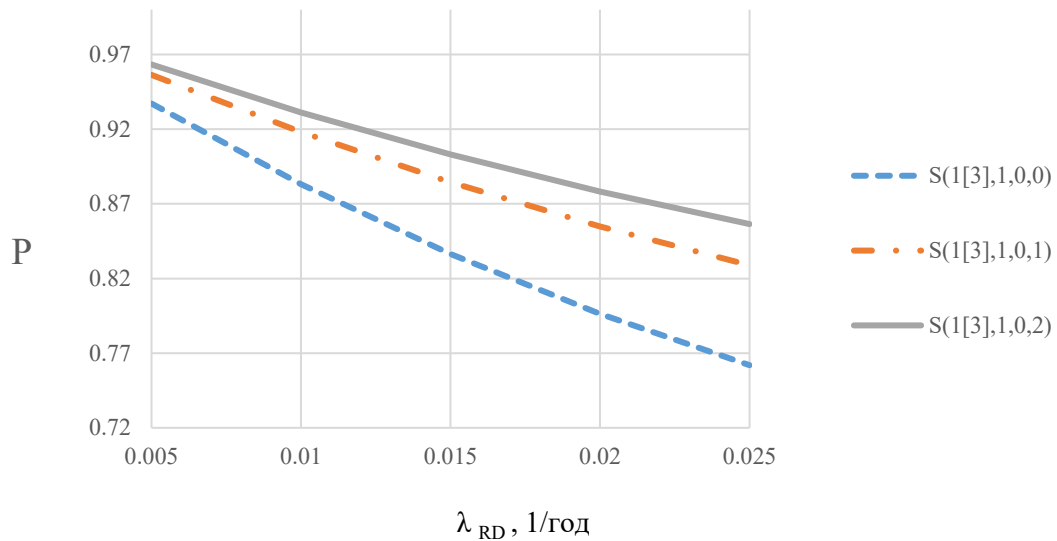


Рисунок 4.35 – Результат оцінки залежності ефективності СОМС, що описуються моделями $S(1[3],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,1)$, $S(1[3],1,0,2)$ від надійності резервного БПЛА

Аналіз результатів, представлених на рисунку 4.34 та рисунку 4.34, дозволяє зробити висновок про те, що надійність основних БПЛА менше впливає на ефективність СОМС, ніж надійність резервних БПЛА. Також отримані результати дають змогу оцінити параметри надійності компонентів СОМС, при яких ефективність систем із меншими рівнями деградації є вищою за ефективність систем із глибокою деградацією. Ці випадки характеризуються моментами перетину кривої функцій, які описують ефективність СОМС, що описуються моделями $S(1[3],1,0,1)$ та $S(1[3],1,0,2)$.

Залежність імовірності успішного виконання плану польоту СОМС з різними рівнями деградації СОМС, яка описується моделлю $S(1[3],1,0,2)$, від часу виконання завдань для наступних вихідних даних: $P_{MD}=e^{-\lambda_{MD}t}$; $P_{RD}=e^{-\lambda_{RD}t}$; $\lambda_{MD}=0,02$ 1/год; $\lambda_{RD}=0,01$ 1/год; $t=0\dots100$ год, показаний на рисунку 4.36.

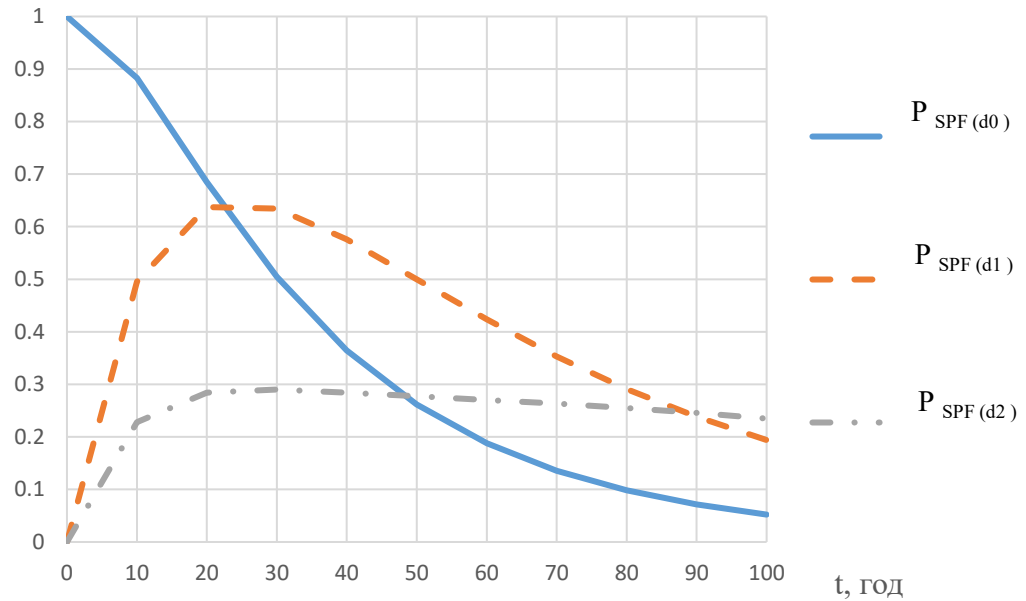
$P_{SPF(d_i)}$


Рисунок 4.36 – Залежність імовірності успішного виконання плану польоту СОМС з різними рівнями деградації СОМС, яка описується моделлю $S(1[3],1,0,2)$, від часу виконання завдань

Результати, представлені на рисунку 4.36 видно, що протягом перших 22 годин роботи СОМС забезпечується максимальне значення ймовірності виконання плану без погіршення якості, потім до 90 годин забезпечується максимальне значення ймовірності виконання плану з першим рівнем деградації, а через 90 годин максимальне значення досягається при другому рівні деградації. Отримані результати дають можливість контролювати стратегії використання СОМС з деградацією для досягнення максимальної ефективності використання її.

Результат порівняння надійності виконання місії для моделей $S(1[3],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,1)$ та $S(1[3],1,0,2)$ при наступних значеннях вихідних даних: $P_{MD}=P_{RD}=0,9$, наведено на рисунку 4.37.

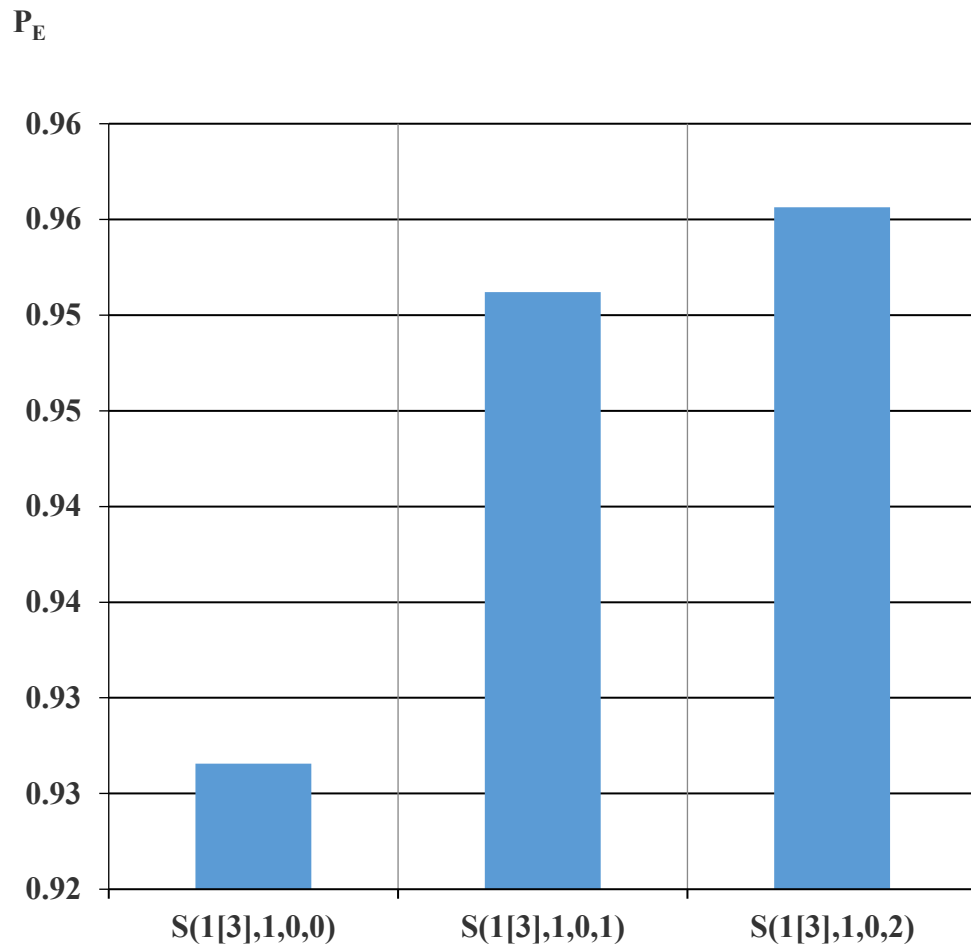


Рисунок 4.37 – Результат порівняння надійності виконання місії для моделей $S(1[3],1,0,0)$, $S(1[3],1,0,1)$ і $S(1[3],1,0,2)$

Отримані результати свідчать про підвищення продуктивності системи моніторингу з кількома станами порівняно зі звичайними системами. Це пов'язано з збільшенням часу роботи системи до переходу у стан повної непрацездатності. Значення показника якості функціонування (P_{SPF}) при цьому зменшується, а загальна імовірність виконання місії підвищується.

4.3 Моделі СМО для оцінювання надійності сервісів на основі безпілотних літальних апаратів з некерованою та керованою деградацією

В даному підрозділі розглядаються моделі СМО СОМС БПЛА з деградацією. Розглядаються два види деградації:

- некерована;
- керована.

При некерованій деградації передбачається, що погіршення якості виконання завдань здійснюється природнім шляхом без будь яких втручань, які передбачають реагування на розподіл ресурсів після виникнення відмов. Прикладом некерованої деградації є завдання, яке передбачає використання рою БПЛА для пошуку об'єкта в заданому районі протягом заданого часу. Для цього завдання залучаються однотипні БПЛА і виникнення їх відмов не призведе до припинення його виконання, а лише збільшить час пошуку. Виконання такого завдання буде продовжуватися до тих пір, поки хоча б один БПЛА буде працездатним.

У випадку керованої деградації передбачається корегування розподілу ресурсів при обслуговуванні потоків замовлень. Використання керованої деградації може призводити до менших втрат ефективності СОМС у випадках, коли виконуються завдання з різними пріоритетами або очікуваною вартістю. У якості прикладу функціонування СОМС БПЛА з керованою деградацією розглядається СМО, яка здійснює доставлення різних типів вантажів: продуктів та ліків. Доставлення ліків вважається більш пріоритетним, тому при відмові БПЛА, яке доставляє ліки, для продовження доставки залучаються інші працездатні БПЛУ, навіть тоді, коли вони виконували доставку продуктів. При цьому втрата замовлення на доставку продуктів призводить до менших втрат ефективності СОМС БПЛА ніж втрата замовлення на доставку ліків.

4.3.1 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів з некерованою деградацією

Розглянемо модель функціонування СОМС як СМО, що описується моделлю $M/M/n(u):(F)$, яка передбачає, що заявки на обслуговування надходять за пуасонівським законом розподілу (перша літера M). Вважається, що час обслуговування також є незалежним та експоненціально розподіленим (друга літера M). Заявки обслуговуються n роями БПЛА, що складаються з u БПЛА. Під час обслуговування заявок БПЛА можуть виходити з ладу та відновлюватися (літера F) [203].

Марківська модель СМО $M/M/n(u):(F)$ представлена на рисунку 4.38, 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.

До множини станів (I) належать стани, коли всі БПЛА працездатні. До множини станів (II) відносяться 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 задіяні в виконанні завдань.

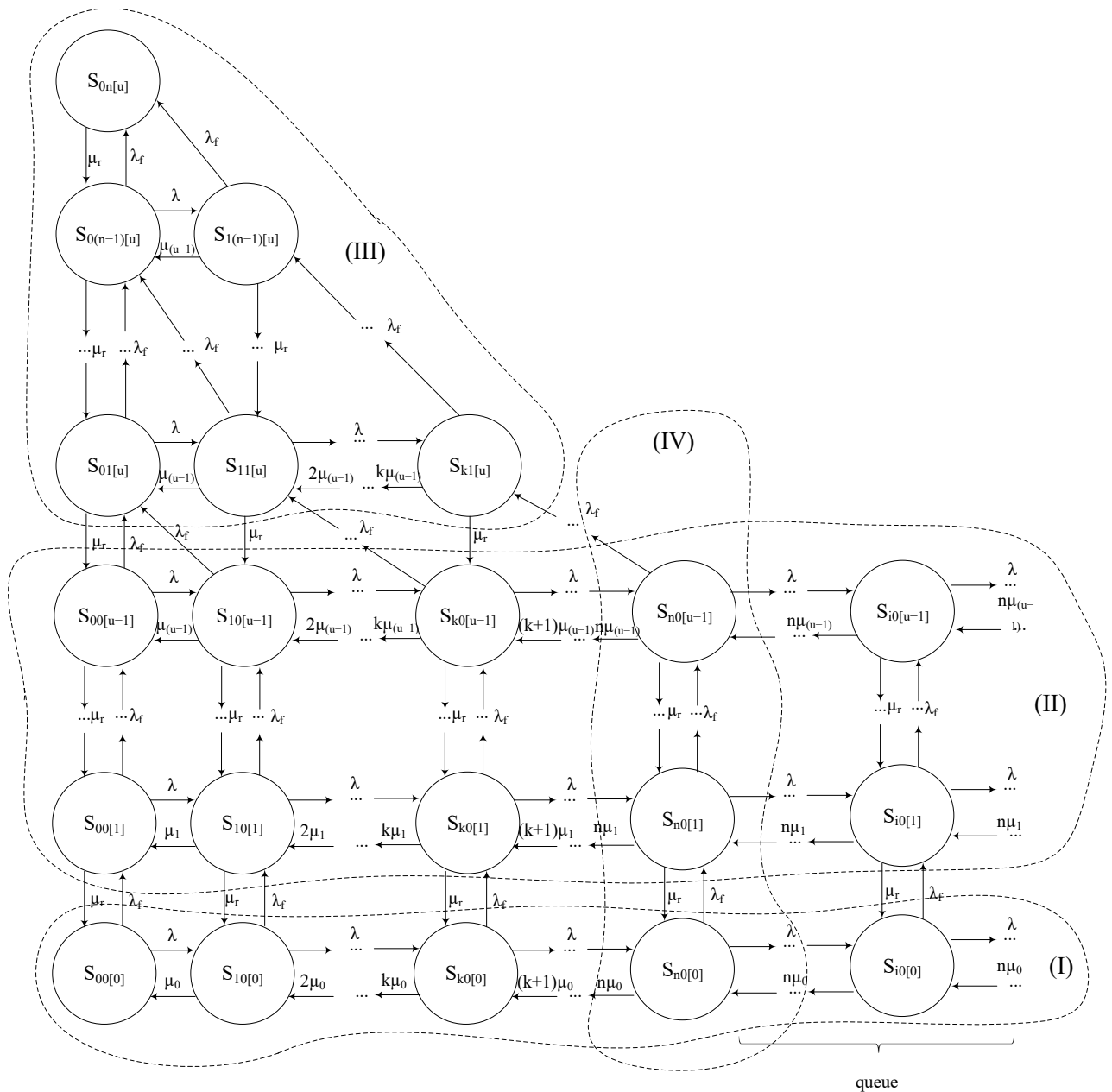


Рисунок 4.38 – Марковська модель функціонування СМО СОМС БПЛА виду $M/M/n(u):(F)$ з некерованою деградацією

4.3.2 Модель СМО сервісу на основі безпілотних літальних апаратів з керованою деградацією

Розглянемо функціонування СМО коли різні замовлення мають різний ступінь важливості в залежності від їх вагових коефіцієнтів [213]. При ці коефіцієнти нормовані тобто їх сума дорівнює одиниці. При такому функціонуванні у випадку, коли всі БПЛА задіяні в обслуговуванні замовлень

і виникають їх несправності, можна розрізнити різні стратегії обслуговування замовлень:

- без перерозподілу ресурсів, $Str_{alloc(-)}$;
- з перерозподілом ресурсів, $Str_{alloc(+)}$.

Стратегія без перерозподілу ресурсів використовується у разі відмови БПЛА, що входять до складу рою, який обслуговує замовлення з меншим ваговим коефіцієнтом. Стратегія з перерозподілом ресурсів використовується в разі відмови БПЛА, що входять до складу рою, який обслуговує замовлення з більшим ваговим коефіцієнтом.

Перерозподіл ресурсів полягає в тому, що на зміну БПЛА, який виконує замовлення з більшим пріоритетом і відмовив, залучаються справні БПЛА, що обслуговують замовлення з меншим ваговим коефіцієнтом. Така стратегія дозволяє підвищити ефективність функціонування СОМС БПЛА, що проілюстровано на рисунку 4.39, де g_1 та g_2 - вагові коефіцієнти для меншого та більшого ступенів важливості запиту відповідно.

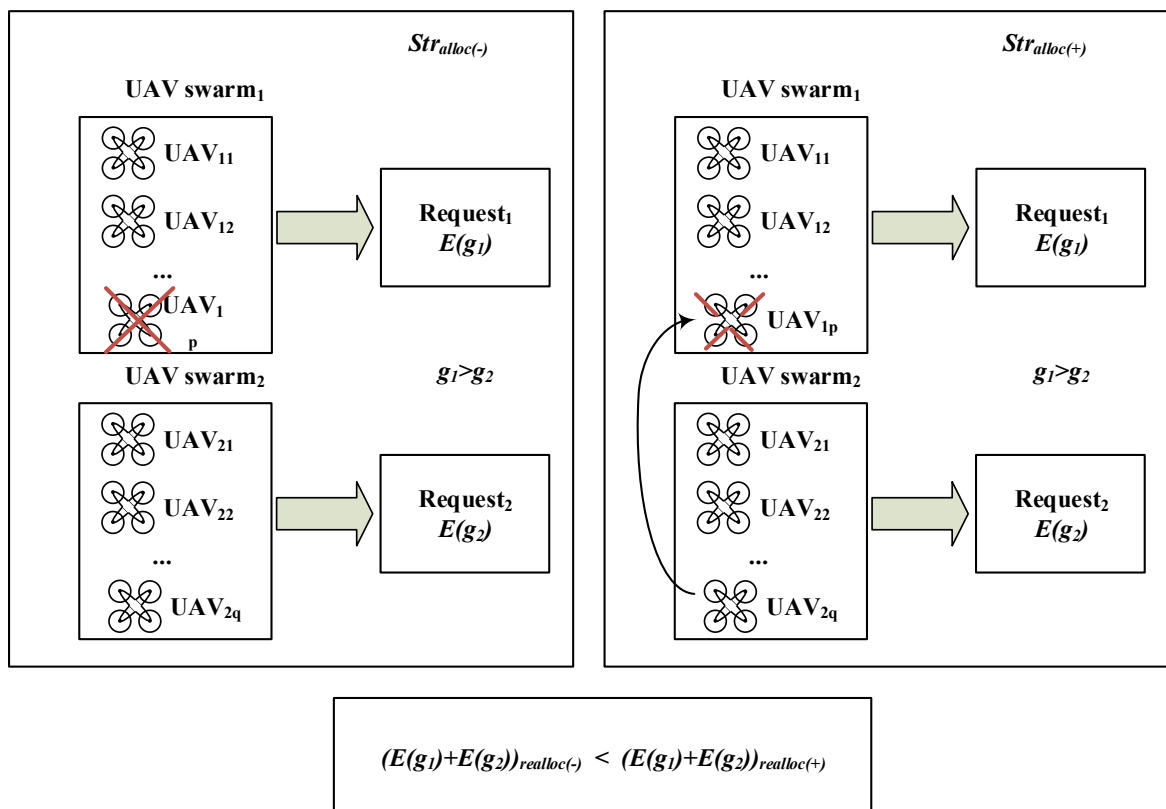


Рисунок 4.39 – Опис використання стратегій $Str_{alloc(-)}$ та $Str_{alloc(+)}$

Розглянемо фрагмент марковської моделі, яка описує функціонування СОМС БПЛА, де два БПЛА обслуговують одну заявку з більшим ваговим коефіцієнтом: g_1 , два БПЛА обслуговують одну заявку з меншим ваговим коефіцієнтом: g_2 , а два БПЛА знаходяться в резерві (рисунок 4.40).

При розробці моделі, були прийняті наступні припущення:

- БПЛА можуть відмовляти і відновлюватися.
- коли БПЛА, що обслуговує заявку з великим ваговим коефіцієнтом, відмовляє, його замінює резервний БПЛА (за наявності).
- коли БПЛА, що обслуговує заявку з більшим ваговим коефіцієнтом, відмовляє, а резервних БПЛА немає, він замінюється на один з БПЛА, що обслуговує заявку з меншим ваговим коефіцієнтом, але може бути використаний тільки один такий БПЛА.
- якщо БПЛА, який обслуговує заявку з меншим ваговим коефіцієнтом, відмовляють, він не замінюється.

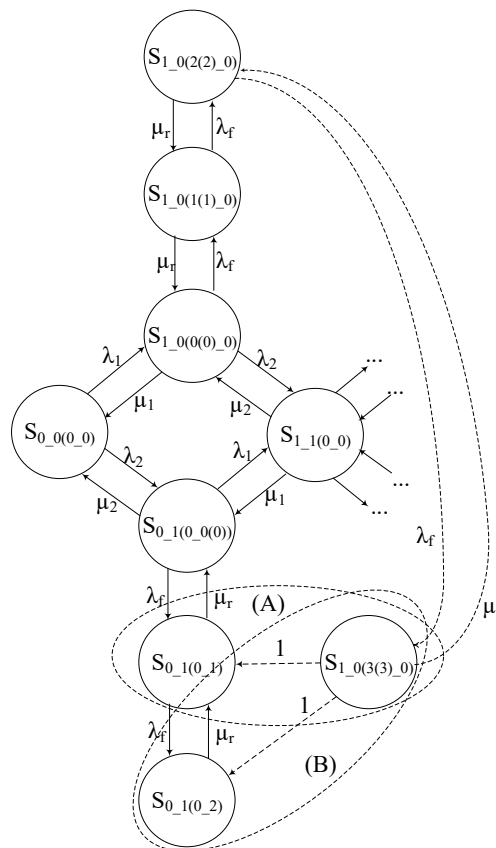


Рисунок 4.40 – Фрагмент марковської моделі функціонування СОМС БПЛА з керованою деградацією

Опис станів для фрагмента марковської моделі, зображеної на рисунку 4.40, представлено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 –Опис станів для фрагмента марковської моделі СОМС БПЛА з керованою деградацією

Стан	Опис стану
$S_{0_0(0(0)_0)}$	Заявки не надходили. Всі БПЛА в робочому стані.
$S_{1_0(0(0)_0)}$	Заявка з великим ваговим коефіцієнтом обслуговується двома БПЛА. Всі БПЛА працездатні.
$S_{1_0(1(1)_0)}$	Заявка з великим ваговим коефіцієнтом обслуговується двома БПЛА. Один з БПЛА вийшов з ладу і був замінений на перший резервний БПЛА
$S_{1_0(2(2)_0)}$	Після заміни БПЛА, що вийшов з ладу, першим резервним БПЛА, заявка з великим ваговим коефіцієнтом обслуговується двома БПЛА. Один з БПЛА вийшов з ладу і був замінений на другий резервний БПЛА. Таким чином, два БПЛА не працюють, а всі резервні БПЛА використані.
$S_{1_0(3(3)_0)}$	Після використання всіх резервних БПЛА для заміни БПЛА, що вийшли з ладу, запит з великим ваговим коефіцієнтом обслуговується двома БПЛА. Один з БПЛА вийшов з ладу і був замінений на БПЛА, який обслуговує запит з меншим ваговим коефіцієнтом. Таким чином, три БПЛА не працюють, всі резервні БПЛА та один БПЛА, що обслуговує запит з меншим ваговим коефіцієнтом, були задіяні.
$S_{0_1(0_0)}$	Заявка з меншим ваговим коефіцієнтом обслуговується двома БПЛА. Всі БПЛА справні.
$S_{(0_1(0(0)_1)}$	Заявку з меншим ваговим коефіцієнтом обслуговують два БПЛА. Один з БПЛА вийшов з ладу.
$S_{0_2(0(0)_2)}$	Заявка з меншим ваговим коефіцієнтом обслуговується двома БПЛА. Два БПЛА вийшли з ладу.

На рисунку 4.40 виділено дві множини станів:

- множина (А), яку можна вважати одним об'єднаним станом у випадку, коли використовується стратегія $Str_{alloc(+)}$ і всі БПЛА рою, що обслуговують замовлення з меншим ваговим коефіцієнтом, є працездатними;

- множина (В), яку можна вважати одним об'єднаним станом у випадку, коли використовується стратегія $Str_{alloc(+)}$ і один БПЛА рою, що обслуговує запит з меншим ваговим коефіцієнтом, є непрацездатним.

Таким чином, може виникнути невизначеність щодо переходів між такими станами. Щоб впоратися з цією проблемою, можна ввести наступне припущення: рій БПЛА, який обслуговує замовлення з меншим ваговим коефіцієнтом, може виділити БПЛА тільки тоді, коли його власні БПЛА працездатні.

Проаналізуємо функціонування СОМС БПЛА з контрольованою деградацією, коли 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.

Прийнято наступні припущення:

- одне замовлення обслуговується одним БПЛА;
- БПЛА відмовляти (за винятком випадків очікування запитів) і відновлюватися;
- лише один БПЛА може бути непрацездатним;
- коли БПЛА, який обслуговує замовлення на доставку медикаментів відмовляє, його замінює резервний БПЛА або БПЛА, який обслуговує замовлення на доставку звичайних вантажів;
- коли БПЛА, що обслуговує замовлення на доставку звичайних вантажів відмовляє, його не замінюють.

Марковська граф станів і переходів для даної СОМС БПЛА представлений на рисунку 4.41, 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.

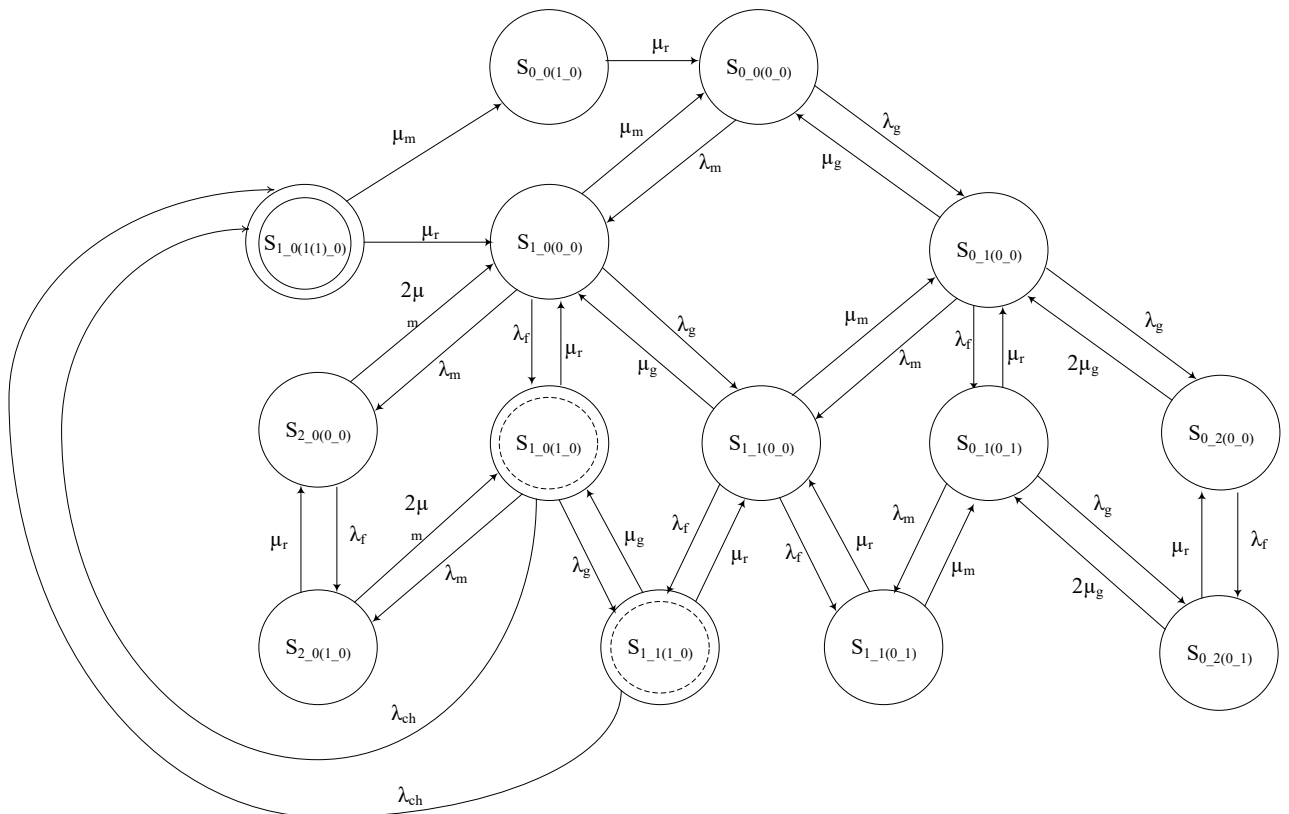


Рисунок 4.41 – Марковська модель системи СОМС БПЛА, що обслуговує запити на доставку медикаментів та звичайних вантажів

Опис станів марковської моделі (рисунок 4.41), представлено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – 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.

Кінець таблиці 4.2

Стан	Опис стану
$S_{0_1(0_0)}$	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. Стан $S_{1_0(1_0)}$ характеризується залученням резервного БПЛА, а $S_{1_1(1_0)}$ - залученням БПЛА, що обслуговує запит на доставку звичайних вантажів.

Фінальні ймовірності знаходження СОМС БПЛА у різних станах можуть бути отримані шляхом розв'язання системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l}
-(\lambda_m + \lambda_g)P_{0_0(0_0)} + \mu_m P_{1_0(0_0)} + \mu_g P_{0_1(0_0)} + \\
+\mu_r P_{0_0(1_0)} = 0; \\
-\mu_r P_{0_0(1_0)} + \mu_m P_{1_0(1_0)} = 0; \\
-(\mu_m + \mu_r)P_{1_0(1_0)} + \lambda_{ch} P_{1_0(1_0)} + \lambda_{ch} P_{1_1(1_0)} = 0; \\
-(\lambda_m + \lambda_g + \lambda_f + \mu_g)P_{0_1(0_0)} + \lambda_m P_{0_0(0_0)} + \mu_m P_{1_1(0_0)} + \\
\mu_r P_{0_1(0_1)} + 2\mu_g P_{0_2(0_0)} = 0; \\
-(\lambda_f + 2\mu_m)P_{2_0(0_0)} + \lambda_m P_{1_0(0_0)} + \mu_r P_{2_0(1_0)} = 0; \\
-(\lambda_m + \lambda_{ch} + \lambda_g + \mu_r)P_{1_0(1_0)} + \lambda_f P_{1_0(0_0)} + 2\mu_m P_{2_0(1_0)} + \\
+\mu_g P_{1_1(1_0)} = 0; \\
-(2\lambda_f + \mu_g + \mu_m)P_{1_1(0_0)} + \lambda_g P_{1_0(0_0)} + \lambda_m P_{0_1(0_0)} + \\
\mu_r P_{1_1(1_0)} + \mu_r P_{1_1(0_1)} = 0; \\
-(\lambda_m + \lambda_g + \mu_r)P_{0_1(0_1)} + \lambda_f P_{0_1(0_0)} + \mu_m P_{1_1(0_1)} + \\
+2\mu_g P_{0_2(0_1)} = 0; \\
-(\lambda_f + 2\mu_g)P_{0_2(0_0)} + \lambda_g P_{0_1(0_0)} + \mu_r P_{0_2(0_1)} = 0; \\
-(2\mu_m + \mu_r)P_{2_0(1_0)} + \lambda_f P_{2_0(0_0)} + \lambda_m P_{1_0(1_0)} = 0; \\
-(\lambda_{ch} + \mu_g + \mu_r)P_{1_1(1_0)} + \lambda_g P_{1_0(1_0)} + \lambda_f P_{1_1(0_0)} = 0; \\
-(\mu_m + \mu_r)P_{1_1(0_1)} + \lambda_m P_{0_1(0_1)} + \lambda_f P_{1_1(0_0)} = 0; \\
-(\mu_r + 2\mu_g)P_{0_2(0_1)} + \lambda_g P_{0_1(0_1)} + \lambda_f P_{0_2(0_0)} = 0; \\
P_{0_0(0_0)} + P_{1_0(0_0)} + P_{1_0(1_0)} + P_{2_0(0_0)} + P_{2_0(1_0)} + \\
+P_{1_1(0_0)} + P_{1_1(1_0)} + P_{1_1(0_1)} + P_{0_1(0_0)} + P_{0_1(0_1)} + \\
P_{0_2(0_0)} + P_{0_2(0_1)} + P_{0_0(1_0)} + P_{1_0(1_0)} = 0.
\end{array} \right. \quad (4.32)$$

Для $\lambda_m = 0.6$, $\lambda_g = 0.7$, $\mu_m = 2$, $\mu_g = 3$, $\lambda_f = 0.001$,
 $\mu_f = 1$, і $\lambda_{ch} = 4$, ймовірності дорівнюють:

$$\begin{aligned}
P_{0_0(0_0)} &= 0.5488; P_{1_0(0_0)} = 0.1624; \\
P_{1_0(1_0)} &= 0.0185; P_{2_0(0_0)} = 0.0249; \\
P_{2_0(1_0)} &= 0.0022; P_{1_1(0_0)} = 0.0365; \\
P_{1_1(1_0)} &= 0.0016; P_{1_1(0_1)} = 0.00003; \\
P_{0_1(0_0)} &= 0.1117; P_{0_1(0_1)} = 0.0001; \\
P_{0_2(0_0)} &= 0.013; P_{0_2(0_1)} = 0.00001; \\
P_{0_0(1_0)} &= 0.0535; P_{1_0(1(1)_0)} = 0.0267.
\end{aligned}$$

З отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

- імовірність того, що СОМС БПЛА обслужить всі запити без втрат, дорівнює 0.996;

- при використанні стратегії $Str_{alloc(-)}$ (неконтрольована деградація) ймовірність того, що СОМС БПЛА втратить запити на доставку медикаментів або продуктів харчування становить 0,00384 та 0,00016 відповідно;

- при використанні стратегії $Str_{alloc(+)}$ (контрольована деградація) ці ймовірності становлять 0,00222 та 0,00178 відповідно.

Тобто, якщо обслуговується 10000 запитів (5000 запитів на доставку ліків і 5000 запитів на доставку продуктів харчування), то при використанні стратегії $Str_{alloc(0(-))}$ (неконтрольована деградація) буде втрачено 38 з кожних 5000 запитів на доставку ліків і 2 з кожних 5000 запитів на доставку продуктів харчування. А при використанні стратегії $Str_{alloc(+)}$ (контрольована деградація) ці втрати становлять 22 і 18 відповідно. При $g_1 = 0.7$ та $g_2 = 0.3$ загальні втрати при використанні стратегії $Str_{alloc(-)}$ становлять: $(38-0.7 + 2-0.3) = 27.2$ умовних одиниць та $(22-0.7 + 18-0.3) = 20.8$ умовних одиниць при використанні стратегії $Str_{alloc(+)}$. Таким чином, використання стратегії з керованою деградацією забезпечує зменшення загальних втрат на 24 відсотки.

На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки.

Загальна кількість втрачених заявок при застосуванні різних стратегій залишається незмінною.

Вигода від застосування стратегії з перерозподілом ресурсів (контрольованою деградацією) стає суттєвою у випадках, коли вагові коефіцієнти запитів, що обслуговуються, суттєво відрізняються.

Використання стратегії з перерозподілом ресурсів збільшує час і складність роботи СОМС БПЛА через необхідність змінювати маршрути БПЛА і витратити час на додаткове обслуговування більш важливих запитів.

4.4 Модель оцінювання надійності системи моніторингу промислових об'єктів, що побудована на основі використання БПЛА

Розглянемо концепцію побудови і загальну структуру системи моніторингу промислових об'єктів, а саме частини критичної інфраструктури, такі як атомні електростанції, ОПН тощо, яка базується на застосуванні таких технологій:

- цифрові двійники;
- флот БПЛА як додатковий канал для збору інформації;
- приватна хмарна система, як резервний центр підтримки прийняття рішень у надзвичайних ситуаціях.

Система моніторингу розглядається як складна система з точки зору надійності з урахуванням:

- різної структури системи моніторингу, варіантів моніторингу об'єктів та конфігурацію різних стаціонарних і мобільних центрів для збору інформації та прийняття рішень;
- режимів роботи системи моніторингу (нормальний та аварійний режими), що відрізняються за умовами середовища та частотою відмов компонентів;
- розміщення та надійність органів керування, що приймають рішення;

- погіршення якості роботи системи моніторингу, які можуть бути спричинені відмовами окремих компонентів та каналів в цілому і таких випадках система моніторингу розглядається як система з деградацією.

Під час розробки структури та моделей системи моніторингу (System of Monitoring, SM) було прийнято трирівневу модель опису промислового об'єкта, яка включає:

- обладнання з датчиками та пристроями управління критичними процесами (обладнання, що підлягає моніторингу та контролю (англ. Equipment of Control, EC);

- системи і комплекси, в яких розміщено обладнання з датчиками та пристроями управління процесами (засоби, що керуються та контролюються) (англ. Utilites of Control, UC);

- територія об'єкта, обмежена зовнішнім периметром, де розташовані станції моніторингу (MS) зон, що контролюються (англ. Zone of control, ZC).

В моделі досліджується варіант об'єкта, на території якого розташовано декілька UC ($i = 1 \dots n$) та MS одного типу.

Для забезпечення надійності та стійкості моніторингу стану об'єкта використовуються кризові центри, що використовують БПЛА (IoD) та туманні сервіси.

Резервна підсистема містить:

- допоміжні центри керування, які працюють разом зі звичайними (наприклад, для атомної електростанції це диспетчерська (англ. Control Room, CR) та аварійна диспетчерська (англ. Emergency Control Room, ECR);

- приватна хмарна кризова група (англ. Private Cloud Group, PCG), яка обробляє дані моніторингу за допомогою хмарних сервісів та Інтернету речей;

- БПЛА (UAV) та центр управління польотами безпілотних літальних апаратів (англ. Flight Control Center, FCC), що отримує та обробляє дані про стан об'єкта за допомогою обладнання, яке може бути розміщене як на одному

потужному безпілотному літальному апараті, так і на групі безпілотних літальних апаратів, які формують мережу IoD.

Для системи моніторингу, що досліджується, IoD є частиною інфраструктури центру управління польотами з доступом як до приватної хмари, так і до ресурсів Інтернету. Бортові системи БПЛА обмінюються даними між собою та з наземними датчиками, що розташовані на MS та FCC.

Системи моніторингу працюють у звичайному та аварійному режимах? відповідно до стану об'єкта моніторингу. В аварійному режимі для виконання завдань моніторингу залучаються додаткові центри управління та моніторингу промислових об'єктів, а саме PCG та FCC. За певних обставин вони можуть виконувати певні функції моніторингу в звичайному режимі, але в рамках даної моделі передбачається, що вони працюють лише в аварійному режимі.

Для такого варіанту побудови організація та функції системи моніторингу на основі CR, ECR, PCG та FCC описані в таблиці 4.3 CR, ECR, PCG та FCC є окремими підсистемами управління та моніторингу, що складаються з датчиків (Sen), засобів зв'язку (Com), засобів обробки даних (Proc) та засобів підтримки прийняття рішень (англ. Decision-Making Support Unit, DMU). У таблиці 1 описано функції цих підсистем з урахуванням рівнів ієрархії об'єкта моніторингу (EC, UC та ZC). У таблиці 2 представлено можливості реалізації функцій моніторингу в нормальному та аварійному режимах.

Підсистема CR в обох режимах виконує всі функції моніторингу на всіх рівнях ієрархії. Підсистема ECR відрізняється тим, що не виконує моніторинг обладнання (EC). Підсистеми FCC та PCG забезпечують моніторинг на рівні ZC тільки в аварійному режимі, повністю або частково, залежно від покриття датчиками прилеглих територій. Датчики ZC для CR, ECR, PCG та FCC можуть бути загальними або окремими.

Таблиця 4.3 – Функції центрів управління та моніторингу

Режим	Центри управління та моніторингу			
	CR	ECR	FCC	PCG
Нормальний	Моніторинг EC, UC, ZC	Моніторинг UC, ZC	Очікування (самообслу- говування)	Очікування (самообслу- говування)
Аварійний	Моніторинг EC, UC, ZC	Моніторинг UC, ZC	Моніторинг ZC	Моніторинг ZC

Таблиця 4.4 – Можливості реалізації функцій моніторингу.

Режим	Рівень	Центри управління та моніторингу			
		CR	ECR	FCC	PCG
Нормальний	EC	Повний	Немає	Немає	Немає
	UC	Повний	Повний	Немає	Немає
	ZC	Повний	Повний	Немає	Немає
Аварійний	EC	Повний	Немає	Немає	Немає
	UC	Повний	Повний	Немає	Немає
	ZC	Повний	Повний	Повний/ Частковий	Повна/ Часткова

Таким чином, загальну модель системи моніторингу промислового об'єкта можна описати кортежем:

$$GSM = \{OM, CM, Sen, Com, DT, DMU\}, \quad (4.33)$$

де $OM = \{EC, UC, ZC\}$ — множина об'єктів моніторингу та/або контролю;

$CM = \{CR, ECR, PCG, FCC\}$ — множина центрів управління та моніторингу;

$Sen = \{Sen_EC, Sen_UC, Sen_ZC\}$ — множина датчиків;

$Com = \{ComEC_CR, ComUC_CR, ComUC_ECR, ComZC_CR, ComZC_ECR, ComZC_PCG, ComZC_FCC\}$ — множина засобів зв'язку;

$DT = \{Dtw_CR, Dtw_ECR, Dtw_PCG, Dtw_FCC\}$ — набір цифрових двійників;

$DMU = \{DMU_CR, DMU_ECR\}$ — набір засобів підтримки прийняття рішень.

Якщо всі підсистеми використовують повний обсяг даних моніторингу, DMU забезпечується як сумісність, так і надійність формування DT. Якщо підсистеми PCG і FCC використовують обмежений набір даних від датчиків, ці дані використовуються для формування відповідної частини DT і поєднання її з даними від CR і ECR для забезпечення сумісності DT.

В аварійному режимі системою моніторингу може використовувати один – PCG/FCC або два – PCG і FCC канали додатково до каналів CR і ECR.

Залежно від завдань, що виконуються системою моніторингу, слід враховувати такі особливості функціонування каналів:

- канали можуть виконувати один і той самий набір функцій моніторингу;
- набір функцій моніторингу для деяких каналів можна розглядати як підмножину функцій моніторингу для інших каналів;
- набори функцій моніторингу для окремих каналів можуть перекриватися.

Зазначені вище особливості каналів системи моніторингу можуть утворювати різні варіанти розподілу функцій моніторингу (англ. Variants of Allocation of Monitoring Functions, VAMF) між каналами. Кожен VAMF дозволяє отримати відповідну модель покриття моніторингу поля функціями SM, а також сформувати блок-схеми надійності (CCH). Останні необхідні для оцінки надійності SM, яка описується відповідною VAMF.

Введемо наступні позначення: F_{CR} , F_{ECR} , F_{PCG} та F_{FCC} – це набори функцій моніторингу, що виконуються каналами CR, ECR, PCG та FCC відповідно.

Враховуючи представлені особливості функціонування каналу SM та прийняті позначення, було розроблено п'ять моделей покриття моніторингу поля опції SM (рисунок 4.42).

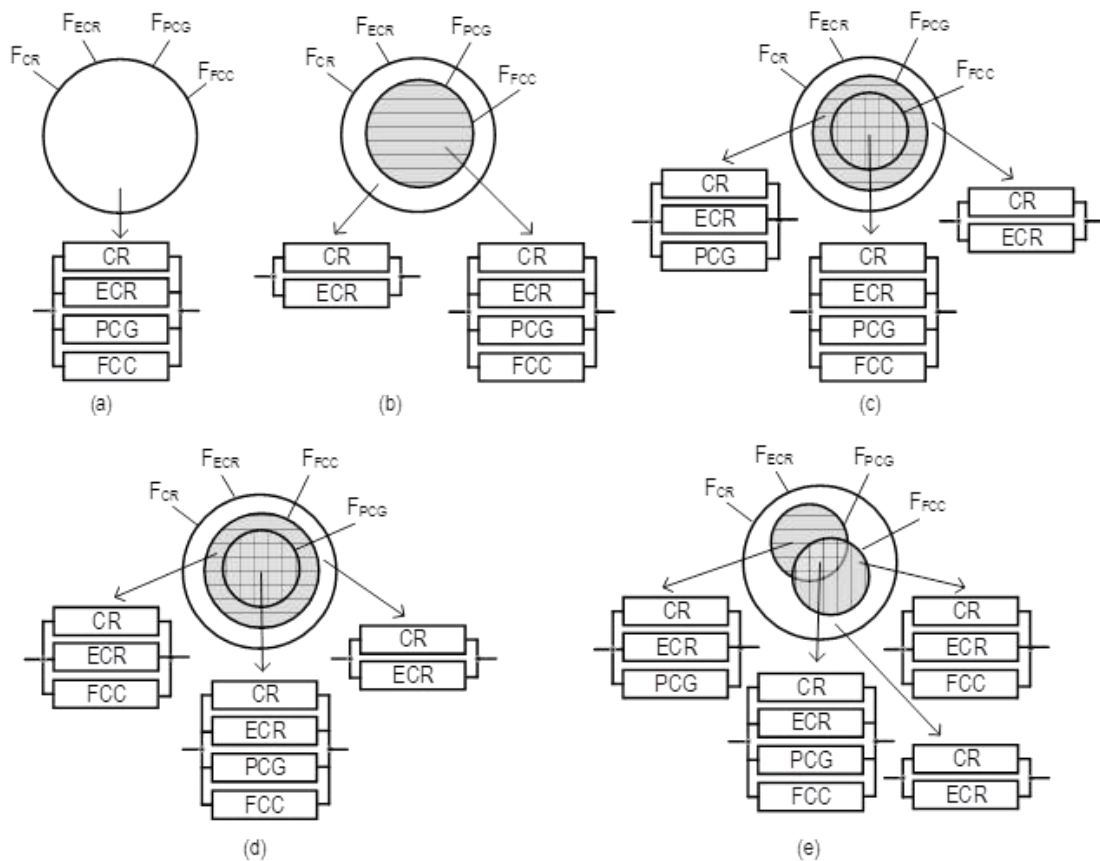


Рисунок 4.42 – Графічне представлення моделей покриття об'єкту системою моніторингу для варіантів розподілу функцій моніторингу між каналами SM (VAMF), а також структурні схеми надійності для кожного з варіантів: (а) модель для VAMF1, (b) модель для VAMF2, (c) модель для VAMF3, (d) модель для VAMF4 та (e) модель для VAMF5.

Як видно з рисунку 4.42, найбільша та найменша кількість структурних схем надійності (СН) мають VAMF5 (чотири СН, рисунок 4.2(e)) та VAMF1 (одна СН, рисунок 4.2(a)), відповідно.

Моделі надійності різних варіантів побудови систем моніторингу

В моделях використовуються наступні позначення:

$Com_{\alpha\beta}$ - комунікації між α та β , де $\alpha = EC, UC, ZC$, а $\beta = CR, ECR, PCG, FCC$.

DMU_{γ} - засоби підтримки прийняття рішень

в γ , де $\gamma = CR, ECR$.

Dtw_{β}/Prc_{β} - цифрові двійники/засоби обробки даних в β , де $\beta = CR, ECR, PCG, FCC$.

P_i-P_i - функція надійності I, де $i = Com_{\alpha}_{\beta}, DMU_{\gamma}, Dtw_{\beta}, Prc_{\beta}$; $\alpha = EC, UC, ZC$; $\beta = CR, ECR, PCG, FCC$; $i \gamma = CR, ECR$.

t - час роботи.

λ - базова інтенсивність відмов, що відповідає частоті відмов Com_{FCC} .

k_i - коефіцієнтом, на який необхідно помножити коефіцієнти відмов Com_{α}_{CR} і Com_{ψ}_{ECR} , щоб отримати їхні коефіцієнти відмов для аварійного режиму, де $\alpha = EC, UC, ZC$ і $\psi = EC, UC, ZC$.

k_E - коефіцієнт, на який необхідно помножити коефіцієнти відмов Com_{EC}_{CR} , Com_{UC}_{CR} , Com_{ZC}_{CR} , Com_{UC}_{ECR} та Com_{ZC}_{ECR} , щоб отримати їхні коефіцієнти відмов для аварійного режиму.

$2k_E$ - коефіцієнт, на який необхідно помножити частоту відмов Com_{ZC}_{ω} , щоб отримати її частоту відмов для аварійного режиму, де $\omega = PCG, FCC$.

Використовуються такі припущення:

- компоненти SM мають експоненційний час до відмови;
- SM вважається системою, що не підлягає відновленню.

При виборі БПЛА з урахуванням завдань моніторингу та умов експлуатації SM враховуються обмежені обчислювальні можливості та обмежений термін служби батареї.

Нижче наведені ССН та формули, які використовуються для обчислень імовірності безвідмовної роботи відповідного VAMF SM.

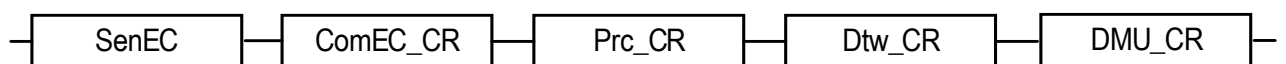


Рисунок 4.43 – ССН, що використовується для обчислення функцій надійності для VAMF1: S_1^{EC-N} and S_1^{EC-E} з використанням формул (4.32) та (4.33), відповідно.

$$P_1^{EC-N} = P_{SenEC} P_{ComEC_CR} P_{Prc_CR} P_{Dtw_CR} P_{DMU_CR}, \quad (4.34)$$

$$\text{де } P_{SenEC} = e^{-\lambda k_{SenEC} t}, P_{ComEC_CR} = e^{-\lambda k_{ComEC_CR} t}, P_{Prc_CR} = e^{-\lambda k_{Prc_CR} t}, \\ P_{Dtw_CR} = e^{-\lambda k_{Dtw_CR} t}, P_{DMU_CR} = e^{-\lambda k_{DMU_CR} t}.$$

$$P_1^{EC-E} = P_{SenEC} P_{ComEC_CR}^E P_{Prc_CR} P_{Dtw_CR} P_{DMU_CR}, \quad (4.35)$$

$$\text{де } P_{ComEC_CR}^E = e^{-k_E \lambda k_{ComEC_CR} t}.$$

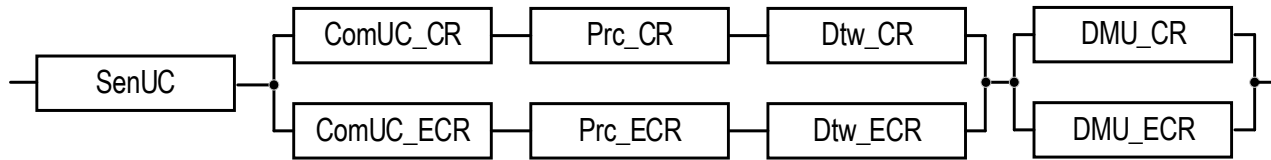


Рисунок 4.44 – СШ, що використовується для обчислення функцій надійності для VAMF2.1: $S_{2,1}^{UC-N}$ та $S_{2,1}^{UC-E}$ з використанням формул (4.36) та (4.37), відповідно.

$$P_{2,1}^{UC-N} = P_{SenUC} (1 - (1 - P_{ComUC_CR} P_{Prc_CR} P_{Dtw_CR}) (1 - P_{ComUC_ECR} P_{Prc_ECR} P_{Dtw_ECR})) \times (1 - (1 - P_{DMU_CR}) (1 - P_{DMU_ECR})), \quad (4.36)$$

$$\text{де } P_{SenUC} = e^{-\lambda k_{SenUC} t}, P_{ComUC_CR} = e^{-\lambda k_{ComUC_CR} t}, P_{ComUC_ECR} = e^{-k_E \lambda k_{ComUC_ECR} t}, \\ P_{Prc_ECR} = e^{-k_E \lambda k_{Prc_ECR} t}, P_{Dtw_ECR} = e^{-\lambda k_{Dtw_ECR} t}, P_{DMU_ECR} = e^{-\lambda k_{DMU_ECR} t}.$$

$$P_{2,1}^{UC-E} = P_{SenUC}^E (1 - (1 - P_{ComUC_CR}^E P_{Prc_CR} P_{Dtw_CR}) (1 - P_{ComUC_ECR}^E P_{Prc_ECR} P_{Dtw_ECR})) \times (1 - (1 - P_{DMU_CR}) (1 - P_{DMU_ECR})), \quad (4.37)$$

$$\text{де } P_{ComUC_CR}^E = e^{-k_E \lambda k_{ComUC_CR} t}, P_{ComUC_ECR}^E = e^{-k_E \lambda k_{ComUC_ECR} t}$$

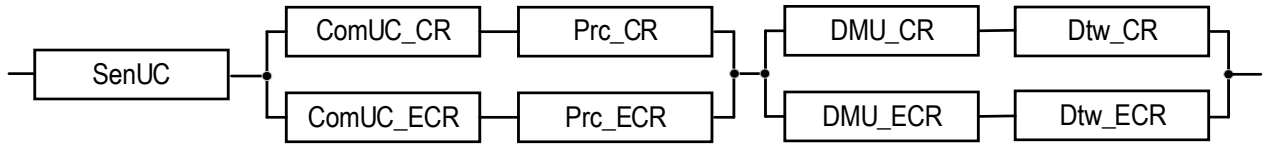


Рисунок 4.45 – ССН, що використовується для обчислення функцій надійності для VAMF2.2: $S_{2,2}^{UC-N}$ та $S_{2,2}^{UC-E}$ з використанням формул (4.38) та (4.39), відповідно.

$$P_{2,2}^{UC-N} = P_{SenUC} (1 - (1 - P_{ComUC_CR} P_{Prc_CR}) (1 - P_{ComUC_ECR} P_{Prc_ECR})) (1 - (1 - P_{DMU_CR} P_{Dtw_CR}) (1 - P_{DMU_ECR} P_{Dtw_ECR})), \quad (4.38)$$

$$P_{2,2}^{UC-E} = P_{SenUC} (1 - (1 - P_{ComUC_CR}^E P_{Prc_CR}) (1 - P_{ComUC_ECR}^E P_{Prc_ECR})) (1 - (1 - P_{DMU_CR} P_{Dtw_CR}) (1 - P_{DMU_ECR} P_{Dtw_ECR})). \quad (4.39)$$

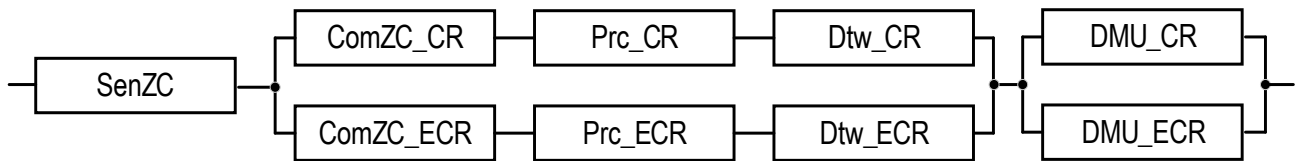


Рисунок 4.46 – ССН, що використовується для обчислення функцій надійності для VAMF3.1: $S_{2,1}^{ZC-N}$ та $S_{2,1}^{ZC-E}$ з використанням формул (4.40) та (4.41), відповідно.

$$P_{2,1}^{ZC-N} = P_{SenZC} (1 - (1 - P_{ComZC_CR} P_{Prc_CR} P_{Dtw_CR}) (1 - P_{ComZC_ECR} P_{Prc_ECR} P_{Dtw_ECR})) \times (1 - (1 - P_{DMU_CR}) (1 - P_{DMU_ECR})), \quad (4.40)$$

де $P_{SenZC} = e^{-\lambda k_{SenZC} t}$, $P_{ComZC_CR} = e^{-\lambda k_{ComZC_CR} t}$, $P_{ComZC_ECR} = e^{-\lambda k_{ComZC_ECR} t}$

$$P_{2,1}^{ZC-E} = P_{SenZC} (1 - (1 - P_{ComZC_CR}^E P_{Prc_CR} P_{Dtw_CR}) (1 - P_{ComZC_ECR}^E P_{Prc_ECR} P_{Dtw_ECR})) \times (1 - (1 - P_{DMU_CR}) (1 - P_{DMU_ECR})), \quad (4.41)$$

де $P_{ComZC_ECR}^E = e^{-k_E \lambda k_{ComZC_ECR} t}$.

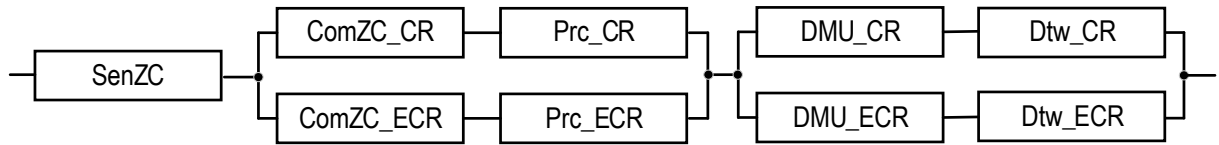


Рисунок 4.47 – ССН, що використовується для обчислення функцій надійності для VAMF3.2: $S_{2,2}^{ZC_N}$ та $S_{2,2}^{ZC_E}$ з використанням формул (4.42) та (4.43), відповідно.

$$P_{2,2}^{ZC_N} = P_{SenZC} (1 - (1 - P_{ComZC_CR} P_{Prc_CR})(1 - P_{ComZC_ECR} P_{Prc_ECR})) (1 - (1 - P_{DMU_CR} P_{Dtw_CR})(1 - P_{DMU_ECR} P_{Dtw_ECR})). \quad (4.41)$$

$$P_{2,2}^{ZC_E} = P_{SenZC} (1 - (1 - P_{ComZC_CR}^E P_{Prc_CR})(1 - P_{ComZC_ECR}^E P_{Prc_ECR})) (1 - (1 - P_{DMU_CR} P_{Dtw_CR})(1 - P_{DMU_ECR} P_{Dtw_ECR})). \quad (4.42)$$

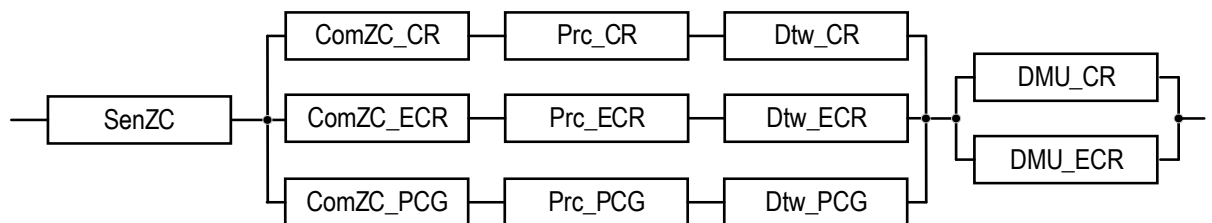


Рисунок 4.48 – ССН, що використовується для обчислення функцій надійності для VAMF2.1: $S_{3(PCG)_1}^{ZC_E}$ з використанням формули (4.44).

$$P_{3(PCG)_1}^{ZC_E} = P_{SenZC} (1 - (1 - P_{ComZC_CR}^E P_{Prc_CR} P_{Dtw_CR})(1 - P_{ComZC_ECR}^E P_{Prc_ECR} P_{Dtw_ECR})) \times (1 - P_{ComZC_PCG}^E P_{Prc_PCG} P_{Dtw_PCG}) (1 - (1 - P_{DMU_CR})(1 - P_{DMU_ECR})). \quad (4.44)$$

де $P_{ComZC_PCG}^E = e^{-2k_E \lambda k_{ComZC_PCG} t}$, $P_{Prc_PCG} = e^{-\lambda k_{Prc_PCG} t}$, $P_{Dtw_PCG}^E = e^{-\lambda k_{Dtw_PCG} t}$.

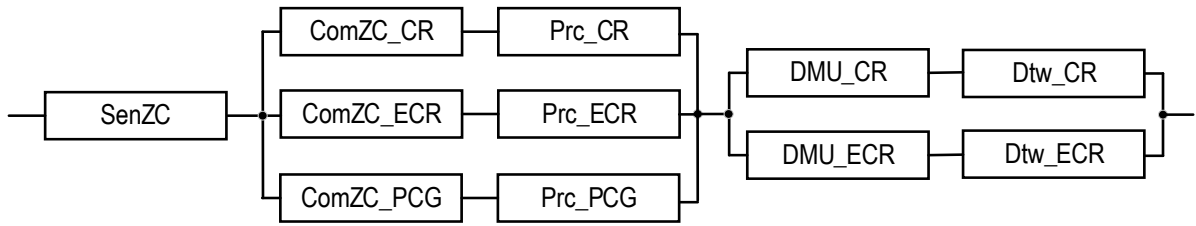


Рисунок 4.49 – ССН, що використовується для обчислення функцій надійності для VAMF4.1: $S_{3(FCC)_2}^{ZC_E}$ з використанням формули (4.45)

$$P_{3(PCG)_2}^{ZCE} = P_{SenZC} \left(1 - (1 - P_{ComZC_{CR}}^E P_{Prc_{CR}}) (1 - P_{ComZC_{ECR}}^E P_{Prc_{ECR}}) (1 - P_{ComZC_{PCG}}^E P_{Prc_{PCG}}) \right) \left(1 - (1 - P_{DMU_{CR}}^E P_{Dtw_{CR}}) (1 - P_{DMU_{ECR}}^E P_{Dtw_{ECR}}) \right) \quad (4.45)$$

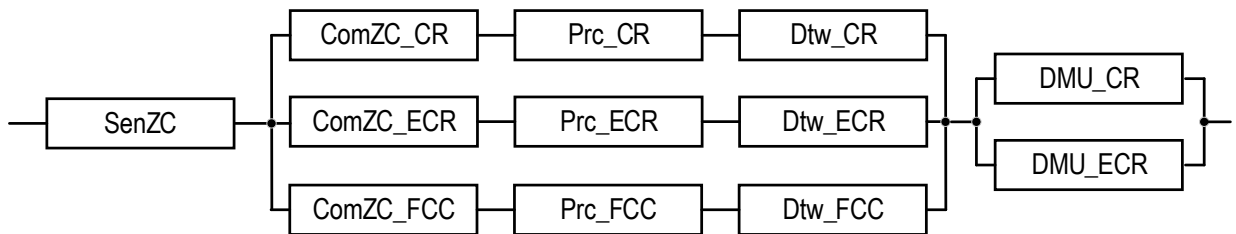


Рисунок 4.50 – ССН, що використовується для обчислення функцій надійності для VAMF5.1: $S_{3(FCC)_1}^{ZC_E}$ з використанням формули (4.46)

$$P_{3(FCC)_1}^{ZCE} = P_{SenZC} \left(1 - (1 - P_{ComZC_{CR}}^E P_{Prc_{CR}} P_{Dtw_{CR}}) (1 - P_{ComZC_{ECR}}^E P_{Prc_{ECR}} P_{Dtw_{ECR}}) \times (1 - P_{ComZC_{FCC}}^E P_{Prc_{FCC}} P_{Dtw_{FCC}}) \right) (1 - P_{DMU_{CR}}) (1 - P_{DMU_{ECR}}), \quad (4.46)$$

де $P_{ComZC_{FCC}}^E = e^{-2k_E \lambda k_{ComZC_{FCC}} t}$, $P_{Prc_{FCC}}^E = e^{-\lambda k_{Prc_{FCC}} t}$, $P_{Dtw_{FCC}}^E = e^{-\lambda k_{Dtw_{FCC}} t}$.

4.5 Модель оцінювання безпеки сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів

4.5.1 Розроблення моделі оцінювання безпеки сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Проблема безпеки застосування СОМС БПЛА є актуальною, тому що вдосконалення технічного рівня та розширення переліку завдань СОМСБПЛА в різних галузях обумовлює виникнення нових викликів безпеці їх застосування, як у сфері кібербезпеки, так і сфері фізичної безпеки.

Ризики для кібербезпеки обумовлені використанням бездротових технологій, які дозволяють зловмисникам створювати загрози цілісності, конфіденційності і доступності. При цьому можна розглядати ці властивості і стосовно інформації, яка передається бездротовими каналами, і стосовно БПЛА як фізичного об'єкту, доступність якого також може бути втрачена через кібератаки. Втрата керування приводить до виникнення ризиків фізичної природи, які включають падіння, зіткнення або створення перешкод іншим літальним апаратам у повітряному просторі. Ці проблеми призвели до збільшення уваги до питань забезпечення безпеки застосування та розробки підходів до захисту БПЛА.

Окрім того в основі СОМС БПЛА лежить групове застосування БПЛА, яке забезпечує стійкість, гнучкість та можливість динамічної адаптації системи до зміни умов виконання завдань [214, 215]. Тому безпека застосування СОМС БПЛА тісно пов'язана з управлінням та комунікацією БПЛА стає критичним аспектом для забезпечення безпеки застосування СОМС БПЛА, побудованих на їх основі, та вимагає системного підходу до розвитку теорії забезпечення безпеки та постійного вдосконалення заходів захисту БПЛА [216].

Безпілотний літальний апарат можна розглядати як приклад кіберфізичної системи (рисунок 4.51), кожна з складових якої може впливати на безпеку застосування, і у фізичному, і у кіберсередовищі [217, 218].

Фізична сутність представляє БПЛА як матеріальний об'єкт, виникнення відмов якого, або використання якого у зловмисних цілях може привести до порушення фізичної безпеки. Інформаційна сутність представляє корисне навантаження, яке генерує потоки даних, вплив на які може привести до порушення властивостей кібербезпеки. Контролюєма сутність представляє обладнання, яке використовується для управління польотом БПЛА, і вплив на яку може привести до порушення і фізичної, і кібербезпеки.

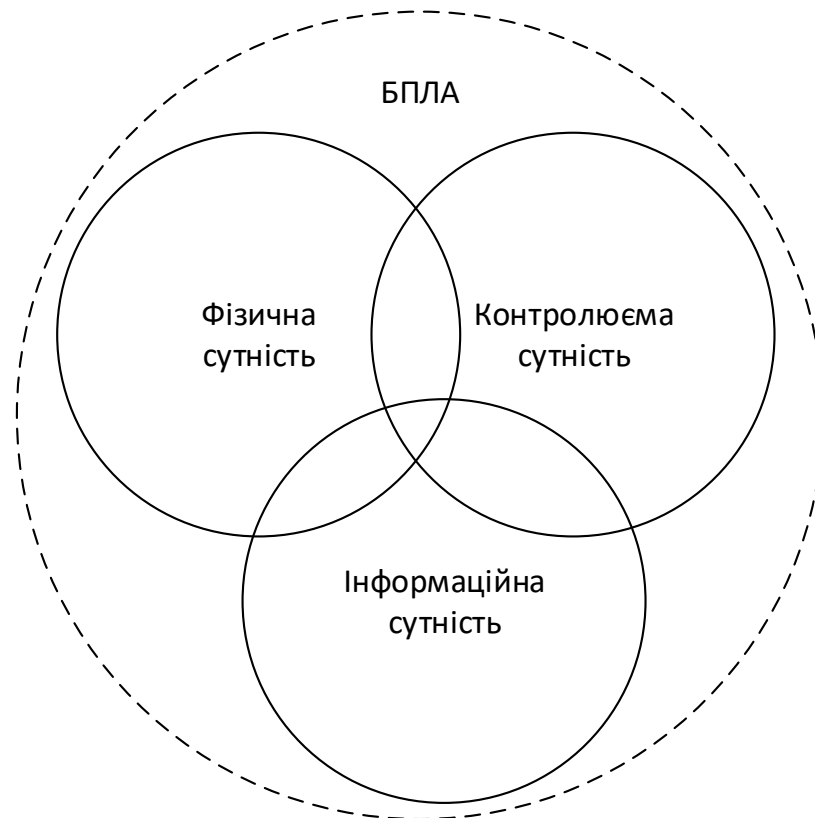


Рисунок 4.51 – Модель БПЛА як кіберфізичної системи

На рисунку 4.51 представлено модель впливу відмов на різні сутності БПЛА і можливих станів, що можуть виникнути внаслідок їх виникнення. Можна побачити, що відмови можуть привести до різних станів, у тому числі до втрати БПЛА та порушення фізичної безпеки, яке полягає у нанесення фізичної шкоди внаслідок його падіння.

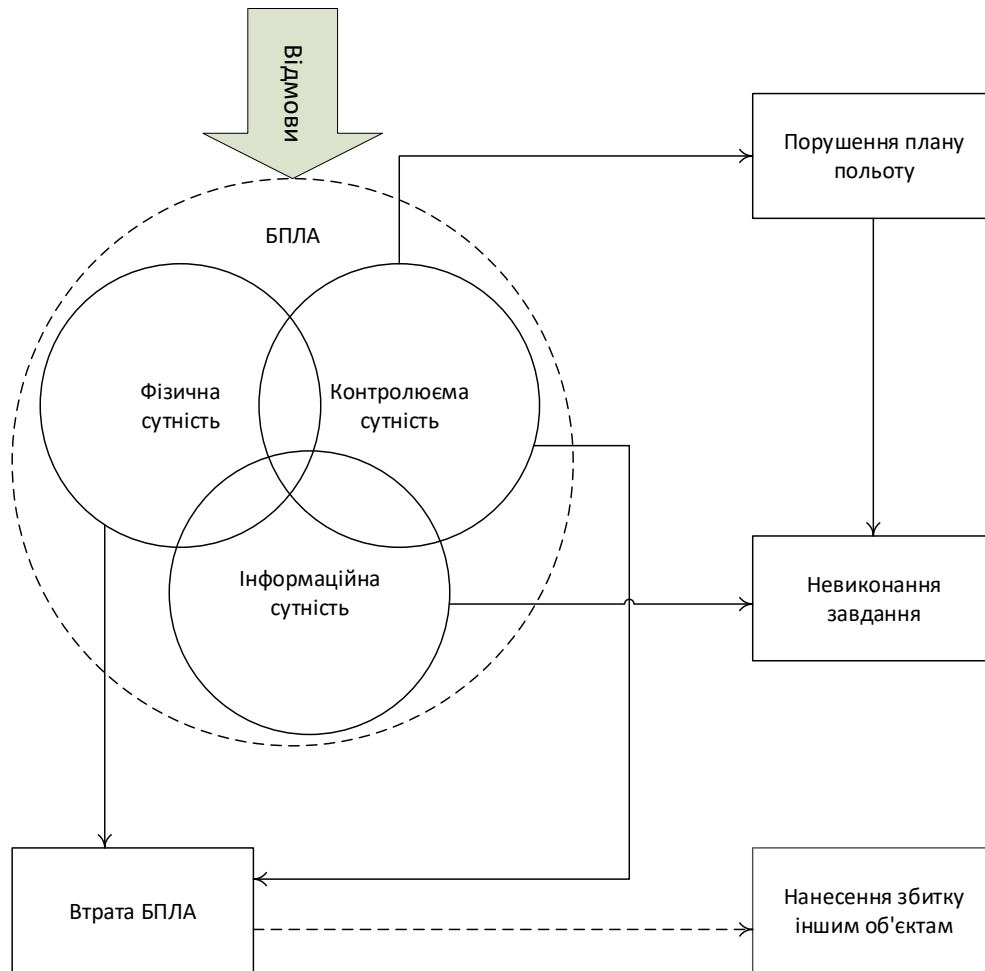


Рисунок 4.52 – Вплив відмов на безпеку застосування БПЛА.

Порушення плану польоту обумовлюється порушеннями в роботі обладнанні БПЛА, яке не приводить до повної відмови від виконання завдання, а лише погіршує ефективність його виконання. Як приклад можна розглядати, відмову системи глобального позиціонування (GPS) при працездатній інерційній системі навігації. В такому разі, завдання може бути виконано частково (з гіршою якістю), або невиконане взагалі, коли, наприклад точність навігації не дозволила обстежити заданий район.

Подібний підхід можна застосовувати у разі розгляду функціонування БПЛА як системи з деградацією, що розглядалося раніше [210].

На рисунку 4.52 представлено модель впливу кібератак на безпеку застосування БПЛА і можливих станів, до яких БПЛА внаслідок них може

перейти. Кібератаки на системи БПЛА можуть привести до повного комплексу порушень безпеки, а саме порушення конфіденційності, цілісності та доступності як інформації, так і БПЛА як фізичної сутності, втрата якої може привести до порушення функційної безпеки.

Також можна розглядати ситуації, коли кібератаки призводять до відмов обладнання БПЛА, що обумовлює більш складні моделі переходів, але в даній роботі це не розглядається.

Подальші результати стосуються лише дослідженню впливу кібератак на безпеку застосування БПЛА.

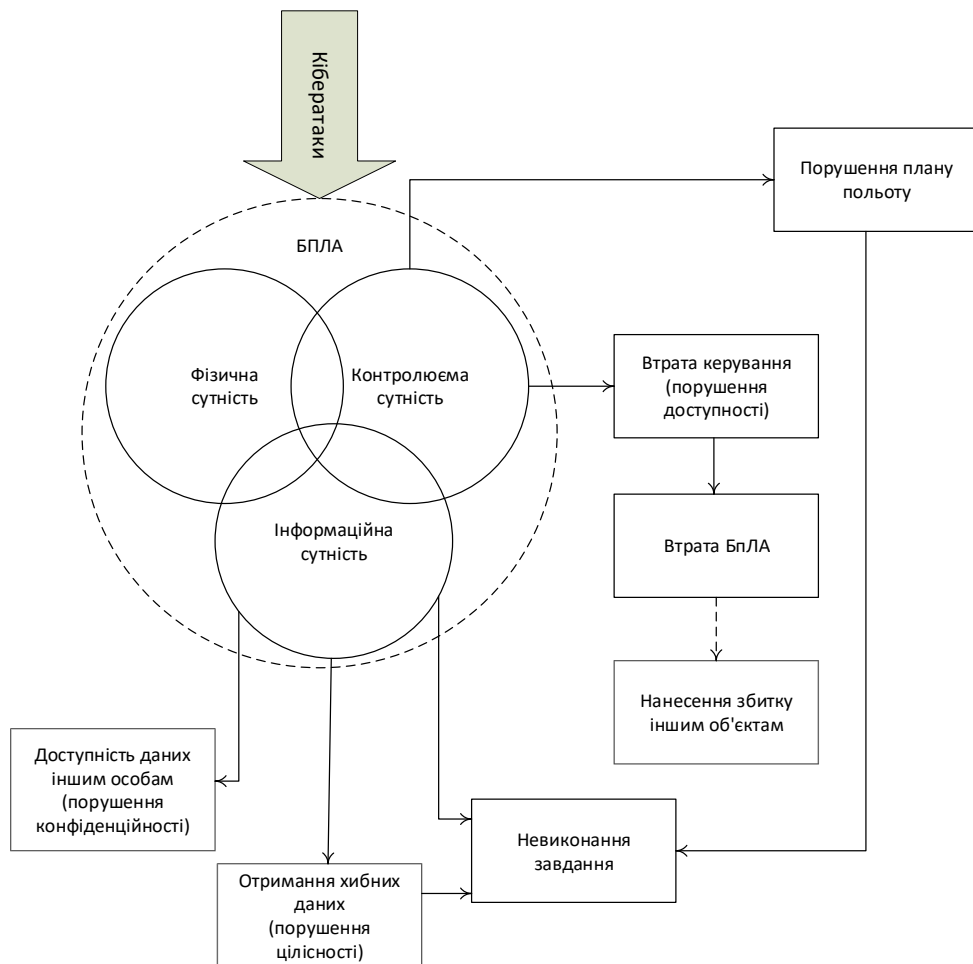


Рисунок 4.53 – Вплив кібератак на безпеку застосування БПЛА

Для оцінки безпеки функціонування систем використовуються різні підходи. Одним з найбільш поширених є ІМЕСА (англ. Intrusion Modes, Effects and Criticality Analysis) [219, 220]. Даний підхід дозволяє оцінювати ризики для

систем від здійснення кібератак та планувати контрзаходи для зниження цих ризиків, але при його використанні складно отримати кількісні показники.

Для усунення даного недоліка пропонується при проведенні оцінювання безпеки застосування СОМС БПЛА використовувати апарат марковських моделей, який дозволяє описати можливі стани і переходи між ними, які обумовлені кібератаками та вживанням контрзаходів проти даних кібератак, у вигляді графу, де стани це вершини графу, а ребра – це переходи між станами.

Кібератаки на БПЛА можуть бути спрямовані і на функції керування і на функції, пов'язані зі збиранням, формуванням та передаванням даних корисного навантаження. При побудові моделі враховувались такі види кібератак:

- перехоплення/порушення управління;
- GPS-спуфінг;
- перехоплення/порушення в каналах передавання даних корисного навантаження.

Для оцінювання безпеки СОМС БПЛА використовувалась розроблена марковська модель у вигляді графу, де вершини графу, це стани, в яких перебуває БПЛА, а ребра – переходи між цими станами, які характеризуються інтенсивностями кібератак та вжиття контрзаходів.

На рисунку 4.53 представлена модель безпеки застосування СОМС БПЛА у вигляді марковського графу з станами:

- S_0 - 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.

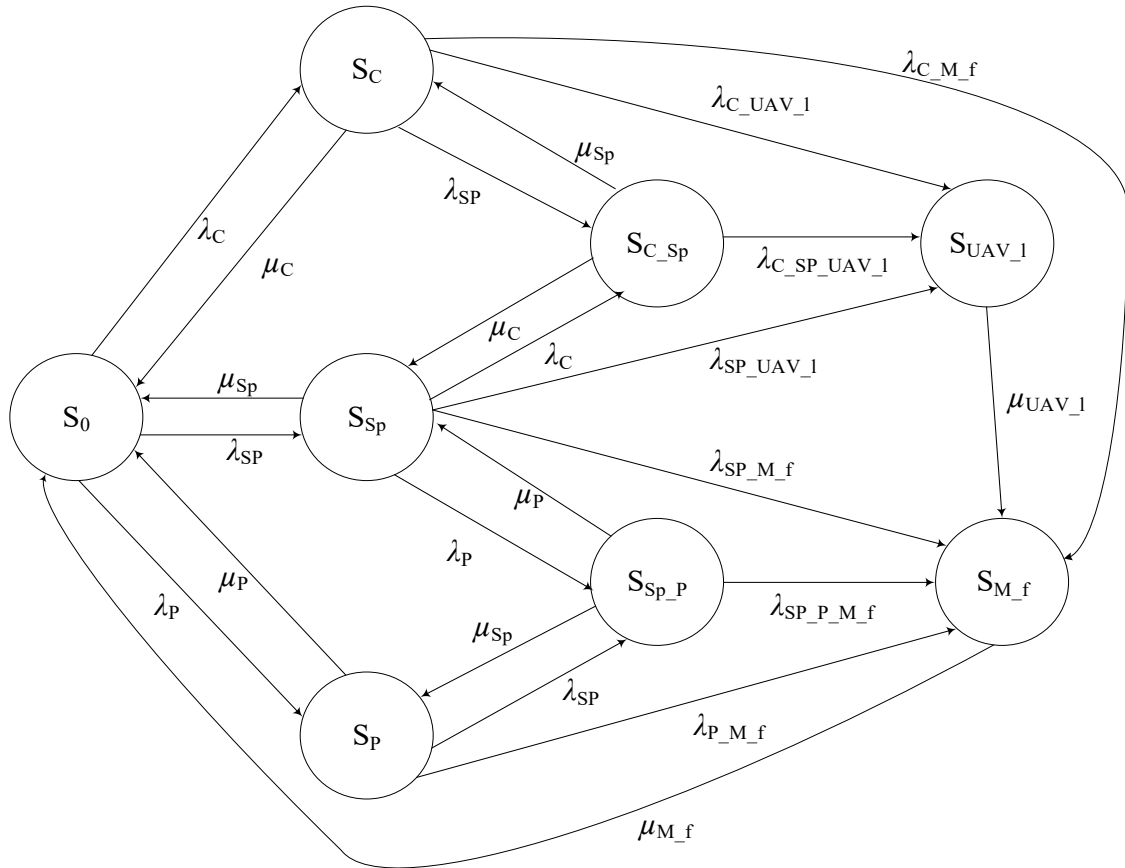


Рисунок 4.53 – Марковська модель безпеки застосування СОМС БПЛА

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 більш складні варіанти комплексування.

При розробці моделі приймалися припущення, що потоки кібератак та вживання заходів щодо їх протидії є пуасонівськими.

Для визначення імовірностей перебування БПЛА у відповідних станах необхідно розв'язати наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь, які є трансформацією рівнянь Колмогорова-Чепмена для стаціонарного режиму:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} - (\lambda_C + \lambda_{Sp} + \lambda_P)P_0 + \mu_C P_C + \mu_{Sp} P_{Sp} + \mu_P P_P + \mu_{M_f} P_{M_f} = 0; \\ \frac{dP_C}{dt} = -(\mu_C + \lambda_{Sp} + \lambda_{C_UAV_1} + \lambda_{C_M_f})P_C + \lambda_C P_0 + \mu_{Sp} P_{C_Sp} = 0; \\ \frac{dP_{C_Sp}}{dt} = -(\mu_{Sp} + \lambda_C + \lambda_P + \lambda_{Sp_UAV_1} + \lambda_{Sp_M_f})P_{C_Sp} + \lambda_{Sp} P_0 + \mu_C P_{C_Sp} + \mu_P P_{Sp_P} = 0; \\ \frac{dP_P}{dt} = -(\mu_P + \lambda_{Sp} + \lambda_P + \lambda_{P_M_f})P_P + \lambda_P P_0 + \mu_{Sp} P_{Sp_P} = 0; \\ \frac{dP_{C_Sp}}{dt} = -(\mu_{Sp} + \mu_C + \lambda_{C_Sp_UAV_1})P_{C_Sp} + \lambda_{Sp} P_C + \lambda_C P_{Sp} = 0; \\ \frac{dP_{Sp_P}}{dt} = -(\mu_{Sp} + \mu_P + \lambda_{Sp_P_M_f})P_{Sp_P} + \lambda_{Sp} P_P + \lambda_P P_{Sp} = 0; \\ \frac{dP_{UAV_1}}{dt} = -\mu_{UAV_1} P_{UAV_1} + \lambda_{C_UAV_1} P_C + \lambda_{C_Sp_UAV_1} P_{C_Sp} + \lambda_{Sp_UAV_1} P_{Sp} = 0; \\ \frac{dP_{M_f}}{dt} = -\mu_{M_f} P_{M_f} + \mu_{UAV_1} P_{UAV_1} + \lambda_{Sp_M_f} P_{Sp} + \lambda_{Sp_P_M_f} P_{Sp_P} + \lambda_{P_M_f} P_P = 0, \end{array} \right. \quad (4.47)$$

де P_0 - імовірність безпечного функціонування БПЛА;

P_C - імовірність перебування БПЛА під кібератакою на канали управління;

P_{Sp} - імовірність перебування БПЛА під кібератакою типу GPS-спуфінгу;

P_P - імовірність перебування БПЛА під кібератакою на канали передавання даних корисного навантаження;

P_{C_Sp} - імовірність перебування БПЛА під кібератакою на канали управління та GPS-спуфінгу;

P_{Sp_P} - імовірність перебування БПЛА під комбінованою кібератакою GPS-спуфінгу та на канали передавання даних корисного навантаження;

P_{UAV_1} - імовірність втрати керування БПЛА (може привести до повної фізичної втрати БПЛА);

P_{M_f} - імовірність невиконання завдання;

λ_C - інтенсивність кібератак на канали управління;

λ_{Sp} - інтенсивність кібератак типу GPS-спуфінгу;

λ_P - інтенсивність кібератак на канали передавання даних корисного навантаження;

$\lambda_{C_UAV_1}$ - інтенсивність втрати БПЛА через кібератаки на канали управління;

$\lambda_{C_M_f}$ - інтенсивність невиконання завдання через кібератаки на канали управління;

$\lambda_{C_Sp_UAV_1}$ - інтенсивність втрати БПЛА через комбіновану кібератаку на канали управління та GPS-спуфінгу;

$\lambda_{Sp_UAV_1}$ - інтенсивність втрати БПЛА через кібератаку GPS-спуфінгу

$\lambda_{Sp_M_f}$ - інтенсивність невиконання завдання БПЛА через кібератаку GPS-спуфінгу;

$\lambda_{P_M_f}$ - інтенсивність невиконання завдання через кібератаку на канали управління;

$\lambda_{Sp_P_M_f}$ - інтенсивність невиконання завдання БПЛА через комбіновану кібератаку GPS-спуфінгу та на канали передавання даних корисного навантаження;

μ_C - інтенсивність вживання контрзаходів проти кібератак на канали управління;

μ_{Sp} - інтенсивність вживання контрзаходів проти кібератак GPS-спуфінгу;

μ_P - інтенсивність вживання контрзаходів проти кібератак на канали передавання даних корисного навантаження;

μ_{M_f} - інтенсивність вживання комплексу заходів відновлення безпечного функціонування БПЛА після зриву виконання завдання;

μ_{UAV_1} - інтенсивність вживання комплексу заходів відновлення функціонування БПЛА після втрати керування БПЛА.

4.5.2 Дослідження моделі оцінювання безпеки сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів

При проведенні досліджень визначались фінальні імовірності перебування СОМС БПЛА у станах з використанням системи рівнянь, яка є приведеної для стаціонарного режиму системою рівнянь (4.47) з доданим рівнянням нормування:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(\lambda_C + \lambda_{Sp} + \lambda_P)P_0 + \mu_C P_C + \mu_{Sp} P_{Sp} + \mu_P P_P + \mu_{M_f} P_{M_f} = 0; \\ -(\mu_C + \lambda_{Sp} + \lambda_{C_UAV_1} + \lambda_{C_M_f})P_C + \lambda_C P_0 + \mu_{Sp} P_{C_Sp} = 0; \\ -(\mu_{Sp} + \lambda_C + \lambda_P + \lambda_{Sp_UAV_1} + \lambda_{Sp_M_f})P_{Sp} + \lambda_{Sp} P_0 + \mu_C P_{C_Sp} + \mu_P P_{Sp_P} = 0; \\ -(\mu_P + \lambda_{Sp} + \lambda_P + \lambda_{P_M_f})P_P + \lambda_P P_0 + \mu_{Sp} P_{Sp_P} = 0; \\ -(\mu_{Sp} + \mu_C + \lambda_{C_Sp_UAV_1})P_{C_Sp} + \lambda_{Sp} P_C + \lambda_C P_{Sp} = 0; \\ -(\mu_{Sp} + \mu_P + \lambda_{Sp_P_M_f})P_{Sp_P} + \lambda_{Sp} P_P + \lambda_P P_{Sp} = 0; \\ -\mu_{UAV_1} P_{UAV_1} + \lambda_{C_UAV_1} P_C + \lambda_{C_Sp_UAV_1} P_{C_Sp} + \lambda_{Sp_UAV_1} P_{Sp} = 0; \\ -\mu_{M_f} P_{M_f} + \mu_{UAV_1} P_{UAV_1} + \lambda_{Sp_M_f} P_{Sp} + \lambda_{Sp_P_M_f} P_{Sp_P} + \lambda_{P_M_f} P_P = 0; \\ P_0 + P_C + P_{Sp} + P_P + P_{C_Sp} + P_{Sp_P} + P_{UAV_1} + P_{M_f} = 1, \end{array} \right. \quad (4.48)$$

Розрахунки проводились для наступних вихідних даних:

$\lambda_C = 0,001$ 1/год, $\lambda_{Sp} = 0,001$ 1/год, $\lambda_P = 0,002$ 1/год, $\lambda_{C_UAV_1} = 0,00001$ 1/год, $\lambda_{C_M_f} = 0,2$ 1/год, $\lambda_{C_Sp_UAV_1} = 0,1$ 1/год, $\lambda_{Sp_UAV_1} = 0,05$ 1/год, $\lambda_{Sp_M_f} = 0,1$ 1/год, $\lambda_{P_M_f} = 0,01$ 1/год, $\lambda_{Sp_P_M_f} = 0,1$ 1/год, $\mu_C = 0,002$ 1/год, $\mu_{Sp} = 0,002$ 1/год, $\mu_P = 0,001$ 1/год, $\mu_{M_f} = 0,001$ 1/год, $\mu_{UAV_1} = 0,001$ 1/год.

Результати розрахунків:

$P_0 = 0,174379$, $P_C = 0,000859$, $P_{Sp} = 0,002558$, $P_P = 0,024953$, $P_{C_Sp} = 0,000032$, $P_{Sp_P} = 0,000292$, $P_{UAV_1} = 0,131198$, $P_{M_f} = 0,665728$.

Даний підхід до оцінювання безпеки дозволяє кількісно оцінювати вплив параметрів атак (λ) та ефективність заходів протидії (μ) на безпеку застосування СОМС БПЛА.

На рисунку 4.54 представлені результати оцінки впливу на безпечне функціонування БПЛА інтенсивності кібератак на канали управління ($\lambda_C = 0,001 \dots 0,005$ 1/год).

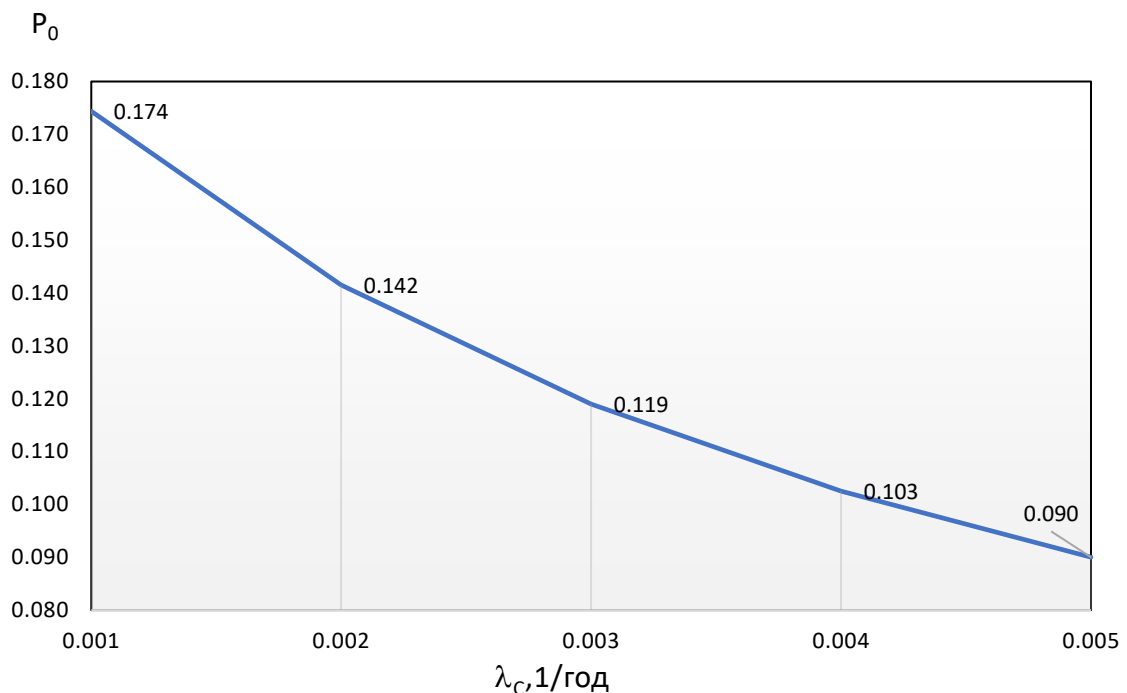


Рисунок 4.54 – Залежність імовірності безпечного функціонування БПЛА від інтенсивності кібератак на канали управління

На рисунку 4.55 представлені результати оцінки впливу на безпечне функціонування БПЛА інтенсивності вживання контрзаходів проти кібератак на канали управління ($\mu_C = 0,002 \dots 0,032$ 1/год) (рисунок 4.47);

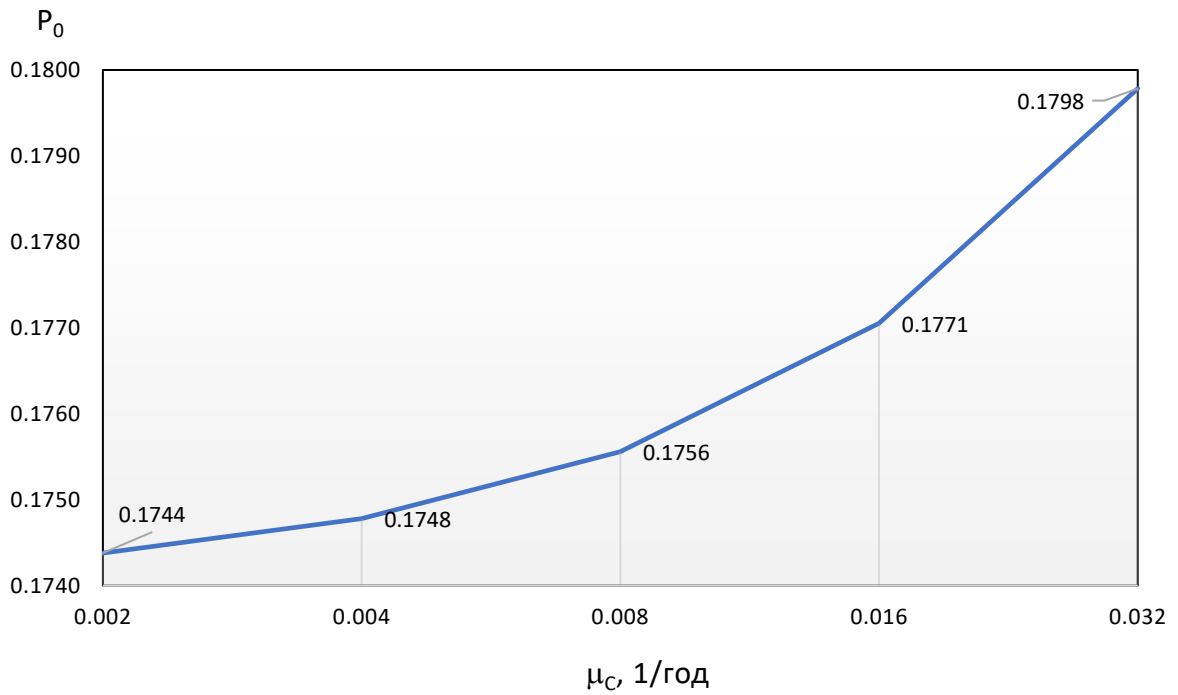


Рисунок 4.55 – Залежність імовірності безпечного функціонування БПЛА від інтенсивності вживання контрзаходів проти кібератак на канали управління

На рисунку 4.56 представлені результати оцінки впливу на безпечне функціонування БПЛА інтенсивності вживання комплексу заходів відновлення безпечного функціонування БПЛА після зриву виконання завдання ($\mu_{M_f} = 0,001 \dots 0,005$ 1/год) (рисунок 4.48).

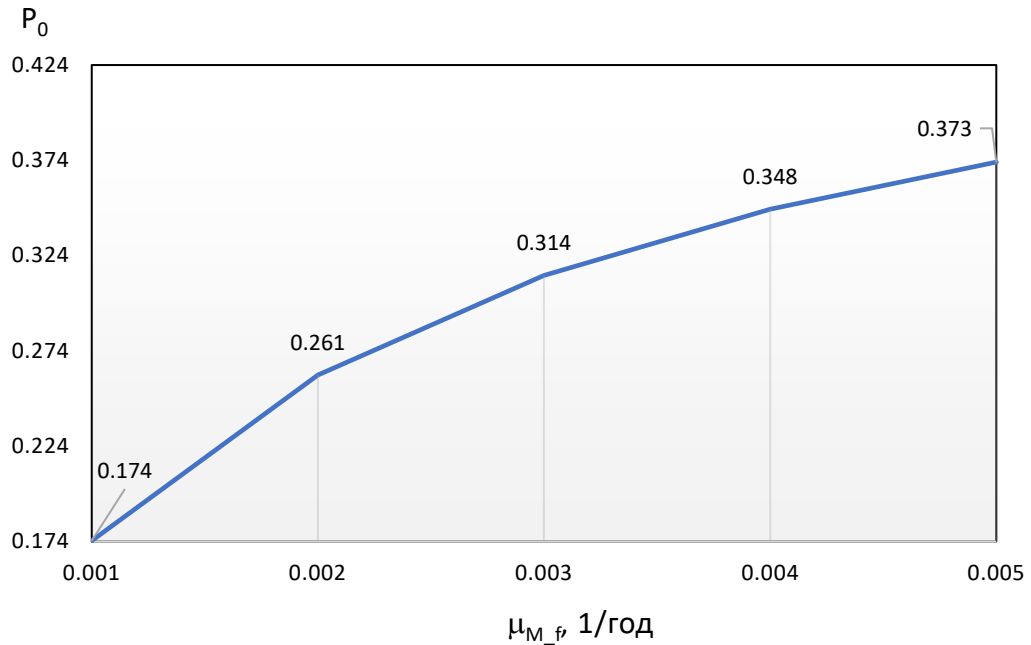


Рисунок 4.56 – Залежність імовірності безпечного функціонування БПЛА від інтенсивності вживання комплексу заходів відновлення безпечного функціонування БПЛА після зриву виконання завдання

Аналіз отриманих результатів вказує на значний вплив на безпеку функціонування інтенсивностей кібератак. Збільшення інтенсивності вживання заходів проти однієї з кібератак приводить лише до незначного підвищення безпеки застосування БПЛА. Проте зусилля спрямовані на протидію комплексним атакам та зриву виконання завдань дозволяють значно підвищити безпеку застосування БПЛА.

4.5 Висновки до четвертого розділу

Розроблено аналітичні 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», що дозволяє визначати кількісні показники функційної надійності СОМС БПЛА.

Проведено аналіз функціонування БПЛА як об'єкта з деградацією та проаналізовано вплив деградації та повних відмов БПЛА на якість виконання місії. 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. Імовірність виконання місії з деградацією, порівняно з імовірністю успішного завершення місії без деградації якості, збільшується з зростанням кількості рівнів деградації і може досягати 10%.

Вдосконалено моделі систем масового обслуговування СОМС БПЛА, які дозволяють досліджувати функціонування та покращувати точність оцінювання показників гарантоздатності за рахунок врахування процесів некерованої та керованої деградації якості виконання завдань.

Показано, що застосування керованої деградації не зменшує кількість втрачених замовлень, але дозволяє зменшити загальну вартість втрат за рахунок перерозподілу наявних ресурсів.

Запропоновано марковську модель готовності СОМС БПЛА з урахуванням кібератак на інформаційні активи, зокрема, навігаційні системи, сенсорне обладнання та канали управління, яка враховує стани втрати працездатності внаслідок таких атак та аварійного закінчення місії та дозволяє обґрунтовувати вимоги до систем захисту та комплексу контрзаходів.

Основні наукові результати, що наведені в першому розділі, опубліковано в роботах автора [7, 8, 13-16, 18-20, 26, 28-30, 32], зазначених в анотації.

РОЗДІЛ 5

МЕТОД ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА СКЛАДУ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

5.1. Розроблення методу формування структури та складу сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Розгортання СОМС БПЛА передбачає використання БПЛА як сервісів, що можуть виконувати різні типи завдань. Наприклад при розгортанні СОМС БПЛА на об'єктах критичної інфраструктури її функціонування може забезпечувати необхідний рівень функціональної безпеки шляхом виконання різноманітних завдань, до яких відносяться [5]:

- інспекція та моніторинг. БПЛА, оснащені камерами, тепловізорами та іншими сенсорами, можна використовувати для виконання планових інспекцій і моніторингу об'єктів та територій їх розміщення. Вони можуть забезпечити детальне спостереження за компонентами та системами об'єктів, виявити будь-які аномалії чи несправності та допомогти виявити потенційні проблеми до їх загострення;

- розгортання AdHoc мереж. БПЛА може нести обладнання для збору даних передачі від даних, вимірювальних станцій до диспетчерських/інформаційних центрів;

- фізична безпека. БПЛА можуть використовуватися для охорони периметра та спостереження за станом об'єктів як частина системи фізичного захисту. Вони можуть спостерігати за територією над і навколо зони розташування критичних елементів і виявляти будь-яку підозрілу активність, зловмисників або потенційні загрози;

- реагування на надзвичайні ситуації. У разі надзвичайної ситуації можна розгорнути сервіс на основі БПЛА для швидкої оцінки ситуації та забезпечення

обізнаності про наслідки, наприклад, БПЛА можна використовувати для огляду та картографування місцевості на території об'єктів та навколо цієї області для оцінки наслідків надзвичайних ситуацій.

Розміри об'єктів критичної інфраструктури досить великі, а завдання БПЛА різноманітні, тому необхідно створювати інфраструктуру для розміщення та обслуговування БПЛА. Ця інфраструктура має забезпечити тривалу експлуатацію БПЛА в автономних умовах і виконувати завдання:

- автономне планування польотів (маршрути, розклади, кількість БПЛА ред.);
- підзарядка/заміна акумулятора;
- зміна корисного навантаження;
- збір (та обробка) та передача даних до диспетчерського/інформаційного центру.

Також, під час функціонування СОМС БПЛА може виникати необхідність у зміні її структури, складу, переліку завдань тощо. За таких умов застосування стандартних підходів до побудови СОМС може привести до розгортання фактично нової системи. Для унеможливлення таких ситуацій необхідно передбачати можливість адаптації структури СОМС БПЛА під нові вимоги, умови виконання завдань та масштабування у ході виконання завдань.

Побудова адаптивної системи моніторингу має базуватись на застосуванні технологій, що забезпечують:

- спільне (групове) виконання завдань;
- адаптацію до нових вимог та умов;
- можливість нарощення (масштабування).

Варіативність завдань та умов їх виконання обумовлюють використання інтелектуальних рішень під час створення СОМС БПЛА, до яких відносяться мультиагентні системи [221 - 223].

Модель СОМС БПЛА у вигляді мультиагентної системи описано в п. 2.4. В розробленому методі формування структури та складу СОМС БПЛА використовуються онтології, які дозволяють:

- визначати складові холонів СОМС для виконання різних завдань (базова онтологія сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів);

- визначати чисельний склад холонів СОМС для забезпечення функційних вимог (онтологія моделей функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів);

- оцінювати показники гарантоздатності СОМС та обкантовувати рішення щодо забезпечення функційних вимог виконання завдань СОМС (онтологія моделей оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів).

Детальний опис онтологій наведено в п. 2.3.

При надходженні замовлення на виконання до базової онтології додається індивід, який наповнюється конкретним значеннями параметрів її виконання. Приклад опису типів місій в базовій онтології приведено в лістингу 5.1.

Лістинг 5.1 – Приклад опису типів місій

```
@prefix ex: <http://example.org/uav#> .
```

```
@prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> .
```

```
ex:Mission rdf:type owl:Class .
```

```
ex:MonitoringMission rdf:type owl:Class ; rdfs:subClassOf ex:Mission .
```

```
ex:SecurityMission rdf:type owl:Class ; rdfs:subClassOf ex:Mission .
```

```
ex:SensorDeploymentMission rdf:type owl:Class ; rdfs:subClassOf ex:Mission .
```

```
ex:InspectionMission rdf:type owl:Class ; rdfs:subClassOf ex:Mission .
```

Замовлення на виконання завдань, які надходять до СОМС ФБПЛА, характеризуються:

а) параметрами:

- 1) розміри району моніторингу;

2) розміри району, або відстань між наземними точками, для розгортання бездротових мереж;

3) довжина маршруту доставлення вантажів;

4) кількість цільових точок для обльоту тощо;

б) вимогами:

1) функційними:

- обмеження на час моніторингу;

- тривалість функціонування розгорнутих сенсорних мереж;

- продуктивність сервісу тощо;

2) нефункційними:

- надійність;

- безпечність;

- гарантоздатність тощо.

в) умовами виконання:

1) час доби

- день;

- ніч;

2) погодні умови:

- температура повітря;

- швидкість вітру;

- хмарність на її характеристики (тип хмарності, висота нижньої (верхньої) границі;

- метеорологічні явища та їх характеристики (дощ, туман і т.п.);

3) інші умови оточуючого середовища:

- випромінювання різного типу (теплове, електромагнітне, радіаційне та ін.);

- штучні аерозольні забруднення повітря (дими, випаровування) тощо.

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, по результатам якого визначається найгірші погодні умови, що очікуються. Також на цьому етапі створюється екземпляр місії який додається до визначеного типу (лістинг 5.2).

Лістинг 5.2 – Приклад OWL-коду екземпляру місії

```
ex:Mission_123 rdf:type ex:MonitoringMission ;
ex:hasCoverageArea "20"^^xsd:float ;
ex:hasResolutionRequirement "15"^^xsd:float ;
ex:hasDurationConstraint "1.5"^^xsd:float .
```

Після цього, з урахуванням прогнозованих погодних умов на час розгортання сервісу, формується SPARQL-запит до базової онтології СОМС БПЛА, за результатом якого визначаються:

- БПЛА, які можуть виконувати місію в поточних умовах і мають відповідне корисне навантаження для її виконання;
- АОЗС, у разі якщо час виконання місії більший за тривалість польоту БПЛА.

В результаті формується структура сервісу для виконання завдання, яка складається з:

- холону виконання з БПЛА
- холону обслуговування з АОЗС (у разі необхідності).

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.

Варіант скрипта для виклику зовнішньої моделі, отримання розрахунків та додавання їх до наведено в лістингу 5.3.

Лістинг 5.3 – Варіант скрипта для виклику вибраної моделі

```

from rdflib import Graph, Namespace, URIRef, Literal
from rdflib.namespace import RDF, XSD

# Завантаження онтології
g = Graph()
g.parse("uav_ontology_with_rule.owl", format="xml")

EX = Namespace("http://example.org/uav#")

# Пошук місії, які ще не мають результатів розрахунку
for mission in g.subjects(RDF.type, EX.MonitoringMission):
    if (mission, EX.hasNumberOfUAVs, None) not in g:
        # Отримаємо параметри місії
        area = g.value(mission, EX.hasCoverageArea)
        duration = g.value(mission, EX.hasDuration)
        resolution = g.value(mission, EX.hasResolution)

        # Виклик зовнішньої обчислювальної моделі (наприклад, Python-функція)
        def compute_required_uavs(area_km2, duration_hr, resolution_m):
            # умовна формула: більше площа і точність → більше БПЛА
            base = float(area_km2) * (1.0 / float(resolution_m)) / float(duration_hr)
            return int(max(1, round(base / 2))) # приклад спрощеної логіки

        num_uavs = compute_required_uavs(area, duration, resolution)

        # Додавання результатів назад в онтологію
        g.add((mission, EX.hasNumberOfUAVs, Literal(num_uavs, datatype=XSD.integer)))

# Збереження оновленої онтології
g.serialize("uav_ontology_results.owl", format="xml")

```

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, яка дозволяє обирати модель, що відповідає місії, за ознаками:

- а) особливості місій (завдань):

1) одиничні;

2) потокові;

б) тип покриттів, на яких базується виконання завдань:

1) точкове;

2) площадне;

3) часове:

– виконання завдань з визначеною тривалістю

– доступність цільової області для виконання завдань

в) характеристики ФБПЛА:

1) однорідність флоту БПЛА;

– одиничні БПЛА;

– флоти:

- рій;

- згряя;

2) обслуговуваність флоту БПЛА:

– необслуговувані;

– обслуговувані:

- стаціонарні засоби обслуговування;

- мобільні засоби обслуговування;

3) відновлюваність БПЛА у разі відмов:

– невідновлювальні;

– відновлювальні;

г) відмови:

1) відмови сервісу:

– відмови БПЛА;

– відмови підсистеми забезпечення БПЛА;

2) причини відмов:

– внаслідок фізичних дефектів;

– внаслідок проектних дефектів;

- відмови внаслідок кібератак;
- 3) багатоступеневість працездатності:
 - двоступенева;
 - багатоступенева (деградація);
 - тип деградації:
 - деградація характеристик БПЛА;
 - деградація якості місій БПЛА;
 - керованість деградації:
 - некерована;
 - керована.

Порядок отримання результатів оцінювання аналогічний описаному порядку для визначення необхідної кількості БПЛА.

У разі невідповідності сервісу СОМС БПЛА вимогам гарантоздатності вживаються ітераційні процедури, які містять вибір, реалізацію заходів з підвищення гарантоздатності та проведення повторного оцінювання гарантоздатності.

Алгоритм реалізації методу формування структури та складу СОМС БПЛА представлений на рисунку 5.1.

Блок 1. Надходження замовлення на виконання завдань до СОМС БПЛА.

Блок 2. Перевірка наявності ресурсів для розгортання сервісу.

Блок 3. Формування запиту на сервер прогнозування погоди на період розгортання сервісу.

Блок 4. Отримання результатів прогнозування погоди на період розгортання сервісу

Блок 5. Перевірка наявності у базі знань запиту на розгортання такого сервісу з такими вимогами в таких умовах..

Блок 7. Вилучення структури та складу сервісу з екземпляру в базовій онтології СОМС БПЛА.

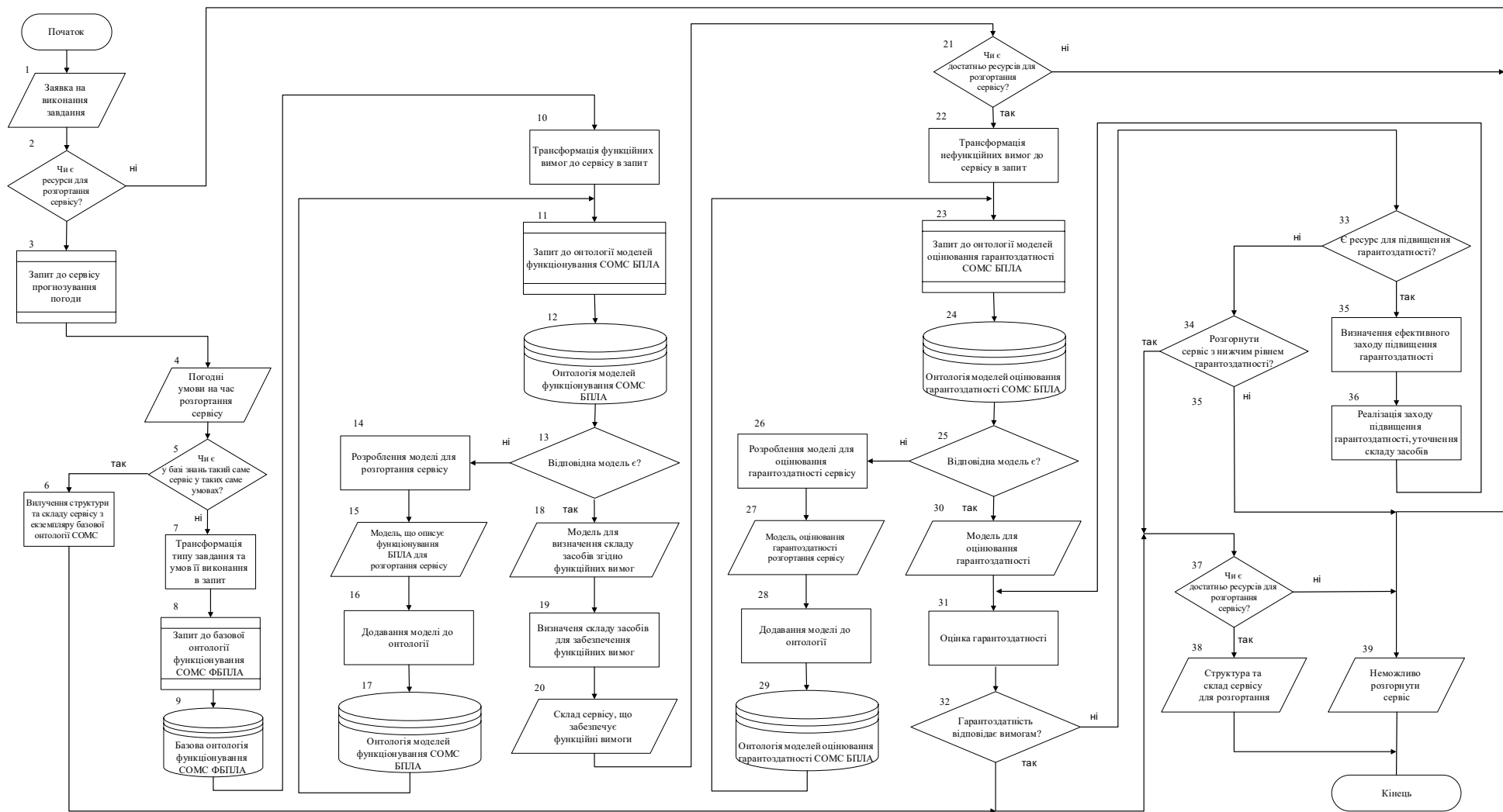


Рисунок 5.1 – Алгоритм реалізації методу формування структури та складу СОМС БПЛА

Блок 7. Трансформація типу сервісу та умов його виконання в запит до базової онтології СОМС БПЛА.

Блок 7. Здійснення запиту до базової онтології СОМС БПЛА (блок 8).

Блок 9. Повернення з базової онтології функціонування СОМС БПЛА відповіді на запит, яка містить структуру сервісу та перелік засобів для виконання завдання у визначених умовах.

Блок 10. Трансформація функційних вимог до завдання в запит до онтології моделей функціонування СОМС БПЛА.

Блок 11. Здійснення запиту до онтології моделей функціонування СОМС БПЛА (блок 12)

Блок 13. У разі відсутності необхідної моделі здійснюється розроблення моделі для розгортання сервісу (блок 14).

Блок 15. Отримання розробленої моделі для розгортання сервісу.

Блок 16. Додавання моделі до онтології моделей функціонування СОМС БПЛА (блок 17).

Блок 18. Отримання моделі для визначення складу засобів для розгортання сервісу, що задовольняє функційним вимогам.

Блок 19. Застосування АРІ моделі для проведення розрахунків чисельного складу сервісу для забезпечення функційних вимог до завдання. Моделі функціонування зберігаються у туманному середовищі. Розгортання та оцінювання гарантоздатності туманного кластера, який має забезпечувати гарантоздатність СОМС здійснюється на окремою методикою [224].

Блок 20. Повернення результатів розрахунків чисельного складу сервісу, що задовольняє функційним вимогам.

Блок 21. Перевірка наявних ресурсів для розгортання сервісу.

Блок 22. У разі наявності ресурсів для сервісу с забезпеченням функційних вимог здійснюється трансформація нефункційних вимог до сервісу в запит до онтології моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА.

Блок 23. Здійснення запиту до онтології моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА (блок 24).

Блок 25. У разі відсутності необхідної моделі здійснюється розроблення моделі для оцінювання гарантоздатності сервісу (блок 26).

Блок 27. Отримання розробленої моделі для оцінювання гарантоздатності сервісу.

Блок 28. Додавання моделі до онтології моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА (блок 29).

Блок 30. Отримання з онтології моделі оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА.

Блок 31. Застосування АРІ моделі для оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА, склад якої задовольняє виконання функційних вимог, та отримання результату оцінювання. Моделі оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА зберігаються у туманному кластері.

Блок 32. Перевірка відповідності гарантоздатності СОМС БПЛА вимогам. Якщо гарантоздатність не відповідає вимогам здійснюється перевірка ресурсів для можливого підвищення гарантоздатності (блок 33).

Блок 34. У разі відсутності ресурсів оцінюється можливість розгортання сервісу з поточним рівнем гарантоздатності.

Блок 35. Визначення ефективного заходу підвищення гарантоздатності та реалізація цього заходу (блок 36) та повторне оцінювання гарантоздатності (блок 31).

У разі, якщо оцінка гарантоздатності задовольняє вимогам та достатньо ресурсів для розгортання сервісу (блок 37), на основі визначеної структури та складу здійснюється розгортання сервісу (блок 38).

Блок 39. Інформування про неможливість розгортання гарантоздатного сервісу с заданими вимогами.

У разі невідповідності гарантоздатності вимогам для визначення напрямку в якому буде реалізовуватись заходи з підвищення здійснюється

F(I)MECA аналіз [131], який дозволяє для переліку загроз встановити, протидія якій з них є найбільш ефективною для забезпечення гарантоздатності. Після цього обираються та реалізуються заходи з підвищення гарантоздатності.

Підвищення гарантоздатності може бути досягнуто за рахунок:

- 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

Можна побачити, що в даному випадку завдання вибору заходу є складною багатокритеріальною задачею, тому що захід, що забезпечує максимальне підвищення гарантоздатності може буди надзвичайно вартісним, або потребувати великої тривалості для реалізації.

Для визначення найбільш ефективного заходу, який дозволить підвищувати гарантоздатність системи, 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 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: $Ops_{д.} = (Ops_1, Ops_2, \dots, Ops_i)$; 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 5.1).

Таблиця 5.1 – 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	B ₁	C ₁	T ₁
2	Ops ₂ . Підвищення надійності системи за рахунок структурного резервування	B ₂	C ₂	T ₂
3	Ops ₃ . Вдосконалення підсистеми обслуговування	B ₃	C ₃	T ₃
4	Ops ₄ . Підвищення кібербезпеки системи	B ₄	C ₄	T ₄
	...			
i	Ops _i . Інший захід підвищення гарантоздатності	B _i	C _i	T _i

Ефективним заходом (тобто оптимальним за принципом Парето) є такий захід Ops₀, для якого не існує інших заходів строго кращих, ніж Ops₀.

Для знаходження множини Парето використовується метод перебору, який полягає у наступному:

- обирається захід Ops_i та послідовно порівнюється з усіма іншими заходами. Якщо захід Ops_i > Ops_j (строго краще) за якимось показником, то

захід Ops_j не може бути ефективним та виключається з множини ефективних заходів;

- порівняння проводиться для всіх пар заходів, поступово зменшуючи кількість заходів, доки не залишиться один, реалізація якого є парето-оптимальною для підвищення гарантоздатності.

Результатом реалізації визначеного заходу є уточнена структура та склад сервісу СОМС БПЛА, яка підлягає проведенню нової оцінки гарантоздатності.

Схема реалізації методу формування структури та складу сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів представлена на рисунку 5.2.

5.2 Застосування методу формування структури та складу сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

5.2.1 Визначення структури та переліку складових з використанням базової онтології сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Розглянемо приклад використання методу формування структури та складу сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів для виконання завдання забезпечення фізичної безпеки об'єкту підвищеної небезпеки (ОПН) тривалістю не менше 2 годин, вночі за вітру, що має швидкість 12 м/с.

Базова онтологія СОМС БПЛА виконання завдань забезпечення фізичної безпеки описує структуру та взаємодію складових елементів системи при виконанні завдань у різних умовах.

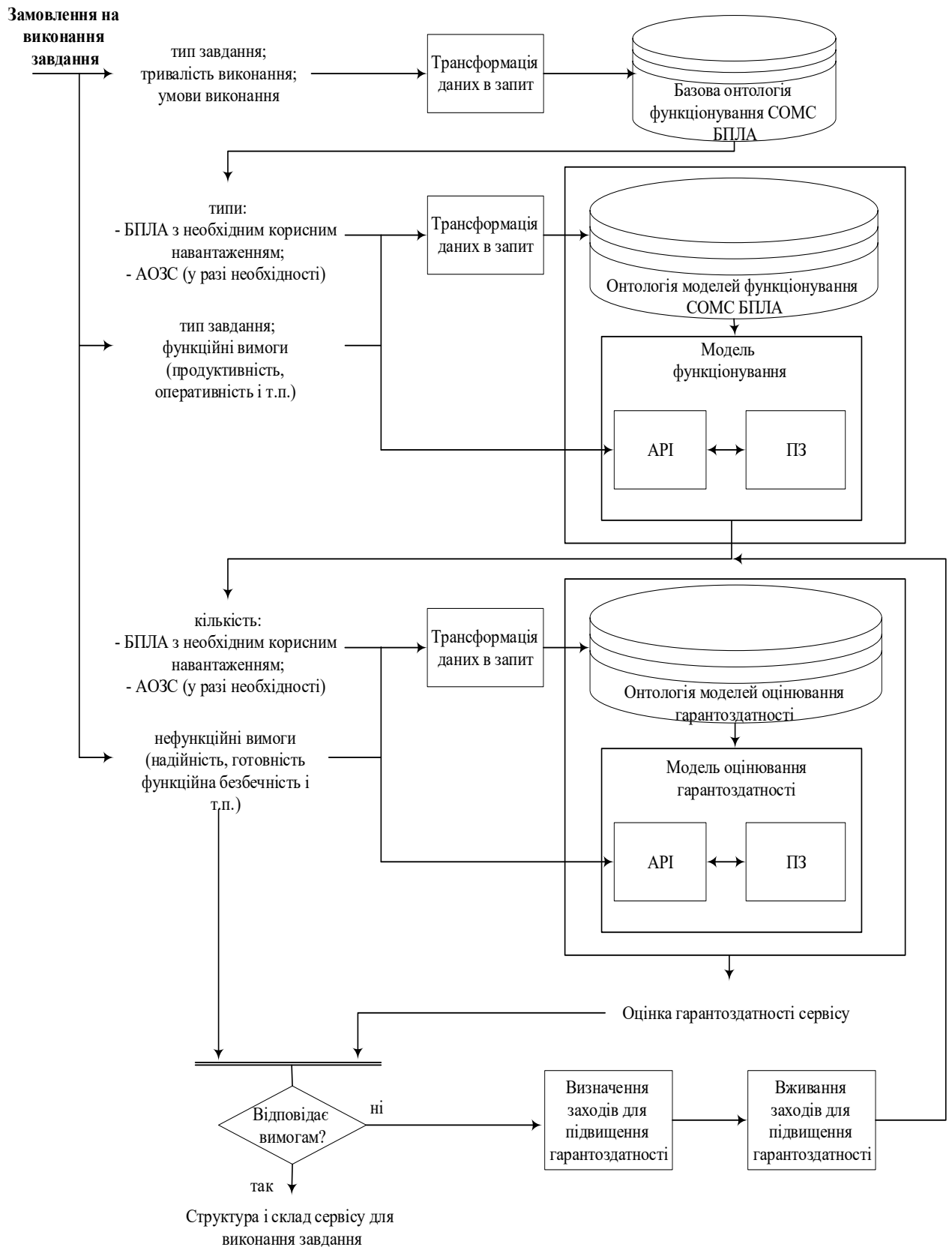


Рисунок 5.2 – Схема реалізації методу формування структури та складу сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

В онтології використовується наступна ієрархія класів:

- a) Mission type:
 - 1) Security;
- б) Performing unit:
 - 1) Simple UAV;
 - 2) Custom UAV;
- в) Support unit:
 - 1) Automatic battery maintenance station (ABMS);
- г) Payload:
 - 1) Camera;
 - 2) FLIR;
- д) Environment conditions:
 - 1) Day;
 - 2) Night.

Цей перелік класів і підкласів може бути розширений залежно від особливостей системи моніторингу.

Опис властивостей об'єкта, визначених в онтології, представлено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Опис властивостей об'єктів, визначених в базовій онтології СОМС БПЛА для виконання завдань фізичної безпеки

Домен	Властивість	Діапазон
UAV	perform	Mission type
ABMS	maintenance	Simple UAV; Custom UAV
Simple UAV	has	Camera; FLIR
Camera	deployed	Custom UAV
FLIR	deployed	Custom UAV
Security	use	Camera; FLIR
Camera	used	Day
FLIR	used	Night

Онтограф базової онтології виконання завдань фізичної безпеки предсталений на рисунку 5.2.

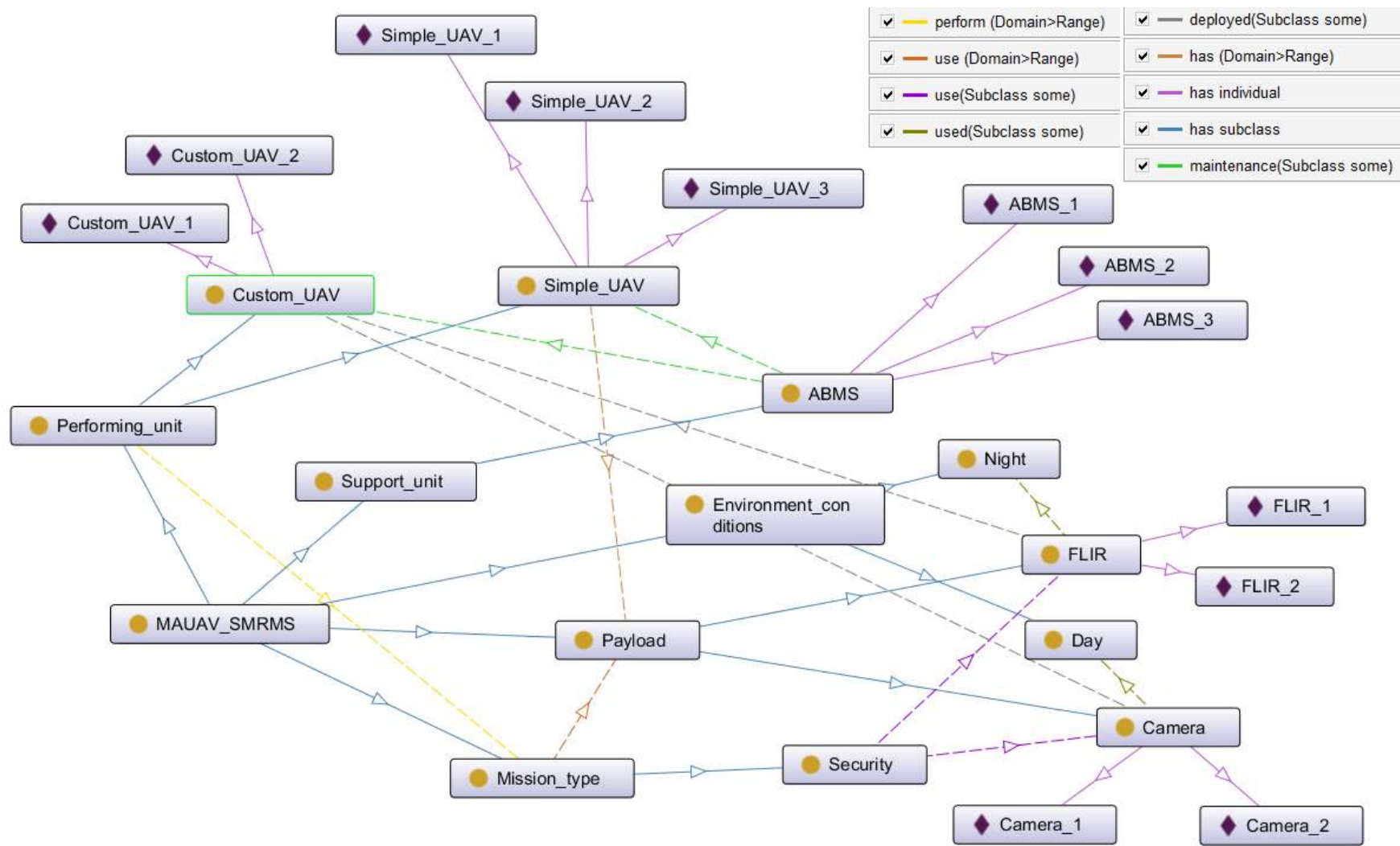


Рисунок 5.2 – Онтограф базової онтології виконання завдань фізичної безпеки

Для уточнення базової онтології до її класів було додано індивідуми з конкретними характеристиками:

а) Simple UAV:

- 1) Simple UAV 1;
- 2) Simple UAV 2;
- 3) Simple UAV 3;

б) Custom UAV:

- 1) Custom UAV 1;
- 2) Custom UAV 2;

в) ABMS:

- 1) ABMS 1;
- 2) ABMS 2;
- 3) ABMS 2;

г) Payload:

- 1) Camera:
 Camera1;
 Camera2;
- 2) FLIR:
 FLIR1;
 FLIR2;
- 3) Camera:
 Camera1;
 Camera2;
- 4) Network equipment:
 WiFi_1;
 LiFi_1.

OWL-коди доданих індивідумів для класів «Simple UAV», «Custom UAV», «ABMS», «Payload» представлені на рисунку 5.3, рисунку 5.4, рисунку 5.5 та рисунку 5.6, відповідно.

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.5</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">10</ims:maxWind>
  <ims:payload1 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera1</ims:payload1>
</owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2 -->
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2">
    <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
    <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.75</ims:flightEndurance>
    <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">12</ims:maxWind>
    <ims:payload1 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">FLIR1</ims:payload1>
  </owl:NamedIndividual>
    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3 -->
    <owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3">
      <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
      <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">1.0</ims:flightEndurance>
      <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">15</ims:maxWind>
      <ims:payload2 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera2</ims:payload2>
    </owl:NamedIndividual>

```

Рисунок 5.3 – OWL-коди доданих екземплярів для класу «Simple UAV»

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>
</owl:NamedIndividual>
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV_2 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV_2">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>
</owl:NamedIndividual>
```

Рисунок 5.4 – OWL-коди доданих екземплярів для класу «Custom UAV»

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
</owl:NamedIndividual>
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_2 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_2">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
</owl:NamedIndividual>
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_3 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_3">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
</owl:NamedIndividual>
```

Рисунок 5.5 – OWL-коди доданих екземплярів для класу «ABMS»

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera"/>
</owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_2 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_2">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera"/>
</owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR"/>
</owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_2 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_2">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR"/>
</owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#LiFi_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#LiFi_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Network_equipment"/>
</owl:NamedIndividual>
  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#WiFi_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#WiFi_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Network_equipment"/>
</owl:NamedIndividual>
```

Рисунок 5.6 – OWL-коди доданих екземплярів для класу «Payload»

Для визначення компонентів для розгортання сервісу з моніторингу фізичної безпеки до онтології використовується SPARQL запит, вигляд якого наведено на рисунку 5.7.

```

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 rdttype Payload.
    ?UAV:has ?payload
    FILTER EXISTS {?payload :used 'Night'}
    FILTER EXISTS ((?UAV :maxWind >=12))
    ?ABMS maintenance ?UAV
    FILTER EXISTS ((?UAV :flightEndurance < 2))
}

```

Рисунок 5.7 - SPARQL запит до базової онтології виконання завдань фізичної безпеки.

За результатами запиту надається перелік корисного навантаження, яке використовується при виконанні завдання в нічних умовах, БПЛА, які мають це корисне навантаження та можуть виконувати польоти при швидкості вітру більше 12 м/с.

В онтології є лише один екземпляр класу Simple UAV – «Simple UAV 2», що може здійснювати польоти при швидкості вітру 12м/с, і який обладнаний камерою FLIR1, що дозволяє виконувати завдання вночі. Максимальна тривалість польоту «Simple UAV 2» складає 0,75 годин, тоді як необхідно виконувати завдання 2 години, що обумовлює використання підсистеми

забезпечення, а саме «ABMS 2», яка може здійснювати обслуговування БПЛА «Simple UAV 2».

5.2.2 Визначення чисельності складових для забезпечення функційних вимог при виконанні поставленого завдання з використанням онтології моделей функціонування сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Після визначення переліку елементів для розгортання сервісу, здійснюється визначення чисельності елементів, які необхідні для виконання поставленого завдання з заданими функційними вимогами. У якості функційних вимог можуть висуватися такі:

- максимальний час обстеження визначеної території;
- загальна тривалість виконання завдання;
- періодичність обстеження;
- типи даних, які необхідно отримати;
- максимальна швидкість передавання даних при розгортанні бездротових мереж тощо.

Для цього використовується онтологія моделей функціонування СОМС БПЛА (див. п. 2.3.2).

Для вибору моделі функціонування, що використовується для визначення чисельності елементів сервісу для виконання завдання моніторингу фізичної безпеки необхідно врахувати наступні вимоги:

- особливості завдання – потокові (Atr1.2);
- тип покриттів, на яких базується виконання завдань – площадне (Atr2.2) та часове з заданою тривалістю (Atr2.3.1);
- при виконанні використовується рій БПЛА (Atr3.1.2.1), які потребують обслуговування стаціонарними засобами (Atr3.2.2.1).

Для вибору моделі функціонування до онтології подається SPARQL запит, вигляд якого наведено на рисунку 5.8.

```

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#>
SELECT ?subject ?object ?subjectLabel
WHERE
{
    ?subject rdfs:враховує?Atr1_2,
                Atr2_2,
                Atr2_3_1,
                Atr3_1_2_1,
                Atr3_2_2_1.
}

```

Рисунок 5.8 - SPARQL запит до онтології моделей функціонування СОМС
БПЛА

За результатами запиту надається перелік моделей функціонування СОМС БПЛА, які враховують дані атрибути, з якого обирається модель, яка має найбільшу потужність множини атрибутів що враховуються:

$$\text{Model_F}^* \rightarrow \text{Max}(\text{Card}(\text{Model_F}\{\text{AtrX}\})). \quad (5.1)$$

В онтології моделей функціонування модель M1_5 враховує найбільшу кількість, а отже і максимальну потужність множини визначених атрибутів.

Далі через API даної моделі до неї передаються вихідні дані для проведення розрахунку чисельності сервісу СОМС, який забезпечить виконання завдання з визначеними функційними вимогами.

5.2.3 Оцінювання гарантоздатності виконанні поставленого завдання з використанням онтології моделей оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтовних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Наступним етапом реалізації методу є перевірка виконання встановлених нефункційних вимог. У якості нефункційних вимог, які розглядаються в роботі, відносяться:

- вимоги до надійності;
- вимоги до функційної безпеки та кібербезпеки;

Комплексування вимог до надійності та безпечності функціонування СОМС БПЛА формує вимоги до гарантоздатності.

Для оцінювання гарантоздатності використовується онтологія моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА (див. п. 2.3.3).

Для вибору моделі оцінювання гарантоздатності вказуються атрибути, які необхідно врахувати наступні вимоги:

- особливості завдання – потокові (Atr1.2);
- тип покриттів, на яких базується виконання завдань – площадне (Atr2.2) та часове з заданою тривалістю (Atr2.3.1);
- при виконанні використовується рій БПЛА (Atr3.1.2.1), які потребують обслуговування стаціонарними засобами (Atr3.2.2.1);
- БПЛА можуть відмовляти внаслідок фізичних дефектів без урахування деградації (Atr4.1.1, Atr4.2.1, Atr4.3.1).

Для вибору моделі оцінювання гарантоздатності до онтології подається SPARQL запит, вигляд якого наведено на рисунку 5.9.

```

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#>
SELECT ?subject ?object ?subjectLabel
WHERE
{
  ?subject rdfs:враховує?Atr1_2,
            Atr2_2,
            Atr2_3_1,
            Atr3_1_2_1,
            Atr3_2_2_1,
            Atr4_1_1,
            Atr4_2_1,
            Atr4_3_1.
}

```

Рисунок 5.9 - SPARQL запит до онтології моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА

За результатами запиту надається перелік моделей функціонування СОМС БПЛА, які враховують дані атрибути, з якого обирається модель, яка має найбільшу потужність множини атрибутів що враховуються:

$$\text{Model_D}^* \rightarrow \text{Max}(\text{Card}(\text{Model_D}\{\text{AtrX}\})). \quad (5.2)$$

В онтології моделей оцінювання гарантоздатності модель M1_5 враховує найбільшу кількість, а отже і максимальну потужність множини визначених атрибутів.

Далі через API даної моделі до неї передаються вихідні дані для проведення розрахунку показника гарантоздатності сервісу СОМС, який забезпечить виконання завдання з визначеними нефункційними вимогами.

5.3 Висновки до п'ятого розділу

Розроблено метод формування структури та складу СОМС БПЛА, який базується на визначенні зв'язків між завданнями, умовами виконання, технічними характеристиками елементів СОМС, а також на моделях їх функціонування та оцінювання гарантоздатності.

Використання методу дозволяє визначати комплекс стаціонарних та мобільних компонентів для розгортання різноманітних сервісів з виконання завдань відповідно до вимог (функційних та нефункційних) та параметрів середовища та ґрунтується на онтологіях, які дозволяють:

- визначати складові холонів СОМС для виконання різних завдань (базова онтологія сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів);

- визначати чисельний склад холонів СОМС для забезпечення функційних вимог (онтологія моделей функціонування сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів);

- оцінювати показники гарантоздатності СОМС та обкантовувати рішення щодо забезпечення функційних вимог виконання завдань СОМС (онтологія моделей оцінювання гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів).

Описано порядок вибору засобів для підвищення гарантоздатності СОМС БПЛА, який базується на визначенні Парето-оптимальних засобів.

Наведено опис та приклад реалізації етапів застосування методу.

Основні наукові результати, що наведені в першому розділі, опубліковано в роботах автора [11, 13, 16, 21, 22, 24, 31, 35, 39, 40, 42], зазначених в анотації.

РОЗДІЛ 6

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ СЕРВІС- ОРІЄНТОВАНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ. РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

6.1 Архітектура сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

Високий ступінь розвитку сучасних технологій дозволяє розгортати сервіси на основі БПЛА для виконання різноманітних завдань.

Загальний вигляд архітектури сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів представлений на рисунку 6.1.

До ресурсів, які використовуються для розгортання сервісів, відносяться:

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

Перелік сервісів формується по мірі виникнення потреб у виконанні. При виникненні нового сервісу до онтологій додаються нові складові (сутності, властивості), що дозволяють описувати функціонування та оцінку гарантоздатності. Наразі існує велика кількість завдань, для виконання яких можна використовувати СОМС БПЛА [225], серед яких:

- доставлення вантажів, ліків, продуктів і т.і.;
- перевезення медичних лабораторних зразків;
- інспектування стану споруд;
- моніторинг навколишнього середовища;
- моніторинг дорожнього трафіку;
- розгортання систем охорони об'єктів;
- оцінювання наслідків надзвичайних ситуацій;

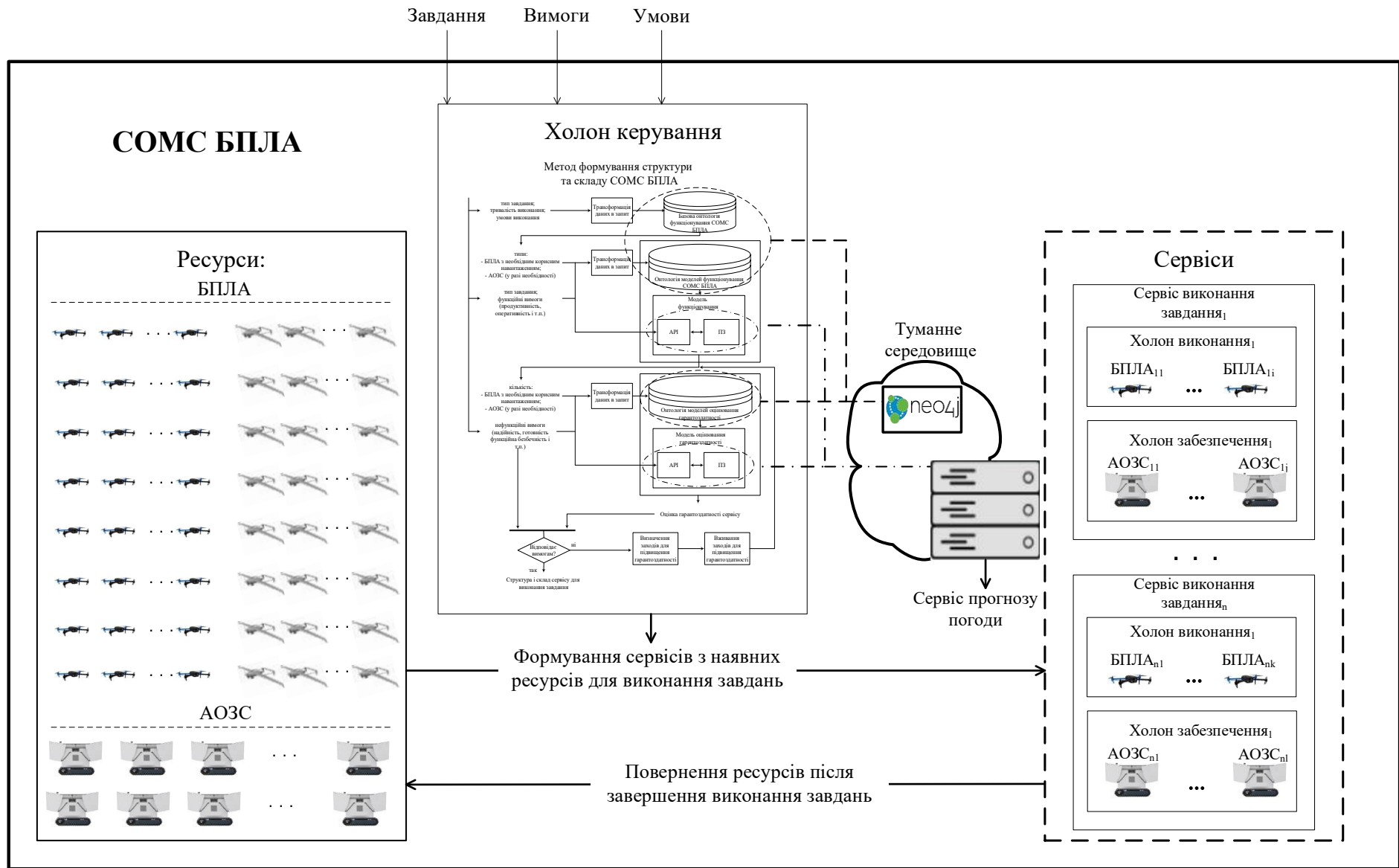


Рисунок 6.1 – Загальний вигляд архітектури СОМС БПЛА

- оцінювання стану сільхозгосподарчих культур;
- оброблення сільхозгосподарчих культур;
- моніторинг пожеж;
- боротьба з пожежами і т.і.

Вказаний перелік завдань є далеко не повним і постійно розширюється. При цьому при виконанні багатьох завдань використовуються однотипні БПЛА, корисне навантаження яких може змінюватися для врахування особливостей виконання конкретних завдань без втручання людей.

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 графову базу Neo4J [226]. Використання Neo4J передбачає проведення перетворень SPARQL-запитів у запити на мові Cypher [227].

Програмне забезпечення, яке використовується для визначення складу сервісів та оцінки їх гарантоздатності, розміщується у туманному середовищі [228, 229], а для роботи з ним використовуються відповідні API, що дозволяють передавати дані для опрацювання та отримувати результати.

6.2 Інформаційна технологія для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів

6.2.1 Основні положення інформаційної технології

Розроблена інформаційна технологія має за мету підтримати прийняття рішень щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА, а саме:

- 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.

Необхідність розроблення рекомендацій щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА може виникати у разі прийняття рішень щодо:

- розгортання СОМС БПЛА;
- зміни вимог до сервісів та умов їх обслуговування;
- модернізації парку БПЛА та АОЗС у складі СОМС.

Інформаційна технологія представлена наступними складовими.

1. IDEF0-діаграма, яка описує послідовності опрацювання даних про СОМС БПЛА, характеристики БПЛА та АОЗС, типи сервісів вимоги до них і отримання рекомендацій щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА для забезпечення визначених вимог. Вона базується на:

- шести функціональних блоках, які показують процеси, що відбуваються з метою оцінювання гарантоздатності та формування рекомендацій щодо її забезпечення при розгортанні СОМС БПЛА;

- інтерфейсних стрілками, що пов'язують блоки разом і відображають взаємодії і взаємозв'язок між ними, поділяючись при цьому на входи (входять у блок з лівого його боку), виходи (виходять з правого боку блоку), управління (входять у блок зверху) та механізми (входять у блок знизу).

2. Архітектура сервіс-орієнтованої мобільної системи на основі БПЛА, яка базується на концептуальній моделі СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи, що описана у підрозділі 2.4, і запропонована у загальному вигляді (рисунок 6.1).

3. Інструментальні засоби, які розроблено для автоматизації процесів планування розгортання СОМС БПЛА, та використано для реалізації процесів аналізу й моделювання.

6.2.2 Перетворення інформації в IDEF0-діаграмі

Інформаційна технологію для забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА представлена на рисунку 6.2 у вигляді IDEF0-діаграми.

IDEF0-діаграма складається з наступних блоків.

A1. Аналіз запитів на розгортання сервісів та оцінювання умов їх обслуговування.

Входами є:

- запити на розгортання сервісів з визначеного типу та вимогами щодо часу обслуговування та району розгортання сервісів;
- перелік можливих типів сервісів, що можуть розгортатись;
- наявна чисельність БПЛА, АОЗС.

Виходом прогнозовані умови навколишнього середовища та рішення, щодо можливості розгортання сервісу.

Управлінням є: сервіси з прогнозування погоди.

Механізмом є програмне забезпечення (ПЗ) формування запитів та API сервісу прогнозування погодних умов.

A2. Визначення переліку засобів для розгортання сервісу у складі СОМС БПЛА.

Входами є:

- функціональні вимоги до сервісу;
- кількість, льотно-технічні характеристики (ЛТХ) БПЛА, тактико-технічні характеристики (ТТХ) АОЗС;
- перелік корисного навантаження БПЛА.

Виходом є перелік типів БПЛА з корисним навантаженням, та АОЗС, які можуть обслуговувати запити на розгортання сервісів у прогнозованих умовах навколишнього середовища.

Управлінням є: базова онтологія функціонування СОМС БПЛА, концептуальна модель ХМАС та метод формування структури та складу СОМС БПЛА.

Механізмом є програмне забезпечення (ПЗ) формування запитів до онтології.

А3. Визначення складу сервісу СОМС БПЛА, що забезпечують виконання функційних вимог.

Входами є:

- наявна кількість, типи та ЛТХ БПЛА, ТТХ АОЗС;
- тип сервісу та функціональні вимоги до нього;
- перелік сервісів, що можуть розгортатися з використанням БПЛА та моделі застосування БПЛА при розгортанні СОМС;

Виходом є чисельність БПЛА та АОЗС, яка необхідна для розгортання сервісу з визначеними функціональними вимогами.

Управлінням є: моделі функціонування СОМС БПЛА, метод формування структури та складу СОМС БПЛА та моделі функціонування СОМС БПЛА.

Механізмом є інструментальні засоби підтримки прийняття рішень під час планування розгортання сервісів СОМС БПЛА, ПЗ формування запитів до онтології та до АРІ моделей функціонування СОМС БПЛА.

А4. Оцінювання гарантоздатності сервісу СОМС БПЛА.

Входами є:

- кількість, типи та ЛТХ БПЛА, ТТХ АОЗС;
- тип сервісу та нефункційні вимоги до нього.

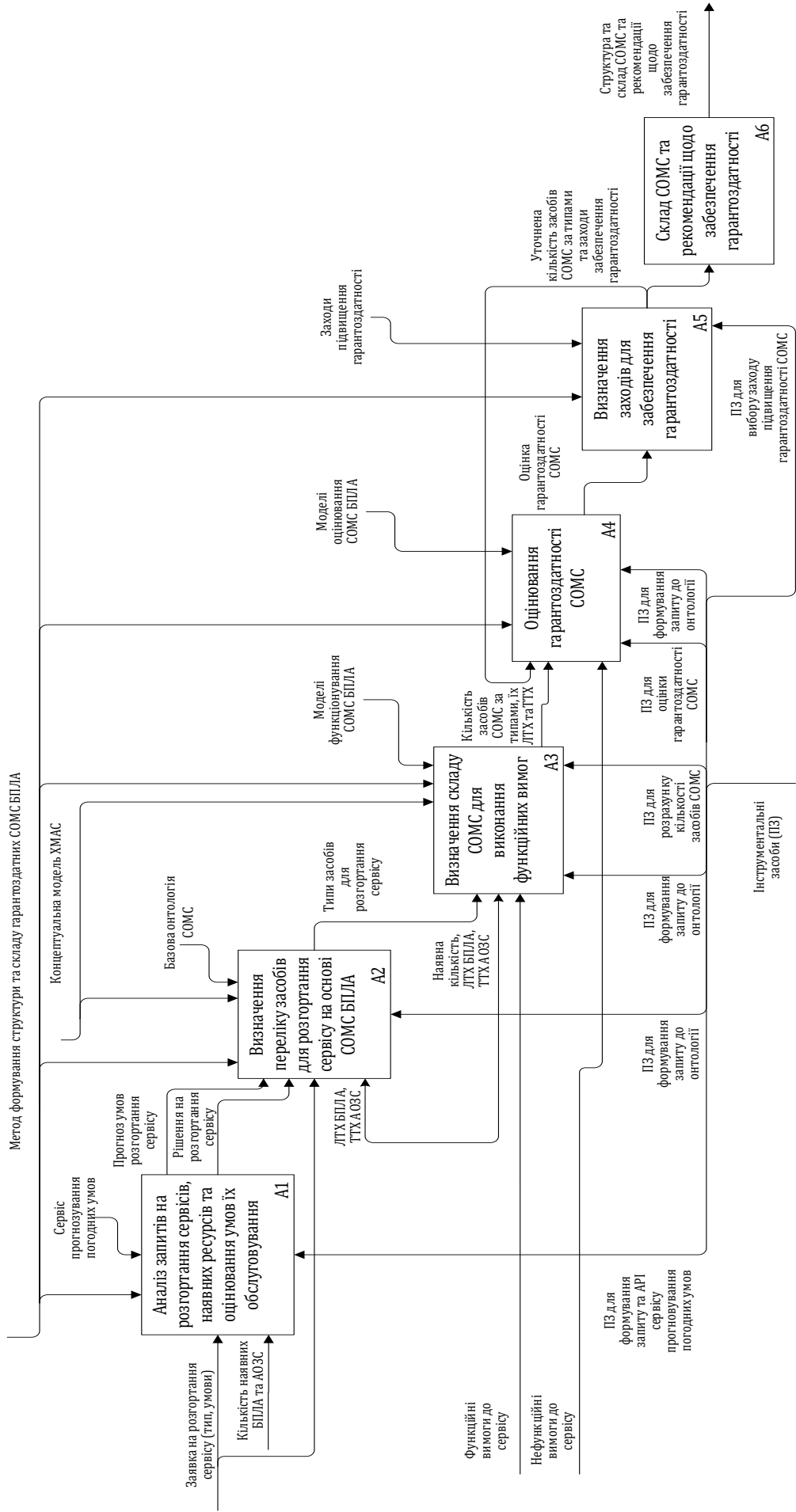


Рисунок 6.2 – Інформаційна технологія забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА (загальна IDEFO-діаграма)

Виходом оцінка гарантоздатності сервісу розгорнутого на основі БПЛА та АОЗС, чисельність яких забезпечує виконання функціональних вимог.

Управлінням є: моделі оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА, метод формування структури та складу гарантоздатної СОМС БПЛА та моделі оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА.

Механізмом є ПЗ формування запитів до онтології та API моделей оцінювання гарантоздатності.

A5. Визначення заходів для забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА при розгортанні сервісу.

Входом є оцінка гарантоздатності визначена в блоці A4.

Управлінням є перелік заходів забезпечення гарантоздатності.

Виходом є перелік заходів щодо забезпечення гарантоздатності та уточнений склад СОМС БПЛА.

A6. Розроблення рекомендацій щодо забезпечення гарантоздатності СОМС БПЛА.

Входи:

- результати оцінювання гарантоздатності;
- визначені заходи підвищення гарантоздатності СОМС БПЛА.

Виходом структура та склад СОМС і рекомендації щодо забезпечення гарантоздатності.

Управлінням є метод формування структури та складу гарантоздатної СОМС БПЛА.

6.3 Інструментальні засоби

Для автоматизації процесу розрахунків було розроблено ряд інструментальних засобів які, зокрема, дозволяють:

- планувати маршрути обльоту цільових точок на місцевості з визначенням місць заміни батарей БПЛА в залежності від типу БПЛА, який визначає швидкість та максимальну тривалість польоту; з урахуванням часу

перебування в кожній точці та тривалості процесу заміни бортових джерел живлення, а також розбивати цільову область на частини у разі необхідності зменшення часу обльоту та визначати необхідну чисельність БПЛА та АОЗС;

– визначати чисельність БПЛА та АОЗС для розгортання системи фізичного захисту об'єктів критичного призначення для варіантів постійного та періодичного покриття визначених зон або периметру.

6.3.1 Інструментальний засіб планування маршруту обльоту цільових точок на місцевості та визначення необхідної чисельності БПЛА та АОЗС

Для розгортання інструментального засобу до складу технічних засобів необхідно використання серверу з наступними характеристиками:

- процесор x86 та вище з тактовою частотою, ГГц – 3, не менше;
- оперативну пам'ять об'ємом, ГБ – 4, не менше;
- вільний дисковий простір для зберігання програми, ГБ – 1, не менше;
- мережева карта з пропускною здатністю 100 МБ/с.

Для функціонування інструментального засобу на сервері має бути встановлено наступне програмне забезпечення:

- Git;
- .NET 7;
- npm.

Для запуску інструментального засобу в режимі розробника потрібно встановити програму Git і скопувати репозиторій. Git можна встановити за посиланням: <https://git-scm.com/book/en/v2/Getting-Started-Installing-Git>.

Далі скопувати проект виконавши наступну команду:

git clone <https://github.com/LambdaTenEleven/uav-path-optimizer-webapi>

Як альтернатива, можна завантажити код програми у вигляді .zip архіву і розархівувати його (рисунок 6.3).

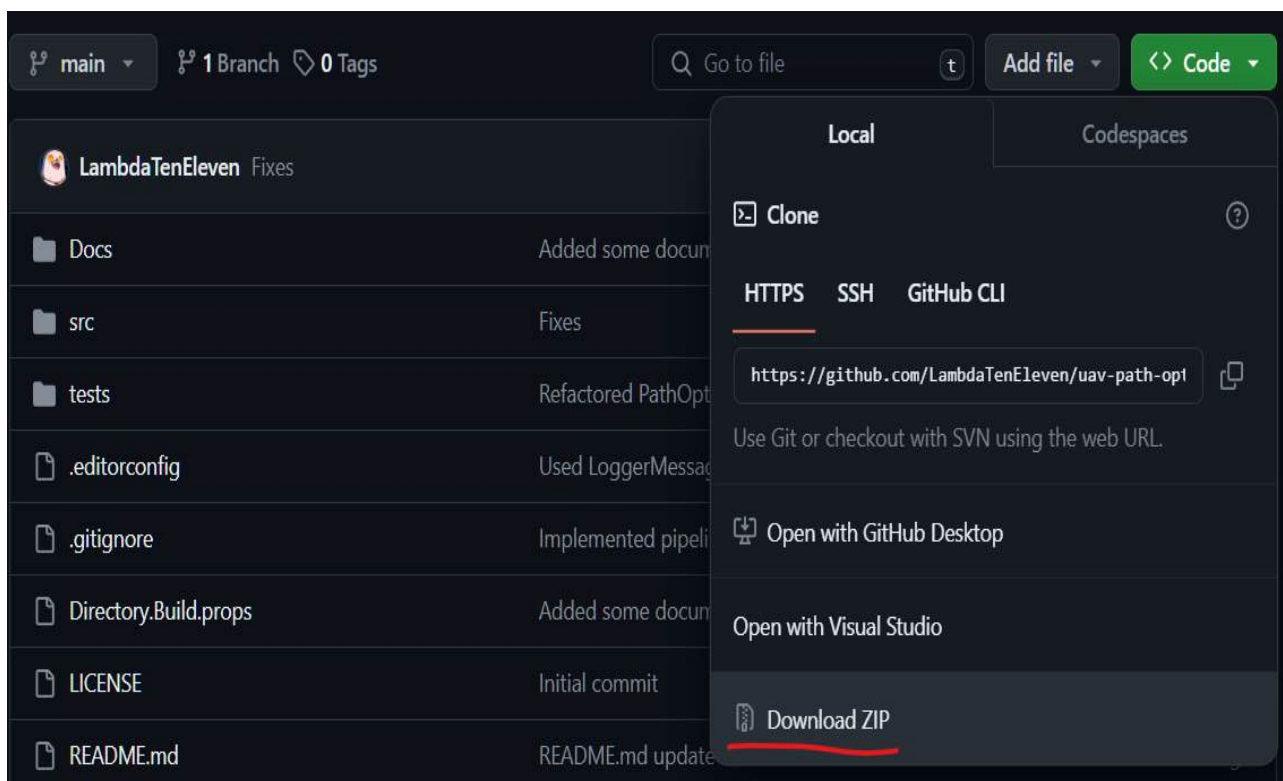
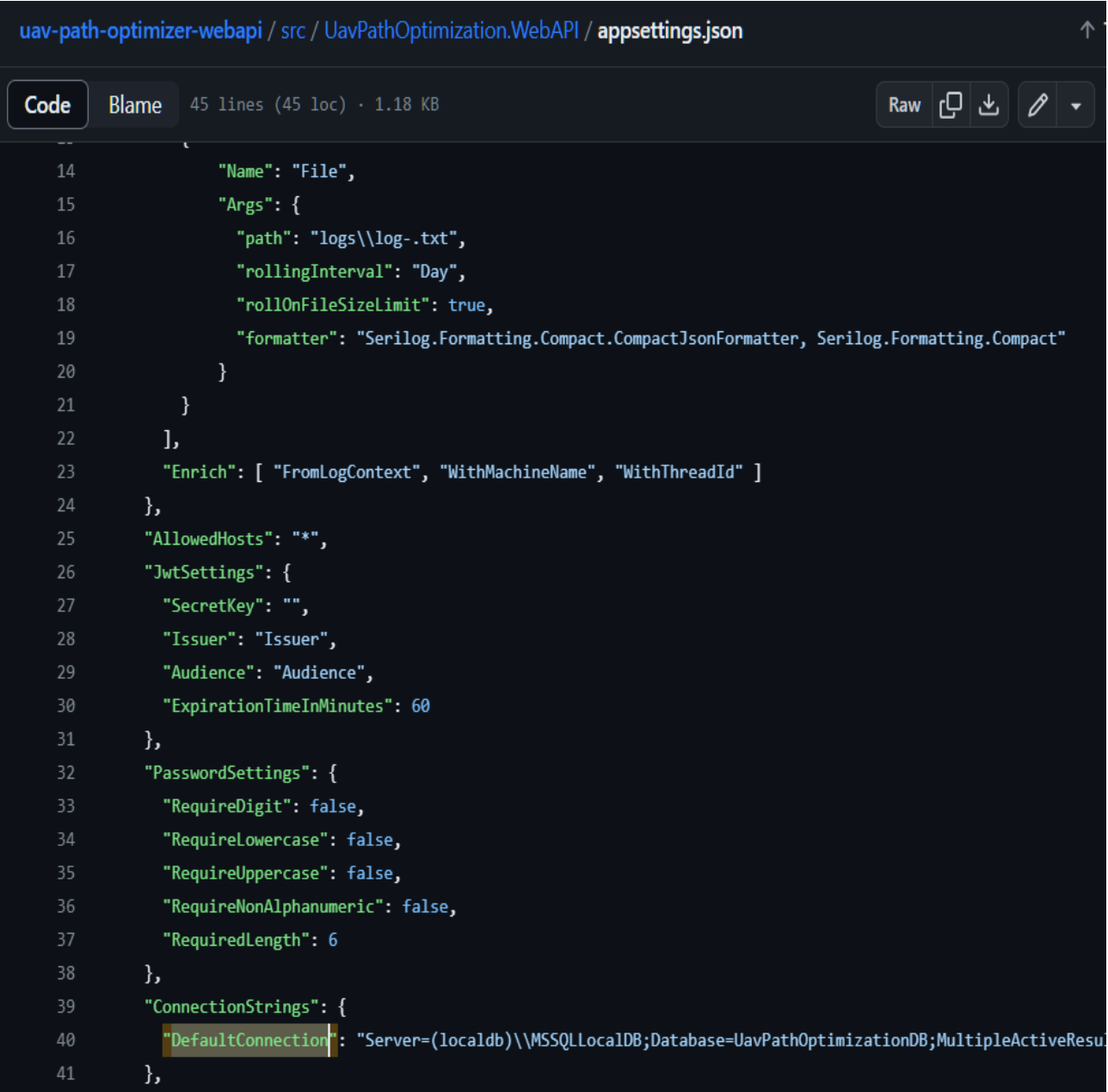


Рисунок 6.3 – Завантажити вихідний код програми

Далі потрібно використати будь яке середовище розробки, що підтримує .NET, наприклад, Visual Studio Community. Посилання: <https://visualstudio.microsoft.com/vs/community/>

При встановленні потрібно обрати можливість розробки з ASP.NET. Перед запуском проекту потрібно створити пусту базу даних MSSQL.

Рядок підключення до бази даних (БД) зберігається за посиланням /src/UavPathOptimization.WebAPI/appsettings.json, в розділі ConnectionStrings:DefaultConnection (рисунок 6.4).



```
uav-path-optimizer-webapi / src / UavPathOptimization.WebAPI / appsettings.json
Code Blame 45 lines (45 loc) · 1.18 KB Raw Copy Download Edit
14     "Name": "File",
15     "Args": {
16       "path": "logs\\log-.txt",
17       "rollingInterval": "Day",
18       "rollOnFileSizeLimit": true,
19       "formatter": "Serilog.Formatting.Compact.CompactJsonFormatter, Serilog.Formatting.Compact"
20     }
21   }
22 ],
23   "Enrich": [ "FromLogContext", "WithMachineName", "WithThreadId" ]
24 },
25 "AllowedHosts": "*",
26 "JwtSettings": {
27   "SecretKey": "",
28   "Issuer": "Issuer",
29   "Audience": "Audience",
30   "ExpirationTimeInMinutes": 60
31 },
32 "PasswordSettings": {
33   "RequireDigit": false,
34   "RequireLowercase": false,
35   "RequireUppercase": false,
36   "RequireNonAlphanumeric": false,
37   "RequiredLength": 6
38 },
39 "ConnectionStrings": {
40   "DefaultConnection": "Server=(localdb)\\MSSQLLocalDB;Database=UavPathOptimizationDB;MultipleActiveResu
41 }
```

Рисунок 6.4 – Рядок з'єднання з БД

В корні проекту в консолі виконати наступну команду для початку міграції:

```
dotnet ef database update --project .\src\UavPathOptimization.Infrastructure\ --
startup-project .\src\UavPathOptimization.WebAPI\
```

Далі потрібно почати збирання проекту і запустити його (рисунок 6.5). Запуститься серверна частина. Потрібно впевнитися, що запускається саме

UavPathOptimization.WebAPI. Якщо це не так, потрібно встановити його як стартовий проект.

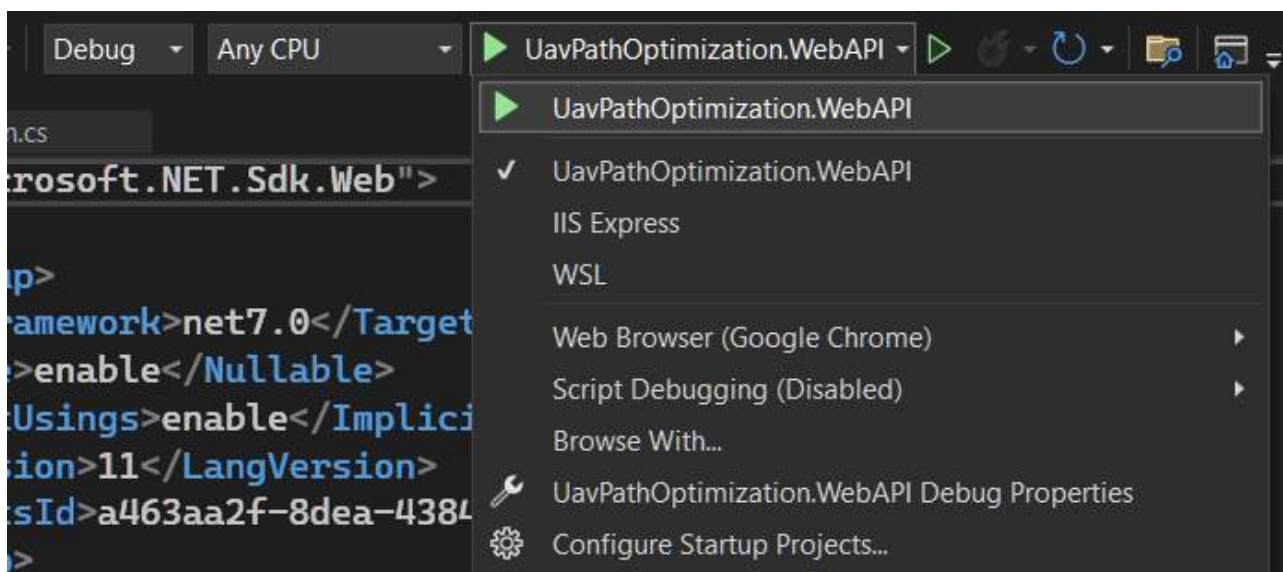


Рисунок 6.5 – Запуск проекту в VisualStudio

Після запуску програми відкриється консоль, де буде вказана локальна адреса сервера. За замовчуванням це <https://localhost:7040> (рисунок 6.6).

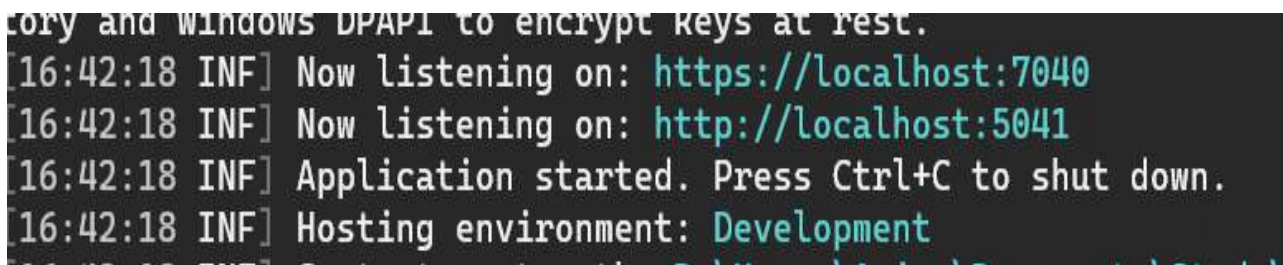


Рисунок 6.6 – Консоль серверу

Для запуску клієнтської частини потрібно виконати наступні команди:

```
cd .\src\UavPathOptimization.WebAPI\uav-optimizer\  
npm install  
ng serve
```

Після цього відбудеться запуск додатку Angular, який можна відкрити перейшовши по локальному посиланню (рисунок 6.7).

```

Browser application bundle generation complete.

Initial Chunk Files | Names | Raw Size
vendor.js           | vendor | 4.10 MB
styles.css, styles.js | styles | 773.67 kB
polyfills.js       | polyfills | 332.99 kB
main.js            | main | 80.67 kB
scripts.js         | scripts | 78.57 kB
runtime.js         | runtime | 6.52 kB
Initial Total      | 5.34 MB

Build at: 2024-01-14T14:55:29.678Z - Hash: e48681c8b3ace888 - Time: 43714ms

Warning: D:\Users\Arian\Documents\Study\DotNet\UavPathOptimization\src\UavPathOptimization.WebAPI\UavOptimizer\src\app\map\map.component.ts depends on 'leaflet'. CommonJS or AMD dependencies can cause optimization bailouts.
For more info see: https://angular.io/guide/build#configuring-commonjs-dependencies

** Angular Live Development Server is listening on localhost:4200, open your browser on http://localhost:4200/ **

```

Рисунок 6.7 – Консоль клієнту

Перейшовши по локальному адресу, відкриється веб-інтерфейс, стартовою сторінкою якого є мапа (рисунок 6.8).

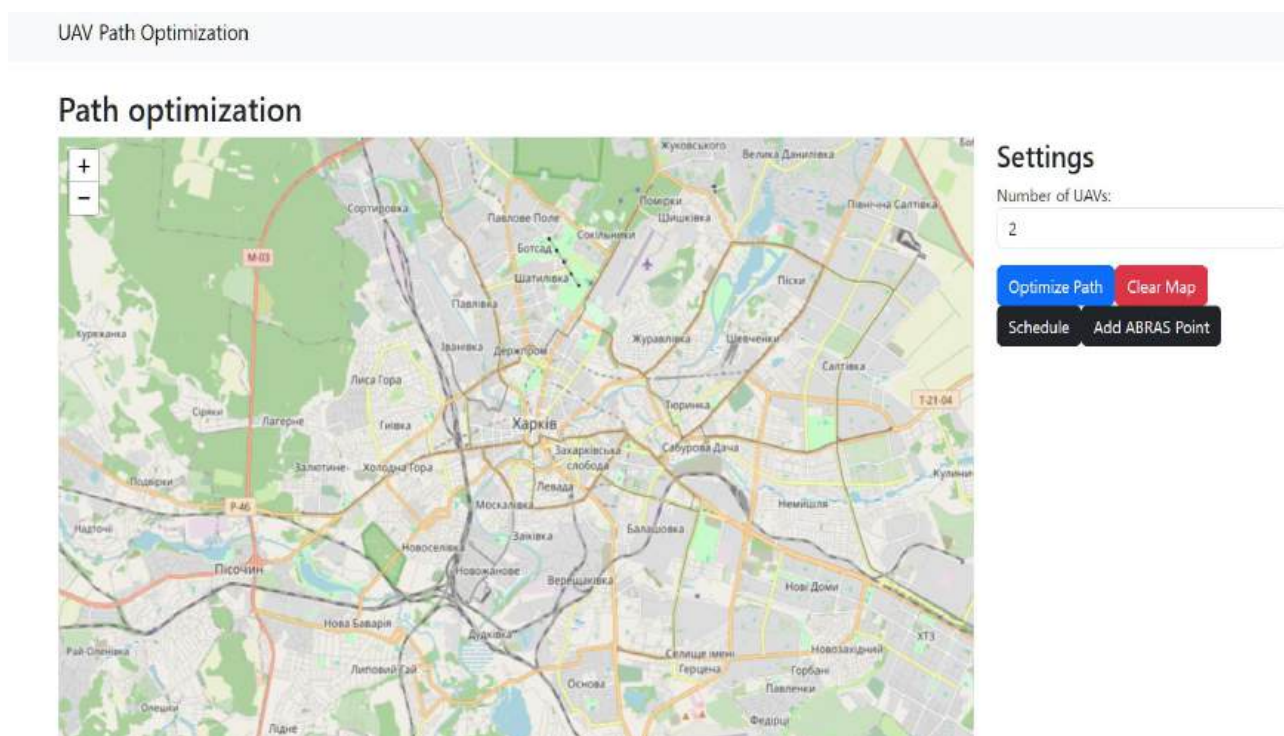


Рисунок 6.8 – Сторінка з мапою

Додати маркер можна клікнувши на будь яке місце на мапі. Також маркери можна переміщувати. Перший маркер завжди буде червоним, тобто стартовим. Після натискання на кнопку «Optimize Path» користувач отримує кілька оптимізованих шляхів БПЛА в залежності від встановленої кількості. Також необхідно додати точку початкового розміщення АОЗС, натиснувши «Add ABRAS Point» (рисунок 6.9).

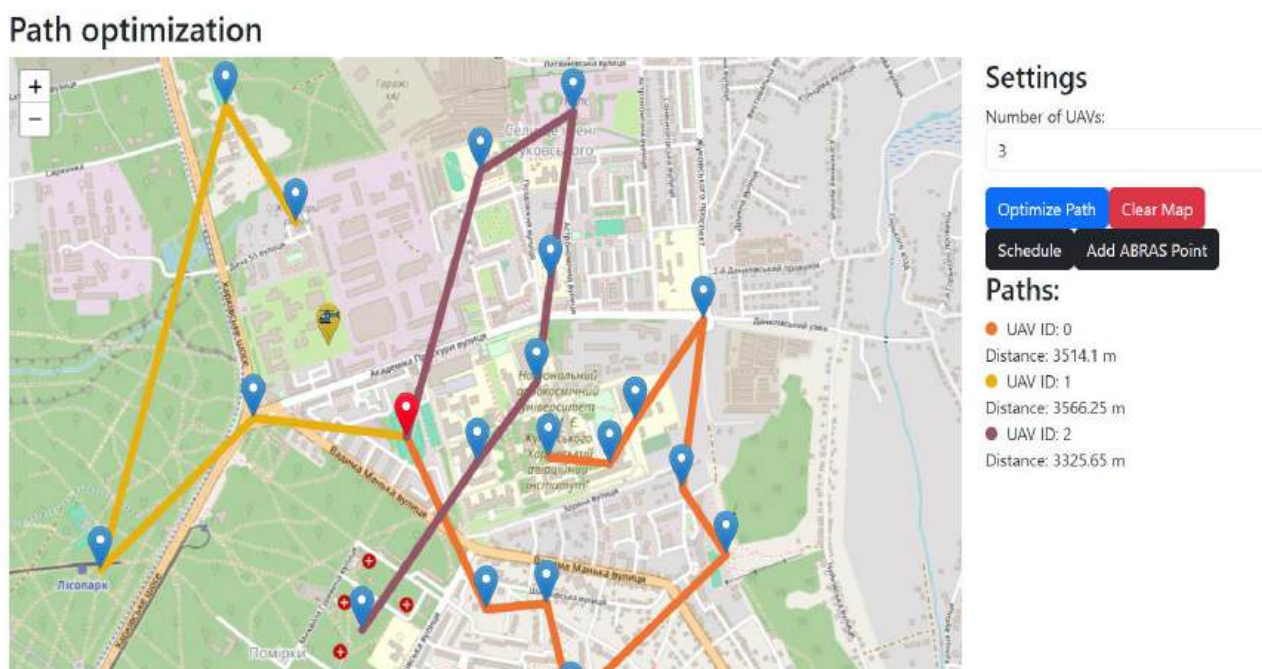


Рисунок 6.9 – Формування маршрутів

Після оптимізації шляху користувач може натиснути на кнопку «Schedule» для переходу на сторінку створення розкладу. Тут потрібно ввести усі потрібні дані, такі як дата початку місії, час для моніторингу БПЛА на кожній точці та час, який потрібен для заміни акумулятора. Також потрібно ввести швидкість системи ABRAS. Для кожного шляху користувач також має обрати модель БПЛА із бази даних (рисунок 6.10).

UAV Path Optimization

Schedule

Please, review the formed paths and select a UAV for each one.

Path #0

Select UAV model
Test UAV

Path #1

Select UAV model

Path #2

Select UAV model

ABRAS Path

Info Gantt chart

Info Gantt chart

Info Gantt chart

Info Gantt chart

Parameters

Departure time
DD.MM.YYYY --:--

Monitoring time
--:--:--

Charging time
--:--:--

ABRAS Speed (km/h)
0

Use weather conditions

Get schedule

© 2023 Artem Serediuk

Рисунок 6.10– Налаштування розкладів

Після введення необхідних параметрів користувач бачить створений розклад для усіх БПЛА та для системи АОЗС (ABRAS). На вкладці Info відображається таблиця на якій є координати точки, чи є точка місцем для підзарядки, час відбуття та прибуття, час проведений у точці та кількість часу роботи акумулятора що залишилася (рисунок 6.11, рисунок 6.12).

UAV Path Optimization

Schedule

Please, review the formed paths and select a UAV for each one.

Path #0

Select UAV model
Test UAV

Info

Location	PBR	Arrival Time	Departure Time	Time Spent	Battery Time Left
50.043443153334074, 36.28221988677979	false		06.01.2024, 12:00	00:00:00	01:00:00
50.039093906777204, 36.28568315509256	false	06.01.2024, 12:01	06.01.2024, 12:11	00:10:00	00:48:41.7136144
50.039231721648854, 36.2883009910911	false	06.01.2024, 12:11	06.01.2024, 12:21	00:10:00	00:38:14.6782523
50.03666830028308, 36.289395332369175	false	06.01.2024, 12:22	06.01.2024, 12:32	00:10:00	00:27:32.0808382
50.040458256578624, 36.296133041414585	false	06.01.2024, 12:34	06.01.2024, 12:44	00:10:00	00:15:59.8929254
50.042153303835924, 36.29420185092386	false	06.01.2024, 12:44	06.01.2024, 12:54	00:10:00	00:05:26.2329202
50.046397549844315, 36.295124530824985	true	06.01.2024, 12:55	06.01.2024, 13:10	00:15:00	01:00:00
50.043862071383806, 36.292163372072544	false	06.01.2024, 13:11	06.01.2024, 13:21	00:10:00	00:49:09.2083687
50.042745867213554, 36.29104757312235	false	06.01.2024, 13:21	06.01.2024, 13:31	00:10:00	00:38:47.9512912

Parameters

Departure time
06.01.2024 12:00

Monitoring time
00:10:00

Charging time
00:05:00

ABRAS Speed (km/h)
20

Use weather conditions

Get schedule

Рисунок 6.11 – Готовий розклад

ABRAS Path

Info		Gantt chart	
Location	Arrival Time	Departure Time	Time Spent
50.04570857448954, 36.27884674078815		06.01.2024, 12:00	00:00:00
50.046397549844315, 36.295124530824985	06.01.2024, 12:55	06.01.2024, 13:10	00:03:29.8553859
50.03855642499766, 36.28027582171854	06.01.2024, 13:14	06.01.2024, 13:30	00:04:07.3174043
50.04570857448954, 36.27884674078815	06.01.2024, 13:33		00:00:00

Рисунок 6.12 – Розклад для системи ABRAS

Також користувач може подивитися діаграму Ганта замість таблиці для будь якого з розкладів (рисунок 6.13).

ABRAS Path

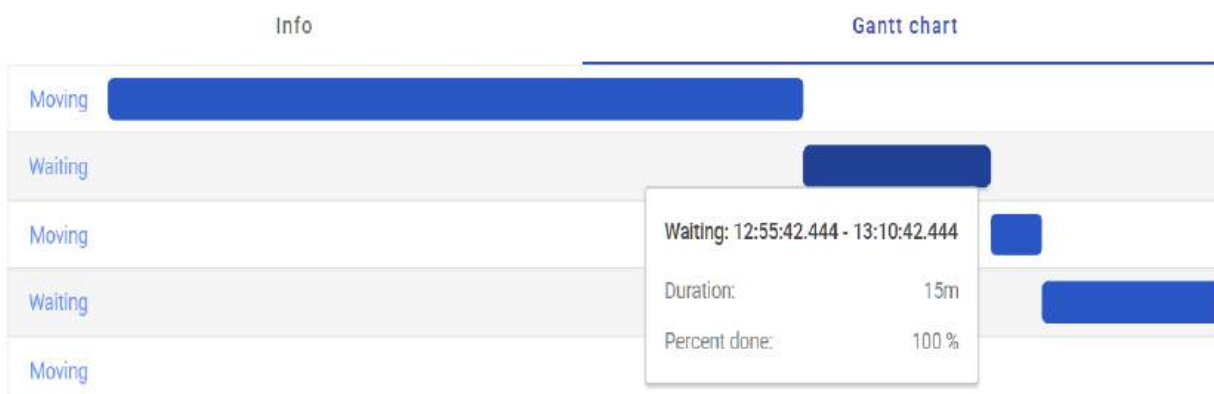


Рисунок 6.13 – Діаграма Ганта

У випадку, якщо час обльоту більший за визначений у вимогах, необхідно у налаштуваннях (Setting) (рисунок 6.9) збільшити кількість БПЛА після чого цільова область буде розділена на частини, кількість яких визначається кількістю БПЛА, і визначиться новий план обльоту за місця обслуговування БПЛА на АОЗС.

У випадку коли результати розрахунків задовольняють вимогам визначається фінальна чисельність БПЛА та АОЗС.

6.3.2 Інструментальний засіб для визначення чисельності БПЛА та АОЗС для розгортання системи фізичного захисту об'єктів критичної інфраструктури

Для розгортання інструментального засобу у складі технічних засобів необхідно використання серверу з наступними характеристиками:

- процесор x86 та вище з тактовою частотою, ГГц – 3, не менше;
- оперативну пам'ять об'ємом, ГБ – 4, не менше;
- вільний дисковий простір для зберігання програми, ГБ – 1, не менше;
- мережева карта з пропускною здатністю 100 МБ/с.

Для функціонування інструментального засобі на сервері має бути встановлено наступне програмне забезпечення:

Застосунок потребує наявності таких програмних засобів (програм та бібліотек):

- Unix-подібна операційна система, наприклад Ubuntu 18.04/20.04 і вище;
- Nginx версії 1.24 і вище;
- NodeJS версії 18.12.0 (LTS) / 20.9.0 (LTS);
- Vue (3.2.13);
- Vue-Router (4.3.3);
- Turf (3.14);
- Leaflet (1.9.4);
- Leaflet-Extra-Markers (1.2.2).

Для користування застосунком користувачу потрібно мати на своєму пристрої браузер і стабільне з'єднання з інтернетом, а також справний тач-скрін у випадку використання смартфона або монітор, клавіатуру і мишу у випадку використання персонального комп'ютера.

Після відкриття браузера та переходу до веб-застосунку перед користувачем буде відображено головну сторінку (рисунок 6.14), на якій

можна або очистити усі збережені застосунком дані (рисунок 6.15), або перейти до сторінки з калькулятором (рисунок 6.16)

Калькулятор польотів БПЛА

Розроблений для використання в якості помічника при плануванні польотів безпілотних літальних апаратів в окресленому координатами полігоні. Розраховує ширину/висоту покриття, висоту польоту, необхідну кількість апаратів для статичного/динамічного/межевого(кордонного) моніторингу з використанням характеристик БПЛА та об'єкту спостереження

[Перейти до мапи](#) [Очистити дані](#)

Кафедра комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки (503)
Кваліфікаційна робота бакалавра
© 2024 Кузьменко Андрій Олегович 545-а

Рисунок 6.14 – Головна сторінка веб-застосунку

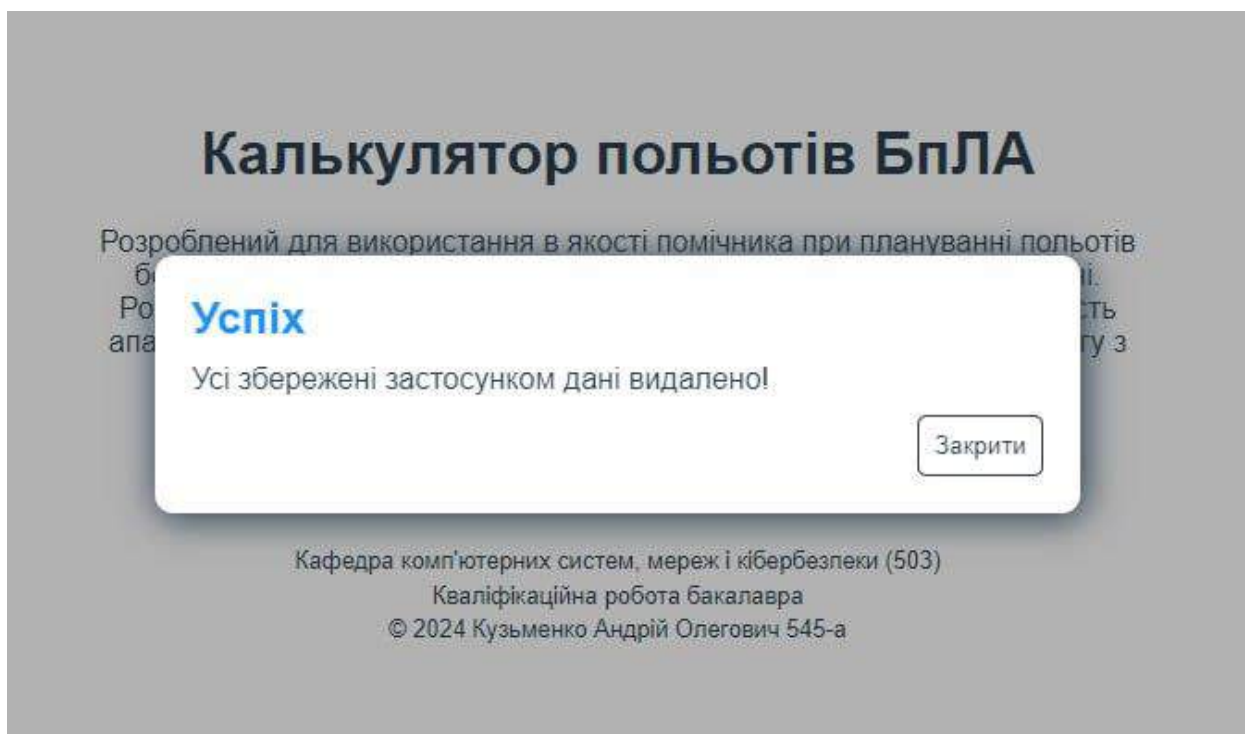


Рисунок 6.15 – Результат натиснення на кнопку очищення даних

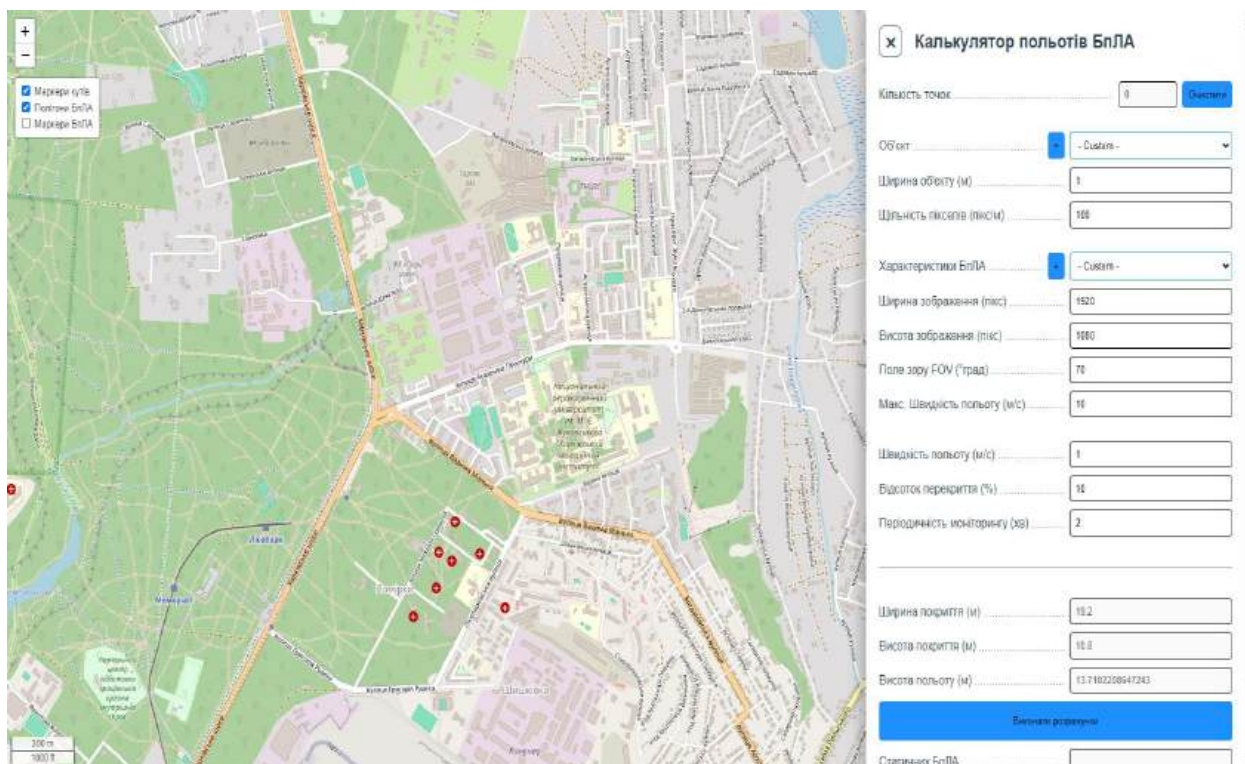


Рисунок 6.16 – Сторінка з мапою і віджетом калькулятора

Натиснувши праву кнопку миші (ПКМ) по мапі в тому місці додається маркер, при натисненні по ньому ПКМ його буде видалено, а при натисненні лівої кнопки миші (ЛКМ) відобразяться його координати. Затиснувши ЛКМ маркер можна перемістити.

Натискаючи кнопки «+» та «-» у верхньому лівому куті або при прокручуванні колеса середньої кнопки миші можна збільшити або зменшити наближення мапи, в той же час у нижньому лівому куті показано поточний масштаб.

Натиснувши на кнопку «X» біля напису «Калькулятор польотів БПЛА» можна приховати віджет, а натиснувши на «+» у верхньому правому куті – показати.

Натиснувши на кнопку «Очистити» з мапи буде видалено всі додані користувачем точки.

При натисненні на поле вибору об'єкта чи БПЛА випаде список, в якому можна обрати збережену сутність (Рисунок 6.17), а при натисненні на кнопку «+» біля цього поля відкриється вікно вказання назви (Рисунок 6.18), в

результаті заповнення якого заповнені вами характеристики буде збережено до сховища.

Об'єкт + - Custom - ▾

Ширина об'єкту (м) - Custom -

Щільність пікселів (пікс/м) Людина (Виявлення)

..... Людина (Розпізнавання)

..... Людина (Ідентифікація)

..... 10

Рисунок Б.4 – Вигляд випадаючого списку збережених сутностей

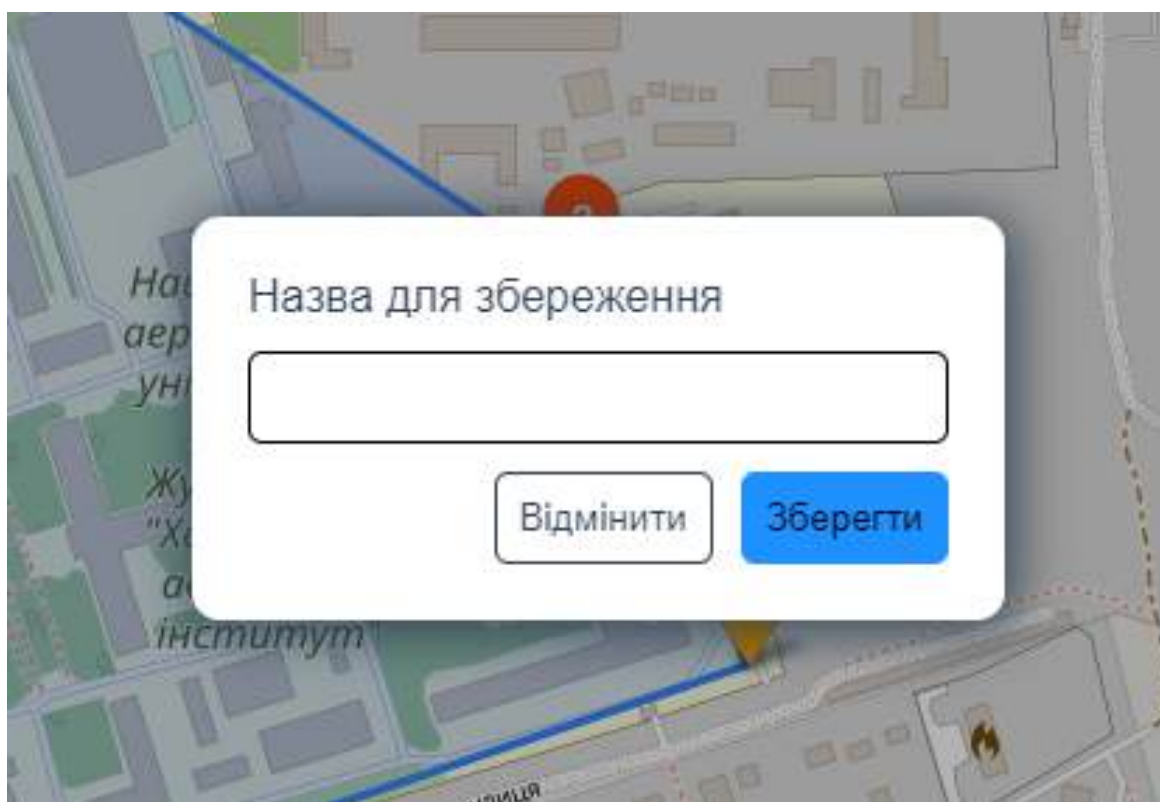


Рисунок 6.18 – Вигляд вікна введення назви нової сутності

Після зміни характеристик, або вибору сутностей зі списків автоматично розраховуються інші додаткові поля, а після натиснення на кнопку «Виконати розрахунки» заповняться й інші поля, які знаходяться під кнопкою та заповниться мапа полігонами статичного моніторингу БПЛА (Рисунок 6.18).

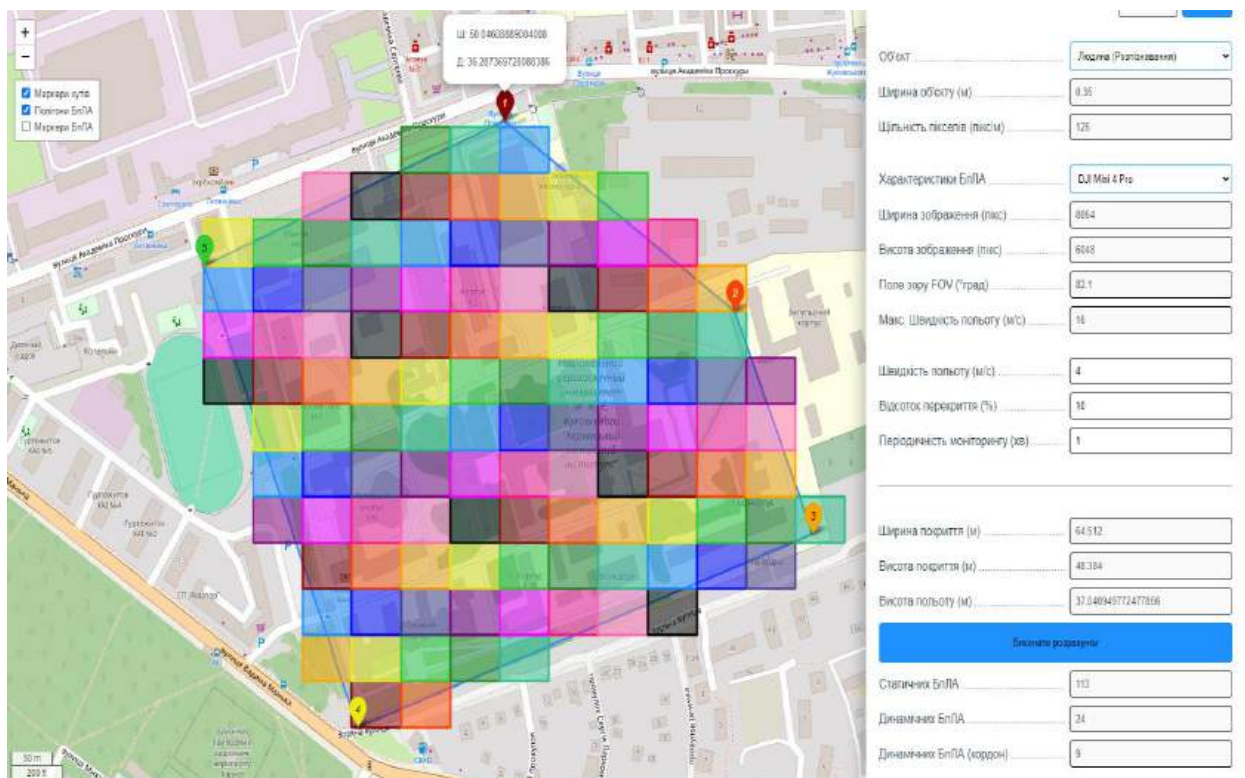


Рисунок 6.18 – Вигляд вікна після виконання розрахунків

В нижній частині вікна будуть наведені числові значення кількості БПЛА, необхідних для різни варіантів покриття:

- постійного;
- періодичного;
- охорони периметру.

6.4 Впровадження результатів досліджень

6.4.1 Впровадження наукових результатів у навчальний процес Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут»

Наукові результати автора були впроваджені у навчальному процесі у вигляді лекційного матеріалу та практичних занять з використання зазначених вище моделей і методів при розробці моделей функціонування та оцінювання функційної надійності та кібербезпеки БПЛА, а також розробки та застосування онтологічних моделей при побудові інтелектуальних мобільних

систем при побудові інтелектуальних систем у навчальних дисциплінах «Надійність та функційна безпека інформаційно-керуючих систем», «Методи штучного інтелекту для кібербезпеки», «Безпека мобільних систем», «Мобільні інтелектуальні системи».

Впровадження результатів дозволило підвищити фундаментальність, наочність та практичну спрямованість навчального процесу, а також якість підготовки фахівців за означеними напрямками.

6.4.2 Впровадження наукових результатів під час виконання науково-дослідних робіт у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут»

Наукові результати автора були впроваджені під час виконання наступних науково-дослідних робіт:

- «Методи, моделі та інформаційні технології підвищення надійності та безпечності складних ІТ-систем на етапах розроблення та впровадження» (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0121U113842, 2021- 2023 рр.) – в частині розроблення моделей оцінювання надійності та безпечності систем на основі БПЛА та методів їх забезпечення;

- «Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів» (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0121U112172, 2021-2023 рр.) – в частині розроблення концепції, принципів, методів та моделей оцінювання та забезпечення гарантоздатності і безпеки флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу;

- «Методологія та інформаційні технології оцінювання та забезпечення безпеки цифрової інфраструктури малих модульних реакторів (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0122U000977, 2022- 2024 рр.) – в частині розроблення моделей

застосування БПЛА для виконання завдань моніторингу та забезпечення фізичної безпеки ММР;

- «Методи та засоби виявлення вибухонебезпечних предметів з використанням багатофункційних інтелектуальних систем БПЛА» (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0123U101992, 2023- 2024 рр.) – в частині розроблення моделей застосування БПЛА для пошуку ВВП;

- «Методи, засоби та технології моделювання, розроблення, розгортання та забезпечення гарантоздатності мобільних інтелектуальних систем для об'єктів критичної інфраструктури» (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0124U003250, 2024 р. - по т.ч.) – в частині розроблення методів обґрунтування завдань, складу та моделей групового застосування гетерогенних груп БПЛА.

6.4.3 Впровадження наукових результатів під час виконання міжнародних проектів у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут»

Отримані наукові результати автора також пов'язані з міжнародною співпрацею та відображені у вигляді матеріалів у наступних міжнародних проектах:

- «Baltic Sea Neighbourhood Programme): WILDFire preparedness and prevention framework for unmanned vehicle platforms» (“WILDCAT”), сумісно з КТН (Швеція), SAHER (Естонія) (2024 - 2026 рр.), зокрема при розробці обрисів автономних систем моніторингу та боротьби з лісовими пожежами та розроблення структури гетерогенної системи моніторингу лісових пожеж з використанням БПЛА та наземних роботизованих платформ;

- «AutoDrone.UA», сумісно з Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF (Fraunhofer IFF, Німеччина) (договір PR758743 4500639807,

2024-2025 рр.) – в частині розроблення моделей покриття цільової області пошуку та планування групового застосування БПЛА для пошуку ВВП.

6.4.4 Впровадження наукових результатів під час виконання науково-дослідних робіт в Командуванні Повітряних Сил Збройних Сил України

Наукові результати дисертаційного дослідження були використані виконання науково-дослідної роботи шифр “Взаємодія”, а саме:

- методологія створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів, яка базується на концепції побудови гарантоздатних (надійних і безпечних) СОМС з недостатньо надійних і безпечних БПЛА та їх множин;

- метод визначення структури та складу СОМС БПЛА, який забезпечує синтез гарантоздатних СОМС БПЛА для виконання різноманітних завдань з

- організаційна модель СОМС БпЛА у вигляді мультиагентної системи, яка реалізована з холонів керування, виконання та забезпечення, і дозволяє описувати склад та структуру холонів-агентів, що формуються для виконання різноманітних завдань, і у такий спосіб утворюють системну архітектуру СОМС БПЛА;

- комплекс моделей функціонування та оцінки гарантоздатності СОМС БПЛА, якій враховує можливість відмов внаслідок фізичних причин та кібератак, стратегії та параметри процесів відновлення та профілактичного обслуговування БпЛА, а також процеси деградації та керованого зменшення якості виконання завдань, що дозволяє підвищити точність розрахунків показників гарантоздатності;

- комплекс моделей оцінки функційної надійності СОМС БпЛА, який враховує фрагментацію цільової області, різні варіанти формування маршрутів для її покриття в умовах відмов БпЛА та підсистеми обслуговування, а також багатоступеневу деградацію їх характеристик БпЛА,

що дозволяє підвищити точність розрахунків показників надійності та ризиків ненадання сервісів СОМС;

що дозволяють забезпечити підвищення ефективності застосування мобільних систем на основі БПЛА в інтересах Повітряних Сил Збройних Сил України під час виконання завдань за призначенням.

6.4.5 Впровадження наукових результатів під час виконання наукових досліджень в Харківському Національному університеті Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

Результати наукових досліджень автора реалізовані в ході виконання оперативного завдання “Дослідження шляхів побудови та застосування багатопозиційної сенсорної системи навігації бойових літальних апаратів та моніторингу обстановки”, шифр “Атрос”, а саме:

- метод визначення складу угруповання БПЛА, необхідного для розгортання багатопозиційної сенсорної системи навігації літальних апаратів та моніторингу обстановки;

- моделі функціонування угруповання БПЛА при покритті цільової області під час розгортання багатопозиційної сенсорної системи навігації літальних апаратів та моніторингу обстановки, та оцінки ефективності їх реалізації.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження дозволило отримувати достовірну оцінку ефективності комплексного використання мережі різнорідних сенсорів та угруповання БПЛА, обґрунтовувати прийняття рішень під час розгортання та застосування перспективних систем навігації і моніторингу обстановки в умовах обмеженого функціонування геоінформаційних систем при забезпеченні виконання завдань пілотованою та безпілотною авіацією.

6.4.6 Впровадження наукових результатів в навчальному процесі в Національному університеті цивільного захисту України

Результати, отримані при проведенні дисертаційного дослідження, впроваджено в освітньому процесі Національного університету цивільного захисту України під час викладання освітніх компонентів (навчальних дисциплін):

- «Управління діяльністю піротехнічних підрозділів»;
- «Технічні засоби забезпечення піротехнічних робіт»;
- «Ідентифікація вибухонебезпечних предметів»;

у ході вивчення тем, пов'язаних із організацією та проведенням заходів з розгортання системи пошуку, виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів з використанням БПЛА.

6.4.7 Систематизація результатів впровадження

Результати узагальнення впровадження результатів представлені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Отримані наукові результати та їх відображення в актах впровадження

Назва організації	Галузь	Науковий результат	Процес	Ефект
Національний аерокосмічний університет Жуковського «Харківський авіаційний інститут»	Освіта	ВР2, У1, У2, У3, ПР1, ПР2	Навчальний процес та процес виконання міжнародних проектів	Підвищення наочності та практичної спрямованості навчального процесу
	Наука	ВР2, ВР3, У1, У2,	Процес виконання НДР	Ефективне вирішення науково-практичних задач під час виконання НДР

Кінець таблиці 6.1

Назва організації	Галузь	Науковий результат	Процес	Ефект
Національний аерокосмічний університет Жуковського «Харківський авіаційний інститут»	Міжнародне співробітництво у галузі науки	ВР2, У1	процес виконання міжнародних проектів	покращення міжнародних зв'язків університетів та наукових інститутів учасників проектів у галузі виконання наукових проектів
Командування Повітряних Сил Збройних Сил України	Збройні Сили України	ВР1, ВР3, У1, У2, ПР1	Процес розробки нормативних вимог до перспективних систем на основі БПЛА	Пропозиції щодо підвищення гарантоздатності застосування систем на основі БПЛА при виконанні завдань за призначенням
Харківський Національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба	Збройні Сили України	ВР2, ВР3	Процес розроблення вимог та провадження систем на основі БПЛА	Уточнені вимоги щодо забезпечення заданих рівнів гарантоздатності застосування БПЛА при виконанні завдань за призначенням
Національний університет цивільного захисту України	Державна служба України з надзвичайних ситуацій	ВР2, У1	Процес організації пошуку ВВП	Методичне забезпечення розгортання та застосування мобільних технічних засобів пошуку ВВП на основі БПЛА

Примітка. Скорочення, що використані у таблиці 6.1:

- ВР – «вперше розроблено»;
- У – «удосконалено»;
- ПР – «дістало подальшого розвитку».

6.5 Висновки до шостого розділу

Запропонована й описана загальна архітектура СОМС на основі концептуальної моделі СОМС у вигляді холонічної мультиагентної системи з використанням БПЛА, АОЗС.

Розроблена інформаційна технологія, яка має за мету підтримати 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; архітектура СОМС БПЛА у вигляді холонічної мультиагентної системи з використанням БПЛА, АОЗС; інструментальні засоби, які використано для реалізації процесів аналізу й моделювання.

Проведена систематизація результатів впровадження і надано їх детальний опис.

Основні наукові результати, що наведені в першому розділі, опубліковано в роботах автора [23, 34, 36, 38, 41, 43, 51-54], зазначених в анотації.

ВИСНОВКИ

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

Визначена проблема обумовлена з 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 отримані наступні нові наукові результати:

а) вперше розроблено:

1) методологія 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) аналітичні моделі для опису процесів розгортання та надійної 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) 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;

б) удосконалено:

1) 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.

2) 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 обґрунтувати вимоги до безвідмовності та живучості апаратів і систем;

в) отримали подальший розвиток:

1) 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.

2) 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 враховувано; 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fourastier, Y., Baron, C., Thomas, C. & Esteban, P. (2020) 'Assurance levels for decision making in autonomous intelligent systems and their safety'. In: *Proceedings of the 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Kyiv, Ukraine, 14-18 May 2020. pp. 475-483. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125079>.
2. Kim, H., Mokdad, L. & Ben-Othman, J. (2018) 'Designing UAV Surveillance Frameworks for Smart City and Extensive Ocean with Differential Perspectives'. *IEEE Communications Magazine*, 56(4), pp. 98-104. Available at: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700444>.
3. Alsamhi, S.H., Ma, O., Ansari, M.S. & Almalki, F.A. (2019) 'Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities'. *IEEE Access*, 7, pp. 128125-128152. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934998>.
4. Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., Jawhar, I., Idries, A. & Mohammed, F. (2020) 'Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities'. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119293. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.05.004>.
5. Yapp, J., Seker, R. & Babiceanu, R. (2016) 'UAV as a service: A network simulation environment to identify performance and security issues for commercial UAVs in a coordinated, cooperative environment'. In: Hodicky, J. (ed.) *Modelling and Simulation for Autonomous Systems. MESAS 2016. Lecture Notes in Computer Science*. Cham, Switzerland: Springer, pp. 347-355. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47605-6_28.
6. Sun, Y., Tan, Q., Yan, C., Chang, Y., Xiang, X. & Zhou, H. (2022) 'Multi-UAV Coverage through Two-Step Auction in Dynamic Environments'. *Drones*, 6(6), 153. Available at: <https://doi.org/10.3390/drones6060153>.
7. Kliushnikov, I.M., Fesenko, H.V. & Kharchenko, V.S. (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>.

8. Fesenko, H., Kharchenko, V., Bardis, N., Kor, A.L. & Brezhniev, Y. (2020) 'Drone fleet survivability evaluation based on Lanchester's modified deterministic model'. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 14, pp. 775-781. Available at: <https://doi.org/10.46300/9106.2020.14.99>.

9. Teng, H., Dong, M., Liu, Y., Tian, W. & Liu, X. (2021) 'A low-cost physical location discovery scheme for large-scale Internet of Things in smart city through joint use of vehicles and UAVs'. *Future Generation Computer Systems*, 118, pp. 310-326. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.01.032>.

10. Nawaz, H., Ali, H.M. & Massan, S.U.R. (2019) 'Applications of unmanned aerial vehicles: a review'. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme. Special Issue*, November 2019, pp. 85-105. Available at: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2019.specialissue3.85-105>.

11. Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V. & Didenko, N. (2023) 'Analysis of the spheres of application of unmanned aircraft apparatus for resolving labor safety issues'. *Municipal Economy of Cities*, 1(175), pp. 182-188. Available at: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-182-188>.

12. Saikhom, V. & Kalita, M. (2024) 'UAV for Remote Sensing Applications: An Analytical Review'. In: Deka, J.K., Robi, P.S. & Sharma, B. (eds.) *Emerging Technology for Sustainable Development. EGTEET 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer, pp. 51-59. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4362-3_6.

13. Manfreda, S., McCabe, M.F., Miller, P.E., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G., Ben Dor, E., Helman, D., Estes, L., Ciraolo, G., Müllerová, J., Tauro, F., De Lima, M.I., De Lima, J.L.M.P., Maltese, A., Frances, F., Caylor, K., Kohv, M., Perks, M. & Toth, B. (2018) 'On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring'. *Remote Sensing*, 10(4), 641. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs10040641>.

14. Noor, F., Khan, M.A., Al-Zahrani, A., Ullah, I. & AlDhlan, K.A. (2020) 'A review on communications perspective of flying adhoc networks: key enabling wireless technologies, applications, challenges and open research topics'. *Drones*, 4(4), 65. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/4/65>.
15. Xu, Y. & Gui, G. (2020) 'Optimal resource allocation for wireless powered multi-carrier backscatter communication networks'. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(8), pp. 1191-1195. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9052662>.
16. Amponis, G., Lagkas, T., Zevgara, M., Katsikas, G., Xirofotos, T., Moscholios, I. & Sarigiannidis, P. (2022) 'Drones in b5g/6g networks as flying base stations'. *Drones*, 6(2), 39. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/2/39>
17. Paredes, W.D., Kaushal, H., Vakilinia, I. & Prodanoff, Z. (2023) 'Lora technology in flying ad hoc networks: A survey of challenges and open issues'. *Sensors*, 23(5), 2403. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/5/2403>.
18. Gupta, A., Afrin, T., Scully, E. & Yodo, N. (2021) 'Advances of UAVs toward Future Transportation: The State-of-the-Art, Challenges, and Opportunities'. *Future Transportation*, 1(2), pp. 326-350. Available at: <https://doi.org/10.3390/futuretransp1020019>.
19. Kujawski, A. & Nürnberg, M. (2023) 'Analysis of the Potential Use of Unmanned Aerial Vehicles and Image Processing Methods to Support Road and Parking Space Management in Urban Transport'. *Sustainability*, 15(4), 3285. Available at: <https://doi.org/10.3390/su15043285>.
20. Liang, H., Lee, S.-C., Bae, W., Kim, J. & Seo, S. (2023) 'Towards uavs in construction: Advancements, challenges, and future directions for monitoring and inspection'. *Drones*, 7(3), 202. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/3/202>.
21. Sun, Y., Fesenko, H., Kharchenko, V., Zhong, L., Kliushnikov, I., Illiashenko, O., Morozova, O. & Sachenko, A. (2022) 'UAV and iotbased 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>.

22. Liu, Z. & Li, J. (2023) 'Application of Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture'. *Agriculture*, 13(7), 1375. Available at: <https://doi.org/10.3390/agriculture13071375>.

23. Aliane, N. (2025) 'Drones and AI-Driven Solutions for Wildlife Monitoring'. *Drones*, 9(7), 455. Available at: <https://doi.org/10.3390/drones9070455>.

24. Pina, P. & Vieira, G. (2022) 'UAVs for science in antarctica'. *Remote Sensing*, 14(7), 1610. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1610>.

25. Fudala, K. & Bialik, R.J. (2022) 'The use of drone-based aerial photogrammetry in population monitoring of southern giant petrels in asma 1, king george island, maritime antarctica'. *Global Ecology and Conservation*, 33, 01990. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01990>.

26. Jang, G., Jeong, K., Keum, J. & Seong, S. (2013) 'System design strategies of post-accident monitoring system for a PGSFR in KOREA'. In: *Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (ANIMMA'2013): Proceedings of the 2013 IEEE 3rd International Conference*. Maseille, France, June 23-27, 2013. pp. 1-5. Available at: <https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2013.6728044>.

27. Sanada, Y. & Torii, T. (2015) 'Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter'. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, pp. 294-299. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.027>.

28. IAEA (International Atomic Energy Agency) (2012) *Accident monitoring systems for nuclear power plants*. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.16. Vienna: IAEA. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1676_web.pdf.

29. Fumian, F., Di Giovanni, D., Martellucci, L., Rossi, R. & Gaudio, P. (2020) 'Application of miniaturized sensors to unmanned aerial systems, a new pathway for the survey of polluted areas: Preliminary results'. *Atmosphere*, 11(5), 471. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/5/471>.

30. Martin, P.G., Kwong, S., Smith, N.T., Yamashiki, Y., Payton, O.D., Russell-Pavier, F.S., Fardoulis, J.S., Richards, D.A. & Scott, T.B. (2016) '3D unmanned aerial

vehicle radiation mapping for assessing contaminant distribution and mobility'. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, pp. 12-19. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.05.007>.

31. IAEA (International Atomic Energy Agency) (2021) *Now Available: New Drone Technology for Radiological Monitoring in Emergency Situations*. Available at: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/dlya-radiologicheskogo-monitoringa-v-chrezvychaynyh-situaciyah-teper-dostupna-novaya-tehnologiya-s-ispolzovaniem-dronov>.

32. Abdelmaboud, A. (2021) 'The internet of drones: Requirements, taxonomy, recent advances, and challenges of research trends'. *Sensors*, 21(17), 5718. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/17/5718>

33. Goyal, N., Sharma, S., Rana, A.K. & Tripathi, S.L. (2022) *Internet of Things: Robotic and Drone Technology*. Boca Raton: CRC Press. Available at:

34. Lakshman, S.A. & Ebenezer, D. (2021) 'Integration of internet of things and drones and its future applications'. *Materials Today: Proceedings*, 47, pp. 944-949. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.039>.

35. Zhou, Y., Rao, B. & Wang, W. (2020) 'UAV swarm intelligence: Recent advances and future trends'. *IEEE Access*, 8, pp. 183856-183878. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9214446>.

36. Khelifi, M. & Butun, I. (2022) 'Swarm unmanned aerial vehicles (suavs): A comprehensive analysis of localization, recent aspects, and future trends'. *Journal of Sensors*, 2022. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9214446>.

37. Fan, B., Li, Y., Zhang, R. & Fu, Q. (2020) 'Review on the technological development and application of uav systems'. *Chinese Journal of Electronics*, 29(2), pp. 199-207. Available at: <https://doi.org/10.1049/cje.2019.12.006>.

38. Feng, Y., Zhang, C., Baek, S., Rawashdeh, S. & Mohammadi, A. (2018) 'Autonomous Landing of a UAV on a Moving Platform Using Model Predictive Control'. *Drones*, 2(3), 34. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/2/4/34>.

39. Nex, F. & Remondino, F. (2019) 'Preface: Latest Developments, Methodologies, and Applications Based on UAV Platforms'. *Drones*, 3(1), 26. Available at: <https://doi.org/10.3390/drones3010026>.

40. Fan, B., Li, Y., Zhang, R. & Fu, Q. (2020) 'Review on the Technological Development and Application of UAV Systems'. *Chinese Journal of Electronics*, 29(2), pp. 199-207. Available at: <https://doi.org/10.1049/cje.2019.12.006>.

41. *Introduction to UAV systems* (2013) In *Choice Reviews Online*, 50(11), pp. 50-6201-50-6201. Available at: <https://doi.org/10.5860/choice.50-6201>.

42. San, K.T., Mun, S.J., Choe, Y.H. & Chang, Y.S. (2018) 'UAV Delivery Monitoring System'. In: Adiguzel, O., McAndrew, I., Yokoi, Y. & Koryanov, V. (eds.) *Matec Web of Conferences*. Vol. 151. EDP Sciences, p. 04011. Available at: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815104011>.

43. 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, pp. 22-29. Available at: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.022>.

44. Ключніков, І.М. & Фесенко, Г.В. (2021) 'Особливості застосування мультиагентних технологій при створенні та управлінні системами моніторингу, побудованими на основі безпілотних літальних апаратів'. In: *Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій: матеріали Третьої міжнар. наук.-практ. конф.* Київ, 25-26 січня 2021 р. Київ, pp. 104-107.

45. Ведмідь, Н.І. (2012) 'Термінологічні підходи до визначення категорії «Сервіс» та його роль в економіці країн'. *Економічний часопис-XXI*, 3-4, pp. 49-52. Available at: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/e2f4e1bc-1ed0-4cac-b64e-3be5d80e6df0>.

46. Moinuddin, M. (no date) *An Overview of Service-Oriented Architecture in Retail*. WayBack Machine. Available at: <http://msdn2.microsoft.com/en-us/library/bb264584.aspx>.

47. Yang, F. & Gu, S. (2021) 'Industry 4.0, a revolution that requires technology and national strategies'. *Complex & Intelligent Systems*, 7, pp. 1311-1325. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00267-9>.

48. Singireddy, S.R.R. & Daim, T.U. (2018) 'Technology Roadmap: Drone Delivery -- Amazon Prime Air'. In: Daim, T., Chan, L. & Estep, J. (eds.) *Infrastructure and Technology Management. Innovation, Technology, and Knowledge Management*. Cham: Springer, pp. 387-412. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68987-6_13.

49. Zenz, A. & Powles, J. (2024) 'Resisting technological inevitability: Google Wing's delivery drones and the fight for our skies'. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 382, 20240107, pp. 1-27. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2024.0107>.

50. Zieher, S., Olcay, E., Kefferpütz, K., Salamat, B., Olzem, S., Elsbacher, G. & Meeß, H. (2024) 'Drones for automated parcel delivery: Use case identification and derivation of technical requirements'. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 28, 101253, pp. 1-17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101253>.

51. Lamptey, E. & Serwaa, D. (2020) 'The Use of Zipline Drones Technology for COVID-19 Samples Transportation in Ghana'. *HighTech and Innovation Journal*, 1(2), pp. 67-71. Available at: <https://doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-02-03>.

52. Business Wire (2022) *Matternet launches world's longest urban drone delivery route connecting hospitals and laboratories in Zurich, Switzerland*. Available at: <https://www.businesswire.com/news/home/20221212005097/en/MatternetLaunches-World's-Longest-Urban-Drone-Delivery-Route-Connecting-Hospitals-andLaboratories-in-Zurich-Switzerland>.

53. Yapp, J., Seker, R. & Babiceanu, R. (2016) 'UAV as a service: Enabling on-demand access and on-the-fly re-tasking of multi-tenant UAVs using cloud services'. In: *2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. Sacramento, CA, USA, 25-29 Sept. 2016. pp. 1-8. Available at: <https://doi.org/10.1109/DASC.2016.7778007>.

54. Sellami, M., Mezni, H., Elmannai, H. et al. (2025) 'Drone-as-a-Service: proximity-aware composition of UAV-based delivery services'. *Cluster Computing*, 28, 330. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04992-5>.
55. Nait-Abdesselam, F. et al. (2021) 'Towards Enabling Unmanned Aerial Vehicles as a Service for Heterogeneous Applications'. *Journal of Communications and Networks*, 23(3), pp. 212-221. Available at: <https://doi.org/10.23919/JCN.2021.000015>.
56. Filiopoulou, E., Bardaki, C., Nikolaidou, M. & Michalakelis, C. (2025) 'Drone-as-a-Service for last-mile delivery: Evidence of economic viability'. *Economics of Transportation*, 41, 100398. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2025.100398>.
57. Hamdi, A., Salim, F.D., Kim, D.Y., Neiat, A.G. & Bouguettaya, A. (2021) 'Drone-as-a-service composition under uncertainty'. *IEEE Transactions on Services Computing*, 15(5), pp. 2685-2698. Available at: <https://doi.org/10.1109/TSC.2021.3066006>.
58. Evans, A., Byrum, C., Stanford, D., Sandt, E. & Goolsby, T. (no date) *Physical Protection Recommendations for Small Modular Reactor Facilities*.
59. Rivera Garcia, M. (2021) *Inspecting nuclear facilities with unmanned aerial systems*. NuclearNewswire. Available at: <https://www.ans.org/news/article-3362/inspecting-nuclear-facilities-with-unmanned-aerial-systems>.
60. Sang, Q., Wu, H., Xing, L. & Xie, P. (2020) 'Review and Comparison of Emerging Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks'. *Symmetry*, 12(6), 971. Available at: <https://doi.org/10.3390/sym12060971>.
61. Rodriguez, P.A., Geckle, W.J., Barton, J.D., Samsundar, J., Gao, T., Brown, M.Z. & Martin, S.R. (2006) 'An emergency response UAV Surveillance System'. *AMIA Annual Symposium Proceedings*. p. 1078. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17238697/>.
62. Bradley, B. (2025) *Amazon pauses Prime Air after 2 drones crash in Tolleson, sources say*. AZfamily. Available at: <https://www.azfamily.com/2025/10/01/amazon-pauses-prime-air-after-2-drones-crash-tolleson-sources-say/>.
63. Avizienis, A., Laprie, J. -C., Randell B., & Landwehr C. (2004) 'Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing', In: *IEEE Transactions on*

Dependable and Secure Computing, Jan.-March 2004, vol. 1, no. 1. pp. 11-33. Available at: <https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2>.

64. International Electrotechnical Commission. (2015) *IEC 60050-192:2015 International electrotechnical vocabulary. Part 192: Dependability*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/21886>.

65. Харченко, В.С. (2009) 'Гарантоздатні системи та багатOVERсійні обчислення: аспекти еволюції'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2(27), с. 46-59.

66. Kharchenko, V., Sklyar, V. & Siora, A. (2009) 'Dependability of Safety-Critical Computer Systems through Component-Based Evolution'. In: *2009 Fourth International Conference on Dependability of Computer Systems*. Brunow, Poland, 30 Jun. 2 Jul. 2009. pp. 42-49. Available at: <https://doi.org/10.1109/DepCoS-RELCOMEX.2009.22>.

67. Chen, D., Garg, S., Kintala, C. & Trivedi, K.S. (2003) 'Dependability enhancement for IEEE 802.11 wireless LAN with redundancy techniques'. In: *2003 IEEE International Conference on Dependable Systems and Networks, 2003. Proceedings*. San Francisco, CA, USA, 22-25 June 2003. pp. 521-528. Available at: <https://doi.org/10.1109/DSN.2003.1209962>.

68. Leveson, N.G. (2004) 'A systems-theoretic approach to safety in software-intensive systems'. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 1(1), pp. 66-86. Available at: <https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.1>.

69. Avizienis, A., Laprie, J-C. & Randell, B. (2001) 'Fundamental Concepts of Dependability'. *Newcastle University, Technical Report CS-TR-739*. Available at: <https://people.cs.rutgers.edu/~rmartin/teaching/spring03/cs553/readings/avizienis00.pdf>.

70. Теслер, Г.С. (2006) 'Концепция построения гарантоспособных вычислительных систем'. *Математичні машини і системи*, 1, pp. 134-145.

71. Теслер, Г.С. (2008) 'Решение проблем гарантоспособности и отказоустойчивости систем в аспекте базисов компьютерной науки'. *Математичні машини і системи*, 4, pp. 171-188.

72. Теслер, Г.С. (2002) 'Концепция создания вычислительных средств с высоким уровнем отказоустойчивости'. *Математичні машини і системи*, 2, pp. 176-183.

73. Харченко, В.С. (2009) 'Гарантоздатні системи та багатоверсійні обчислення: аспекти еволюції'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2(27), pp. 46-59.

74. Kharchenko, V.S., Sklyar, V.V. & Volkoviy, A.V. (2007) 'Multi-version Information Technologies and Development of Dependable Systems out of Undependable Components'. In: *2nd IEEE International Conference on Dependability of Computer Systems (DepCoS-RELCOMEX'07)*. Szklarska Poreba, Poland, 14-16 June 2007. pp. 43-50. Available at: <https://doi.org/10.1109/DEPCOS-RELCOMEX.2007.34>.

75. Харченко, В.С. та ін. (2019) *Забезпечення функціональної безпеки критичних інформаційно-керуючих систем: монографія*. Харків: Константа.

76. Глухов, В. (2008) 'Оцінювання гарантоздатності криптографічних комп'ютерних систем'. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, 616, pp. 66-72.

77. Глухов, В.С. & Ілляшенко, О. (2009) 'Кодирование состояний управляющих автоматов в гарантоспособных системах'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 5, pp. 91-95.

78. Глухов, В.С. & Ногаль, М.В. (2008) 'Спеціалізований однорозрядний процесор для захисту інформації в гарантоздатних системах'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 5, pp. 104-108.

79. Федухин, А.В. & Мудла, Б.Г. (2014) 'Гарантоспособность компьютерных систем - мода или объективная необходимость'. *Математичні машини і системи*, 4, pp. 179-188.

80. Федухин, А.В. & Сеспедес-Гарсия, Н.В. (2009) 'Моделирование надежности невосстанавливаемой системы со структурой типа "к из n" с реконфигурацией'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 7, pp. 82-84.

81. Федухин, А.В. & Сеспедес-Гарсия, Н.В. (2013) 'Атрибут и метрики гарантоспособных компьютерных систем'. *Математичні машини і системи*, 2, pp. 195-201.
82. Ковтун, В.В. (2020) *Моделі атрибутів гарантоздатності інформаційної системи критичного застосування із автентифікацією суб'єкта за голосом: монографія*. Вінниця: ВНТУ.
83. Береза, А.О., Гришук, Т.В. & Ковтун, В.В. (2018) 'Оцінювання надійності сеансу розпізнавання особи автоматизованою системою розпізнавання мовця критичного застосування'. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 6(1), pp. 143-150.
84. Поночевний, Ю.Л. (2021) *Методологічні основи та інформаційні технології забезпечення гарантоздатності інформаційно-керуючих систем з багатоцільовим обслуговуванням*. Дисертація на здобуття наук. ст. докт. техн. наук, 05.13.06.
85. Поночевний, Ю.Л. (2019) 'Аналіз концепцій управління кібербезпекою розподілених ІТ інфраструктур'. *Системи та технології*, 2, pp. 87-101.
86. Поночевний, Ю.Л. & Харченко, В.С. (2020) 'Методологія забезпечення гарантоздатності інформаційно-керуючих систем з використанням багатоцільових стратегій обслуговування'. *Радіoeлектронні і комп'ютерні системи*, 3, pp. 43-58.
87. Держстандарт України. (1994) *ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення*. Available at: <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/30417/3/DSTU%202860-94u.doc>.
88. Горбенко, А.В. (2013) 'Проблемы и задачи создания гарантоспособных сервис-ориентированных web-систем'. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 3, pp. 171-176.
89. Trivedi, K.S. & Bobbio, A. (2017) '*Reliability and Availability Engineering: Modeling, Analysis, and Applications*'. Cambridge: Cambridge University Press. Available at: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781108514965_A30456328/preview-9781108514965_A30456328.pdf.

90. International Electrotechnical Commission. (2010) *IEC 61508-1:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Part 1: General requirements*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/5515>.

91. Скляр, В.В. (2010) 'Аналіз функціональної безпеки інформаційно-керуючих систем з використанням логічних моделей помилок контролю та управління'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 7, pp. 267-271.

92. International Electrotechnical Commission. (2006) *IEC 60880:2006 Nuclear power plants. Instrumentation and control systems important to safety. Software aspects for computer-based systems performing category A functions*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/3795>.

93. Society of Automotive Engineers International (1996) *ARP4761 Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment*. Available at: <https://www.sae.org/standards/content/arp4761>.

94. International Civil Aviation Organization. (2013) *Operation of Aircraft. Convention on International Civil Aviation. Part I - International Commercial Air Transport - Aeroplanes*. Available at: [https://www.icao.int/safety/fatiguemanagement/FRMS%20Tools/Amendment%2037%20for%20FRMS%20SARPS%20\(en\).pdf](https://www.icao.int/safety/fatiguemanagement/FRMS%20Tools/Amendment%2037%20for%20FRMS%20SARPS%20(en).pdf).

95. Society of Automotive Engineers International. (2019) *ARP5151A Safety Assessment of General Aviation Airplanes and Rotorcraft in Commercial Service*. Available at: <https://www.sae.org/standards/content/arp5151a>.

96. European Committee for Electrotechnical Standardization. (2010) *CENELEC - EN 50159 Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Safety-related communication in transmission systems*. Available at: <https://standards.globalspec.com/std/1285055/EN%2050159>.

97. British Standards Institution. (2020) *BSI -BS EN 50126-1 -TC. Tracked Changes (Redline) - Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) Part 1: Generic RAMS Process* Available at: <https://standards.globalspec.com/std/14321159/bs-en-50126-1-tc>.

98. British Standards Institution. (2020) *BSI - BS EN 50126-2 - TC. Tracked Changes (Redline). Railway Applications. The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) Part 2: Systems Approach to Safety*. Available at: <https://standards.globalspec.com/std/14326588/bs-en-50126-2-tc>.

99. International Organization for Standardization. (2018) *ISO 26262-4:2018 Road vehicles. Functional safety. Part 4: Product development at the system level*. Available at: <https://www.iso.org/standard/68386.html>.

100. International Electrotechnical Commission. (2010) *IEC 61508-4:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Part 4: Definitions and abbreviations*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/5518>.

101. International Electrotechnical Commission (2019) *IEC 62645:2019 Nuclear power plants. Instrumentation, control and electrical power systems. Cybersecurity requirements*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/32904>.

102. Raggad, B. (2010) *Information Security Management: Concepts and Practice*. Boca Raton: CRC Press. Available at: <https://archive.org/details/informationsecur0000ragg>.

103. Gluschke, G. (2018) *Cyber security policies and critical infrastructure protection*. Potsdam: Institute for Security and Safety (ISS) Press.

104. International Organization for Standardization/ (2004) *ISO/IEC 13335-1:2004 Information technology. Security techniques. Management of information and communications technology security. Part 1: Concepts and models for information and communications technology security management*. Available at: <https://www.iso.org/standard/39066.html>.

105. Limba, T., Plêta, T., Agafonov, K. & Damkus, M. (2017) 'Cyber security management model for critical infrastructure'. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 4(4), pp. 559-573. Available at: [https://doi.org/10.9770/jesi.2017.4.4\(12\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2017.4.4(12)).

106. Верховна Рада України. (2016) *Указ Президента України; Стратегія від 15.03.2016 № 96/2016. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України*

від 27 січня 2016 року "Про Стратегію кібербезпеки України". Available at: <https://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/96/2016>.

107. International Electrotechnical Commission. (2009) *IEC TS 62443-1-1:2009 Industrial communication networks. Network and system security. Part 1-1: Terminology, concepts and models*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/7029>.

108. Lee, J. & Hong, Y.S. (2018) 'Data-Driven Prediction of Change Propagation Using Dependency Network'. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* Available at: 10.1016/j.ict.2018.02.001.

109. International Electrotechnical Commission. (2010) *IEC 62443-2-1:2010 Industrial communication networks. Network and system security. Part 2-1: Establishing an industrial automation and control system security program*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/7030>.

110. International Electrotechnical Commission. (2009) *IEC/TR 62443-3-1:2009 Industrial communication networks. Network and system security. Part 3-1: Security technologies for industrial automation and control systems*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/7031>.

111. International Electrotechnical Commission. (2013) *IEC 62443-3-3:2013 Industrial communication networks. Network and system security. Part 3-3: System security requirements and security levels*. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/7033>.

112. Харченко, В.С. & Зайцева, О. (2010) 'Про деградуючі системи з деградуючими компонентами'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 7, pp 288-292. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2010_7_58.

113. International Organization for Standardization. (2014) *ISO/IEC 15408-1:2009 Information technology. Security techniques. Evaluation criteria for IT security -- Part 1: Introduction and general model**. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/50341.html>.

114. Franco, M.L., Branco, K., Braga, R., Oliveira, A.L., Dezan, C. & Diguet, J. (2018) 'Model-Based Dependability Analysis of Unmanned Aerial Vehicles - A Case

Study'. In: *2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W)*. 25-28 June 2018. pp. 263-270. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8416258>

115. Zhang, Q., Furqan, M.D., Nutzhat, T., Machida, F. & Andrade, E. (2025) 'Dependability of UAV-Based Networks and Computing Systems: A Survey'. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.16786>

116. Petritoli, E., Leccese, F., & Ciani, L. (2017) 'Reliability assessment of UAV systems', *2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, Padua, Italy, 2017, pp. 266-270, Available at: <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2017.7999577>.

117. Petritoli, E.; Leccese, F.; & Ciani, L. (2018) 'Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles'. *Sensors*, 18, 3171. Available at: <https://doi.org/10.3390/s18093171>.

118. Rodrigues, D. (2017) 'Service-Oriented Architectures for a Flexible and Safe Use of Unmanned Aerial Vehicles'. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9 (1). pp. 97-109. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7823097>.

119. Abdallah, R. (2019) '*Reliability approaches in networked systems: Application on Unmanned Aerial Vehicles*'. Thèse de doctorat. Bourgogne Franche-Comté. Available at: <https://theses.fr/2019UBFCA008>.

120. Brito, C., Silva, L., Callou, G., Nguyen, T., Min, D., Lee, J.-W. & Silva, F.A. (2021) 'Offloading Data Through Unmanned Aerial Vehicles: A Dependability Evaluation'. *Electronics*, 10, 1916. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/16/1916>.

121. Nguyen, T., Jeon, K.-S., Lee, J.-W., Fé, I. & Silva, F.A. (2022) 'Model-Driven Mission Dependability Design of Unmanned Aerial Systems'. In: *AIAA AVIATION 2022 Forum*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.2514/6.2022-4091>.

122. Xing, L. & Johnson, B.W. (2023) 'Reliability Theory and Practice for Unmanned Aerial Vehicles'. *IEEE Internet of Things Journal*, 10 (4). pp. 3548-3566. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9933816>.

123. Zaitseva, E. (2023) 'Review of Reliability Assessment Methods of Drone Swarm (Fleet) and a New Importance Evaluation Based Method of Drone Swarm Structure Analysis'. *Mathematics*, 11, 2551. Available at: <https://doi.org/10.3390/math11112551>.
124. International Electrotechnical Commission. (2003) IEC 60300-3-1:2003 Dependability management. Part 3-1: Application guide. Analysis techniques for dependability. Guide on methodology. Available at: <https://webstore.iec.ch/en/publication/1294>.
125. Pan, K., Liu, H., Gou, X., Huang, R., Ye, D., Wang, H. & Glowacz, A. (2022) 'Towards a Systematic Description of Fault Tree Analysis Studies Using Informetric Mapping'. *Sustainability*, 14(18), 11430. Available at: <https://doi.org/10.3390/su141811430>.
126. Mareş, R. & Mihai, P. (2017) 'The application of event tree analysis in a work accident at maintenance operations'. *MATEC Web of Conferences*, 121, 11013. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712111013>.
127. Hasan, O., Ahmed, W., Tahar, S. & Hamdi, M. (2015) 'Reliability block diagrams based analysis: A survey'. *AIP Conference Proceedings*, 1648. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.4913184>.
128. Mahfuz, F. (2021) 'Markov chains and their applications'. *Math Theses*, Paper 10. Available at: <http://hdl.handle.net/10950/3704>.
129. Ключніков, І.М. (2024) 'Оцінка безпеки застосування безпілотних літальних апаратів з використанням марковських моделей'. *Системи озброєння і військова техніка*, 4(76), pp. 51-57. Available at: <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.76.05>.
130. Lukova-Chuiko, N., Musienko, A. & Koval, M. (2018) 'Використання мереж петрі для побудови моделі виявлення зовнішніх впливів на інформаційну систему'. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 2, pp. 77-82. Available at: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.2.077>.
131. Signoret, J.-P. & Leroy, A. (2021) 'Failure Mode, Effects (and Criticality) Analysis, FME(C)A'. In: *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety*

in *Engineering Design*. Springer, pp. 1-40. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-64708-7_10.

132. Kotek, L. & Tabas, M. (2012) 'HAZOP Study with Qualitative Risk Analysis for Prioritization of Corrective and Preventive Actions'. *Procedia Engineering*, 42, pp. 808-815. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.473>.

133. Akpan, E. (2017) 'Analytic determination of values on the truth table: possible implications'. *AFRREV STECH: An International Journal of Science and Technology*, 6(1), pp. 74-84. Available at: <https://doi.org/10.4314/stech.v6i1.6>.

134. Velichko, V. & Kolomeychuk, A. (2025) 'THE TRUTH TABLE'. In: *Proceedings of the 2024 International Conference on Information Security and Management Practices (CISMP2024)*. pp. 566-570. Available at: https://doi.org/10.58168/CISMP2024_566-570.

135. Скляр, В.В. (2012) *Методологія та інформаційні технології забезпечення функціональної безпеки інформаційно-управляючих систем: автореф. дис. докт. техн. наук : 05.13.06*. Харків.

136. Брежнев, Є.В. (2017) **Методологічні основи інформаційної технології забезпечення безпеки критичних енергетичних інфраструктур: дис. докт. техн. наук : 05.13.06*. Харків.

137. Sklyar, V. & Kharchenko, V. (2017) 'Challenges in assurance case application for industrial IoT'. In: *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017): Proceedings of the 9th IEEE International Conference*. Bucharest, Romania, 21-23 Sept. 2017. Vol. 2. pp. 736-739. Available at: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095187>.

138. Sklyar, V. & Kharchenko, V. (2019) 'Assurance case based licensing for nuclear power plant post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicles'. In: *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2019): Proceedings of the 10th IEEE International Conference*. Leeds, UK, 5-7 Jun. 2019. pp. 186-192. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770014>.

139. Yastrebenetsky, M. & Gromov, G. (2014) 'International standard bases and safety classification'. In: Yastrebenetsky, M. & Kharchenko, V. (eds.) *Nuclear Power*

Plant Instrumentation and Control Systems for Safety and Security. Hershey, PA: IGI Global, pp. 31-60. Available at: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-5133-3.ch002>.

140. Ushakov, I.A. (2012) *Probabilistic reliability models*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118370742>.

141. Федухин, А.В., Сеспедес-Гарсия, Н.В. (2006) До питання про статистичне моделювання надійності. *Математичні машини і системи*, 1 (1). pp. 156-162.

142. Харченко, В. С. (2006) *Надійність цифрових систем*. Харків: Міністерство освіти та науки України.

143. Стрельников, В.П. & Федухин, А.В. (2002) *Оцінка та прогнозування надійності електронних елементів та систем*. Київ: Логос.

144. Волкович, В.Л., Волошин, А.Ф., Заславский, В.А. & Ушаков, И.А. (1992) *Модели та алгоритми оптимізації надійності складних систем*. Київ: Наукова думка.

145. Харченко, В. С., & Жихарев, В. Я. (2006) *Основи надійності цифрових систем*. Харків: Міністерство освіти та науки України.

146. Barlow, R. & Proschan, F. (1996) *Mathematical theory of reliability*. Philadelphia, PA: SIAM.

147. Lloyd, D. & Lipow, M. (1962) *Reliability: Management, methods and mathematics*. London: Prentice-Hall International.

148. Харченко, В.С., *et al.* (2013) *Оцінка та забезпечення якості програмних засобів космічних систем*. Харків: Національне космічне агентство України, Нац. аерокосм. університет «ХАІ».

149. Trivedi, K. & Bobbio, A. (2017) *Reliability and availability engineering*. Cambridge: Cambridge University Press.

150. Волочій, Б.Ю., Озірковський, Л.Д. & Улибін, Д.О. (2003) 'Марковська модель як засіб комплексного моделювання інформаційних систем з функціональним резервуванням'. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 470, с. 101-109.

151. Littlewood, B., Popov, P., Strigini, L. & Shryane, N. (2008) 'Modelling the effects of combining diverse software fault detection techniques'. In: Hierons, R., Bowen, J. & Harman, M. (eds.) *Formal methods and testing*. Berlin: Springer, pp. 345-366. Available at: [10.1007/978-3-540-78917-8_12](https://doi.org/10.1007/978-3-540-78917-8_12).
152. Bishop, P., Bloomfield, R., Littlewood, B., Popov, P., Povyakalo, A. & Strigini, L. (2014) 'A conservative bound for the probability of failure of a 1-out-of-2 protection system with one hardware-only and one software-based protection train'. *Reliability Engineering and System Safety*, 130, pp. 61-68. Available at: [10.1016/j.ress.2014.04.002](https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.04.002).
153. Харченко, В.С., Жихарев, В.Я., Ілюшко, В.М. & Нечипорук, Н.В. (2003) *Многоверсионные системы, технологии, проекты*. Харків: Нац. аэрокосм. університет «ХАІ».
154. Siora, A., Sklyar, V., Kharchenko, V. & Brezhnev, E. (2014) 'Diversity and multi-version systems'. In: Yastrebenetsky, M. & Kharchenko, V. (eds.) *Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems for Safety and Security*. Hershey, PA: IGI Global, pp. 178-232. Available at: [10.4018/978-1-4666-5133-3.ch006](https://doi.org/10.4018/978-1-4666-5133-3.ch006).
155. Levitin, G., Lisnianski, A. & Haim, H. (1998) 'Redundancy optimization for series-parallel multi-state systems'. *IEEE Transactions on Reliability*, 47(2), pp. 165-172. Available at: [10.1109/24.722283](https://doi.org/10.1109/24.722283).
156. Lisnianski, A. & Levitin, G. (2003) *Multi-state system reliability: Assessment, optimization and applications*. Singapore: World Scientific.
157. Zaitseva, E. (2012) 'Importance analysis of a multi-state system based on multiple-valued logic methods'. In: Lisnianski, A. & Frenkel, I. (eds.) *Recent advances in system reliability: signatures, multi-state systems and statistical inference*. London: Springer, pp. 113-134. Available at: [10.1007/978-1-4471-2207-4_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2207-4_8).
158. Додонов, А.Г., Кузнецова, М.Г. & Горбачек, Е.С. (1990) *Введение в теорию живучести вычислительных систем*. Киев: Наукова думка.
159. Сербін, В.Г. & Сухомлин, А.І. (2011) 'Деякі аспекти живучості складних гарантоздатних комп'ютерних систем критичних умов застосування'. *Математичні машини і системи*, 4.

160. Бабешко, Є., Ілляшенко, О. & Харченко, В. (2019) *Функційна безпека індустріальних систем. Стандарт ІЕС 61508*. Київ. Available at: <https://tk185.appau.org.ua/whitepapers/aCampus-whitepaper-IEC-61508+++pdf>.
161. International Electrotechnical Commission. (2014) *IEC 60300-1 Dependability management. Part 1: Dependability management systems*. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/18515/2acd6d02cab34b538b234365b354a4b4/IEC-60300-1-2014.pdf>.
162. Пасічник, В.В., Веклюк, Я.І. & Камінський, Р.М. (2017) *Моделювання складних систем*. Львів: Видавництво "Новий Світ - 2000".
163. Настенко, Є.А., Павлов, В.А., Городецька, О.К. & Корнієнко, Г.А. (2022) *Методи моделювання складних систем і процесів. Навч. посібник*. Київ: КПІ ім. І. Сікорського. Available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/dc7fc290-5e19-45b6-bb05-ca1b91b5b77e/content>.
164. Стеценко, І.В. (2010) *Моделювання систем*. Черкаси: ЧДТУ.
165. Nikolaou, P., Savva, A.D., Sorokos, I., Aslansefat, K., Missaoui, S., Naveed, A.M., Hillen, D. et al. (2025) 'Multi-Partner Project: Safe, Secure and Dependable Multi-UAV Systems for Search and Rescue Operations'. In: *Design, Automation and Test in Europe, 2025*. Available at:
166. Babu, N., Popovski, P. & Papadias, C. (2022) 'Cost-Efficient Deployment of a Reliable Multi-UAV Unmanned Aerial System'. In: *IEEE Vehicular Technology Conference, London, United Kingdom, 26-29 September 2022*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10013015>.
167. Ahmed, F. & Jenihhin, M. (2022) 'A Survey on UAV Computing Platforms: A Hardware Reliability Perspective'. *Sensors*, 22, 6286. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22166286>.
168. International Organization for Standardization (2018) *ISO/IEC 27000:2018 Information technology. Security techniques. Information security management systems. Overview and vocabulary*. Available at: <https://www.iso.org/standard/73906.html>.

169. Брежнев, Е.В. & Харченко, В.С. (2015) 'Методология обеспечения безопасности критических инфраструктур в условиях неопределенности: концепция и принципы'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 1, pp. 25-32.
170. Сіроклин, І.М., Мороз, В.П., Петухов, В.М. & Каргін, А.О. (2018) 'Концепція побудови комплексної системи визначення технічного стану рухомого складу: напольні пристрої'. *Залізничний транспорт України*, 2, pp. 13-21. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZTU_2018_2_4.
171. Верховна Рада України. (2020) *Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція від 02.12.2020 № 1556-р. 'Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні'*. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>.
172. Концепція. *Енциклопедія Сучасної України*. Available at: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=3256.
173. Гончаров, М.В. (2024) 'Дослідження поняття «інформаційна безпека»'. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*, 1 (82). pp. 34-37 Available at: <http://visnyk-pravo.uzhnu.edu.ua/article/view/303531>.
174. International Civil Aviation Organization. (2019) *Annex 19. Convention on International Civil Aviation. Safety Management*. Available at: https://caainternational.com/wp-content/uploads/2018/05/AN19_2edpublication.pdf.
175. Брежнев, Е.В., Фесенко, Г.В. & Харченко, В.С. (2018) 'Методологічні засади оцінювання та забезпечення безпеки критичних інформаційних інфраструктур'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 4, pp. 78-85.
176. Дудикевич, В.Б., Максимович, В.М. & Микитин, Г.В. (2015) 'Парадигма та концепція побудови багаторівневої комплексної системи безпеки кіберфізичних систем'. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. *Автоматика, вимірювання та керування*, 821, pp. 3-7. Available at: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/31196>
177. Staab, S. & Studer, R. (eds.) (2009) *Handbook on Ontologies*. Berlin: Springer.

178. 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: *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2023): Proceedings of the 13th IEEE International Conference*. Athens, Greece, 13-15 Oct. 2023. pp. 1-7. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416509>.
179. W3.org.(2022) *SPARQL 1.1 Update*. Available at: <https://www.w3.org/TR/sparql11-update/>.
180. Rodriguez, S., Hilaire, V., Gaud, N., Galland, S. & Koukam, A. (2011) 'Holonic Multi-Agent Systems'. In: Di Marzo Serugendo, G., Gleizes, M.P. & Karageorgos, A. (eds.) *Self-organising Software. Natural Computing Series*. Berlin: Springer. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-17348-6_11.
181. Koestler, A. (1967) *The ghost in the machine*. New York: Random House.
182. Bertalanffy, L.V. (1969) *General System Theory: Foundations, development, and applications*. New York: Braziller.
183. Li, D., Ge, S.S., He, W., Ma, G. & Xie, L. (2019) 'Multilayer formation control of multi-agent systems'. *Automatica*, 109, 108558. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108558>.
184. 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>.
185. 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 IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Kyiv, Ukraine, 14-18 May 2020. 34-39. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125080>.

186. 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>.

187. Htun, T.T. (2018) 'A Survey Review on Solving Algorithms for Travelling Salesman Problem'. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 8(12), pp. 630-633. Available at: <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.12.2018.p8481>.

188. Rothlauf, F. (2016) 'Representations for evolutionary algorithms'. In: *2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (GECCO'16 Companion)*. 2016. ACM, pp. 413-434. Available at: <https://doi.org/10.1145/2908961.2926981>.

189. Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S. & Fu, J. (2019) 'Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0'. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, pp. 1809-1830. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1350-2>.

190. Kliushnikov, I.M., Fesenko, H.V. & Kharchenko, V.S. (2019) 'Using automated battery replacement stations for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP post-accident monitoring'. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 4(92), с. 30-38. Available at: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.4.03>.

191. Evans, A., Byrum, C., Stanford, D., Sandt, E. & Goolsby, T. (2021) *Physical Protection Recommendations for Small Modular Reactor Facilities*. SANDIA REPORT, SAND2021-15712. Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1837151>.

192. 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), pp. 5-18. Available at: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2018.2-56.1>.

193. Kučera, L. (1991) 'The greedy coloring is a bad probabilistic algorithm'. *Journal of Algorithms*, 12(4), pp. 674-684. Available at: [https://doi.org/10.1016/0196-6774\(91\)90040-6](https://doi.org/10.1016/0196-6774(91)90040-6)

194. Kosowski, A. (2011) 'Classical Coloring of Graphs'. In: Kubale, M. (ed.) *Graph Colorings*. AMS Contemporary Mathematics, pp. 1-20. Available at: <https://www.ams.org/books/conm/352/conm352-endmatter.pdf>.

195. Hansen, J., Kubale, M., Kuszner, Ł. & Nadolski, A. (2004) 'Distributed Largest-First Algorithm for Graph Coloring'. In: *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 3149. Springer, pp. 804-811. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27866-5>.

196. Matula, D.W., & Beck, L.L. 'Smallest-last ordering and clustering and graph coloring algorithms'. *Journal of the ACM (JACM)*, 30(3), pp. 135-145. Available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2402.322385>.

197. Read, R.C. (2014) *Graph Theory and Computing*. Academic Press.

198. Matula, D., Marble, G. & Isaacson, J. (1972) 'Graph coloring algorithms'. In: *Graph Theory and Computing*. New York: Academic Press.

199. Hertz, A. & De Werra, D. (1989) 'Connected Sequential Colorings'. *Annals of Discrete Mathematics*, 39, pp. 51-59. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0167-5060\(08\)70297-8](https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70297-8).

200. Wu, Q. & Hao, J.-K. (2012) 'Coloring large graphs based on independent set'. *Computers & Operations Research*, 39, pp. 283-290. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.04.002>.

201. Komosko, L., Batsyn, M., San Segundo, P. & Pardalos, P.M. (2016) 'A fast greedy sequential heuristic for the vertex colouring problem based on bitwise operations'. *Journal of Combinatorial Optimization*, 4, pp. 1665-1677. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10878-015-9862-1>.

202. Kliushnikov, I., Kharchenko, V., Fesenko, H. & Leontiev, K. (2022) 'UAV Fleet with Battery Recharging for NPP Monitoring: Queuing System and Routing Based Reliability Models'. In: Zamojski, W. et al. (eds.) *New Advances in Dependability of Networks and Systems. DepCoS-RELCOMEX 2022. Lecture Notes in Networks and*

Systems. Cham, Switzerland: Springer, pp. 109-119. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06746-4_11.

203. 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>.

204. Lee, A.M. (1966) 'Models of Queueing Processes'. In: *Applied Queueing Theory. Studies in Management*. London: Palgrave, pp. 6-21. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-349-00273-3_2.

205. Shortle, J.F., Thompson, J.M., Gross, D. & Harris, C.M. (2018) *Fundamentals of Queueing Theory*. 5th Edition. Hoboken, NJ: Wiley. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119453765>.

206. Bielawski, R., Rządowski, W. & Perz, R. (2018) 'Unmanned Aerial Vehicles in the protection of the elements of a country's critical infrastructure selected directions of development'. *Security and Defence Quarterly*, 5, pp. 3-19. Available at: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6422>.

207. Moore, A.L. (2019) 'UAV surveillance of critical infrastructure, capability and constraints'. In: *Proceedings of the 49th Session of the International Seminars on Nuclear War and Planetary Emergencies*. Erice, Sicily, 19 – 24 August 2016. pp. 201-203. Available at: https://doi.org/10.1142/9789811205217_0025

208. Hao, Z., Di Maio, F. & Zio, E. (2021) 'Multi-State Reliability Assessment Model of Base-Load Cyber-Physical Energy Systems (CPES) during Flexible Operation Considering the Aging of Cyber Components'. *Energies*, 14, 3241. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14113241>.

209. Guo, J. & Elsayed, E.A. (2019) 'Reliability of balanced multi-level Unmanned Aerial Vehicles'. *Computers and Operations Research*, 106, pp. 1-13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.013>.

210. Kliushnikov, I., Kharchenko, V. & Fesenko, H. (2022) 'An Unmanned Aerial Vehicle as a Multi-State System'. In: *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2022): Proceedings of the 16th*

IEEE International Conference. Lviv-Slavske, Ukraine, 22-26 Feb. 2022. pp. 291-296. Available at: <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766951>.

211. Songming, J., Haiyue, G., Xiaokun, Z. & Dengpan, L. (2020) 'Fault Tolerant Control Algorithm of Hexarotor UAV'. *Journal of Robotics*, 2020, 8829329. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/8829329>.

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

213. 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: *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2022): Proceedings of the 12th IEEE International Conference*. Athens, Greece, 09-11 Dec. 2022. pp. 1-7. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT58054.2022.10018784>.

214. Beg, A., Qureshi, A.R., Sheltami, T. & Yasar, A. (2021) 'UAV-enabled intelligent traffic policing and emergency response handling system for the smart city'. *Personal and Ubiquitous Computing*, 25, pp. 33-50. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00779-019-01297-y>.

215. Qi, F., Zhu, X., Mang, G., Kadoch, M. & Li, W. (2019) 'UAV Network and IoT in the Sky for Future Smart Cities'. *IEEE Network*, 33, pp. 96-101. Available at: <https://doi.org/10.1109/MNET.2019.1800250>.

216. Coppola, M., McGuire, K., De Wagter, C. & De Croon, G. (2020) 'A Survey on Swarming with Micro Air Vehicles: Fundamental Challenges and Constraints'. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 18, pp. 1-26. Available at: <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00018>.

217. Al-Bkree, M. (2023) 'Managing the cyber-physical security for unmanned aerial vehicles used in perimeter surveillance'. *International Journal of Innovative*

Research and Scientific Studies, 6(1), pp. 164-173. Available at: <https://doi.org/10.53894/ijirss.v6i1.1173>.

218. Omolara, A.E., Alawida, M. & Abiodun, O.I. (2023) 'Drone cybersecurity issues, solutions, trend insights and future perspectives: a survey'. *Neural Computing and Applications*, 35(31), pp. 23063-23101. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08857-7>.

219. Ілляшенко, О.О. (2018) 'Оцінювання інформаційної безпеки систем на програмовній логіці з використанням кейсів: таксономія, нотація, концепція'. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 2(31), pp. 97-103. Available at: <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.31.12>.

220. Torianyuk, V., Kharchenko, V. & Zemlianko, H. (2021) 'IMECA based assessment of internet of drones systems cyber security considering radio frequency vulnerabilities'. In: *2nd International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security (INTELITSIS-2021): Conference Paper*. Khmelnytskyi, Ukraine, 24-26 March 2021. Vol. 2853, pp. 560-570. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2853/paper50.pdf>.

221. Julian, V. & Botti, V. (2019) 'Multi-Agent Systems'. *Applied Sciences*, 9(7), 1402. <https://doi.org/10.3390/app9071402>.

222. Tugrul, K.M. (2023) 'Drone Technologies and Applications'. In: Cvetkovi, D. (ed.) *Drones - Various Applications*. London: IntechOpen, pp. 1-24. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001987>.

223. Herrera, M., Parlikad, A.K., Izquierdo, J. & Perez Hernandez, M. (2020) 'Multi-Agent Systems and Complex Networks: Review and Applications in Systems Engineering'. *Processes*, 8(3), 312. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr8030312>.

224. Ivanchenko, O., Brezhniev, 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>.

225. Mukhamediev, R.I., Symagulov, A., Kuchin, Y., Zaitseva, E., Bekbotayeva, A., Yakunin, K., Assanov, I., Levashenko, V., Popova, Y., Akzhalova, A. et al. (2021)

'Review of Some Applications of Unmanned Aerial Vehicles Technology in the Resource-Rich Country'. *Applied Sciences*, 11(21), 10171. Available at: <https://doi.org/10.3390/app112110171>.

226. Neo4j, Inc. *The World's Leading Graph Intelligence Platform*. Available at: <https://neo4j.com/>

227. Lakshya, A., Nikunj, S. & Raghava, M. (2022) 'A SPARQL to Cypher Transpiler: Proposal and Initial Results'. In: *Proceedings of the 2022 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. 2022. ACM, pp. 312-313. Available at: <https://doi.org/10.1145/3493700.3493757>.

228. 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, pp. 1-27. Available at: <https://doi.org/10.3390/drones7070409>.

229. Zhurylo, O., Liashenko, O. & Avetisova, K. (2023) 'Hardware security overview of fog computing end devices in the internet of things'. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 1(23), pp. 57-71. Available at: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.057>.

ДОДАТОК А OWL - КОДИ ОНТОЛОГІЙ

А.1 OWL-код базової онтології СОМС БПЛА

```

<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF xmlns="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/untitled-ontology-23#"
  xml:base="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/untitled-ontology-23"
  xmlns:ims="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#"
  xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#">
  <owl:Ontology rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims">
    <rdfs:comment>MA UAV-based SMR MS ontology</rdfs:comment>
  </owl:Ontology>

  <!--
  ////////////////////////////////////////////////////////////////////
  //
  // Object Properties
  //
  ////////////////////////////////////////////////////////////////////
  -->

  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#deployed -->

  <owl:ObjectProperty
  rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#deployed"/>

  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#has -->

  <owl:ObjectProperty
  rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#has">
    <rdfs:domain
  rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
    <rdfs:range
  rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Payload"/>
  </owl:ObjectProperty>

  <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#maintenance -->

  <owl:ObjectProperty
  rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#maintenance"/>

```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#perform -->
```

```
<owl:ObjectProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#perform">
  <rdfs:domain
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Performing_unit"/>
  <rdfs:range
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Mission_type"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#performed -->
```

```
<owl:ObjectProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#performed">
  <rdfs:domain
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Mission_type"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#use -->
```

```
<owl:ObjectProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#use">
  <rdfs:domain
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Mission_type"/>
  <rdfs:range
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Payload"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#used -->
```

```
<owl:ObjectProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#used"/>
```

```
<!--
////////////////////////////////////
//
// Data properties
//
////////////////////////////////////
-->
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#dataTransmissionProtocol -->
```

```

    <owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#dataTransmissionProtocol"
/>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#flightEndurance -->

```

```

    <owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#flightEndurance"/>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#maxWind -->

```

```

    <owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#maxWind"/>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#payload1 -->

```

```

    <owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#payload1"/>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#payload2 -->

```

```

    <owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#payload2"/>

```

```

<!--
////////////////////////////////////
//
// Classes
//
////////////////////////////////////
-->

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS -->

```

```

    <owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS">
      <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Support_unit"/>
      <rdfs:subClassOf>
        <owl:Restriction>
          <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#maintenance"/>
          <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>

```

```

    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#maintenance"/>
        <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
          </owl:Restriction>
        </rdfs:subClassOf>
      </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera -->

```

```

  <owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Payload"/>
      <rdfs:subClassOf>
        <owl:Restriction>
          <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#deployed"/>
            <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>
              </owl:Restriction>
            </rdfs:subClassOf>
          <rdfs:subClassOf>
            <owl:Restriction>
              <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#used"/>
                <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Day"/>
                  </owl:Restriction>
                </rdfs:subClassOf>
              </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV -->

```

```

  <owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Performing_unit"/>
      <owl:disjointWith
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
        </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Day -->

```

```

  <owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Day">

```

```

    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Environment_conditions
"/>

```

```

    <owl:disjointWith
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Night"/>
</owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Environment_conditions -->

```

```

<owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Environment_conditions">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#MAUAV_SMRMS"/>
</owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR -->

```

```

<owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Payload"/>
    <rdfs:subClassOf>
        <owl:Restriction>
            <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#deployed"/>
            <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>
            </owl:Restriction>
        </rdfs:subClassOf>
    <rdfs:subClassOf>
        <owl:Restriction>
            <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#used"/>
            <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Night"/>
            </owl:Restriction>
        </rdfs:subClassOf>
    </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#MAUAV_SMRMS -->

```

```

<owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#MAUAV_SMRMS"/>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Mission_type -->

```

```

<owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Mission_type">

```

```

    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#MAUAV_SMRMS"/>
  </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Network_equipment -->

```

```

  <owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Network_equipment">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Payload"/>
      <rdfs:subClassOf>
        <owl:Restriction>
          <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#deployed"/>
            <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>
              </owl:Restriction>
            </rdfs:subClassOf>
          </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Night -->

```

```

  <owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Night">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Environment_conditions"/>
      </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Payload -->

```

```

  <owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Payload">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#MAUAV_SMRMS"/>
      </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Performing_unit -->

```

```

  <owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Performing_unit">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#MAUAV_SMRMS"/>
      </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Radiation_dosimeter -->

```

```

  <owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Radiation_dosimeter">

```

```

    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Payload"/>
    <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
    <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#deployed"/>
    <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>
    </owl:Restriction>
    </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Security -->

```

```

    <owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Security">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Mission_type"/>
    <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
    <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#use"/>
    <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera"/>
    </owl:Restriction>
    </rdfs:subClassOf>
    <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
    <owl:onProperty
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#use"/>
    <owl:someValuesFrom
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR"/>
    </owl:Restriction>
    </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV -->

```

```

    <owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Performing_unit"/>
    </owl:Class>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Support_unit -->

```

```

    <owl:Class
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Support_unit">
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#MAUAV_SMRMS"/>

```

```
</owl:Class>
```

```
<!--
////////////////////////////////////
//
// Individuals
//
////////////////////////////////////
-->
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_1">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
  </owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_2">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
  </owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_3 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS_3">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#ABMS"/>
  </owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_1">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera"/>
  </owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_2 -->
```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera_2">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera"/>
</owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV_1 -->

```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV_1">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>
</owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV_2 -->

```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV_2">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Custom_UAV"/>
</owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Dosimeter_1 -->

```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Dosimeter_1">
  <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Radiation_dosimeter"/>
</owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_1 -->

```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR"/>
</owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_2 -->

```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR_2">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR"/>
</owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#LiFi_1 -->

```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#LiFi_1">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Network_equipment"/>
    </owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1 -->

```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
    <ims:dataTransmissionProtocol
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Mavlink</ims:dataTransmissionP
rotocol>
    <ims:flightEndurance
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.5</ims:flightEndurance>
    <ims:maxWind
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">10</ims:maxWind>
    <ims:payload1
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera1</ims:payload1>
    </owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2 -->

```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
    <ims:dataTransmissionProtocol
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">DSM</ims:dataTransmissionProt
ocol>
    <ims:flightEndurance
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.75</ims:flightEndurance>
    <ims:maxWind
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">12</ims:maxWind>
    <ims:payload1
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">FLIR1</ims:payload1>
    </owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3 -->

```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
    <ims:dataTransmissionProtocol
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">MavLink</ims:dataTransmission
Protocol>

```

```

    <ims:flightEndurance
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">1.0</ims:flightEndurance>
    <ims:maxWind
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">15</ims:maxWind>
    <ims:payload2
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera2</ims:payload2>
    </owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#WiFi_1 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#WiFi_1">
    <rdf:type
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Network_equipment"/>
    </owl:NamedIndividual>

<!--
////////////////////////////////////
//
// General axioms
//
////////////////////////////////////
-->

<rdf:Description>
    <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#AllDisjointClasses"/>
    <owl:members rdf:parseType="Collection">
        <rdf:Description
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Camera"/>
        <rdf:Description
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#FLIR"/>
        <rdf:Description
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Network_equipment"/>
        <rdf:Description
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Radiation_dosimeter"/>
    </owl:members>
    </rdf:Description>
</rdf:RDF>

<!-- Generated by the OWL API (version 4.5.9.2019-02-01T07:24:44Z)
https://github.com/owlcs/owlapi -->

```

A.2. Онтологія моделей функціонування СОМС БПЛА

```

<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF xmlns="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4"
xml:base="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4"
xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace"

```

```

xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
xmlns:untitled-ontology-4="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#">
  <owl:Ontology      rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4">
    <rdfs:comment>Онтологія моделей функціонування COMC</rdfs:comment>
  </owl:Ontology>

```

```

<!--
////////////////////////////////////
//
// Object Properties
//
////////////////////////////////////
-->

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#враховує -->

```

```

  <owl:ObjectProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#враховує"/>

```

```

<!--
////////////////////////////////////
//
// Data properties
//
////////////////////////////////////
-->

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4/ims#API -->

```

```

  <owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4/ims#API"/>

```

```

<!-- http://www.w3.org/2002/07/owl#topDataProperty -->

```

```

  <rdf:Description rdf:about="http://www.w3.org/2002/07/owl#topDataProperty">
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>
  </rdf:Description>

```

```

<!--
////////////////////////////////////
//

```

```

// Classes
//
////////////////////////////////////
-->

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути -->

<owl:Class      rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Атрибути"/>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Моделі -->

<owl:Class      rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Моделі"/>

<!--
////////////////////////////////////
//
// Individuals
//
////////////////////////////////////
-->

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_1 -->

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_2 -->

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_2">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_1 -->

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>

```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_2">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_3_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_3_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_3_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_3_2">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_2_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_2_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_2_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_2_2">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_2_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_2_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_2_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_2_2">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_2_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_2_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_2_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_2_2">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_3_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_3_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_3_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_3_2">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_4_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_4_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_4_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_4_2">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Моделі"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_2"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_3_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_2_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_2_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_2_2"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_1"/>
  <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_1_1</ims:API>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_2 -->
```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_2">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Моделі"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr1_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr2_3_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr3_1_2_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr3_2_2_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr4_1_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_1_2</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_3 -->

```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_3">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Моделі"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr1_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr2_3_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr3_1_2_2"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr4_1_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_1_3</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_4 -->

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_4">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Моделі"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr1_2"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr2_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr3_1_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr3_1_2_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr3_2_2_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr4_1_2_2"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr4_1_3_2"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr4_1_4_2"/>
  <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_1_4</ims:API>
</owl:NamedIndividual>

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_5 -->

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_5">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-4#Моделі"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr1_2"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr2_2"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr2_3_1"/>
  <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
4#Atr3_1_2_1"/>

```

```

    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_2_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_1_5</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_6 -->

```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_6">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Моделі"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_3_2"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_2_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_2_2"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_1_6</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_7 -->

```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#M1_7">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Моделі"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr1_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr2_2"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr3_1_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_2_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_3_1"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_3_2"/>
    <untitled-ontology-4:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#Atr4_1_4_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_1_7</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>
</rdf:RDF>

```

```

<!-- Generated by the OWL API (version 4.5.9.2019-02-01T07:24:44Z)
https://github.com/owlcs/owlapi -->

```

А.3. Онтологія моделей оцінювання гарантоздатності СОМС БПЛА

```

<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF xmlns="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7"
    xml:base="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7"
    xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
    xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
    xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace"
    xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
    xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
    xmlns:untitled-ontology-7="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#">
    <owl:Ontology rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7"/>

```

```
<!--  
////////////////////////////////////  
//  
// Object Properties  
//  
////////////////////////////////////  
-->  
  
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#враховує -->  
  
<owl:ObjectProperty  
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-  
7#враховує"/>  
  
<!--  
////////////////////////////////////  
//  
// Data properties  
//  
////////////////////////////////////  
-->  
  
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#API -->  
  
<owl:DatatypeProperty  
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-4#API"/>  
  
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-  
7#атомарність_апарата_обслуговування -->
```

```
<owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#атомарність_апарата_обслуговування"/>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#кількість_АОЗС -->
```

```
<owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#кількість_АОЗС"/>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#кількість_апаратів_обслуговування -->
```

```
<owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#кількість_апаратів_обслуговування"/>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#кількість_ділянок_на_маршрути -->
```

```
<owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#кількість_ділянок_на_маршрути">
  <rdfs:subPropertyOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#характеристики_маршрутів"/>
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#кількість_маршрутів -->
```

```
<owl:DatatypeProperty
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#кількість_маршрутів"/>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#кількість_основних_БПЛА -->
```

```
<owl:DatatypeProperty  
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#кількість_основних_БПЛА"/>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#кількість_резервних_БПЛА -->
```

```
<owl:DatatypeProperty  
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#кількість_резервних_БПЛА"/>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#кількість_рівнів_деградації -->
```

```
<owl:DatatypeProperty  
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#кількість_рівнів_деградації"/>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#характеристики_маршрутів -->
```

```
<owl:DatatypeProperty  
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#характеристики_маршрутів"/>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#кількість_ділянок_рівна? -->
```

```
<owl:DatatypeProperty  
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#кількість_ділянок_рівна?"/>
```

```

    <rdfs:subPropertyOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#характеристики_маршрутів"/>
  </owl:DatatypeProperty>

<!--
////////////////////////////////////
//
// Classes
//
////////////////////////////////////
-->

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути -->

<owl:Class      rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>

<!--          http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Моделі_оцінки_гарантоздатності -->

<owl:Class      rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Моделі_оцінки_гарантоздатності"/>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_СМО
-->

<owl:Class      rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_СМО">
  <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Моделі_оцінки_гарантоздатності"/>
</owl:Class>

```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_комплексні -->
```

```
<owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_комплексні">
```

```
<rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Моделі_оцінки_гарантоздатності"/>
```

```
</owl:Class>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_маршрути -->
```

```
<owl:Class rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_маршрути">
```

```
<rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Моделі_оцінки_гарантоздатності"/>
```

```
</owl:Class>
```

```
<!--
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
//
```

```
// Individuals
```

```
//
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
-->
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1">
```

```
<rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
```

</owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2 -->

<owl:NamedIndividual

rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2">

<rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>

</owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1 -->

<owl:NamedIndividual

rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1">

<rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>

</owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_2 -->

<owl:NamedIndividual

rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_2">

<rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>

</owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_1 -->

<owl:NamedIndividual

rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_1">

<rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>

</owl:NamedIndividual>

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_2">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_1">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>
```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_1"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_3_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_4_1"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_4_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>

```

```

    </owl:NamedIndividual>

```

```

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_2 --
>

```

```

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_2">

```

```

    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>

```

```

    </owl:NamedIndividual>

```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_1">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_1">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_2">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1">
```

```
<rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
```

```
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
```

```
  rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_2">
```

```
    <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
```

```
  </owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_3_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
```

```
  rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_3_1">
```

```
    <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
```

```
  </owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_3_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
```

```
  rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_3_2">
```

```
    <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
```

```
  </owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_4_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_4_1">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_4_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_4_2">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_2">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_1">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_2 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_2">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_3 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_3">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Атрибути"/>
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_1 -->
```

```
<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_1">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_СМО"/>
```

```

    <untitled-ontology-7:враховые
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховые
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховые
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховые
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховые
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_1_1</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_2 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_1_2">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_CMO"/>
    <untitled-ontology-7:враховые
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховые
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховые
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_1_2</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_3 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_3">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_CMO"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_1_3</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_4 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_4">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_CMO"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_1"/>

```

```

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>
<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_1"/>
<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_2"/>
<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_3_2"/>
<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>
<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_1"/>
<untitled-ontology-7:атомарність_апарата_обслуговування
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#boolean">false</untitled-ontology-7:атомарність_апарата_обслуговування>
<untitled-ontology-7:кількість_апаратів_обслуговування
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int"></untitled-ontology-7:кількість_апаратів_обслуговування>
<ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_1_4</ims:API>
</owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_5 -->

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_1_5">
  <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_CMO"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_3_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_2_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_3_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_1_5</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_1 -->

```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_2_1">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_маршрути"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_2_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_2_1"/>
  <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_1</ims:API>
</owl:NamedIndividual>

```

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_10 -->

```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_2_10">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_маршрути"/>

```

<untitled-ontology-7:враховує
 rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
 rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2"/>

<untitled-ontology-7:враховує
 rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
 rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
 rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
 rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
 rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_4_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
 rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>

<untitled-ontology-7:кількість_АОЗС
 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">0</untitled-ontology-7:кількість_АОЗС>

<untitled-ontology-7:кількість_ділянок_на_маршрути
 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">3</untitled-ontology-7:кількість_ділянок_на_маршрути>

<untitled-ontology-7:кількість_маршрутів
 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">1</untitled-ontology-7:кількість_маршрутів>

```

    <untitled-ontology-7:кількість_основних_БПЛА
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">1</untitled-ontology-
7:кількість_основних_БПЛА>
    <untitled-ontology-7:кількість_резервних_БПЛА
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">1</untitled-ontology-
7:кількість_резервних_БПЛА>
    <untitled-ontology-7:кількість_рівнів_деградації
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">1</untitled-ontology-
7:кількість_рівнів_деградації>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_10</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_11 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_2_11">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_маршрути"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_2_2_1"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_11</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_2 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_2">
        <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_маршрути"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>

```

```

    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_2</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_3 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_2_3">
        <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_маршрути"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_1"/>
            <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
                <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
                    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_2_1"/>
                        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_1"/>
                            <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_2_1"/>
                                <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_3</ims:API>
                                </owl:NamedIndividual>

                                <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_4 -->

```

```

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_2_4">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_маршрути"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_2_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_1"/>
  <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_2_1"/>
  <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_4</ims:API>
</owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_5 -->

<owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_2_5">
  <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_маршрути"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_5</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_6 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_2_6">
    <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_маршрути"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_6</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_7 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_2_7">
        <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_маршрути"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_1_2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_2_2_1"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_7</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_8 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_8">
        <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_маршрути"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_8</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_9 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_2_9">
        <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_маршрути"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_2"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_2_9</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_3_1 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_3_1">
        <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_КОМПЛЕКСНІ"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_2"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_2"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_1"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr3_2_2_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_3_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_3_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_4_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_3_1</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_3_2 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_3_2">
        <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_комплексні"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr1_2"/>

```

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_3_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_2"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_2_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_2"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_3_2"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_4_1"/>

<untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_2_2"/>

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_3_2"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_3_3</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

    <!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_3_3 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_3_3">
        <rdf:type      rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#COMC_КОМПЛЕКСНІ"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr1_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr2_2"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_1_2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr3_2_1"/>
        <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#Atr4_1_2"/>

```

```

    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_3_2"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_1_4_1"/>
    <untitled-ontology-7:враховує
rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#Atr4_2_1"/>
    <ims:API
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">URL_M_2_3_3</ims:API>
    </owl:NamedIndividual>

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-7#M2_3_4 -->

    <owl:NamedIndividual
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#M2_3_4">
        <rdf:type    rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-
ontology-7#COMC_КОМПЛЕКСНІ"/>
    </owl:NamedIndividual>

<!--
////////////////////////////////////
//
// General axioms
//
////////////////////////////////////
-->

<rdf:Description>
    <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#AllDisjointClasses"/>
    <owl:members rdf:parseType="Collection">

```

```
<rdf:Description
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#COMC_СМО"/>
  <rdf:Description
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#COMC_комплексні"/>
    <rdf:Description
rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2024/10/untitled-ontology-
7#COMC_маршрути"/>
      </owl:members>
    </rdf:Description>
  </rdf:RDF>
```

```
<!-- Generated by the OWL API (version 4.5.9.2019-02-01T07:24:44Z)
https://github.com/owlcs/owlapi -->
```

ДОДАТОК Б

ВИХІДНІ КОДИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРЯДКУ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ТА АОЗС ДЛЯ ПОКРИТТЯ ЦІЛЮВИХ ТОЧОК НА МІСЦЕВОСТІ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ

Лістинг Б.1 – Код модуля оптимізації шляху

```

using ErrorOr;
using GeoCoordinatePortable;
using Google.OrTools.ConstraintSolver;
using UavPathOptimization.Domain.Common.Errors;
using UavPathOptimization.Domain.Contracts;
using UavPathOptimization.Domain.Contracts.OptimizePath;

namespace UavPathOptimization.Domain.Services;

public class PathOptimizationService : IPathOptimizationService
{
    private const int Scale = 100;

    public ErrorOr<IList<UavPath>> OptimizePath(int vehicleCount, IList<GeoCoordinateDto>
coordinates)
    {
        if (coordinates == null || coordinates.Count < 2)
        {
            return Errors.OptimizePath.InvalidInputError;
        }

        var path = coordinates.Select(x => new GeoCoordinate(x.Latitude, x.Longitude)).ToList();

        var matrix = CreateDistanceMatrix(path);

        var (routing, manager) = InitializeRoutingModel(matrix, vehicleCount);

        var searchParameters = ConfigureRoutingSearchParameters();

        var solution = routing.SolveWithParameters(searchParameters);
        if (solution is null)
        {
            return Errors.OptimizePath.SolutionError;
        }

        var result = ExtractUavPaths(solution, manager, routing, vehicleCount,
coordinates).ToList();
        return result;
    }
}

```

```

private static long[,] CreateDistanceMatrix(IEnumerable<GeoCoordinate> path)
{
    var coordinatesList = path.ToList();
    var count = coordinatesList.Count;
    var matrix = new long[count, count];

    for (var i = 0; i < count; i++)
    {
        for (var j = i; j < count; j++)
        {
            var distance = (long)(coordinatesList[i].GetDistanceTo(coordinatesList[j]) * Scale);
            matrix[i, j] = distance;
            matrix[j, i] = distance;
        }
    }

    return matrix;
}

private static (RoutingModel, RoutingIndexManager) InitializeRoutingModel(long[,] matrix,
int vehicleCount)
{
    var manager = new RoutingIndexManager(matrix.GetLength(0), vehicleCount, 0);
    var routing = new RoutingModel(manager);

    int transitCallbackIndex = routing.RegisterTransitCallback((long fromIndex, long toIndex)
=>
    {
        // Convert from routing variable Index to
        // distance matrix NodeIndex.
        var fromNode = manager.IndexToNode(fromIndex);
        var toNode = manager.IndexToNode(toIndex);
        return matrix[fromNode, toNode];
    });

    routing.SetArcCostEvaluatorOfAllVehicles(transitCallbackIndex);
    routing.AddDimension(transitCallbackIndex, 0, 30000000,
        true, // start cumul to zero
        "Distance");
    routing.GetMutableDimension("Distance").SetGlobalSpanCostCoefficient(100000);

    return (routing, manager);
}

private static RoutingSearchParameters ConfigureRoutingSearchParameters()
{
    var searchParameters =
operations_research_constraint_solver.DefaultRoutingSearchParameters();
    searchParameters.FirstSolutionStrategy =
FirstSolutionStrategy.Types.Value.PathCheapestArc;
    return searchParameters;
}

```

```

    }

    private static IList<UavPath> ExtractUavPaths(Assignment solution, RoutingIndexManager
manager,
    RoutingModel routing, int vehicleCount, IList<GeoCoordinateDto> coordinates)
    {
        var uavPaths = new List<UavPath>();

        for (int i = 0; i < vehicleCount; ++i)
        {
            long routeDistance = 0;
            var index = routing.Start(i);

            var uavPath = new UavPath();
            while (routing.IsEnd(index) == false)
            {
                uavPath.Path.Add(coordinates[manager.IndexToNode((int)index)]);
                var previousIndex = index;
                index = solution.Value(routing.NextVar(index));
                routeDistance += routing.GetArcCostForVehicle(previousIndex, index, i);
            }

            uavPath.VehicleId = i;
            uavPath.Distance = (double)routeDistance / Scale;
            uavPaths.Add(uavPath);
        }

        return uavPaths;
    }
}

```

Лістинг Б.2 – Код модуля створення розкладу

```

using ErrorOr;
using MediatR;
using UavPathOptimization.Application.Common.Services;
using UavPathOptimization.Domain.Common.Errors;
using UavPathOptimization.Domain.Entities.Results;
using UavPathOptimization.Domain.Entities.Schedule;
using UavPathOptimization.Domain.Repositories;

namespace UavPathOptimization.Application.UseCases.Schedule.Queries;

internal sealed class CreateScheduleQueryHandler : IRequestHandler<CreateScheduleQuery,
ErrorOr<UavScheduleResult>>
{
    private readonly IUavScheduleCreatorService _uavScheduleCreatorService;
    private readonly IUavModelRepository _uavModelRepository;
    private readonly IAbrasScheduleCreator _abrasScheduleCreator;

    public CreateScheduleQueryHandler(IUavScheduleCreatorService
uavScheduleCreatorService,

```

```

    IUavModelRepository uavModelRepository,
    IAbbrasScheduleCreator abbrasScheduleCreator)
{
    _uavScheduleCreatorService = uavScheduleCreatorService;
    _uavModelRepository = uavModelRepository;
    _abrasScheduleCreator = abbrasScheduleCreator;
}

public async Task<ErrorOr<UavScheduleResult>> Handle(CreateScheduleQuery request,
    Cancellation token cancellationToken)
{
    // UAV schedules
    var schedulesResult = await CalculateSchedules(request, cancellationToken);
    if (schedulesResult.IsError)
    {
        return schedulesResult.Errors;
    }

    // ABRAS schedule
    var abbrasScheduleResult = _abrasScheduleCreator.CreateScheduleForAbbras(
        schedulesResult.Value,
        request.AbrasSpeed,
        request.AbrasDepotLocation,
        request.DepartureTimeStart,
        request.ChargingTime);

    if (abrasScheduleResult.IsError)
    {
        return abbrasScheduleResult.Errors;
    }

    return abbrasScheduleResult.Value;
}

private async Task<ErrorOr<IList<UavSchedule>>>
CalculateSchedules(CreateScheduleQuery request,
    Cancellation token cancellationToken)
{
    var schedules = new List<UavSchedule>();

    foreach (var path in request.Paths)
    {
        var uav = await _uavModelRepository.GetByIdAsync(path.UavModelId,
            cancellationToken);

        if (uav is null)
        {
            return Errors.UavModelErrors.UavModelNotFound;
        }

        var schedulePathResult = _uavScheduleCreatorService.CreateScheduleForUavPath(path,
            request.DepartureTimeStart,

```

```

        request.MonitoringTime, request.ChargingTime, uav, request.UseWeatherData);

    if (schedulePathResult.IsError)
    {
        return schedulePathResult.Errors;
    }

    schedules.Add(schedulePathResult.Value);
}

return schedules;
}
}

```

Лістинг Б.3 – Код модуля створення розкладу БПЛА

```

using ErrorOr;
using GeoCoordinatePortable;
using UavPathOptimization.Domain.Common.Errors;
using UavPathOptimization.Domain.Contracts;
using UavPathOptimization.Domain.Entities.Schedule;
using UavPathOptimization.Domain.Entities.UavEntities;
using UavPathOptimization.Domain.Services;
using UnitsNet;
using UnitsNet.Units;

namespace UavPathOptimization.Application.Common.Services;

public class UavScheduleCreatorService : IUavScheduleCreatorService
{
    private readonly IWeatherClient _weatherClient;

    public UavScheduleCreatorService(IWeatherClient weatherClient)
    {
        _weatherClient = weatherClient;
    }

    public ErrorOr<UavSchedule> CreateScheduleForUavPath(
        UavPathDto path,
        DateTime departureTimeStart,
        TimeSpan monitoringTime,
        TimeSpan chargingTime,
        UavModel uavModel,
        bool useWeatherData)
    {
        var scheduleUav = new List<UavScheduleEntry>();

        // calculate first point
        var start = new UavScheduleEntry(path.Coordinates[0], null, departureTimeStart,
            TimeSpan.Zero, false, uavModel.MaxFlightTime);

        scheduleUav.Add(start);
    }
}

```

```

for (int i = 1; i < path.Coordinates.Count; i++)
{
    var distanceMeters = CalculateDistance(path.Coordinates[i], path.Coordinates[i - 1]);
    var flightTime = (distanceMeters / uavModel.MaxSpeed).ToTimeSpan();

    if (flightTime + monitoringTime > uavModel.MaxFlightTime)
    {
        return Errors.Schedule.UavModelMaxFlightTimeExceeded;
    }

    var arrivalTime = (scheduleUav[i - 1].ArrivalTime ?? scheduleUav[i - 1].DepartureTime)
+ flightTime + scheduleUav[i - 1].TimeSpent;

    var isPBR = false;
    var timeLeft = scheduleUav[i - 1].BatteryTimeLeft - monitoringTime - flightTime;

    if (timeLeft <= TimeSpan.Zero)
    {
        timeLeft = uavModel.MaxFlightTime;
        isPBR = true;
    }

    var timeSpent = isPBR ? monitoringTime + chargingTime : monitoringTime;
    var departureTime = arrivalTime + timeSpent;

    var entry = new UavScheduleEntry(path.Coordinates[i], arrivalTime, departureTime,
timeSpent, isPBR, timeLeft);

    scheduleUav.Add(entry);
}

// calculate last point
var distanceToDH = CalculateDistance(path.Coordinates[0], scheduleUav.Last().Location);
var flightTimeToDH = (distanceToDH / uavModel.MaxSpeed).ToTimeSpan();

if (flightTimeToDH + monitoringTime > uavModel.MaxFlightTime)
{
    return Errors.Schedule.UavModelMaxFlightTimeExceeded;
}

if (flightTimeToDH + monitoringTime > scheduleUav.Last().BatteryTimeLeft)
{
    var lastEntry = scheduleUav.Last();
    lastEntry.TimeSpent += chargingTime;
    lastEntry.DepartureTime += chargingTime;
    lastEntry.IsPBR = true;
    lastEntry.BatteryTimeLeft = uavModel.MaxFlightTime;
}

var arrival = scheduleUav.Last().DepartureTime + flightTimeToDH;
var timeLeftLast = scheduleUav.Last().BatteryTimeLeft - monitoringTime -

```

```

flightTimeToDH;
    var endPoint = new UavScheduleEntry(path.Coordinates[0], arrival, null, TimeSpan.Zero,
false, timeLeftLast);

    scheduleUav.Add(endPoint);

    return new UavSchedule(path.UavModelId, scheduleUav);
}

private static Length CalculateDistance(GeoCoordinateDto point1, GeoCoordinateDto point2)
{
    var p1 = new GeoCoordinate(point1.Latitude, point1.Longitude);
    var p2 = new GeoCoordinate(point2.Latitude, point2.Longitude);

    return new Length(p1.GetDistanceTo(p2), LengthUnit.Meter);
}
}

```

Лістинг Б.4 – Код модуля створення розкладу АОЗС

```

using ErrorOr;
using GeoCoordinatePortable;
using UavPathOptimization.Domain.Contracts;
using UavPathOptimization.Domain.Entities.Results;
using UavPathOptimization.Domain.Entities.Schedule;

namespace UavPathOptimization.Application.Common.Services;

public class AbrasScheduleCreator : IAbrasScheduleCreator
{
    public ErrorOr<UavScheduleResult> CreateScheduleForAbras(ICollection<UavSchedule>
uavSchedules,
    double speed,
    GeoCoordinateDto abrasDepotLocation,
    DateTime departureTimeStart,
    TimeSpan chargingTime)
    {
        var pbrEntries = GetPbrEntries(uavSchedules);

        if(pbrEntries.Count == 0)
        {
            return new UavScheduleResult(uavSchedules, new AbrasSchedule(new
List<ScheduleEntry>()));
        }

        var currentLocation = abrasDepotLocation;
        var currentTime = DateTime.MinValue;

        var abrasScheduleEntries = new List<ScheduleEntry>
        {
            // Add depot entry
            new ScheduleEntry(abrasDepotLocation, null, departureTimeStart, TimeSpan.Zero)

```

```

};

foreach (var (uavSchedule, pbrEntry) in pbrEntries)
{
    var elapsedTime = CalculateElapsedTime(currentLocation, pbrEntry.Location, speed);

    // Wait time for ABRAS to reach the PBR point before the UAV arrives
    var waitTime = TimeSpan.Zero;
    if (pbrEntry.ArrivalTime - elapsedTime > currentTime)
    {
        waitTime = pbrEntry.ArrivalTime.Value - elapsedTime - currentTime;
    }
    else
    {
        // Conflict: Shift the UAV's schedule
        var conflictDuration = currentTime.Add(elapsedTime) -
pbrEntry.ArrivalTime.Value.AddMinutes(-1);
        ShiftUavSchedule(uavSchedule, conflictDuration);
    }

    currentTime += elapsedTime + waitTime;
    var departureTime = pbrEntry.ArrivalTime.Value.Add(pbrEntry.TimeSpent);
    abrasScheduleEntries.Add(new ScheduleEntry(pbrEntry.Location, currentTime,
departureTime, elapsedTime));

    currentTime = departureTime;
    currentLocation = pbrEntry.Location;
}

// calculate the time to return to the depot
var returnTime = CalculateElapsedTime(currentLocation, abrasDepotLocation, speed);

// Add depot entry
abrasScheduleEntries.Add(
    new ScheduleEntry(abrasDepotLocation, currentTime.Add(returnTime), null,
TimeSpan.Zero));

return new UavScheduleResult(uavSchedules, new AbrasSchedule(abrasScheduleEntries));
}

private static List<Tuple<UavSchedule, UavScheduleEntry>>
GetPbrEntries(ICollection<UavSchedule> uavSchedules)
{
    var pbrEntries = new List<Tuple<UavSchedule, UavScheduleEntry>>();

    foreach (var uavSchedule in uavSchedules)
    {
        pbrEntries.AddRange(uavSchedule.UavScheduleEntries.Where(entry => entry.IsPBR)
            .Select(entry => Tuple.Create(uavSchedule, entry)));
    }

    pbrEntries.Sort((a, b) =>

```

```
a.Item2.ArrivalTime.Value.CompareTo(b.Item2.ArrivalTime.Value));

    return pbrEntries;
}

private static TimeSpan CalculateElapsedTime(GeoCoordinateDto start, GeoCoordinateDto
end, double speed)
{
    var startCoord = new GeoCoordinate(start.Latitude, start.Longitude);
    var endCoord = new GeoCoordinate(end.Latitude, end.Longitude);

    var distance = startCoord.GetDistanceTo(endCoord);

    return TimeSpan.FromHours(distance / (speed * 1000)); // Assuming speed is in km/h
}

private static void ShiftUavSchedule(UavSchedule uavSchedule, TimeSpan shiftDuration)
{
    foreach (var entry in uavSchedule.UavScheduleEntries)
    {
        entry.ArrivalTime = entry.ArrivalTime?.Add(shiftDuration);
        entry.DepartureTime = entry.DepartureTime?.Add(shiftDuration);
    }
}
}
```

ДОДАТОК В

**ВИХІДНІ КОДИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЕЛЬНОСТІ БПЛА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ ФІЗИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ**

Лістинг В.1 – Код модуля main.ts

```
import { createApp } from 'vue'
import App from './App.vue'
import './registerServiceWorker'

import { createRouter, createWebHistory } from 'vue-router'

import HomeView from './views/HomeView.vue'
import MapView from './views/MapView.vue'

const routes = [
  { path: '/', component: HomeView },
  { path: '/map', component: MapView },
]

const router = createRouter({
  history: createWebHistory(),
  routes,
})

createApp(App)
  .use(router)
  .mount('#app')
```

Лістинг В.2 – Код модуля App.vue

```
<template>
  <main>
    <router-view v-slot="{ Component }">
      <transition name="scale" mode="out-in">
        <component :is="Component" />
      </transition>
    </router-view>
  </main>
</template>

<script lang="ts">
import { defineComponent } from 'vue';

export default defineComponent({
  name: 'App',
});
```

```
</script>

<style lang="scss">
:root {
  --color-primary: #1E90FF;
  --color-secondary: #35495e;
  --color-text: #2c3e50;
  --color-background: #f5f5f5;
  --color-border: #e0e0e0;
  --color-shadow: #0000001a;
  --color-error: #ff4d4f;
  --color-success: #52c41a;
  --color-warning: #faad14;
  --color-info: #1890ff;
}

#app {
  font-family: Avenir, Helvetica, Arial, sans-serif;
  -webkit-font-smoothing: antialiased;
  -moz-osx-font-smoothing: grayscale;
  text-align: center;
  color: var(--color-text);
}

* {
  box-sizing: border-box;
}

html, root, body {
  margin: 0;
  padding: 0;
}

.slide-leave-active,
.slide-enter-active {
  transition: .8s;
}

.slide-leave-from,
.slide-enter-to {
  transform: translate(0, 0);
}

.slide-enter-from,
.slide-leave-to {
  transform: translate(100%, 0);
}

.bounce-enter-active {
  animation: bounce-in 0.5s;
}

.bounce-leave-active {
```

```

    animation: bounce-in 0.5s reverse;
  }
  @keyframes bounce-in {
    0% {
      transform: scale(0);
    }
    50% {
      transform: scale(1.25);
    }
    100% {
      transform: scale(1);
    }
  }
}

.scale-enter-active,
.scale-leave-active {
  transition: all .5s ease;
}

.scale-enter-from,
.scale-leave-to {
  opacity: 0;
  transform: scale(0.9);
}
</style>

```

Лістинг В.3 – Код модуля HomeView.vue

```

<template>
  <div class="wrapper">
    <ModalAlert
      v-show="showModal"
      title="ФСЬО!"
      :is-prompt="false"
      description="Усі збережені дані видалено :)"
      @close="showModal = false"
    />
    <div class="inner">
      <h1>Калькулятор польотів БПЛА</h1>
      <p>Розроблений для використання в якості помічника при плануванні польотів
      безпілотних літальних апаратів в окресленому координатами полігоні. Розраховує
      ширину/висоту покриття, висоту польоту, необхідну кількість апаратів для
      статичного/динамічного/межевого(кордонного) моніторингу з використанням
      характеристик БПЛА та об'єкту спостереження</p>
      <div class="links">
        <RouterLink to="/map">Перейти до мапи</RouterLink>
        <a @click="clearLocalStorage">Очистити дані</a>
      </div>
      <footer>
        <p>Кафедра комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки (503)</p>
        <p>Кваліфікаційна робота бакалавра</p>
        <p>© 2024 Кузьменко Андрій Олегович 545-a</p>
      </footer>
    </div>
  </div>

```

```

    </footer>
  </div>
</div>
</template>

<script setup>
import { RouterLink } from 'vue-router';
import ModalAlert from "@components/ModalAlert.vue";
import {ref} from "vue";
import {leafletLinkedStore} from "@stores/leafletLinkerStore";

const showModal = ref(false);
function clearLocalStorage() {
  localStorage.clear();
  leafletLinkedStore.value.markersCords = [];
  showModal.value = true;
}
</script>

<style scoped lang="scss">
.wrapper {
  display: flex;
  flex-direction: column;
  align-items: center;
  justify-content: center;

  height: 100vh;
  height: 100dvh;
}

.inner {
  max-width: 600px;
  width: 100%;

  display: flex;
  flex-direction: column;
  align-items: center;
  justify-content: center;
  gap: 20px;
}

h1 {
  font-size: 2rem;
  margin: 0;
}

p {
  font-size: 1rem;
  text-align: center;
  margin: 0;
}

```

```

.links {
  display: flex;
  margin: 0;

  a {
    text-decoration: none;
    padding: 10px;
    border: 1px solid var(--color-primary);
    transition: all 0.3s ease;
    cursor: pointer;

    &:hover {
      scale: 1.1;
    }
  }

  a:first-of-type {
    background-color: var(--color-primary);
    color: white;
    border-radius: 10px 0 0 10px;

    &:hover {
      transform: translateX(-10px);
    }
  }

  a:last-of-type {
    background-color: white;
    color: var(--color-primary);
    border-radius: 0 10px 10px 0;
    &:hover {
      transform: translateX(10px);
    }
  }
}

footer {
  p {
    margin: 0.2rem;
    font-size: 0.8rem;
  }
}
</style>

```

Лістинг В.4 – Код модуля MapView.vue

```

<template>
  <div class="main-elements">
    <LeafletMap class="main-map"/>
    <ControlBlock class="main-control"></ControlBlock>
  </div>

```

```

</template>

<style scoped lang="scss">
.main-map {
  height: 100%;
}
</style>

<script setup lang="ts">
import LeafletMap from "@components/LeafletMap.vue";
import ControlBlock from "@components/ControlBlock.vue";
</script>

```

Лістинг В.5 – Код модуля leafletLinkerStore.ts

```

import L from 'leaflet'
import {reactive, ref, watch} from 'vue'

export type UAVPos = {
  centerCords: L.LatLng
  cornersCords: L.LatLng[]
}

export type UAVPosInternal = {
  polygon: L.Polygon
  cornersMarkers: L.Marker[]
  centerMarker: L.Marker | undefined
}

export type LeafletLinkedStore = {
  markersCords: L.LatLng[]
  markedForErase: boolean

  uavsPos: UAVPos[]
}

/**
 * Сховище для зберігання координат маркерів та положення БПЛА
 */
export const leafletLinkedStore = ref<LeafletLinkedStore>({
  markersCords: [] as L.LatLng[],
  markedForErase: false,

  uavsPos: [] as UAVPos[],
})

/**
 * Очікує зміну координат маркерів та зберігає їх у localStorage
 * @param newVal - нові координати маркерів
 */
watch( // TODO: Uncomment this
  () => leafletLinkedStore.value.markersCords,

```

```

async (newVal) => {
  async function saveMarkersCords(): Promise<boolean> {
    return new Promise((resolve) => {
      localStorage.setItem('markers-cords', JSON.stringify(newVal))
      resolve(true)
    })
  }
  localStorage.setItem('markers-cords', JSON.stringify(newVal))
  // saveMarkersCords().then(() => console.log('Markers cords saved'))
},
{deep: true}
)

```

Лістинг В.6 – Код модуля useStore.ts

```

import {Ref, ref, watch} from "vue";
import {computed} from "vue";

export interface Compare {
  equal(second: any): boolean
}

export function useStore<T extends Compare>(name: string, defaultValue: T, anywayValues:
T[] = [], convert: (el: any) => T) {
  const storage: Ref<T[]> = ref(
    (JSON.parse(localStorage.getItem(name) || "[]") as any[]).map(el => convert(el)) //
    Перетворення об'єктів збережених в localStorage в об'єкти класу T
  ) as Ref<T[]>

  watch(storage, () => {
    localStorage.setItem(name, JSON.stringify(storage.value))
  }, {deep: true})

  const customValue = ref(convert(JSON.parse(JSON.stringify(defaultValue)))) as Ref<T>;
  const exportStorage: Ref<T[]> = ref([])
  watch(
    () => [storage, customValue, anywayValues],
    () => {
      exportStorage.value = [
        customValue.value,
        ...anywayValues,
        ...storage.value,
      ]
    },
    {immediate: true, deep: true}
  )

  const selected = ref(exportStorage.value![0]) as Ref<T>
  return {
    exportStorage,
    selected,
    isCustomUnsaved: computed(() => selected.value.equal(customValue.value)),
  }
}

```

```

    saveCustom(obj: T) {
      if (this.isCustomUnsaved) {
        storage.value.push(obj as T)
      }
    },
  }
}
}

```

Лістинг В.7 – Код модуля ControlBlock.vue

```

    <template>
    <ModalInput
      v-show="modalInput.opened"
      :title="modalInput.title"
      placeholder=""
      @close="modalInput.opened = false"
      @save="(str) => {
        modalInput.onResult(str)
        modalInput.opened = false
      }"
    />
    <ModalAlert
      v-show="modalAlert.opened"
      :title="modalAlert.title"
      :description="modalAlert.description"
      :is-prompt="modalAlert.isPrompt"
      @close="modalAlert.opened = false"
      @no="modalAlert.onNo?.()"
      @yes="modalAlert.onYes?.()"
    />

    <transition name="slide">
    <div class="control-minimized" v-if="isHidden">
      <div class="control-btn" :class="{ 'btn-close': !isHidden }"
      @click="toggleControl"><div/></div>
    </div>
    </transition>

    <transition name="slide">
    <div v-if="!isHidden" class="control-opened">
      <header>
        <div class="control-btn btn-close" @click="toggleControl"><div/></div>
        <h3>Калькулятор польотів БПЛА</h3>
      </header>

      <section>
        <div>
          <label for="points-count">Кількість точок</label>
          <input id="points-count" type="number" disabled
          :value="leafletLinkedStore.markersCords.length">
          <button @click="leafletLinkedStore.markedForErase=true">Очистити</button>

```

```

</div>
</section>
<section>
  <div>
    <label for="object-choice">Об'єкт</label>
    <Transition name="bounce">
      <button
        v-if="objects.isCustomUnsaved.value"
        @click="() => openModalInput('Назва для збереження', (text) =>
saveCustomObject(text))"
      >+</button>
    </Transition>
    <select id="object-choice" v-model="objects.selected.value">
      <option v-for="el in objects.exportStorage.value" :value="el"
:key="el.object">{{el.object}}</option>
    </select>
  </div>
  <div>
    <label for="object-width">Ширина об'єкту (м)</label>
    <input id="object-width" ref="objectWidth" type="number" step="0.1" min="0"
:disabled="!objects.isCustomUnsaved.value"
v-model="objects.selected.value.width">
  </div>
  <div>
    <label for="object-ppm">Щільність пікселів (пікс/м)</label>
    <input id="object-ppm" ref="objectPpm" type="number" step="1" min="1"
:disabled="!objects.isCustomUnsaved.value"
v-model="objects.selected.value.ppm">
  </div>
</section>
<section>
  <div>
    <label for="device-choice">Характеристики БПЛА</label>
    <Transition name="bounce">
      <button v-if="devices.isCustomUnsaved.value"
        @click="() => openModalInput('Назва для збереження', (text) =>
saveCustomUAV(text))"
      >+</button>
    </Transition>
    <select id="device-choice" v-model="devices.selected.value">
      <option v-for="el in devices.exportStorage.value" :value="el"
:key="el.model">{{el.model}}</option>
    </select>
  </div>
  <div>
    <label for="device-camera-width">Ширина зображення (пікс)</label>
    <input id="device-camera-width" ref="deviceCameraWidth" type="number" step="1"
min="1"
:disabled="!devices.isCustomUnsaved.value"
v-model="devices.selected.value.camera.maxImageSize[0]">
  </div>
</div>

```

```

<label for="device-camera-height">Висота зображення (пікс)</label>
<input id="device-camera-height" ref="deviceCameraHeight" type="number" step="1"
min="1"
      :disabled="!devices.isCustomUnsaved.value"
      v-model="devices.selected.value.camera.maxImageSize[1]">
</div>
<div>
<label for="device-camera-fov">Поле зору FOV (°град)</label>
<input id="device-camera-fov" ref="deviceCameraFov" type="number" min="1"
      :disabled="!devices.isCustomUnsaved.value"
      v-model="devices.selected.value.camera.fov">
</div>
<div>
<label for="device-max-flight-speed">Макс. Швидкість польоту (м/с)</label>
<input id="device-max-flight-speed" ref="deviceMaxFlightSpeed" type="number" min="1"
      :disabled="!devices.isCustomUnsaved.value"
      v-model="devices.selected.value.maxFlightSpeed">
</div>
</section>
<section>
<div>
<label for="additional-flight-speed">Швидкість польоту (м/с)</label>
<input id="additional-flight-speed" ref="additionalFlightSpeed" type="number" min="1"
      :disabled="!devices.selected.value.maxFlightSpeed"
      v-model="additionalProps.flightSpeed">
</div>
<div>
<label for="additional-overlap">Відсоток перекриття (%)</label>
<input id="additional-overlap" ref="additionalOverlap" type="number" step="1" min="1"
max="99"
      v-model="additionalProps.overlap">
</div>
<div>
<label for="additional-monitoring-period">Періодичність моніторингу (хв)</label>
<input id="additional-monitoring-period" ref="additionalMonitoringPeriod"
type="number" min="1"
      v-model="additionalProps.monitoringPeriod">
</div>
</section>
<hr>
<section>
<div>
<label for="result-hover-width">Ширина покриття (м)</label>
<input id="result-hover-width" type="number" readonly disabled v-
model="resultValues.coverageWidth">
</div>
<div>
<label for="result-hover-width">Висота покриття (м)</label>
<input id="result-hover-width" type="number" readonly disabled v-
model="resultValues.coverageHeight">
</div>
</div>

```

```

    <label for="result-flight-height">Висота польоту (м)</label>
    <input id="result-flight-height" type="number" readonly disabled v-
model="resultValues.flightHeight">
  </div>
</div>
  <button class="full-width" @click="calcButtonPressed">Виконати розрахунки</button>
</div>
<div>
  <label for="uav-result-static">Статичних БПЛА</label>
  <input id="uav-result-static" type="number" readonly disabled
:value="uavResultValues?.staticUAVs">
</div>
<div>
  <label for="uav-result-dynamic">Динамічних БПЛА</label>
  <input id="uav-result-dynamic" type="number" readonly disabled
:value="uavResultValues?.dynamicUAVs">
</div>
<div>
  <label for="uav-result-edge">Динамічних БПЛА (кордон)</label>
  <input id="uav-result-edge" type="number" readonly disabled
:value="uavResultValues?.borderUAVs">
</div>
</section>
</div>
</transition>
</template>

```

```

<script setup lang="ts">
import {ref, watch, Ref} from 'vue';
import "leaflet/dist/leaflet.css";
import * as turf from "turf";
import {LatLng} from "leaflet";

import ModalInput from "@/components/ModalInput.vue";
import {useStore, Compare} from "@/composables/useStore";
import {leafletLinkedStore, UAVPos} from "@/stores/leafletLinkerStore";
import ModalAlert from "@/components/ModalAlert.vue";

/**
 * Клас для зберігання параметрів об'єктів
 * @param object - назва об'єкту
 * @param width - ширина об'єкту (м)
 * @param ppm - щільність пікселів (пікс/м)
 * @implements Compare - інтерфейс для порівняння об'єктів
 * @method equal - порівняння двох об'єктів за всіма параметрами
 */
class ObjectParams implements Compare {
  object: string;
  public width: number;
  ppm: number;

  constructor(obj: string, width: number, ppm: number) {

```

```

    this.object = obj;
    this.width = width;
    this.ppm = ppm;
}

equal(second: any): boolean {
    if (!(second instanceof ObjectParams))
        return false

    return this.object === second.object
        && this.width === second.width
        && this.ppm === second.ppm
}
}

/**
 * Клас для зберігання параметрів БпЛА
 * @param model - модель БпЛА
 * @param maxFlightSpeed - максимальна швидкість польоту (м/с)
 * @param camera - характеристики камери (максимальний розмір зображення та поле зору)
 * @implements Compare - інтерфейс для порівняння об'єктів
 * @method equal - порівняння двох об'єктів за всіма параметрами
 */
class UAVParams implements Compare {
    model: string;
    maxFlightSpeed: number;
    camera: {
        maxImageSize: [number, number],
        fov: number
    }
}

    constructor(model: string, maxFlightSpeed: number, camera: { maxImageSize: [number, number], fov: number }) {
        this.model = model;
        this.maxFlightSpeed = maxFlightSpeed;
        this.camera = camera;
    }

    equal(second: any): boolean {
        if (!(second instanceof UAVParams))
            return false

        return this.model === second.model
            && this.maxFlightSpeed === second.maxFlightSpeed
            && this.camera.maxImageSize[0] === second.camera.maxImageSize[0]
            && this.camera.maxImageSize[1] === second.camera.maxImageSize[1]
            && this.camera.fov === second.camera.fov
    }
}

/**

```

```

* Сховище з інформацією про об'єкти
*/
const objects = useStore<ObjectParams>(
  "objects",
  new ObjectParams("- Custom -", 1, 100),
  [
    new ObjectParams("Людина (Виявлення)", 0.35, 25),
    new ObjectParams("Людина (Розпізнавання)", 0.35, 125),
    new ObjectParams("Людина (Ідентифікація)", 0.35, 250),
  ],
  (el) => Object.setPrototypeOf(el, ObjectParams.prototype))

/**
* Сховище з інформацією про БпЛА
*/
const devices = useStore<UAVParams>(
  "devices",
  new UAVParams("- Custom -", 10, { maxImageSize: [1920,1080], fov: 70 }),
  [
    new UAVParams("DJI Mavic 3M", 20, { maxImageSize: [5280,3956], fov: 84.0 }),
    new UAVParams("DJI FPV", 39, { maxImageSize: [3840, 2160], fov: 150.0 }),
    new UAVParams("DJI Avata 2", 8, { maxImageSize: [4000, 3000], fov: 155.0 }),
    new UAVParams("DJI Mini 4 Pro", 16, { maxImageSize: [8064, 6048], fov: 82.1 }),
  ],
  (el) => Object.setPrototypeOf(el, UAVParams.prototype))

/**
* Об'єкт який контролює параметри модального вікна введення тексту
* @param title - заголовок
* @param opened - стан модального вікна
* @param onResult - функція, яка викликається при збереженні тексту
*/
const modalInput = ref<{
  title: string,
  opened: boolean,
  onResult: (text: string) => void
}>({} as never);

/**
* Об'єкт який контролює параметри модального вікна підтвердження дії або сповіщення
* @param opened - стан модального вікна
* @param title - заголовок
* @param description - опис
* @param isPrompt - чи є це підтвердження дії (true) чи сповіщення (false)
* @param onClose - функція, яка викликається при закритті модального вікна
* @param onYes - функція, яка викликається при підтвердженні дії (якщо isPrompt - true)
* @param onNo - функція, яка викликається при скасуванні дії (якщо isPrompt - true)
*/
const modalAlert = ref<{
  opened: boolean,
  title: string,

```

```

description: string,
isPrompt: boolean,
onClose?: () => void,
onYes?: () => void,
onNo?: () => void
}>({} as never);

/**
 * Функція яка відображає модальне вікно сповіщення
 * @param title - заголовок
 * @param description - опис
 */
function showAlert(title: string, description: string) {
  modalAlert.value = { opened: true, title, description, isPrompt: false }
}

/**
 * Функція яка відображає модальне вікно підтвердження дії
 * @param title - заголовок
 * @param description - опис
 * @returns Promise<boolean> - результат підтвердження (true - продовжити, false -
скасувати, false - закрити модальне вікно)
 */
function showPrompt(title: string, description: string): Promise<boolean> {
  modalAlert.value = { opened: true, title, description, isPrompt: true }

  return new Promise((resolve) => { // Очікуємо на результат
    modalAlert.value.onYes = () => {
      resolve(true)
      modalAlert.value.opened = false
    }
    const close = () => {
      resolve(false)
      modalAlert.value.opened = false
    }

    modalAlert.value.onClose = close
    modalAlert.value.onNo = close
  })
}

/**
 * Функція яка відкриває модальне вікно введення тексту
 * @param title - заголовок
 * @param onResult - функція, яка викликається при збереженні тексту
 */
function openModalInput(title: string, onResult: (text: string) => void) {
  modalInput.value = { title, opened: true, onResult }
}

/**
 * Функція яка зберігає новий об'єкт в сховище

```

```

* @param text - назва об'єкта
*/
function saveCustomObject(text: string) {
  objects.saveCustom(new ObjectParams(text, objects.selected.value.width,
objects.selected.value.ppm))
}

/**
* Функція яка зберігає новий БпЛА в сховище
* @param text - назва БпЛА
*/
function saveCustomUAV(text: string) {
  devices.saveCustom(new UAVParams(text, devices.selected.value.maxFlightSpeed,
devices.selected.value.camera))
}

// Посилання на елементи введення даних
const objectWidth = ref<HTMLInputElement>()
const objectPpm = ref<HTMLInputElement>()

const deviceCameraWidth = ref<HTMLInputElement>()
const deviceCameraHeight = ref<HTMLInputElement>()
const deviceCameraFov = ref<HTMLInputElement>()
const deviceMaxFlightSpeed = ref<HTMLInputElement>()

const additionalFlightSpeed = ref<HTMLInputElement>()
const additionalOverlap = ref<HTMLInputElement>()
const additionalMonitoringPeriod = ref<HTMLInputElement>()
// -----

/**
* Стан віджета розрахунків
*/
const isHidden = ref(false)

/**
* Функція яка змінює стан віджета розрахунків
*/
const toggleControl = () => isHidden.value = !isHidden.value;

type AdditionalProps = {
  flightSpeed: number,
  overlap: number,
  monitoringPeriod: number
}

/**
* Додаткові параметри для розрахунку
* @param flightSpeed - швидкість польоту (м/с)
* @param overlap - відсоток перекриття (%)
* @param monitoringPeriod - періодичність моніторингу (хв)
*/

```

```

const additionalProps = ref<AdditionalProps>({
  flightSpeed: 1,
  overlap: 10,
  monitoringPeriod: 2
})

type ResultValues = {
  coverageWidth: number,
  coverageHeight: number,
  flightHeight: number
}

/**
 * Результати розрахунків реального часу
 * @param coverageWidth - ширина покриття (м)
 * @param coverageHeight - висота покриття (м)
 * @param flightHeight - висота польоту (м)
 */
const resultValues = ref<ResultValues>({
  coverageWidth: 0,
  coverageHeight: 0,
  flightHeight: 0
})

/**
 * Результати розрахунків БпЛА
 * @param staticUAVsPositions - позиції статичних БпЛА
 * @param staticUAVs - кількість статичних БпЛА для моніторингу всього полігону
 * @param dynamicUAVs - кількість динамічних БпЛА для моніторингу всього полігону
 * @param borderUAVs - кількість динамічних БпЛА для моніторингу кордону
 */
const uavResultValues = ref<UAVsCalcResult | undefined>(undefined)

/**
 * Функція яка перевіряє введені користувачем дані та викликає функції розрахунку
 */
async function calcButtonPressed() {
  /**
   * Функція яка виводить повідомлення про помилку біля відповідного поля вводу
   * @param input - посилання на елемент введення
   * @param message - повідомлення про помилку
   */
  function report(input: Ref<HTMLInputElement | undefined>, message: string) {
    if (!input.value)
      throw new Error("Input element is not defined")

    input.value?.setCustomValidity(message)
    input.value?.reportValidity()
  }

  if (objects.selected.value.width <= 0)
    return report(objectWidth, "Ширина об'єкту <= 0", )

```

```

if (!Number.isInteger(objects.selected.value.ppm) || objects.selected.value.ppm < 1)
  return report(objectPpm, "Має бути цілим числом >= 1")

if (!Number.isInteger(devices.selected.value.camera.maxImageSize[0])
  || devices.selected.value.camera.maxImageSize[0] <= 0)
  return report(deviceCameraWidth, "Має бути цілим числом >= 1")

if (!Number.isInteger(devices.selected.value.camera.maxImageSize[1])
  || devices.selected.value.camera.maxImageSize[1] <= 0)
  return report(deviceCameraHeight, "Має бути цілим числом >= 1")

if (devices.selected.value.camera.fov <= 0)
  return report(deviceCameraFov, "Має бути > 0")

if (devices.selected.value.maxFlightSpeed <= 0)
  return report(deviceMaxFlightSpeed, "Має бути > 0")

if (additionalProps.value.flightSpeed <= 0)
  return report(additionalFlightSpeed, "Має бути > 0")
if (additionalProps.value.flightSpeed < 0.1 ||
  additionalProps.value.flightSpeed > devices.selected.value.maxFlightSpeed)
  return report(additionalFlightSpeed,
    "Швидкість польоту повинна бути в межах від 0 до " +
    devices.selected.value.maxFlightSpeed)

if (additionalProps.value.overlap < 0 || additionalProps.value.overlap > 99)
  return report(additionalOverlap, "Відсоток перекриття повинен бути в межах від 0% до 99%")

if (additionalProps.value.monitoringPeriod <= 0)
  return report(additionalMonitoringPeriod, "Періодичність моніторингу повинна бути > 0")

if (resultValues.value.coverageWidth < 10 || resultValues.value.coverageHeight < 10) {
  if(!await showPrompt(
    "Увага!",
    "Ширина та висота покриття досить маленькі, ви впевнені, що хочете продовжити з такими параметрами?"
  )) return
}

console.log(leafletLinkedStore.value.markersCords)
if (leafletLinkedStore.value.markersCords.length < 3) {
  showAlert("Увага", "Для розрахунку необхідно вказати хоча б 3 точки")
  return
}

uavResultValues.value = calcUAVsInRegion(
  leafletLinkedStore.value.markersCords,
  resultValues.value.coverageWidth,
  resultValues.value.coverageHeight,

```

```

        additionalProps.value.flightSpeed,
        additionalProps.value.overlap,
        additionalProps.value.monitoringPeriod * 60
    )
    leafletLinkedStore.value.uavsPos = uavResultValues.value?.staticUAVsPositions ?? []
}
/**
 * Розрахунок ширини та висоти покриття БпЛА в реальному часі (при зміні розмірів
 зображення та щільності пікселів)
 */
watch([
    () => devices.selected.value.camera.maxImageSize,
    () => objects.selected.value.ppm
], ([imgSize, ppm]) => {
    resultValues.value.coverageWidth = imgSize[0] / ppm
    resultValues.value.coverageHeight = imgSize[1] / ppm
}, {
    deep: true,
    immediate: true
})

/**
 * Розрахунок висоти польоту БпЛА в реальному часі (при зміні ширини покриття та
 поля зору камери)
 */
watch([
    () => resultValues.value.coverageWidth,
    () => devices.selected.value.camera.fov
], ([hoverWidth, fov]) => {
    resultValues.value.flightHeight = hoverWidth / (2 * Math.tan(degToRad(fov / 2)))
}, {
    deep: true,
    immediate: true
})

/**
 * Переведення градусів в радіани
 * @param deg - градуси (°)
 */
function degToRad(deg: number) {
    return deg * (Math.PI / 180) // https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Reference/Global\_Objects/Math/tan
}

/*watch(() => leafletLinkedStore.markersCords, (elem) => {
    leafletLinkedStore.markersCords
    elem
    calcCentersOfUAVsInRegion(elem)
})*/*

```

```

/**
 * Розрахунок ефективного покриття одним БпЛА
 * @param width - ширина регіону
 * @param height - висота регіону
 * @param overlapPercent - відсоток перекриття в діапазоні [0, 100]
 * @returns {effectiveCoverageWidth, effectiveCoverageHeight, effectiveCoverageInFraction} -
ширина та висота покриття, відсоток ефективного покриття (0 - 1)
 * @throws Error - якщо відсоток перекриття не в діапазоні [0, 100]
 * @throws Error - якщо ширина або висота регіону менше 1
 */
function calcEffectiveCoverage(width: number, height: number, overlapPercent: number) {
  if (overlapPercent < 0 || overlapPercent > 100) {
    throw new Error("Overlap percent must be in range [0, 100]")
  }

  if (width < 1 || height < 1) {
    throw new Error("Width and height must be greater than 1")
  }

  const effectiveCoverageInFraction = 1 - additionalProps.value.overlap / 100
  const effectiveCoverageWidth = resultValues.value.coverageWidth *
effectiveCoverageInFraction
  const effectiveCoverageHeight = resultValues.value.coverageHeight *
effectiveCoverageInFraction

  return {effectiveCoverageWidth, effectiveCoverageHeight, effectiveCoverageInFraction}
}

/**
 * Результат розрахунків полігону для БпЛА
 * @param staticUAVsPositions - позиції статичних БпЛА
 * @param staticUAVs - кількість статичних БпЛА для моніторингу всього полігону
 * @param dynamicUAVs - кількість динамічних БпЛА для моніторингу всього полігону
 * @param borderUAVs - кількість динамічних БпЛА для моніторингу периметра
 */
type UAVsCalcResult = {
  staticUAVsPositions: UAVPos[],
  staticUAVs: number,
  dynamicUAVs: number,
  borderUAVs: number
}

/**
 * Розрахунок кількості БпЛА для ДИНАМІЧНОГО покриття регіону
 * @param zonesCount - кількість зон для моніторингу
 * @param zoneWidth - ширина зони
 * @param zoneHeight - висота зони
 * @param uavSpeed - швидкість польоту БпЛА
 * @param uavMonitoringPeriod - період моніторингу (сек)
 * @returns {number} - кількість БпЛА для покриття всіх зон з періодом моніторингу
(округлено в більшу сторону)

```

```

*/
function calcDynamicUAVsInRegion(
  zonesCount: number,
  zoneWidth: number,
  zoneHeight: number,
  uavSpeed: number,
  uavMonitoringPeriod: number
): number {
  const averageZoneDimension = (zoneWidth + zoneHeight) / 2
  const zoneLookupTime = averageZoneDimension / uavSpeed // час, який БпЛА проводить
над зоною (сек)
  const allZonesLookupTime = zonesCount * zoneLookupTime // час, за який БпЛА пролітає
над усіма зонами (сек)

  return Math.ceil(allZonesLookupTime / uavMonitoringPeriod) // Кількість БпЛА, які
потрібні для покриття всіх зон з періодом моніторингу
}

/**
 * Розрахунок кількості БпЛА для ДИНАМІЧНОГО моніторингу периметра
(кордону/межі) полігону
 * @param coords - масив координат кутів полігону
 * @param uavSpeed - швидкість польоту БпЛА (м/с)
 * @param uavMonitoringPeriod - період моніторингу (сек)
 * @returns {number} - кількість БпЛА для моніторингу кордону з періодом моніторингу
(округлено в більшу сторону)
 */
function calcBorderUAVsInRegion(coords: LatLng[], uavSpeed: number, uavMonitoringPeriod:
number) {
  const perimeter = coords.reduce((acc, currentCoord, index, array) => {
    const nextCoord = array[index + 1] ?? array[0] // якщо це остання точка - беремо першу
(замикаємо регіон)
    return acc + calcDistanceBetweenPoints(currentCoord, nextCoord) // додаємо відстань між
точками
  }, 0)

  const borderLookupTime = perimeter / uavSpeed // час, який БпЛА проводить над кордоном
(сек)
  return Math.ceil(borderLookupTime / uavMonitoringPeriod) // кількість БпЛА для покриття
кордону з періодом моніторингу
}

/**
 * Розрахунок кількості БпЛА для моніторингу полігону
 * @param coords - масив координат кутів полігону
 * @param uavCoverageWidth - ширина покриття БпЛА (м)
 * @param uavCoverageHeight - висота покриття БпЛА (м)
 * @param uavFlightSpeed - швидкість польоту БпЛА (м/с)
 * @param overlapPercent - відсоток перекриття (%)
 * @param monitoringPeriodInSeconds - періодичність моніторингу (сек)
 * @returns {UAVsCalcResult} - результат розрахунку
 * @returns {undefined} - якщо розрахунок неможливий (наприклад, неправильні

```

координати полігону)

**/*

```
function calcUAVsInRegion(
  coords: LatLng[],
  uavCoverageWidth: number,
  uavCoverageHeight: number,
  uavFlightSpeed: number,
  overlapPercent: number,
  monitoringPeriodInSeconds: number
): UAVsCalcResult | undefined {
  const {effectiveCoverageWidth, effectiveCoverageHeight, effectiveCoverageInFraction} =
    calcEffectiveCoverage(uavCoverageWidth, uavCoverageHeight, overlapPercent)

  let poly
  try { poly = turf.polygon([[...coords, coords[0]].map(({lat, lng}) => [lng, lat])] ) } catch (e) {
  return }
  let bbox = turf.bbox(poly) // [minX, minY, maxX, maxY] Полігону

  const width = calcDistanceBetweenPoints(new LatLng(bbox[1], bbox[0]), new
  LatLng(bbox[1], bbox[2])); // Розрахунок ширини полігону (в метрах)
  const height = calcDistanceBetweenPoints(new LatLng(bbox[1], bbox[0]), new
  LatLng(bbox[3], bbox[0])); // Розрахунок висоти полігону (в метрах)
  console.log("Width/Height: ", width, height)

  const numDronesWidth = Math.ceil(width / effectiveCoverageWidth); // Максимальна
  кількість БпЛА по ширині
  const numDronesHeight = Math.ceil(height / effectiveCoverageHeight); // Максимальна
  кількість БпЛА по висоті
  console.log("Drones count [W/H]: ", numDronesWidth, numDronesHeight)

  const deltaLngPerMeter = (bbox[2] - bbox[0]) / width; // Розрахунок коефіцієнта
  перетворення метрів в градуси довготи
  const deltaLatPerMeter = (bbox[3] - bbox[1]) / height // Розрахунок коефіцієнта
  перетворення метрів в градуси широти
  console.log("Delta [lat/lng]: ", deltaLatPerMeter, deltaLngPerMeter)

  const uavPositions: UAVPos[] = []
  // Перебір всіх можливих полігонів для розміщення БпЛА
  for (let h = 0; h < numDronesHeight; h++) {
    for (let w = 0; w < numDronesWidth; w++) {
      const lat = bbox[1] + (h * effectiveCoverageHeight * deltaLatPerMeter); // Початкова
      широта полігону
      const lng = bbox[0] + (w * effectiveCoverageWidth * deltaLngPerMeter); // Початкова
      довгота полігону

      // Координати полігону ефективної області покриття БпЛА
      const polygonCoordinates = [
        [lat, lng],
        [lat, lng + (effectiveCoverageWidth * deltaLngPerMeter)],
        [lat + (effectiveCoverageHeight * deltaLatPerMeter), lng + (effectiveCoverageWidth *
        deltaLngPerMeter)],
        [lat + (effectiveCoverageHeight * deltaLatPerMeter), lng],
```

```

];

// Полігон ефективної області покриття БнЛА
const turfPoly =
  turf.polygon([[...polygonCoordinates, polygonCoordinates[0]].map(([lat, lng]) => [lng,
lat])])

const polyIntersection = turf.intersect(turfPoly, poly)
if (!polyIntersection) {
  continue // якщо розглянутий полігон не перетинається з основним - пропускаємо
}

const polyOverlap = turf.area(polyIntersection) / turf.area(turfPoly) // Відношення площі
перетину до площі полігону
if (polyOverlap <= 1 - effectiveCoverageInFraction) {
  continue // якщо перекриття менше заданого % - пропускаємо полігон, адже перекриє
інший БнЛА
}

const centerLng = lng + (effectiveCoverageWidth * deltaLngPerMeter) / 2;
const centerLat = lat + (effectiveCoverageHeight * deltaLatPerMeter) / 2;
uavPositions.push({
  centerCords: new LatLng(centerLat, centerLng), // центр полігону (Координати
Розміщення БнЛА)
  cornersCords: polygonCoordinates.map(el => new LatLng(el[0], el[1])) // координати
кутів полігону
});
}
}

return {
  staticUAVsPositions: uavPositions,
  staticUAVs: uavPositions.length,
  dynamicUAVs: calcDynamicUAVsInRegion(
    uavPositions.length,
    effectiveCoverageWidth,
    effectiveCoverageHeight,
    uavFlightSpeed,
    monitoringPeriodInSeconds
  ),
  borderUAVs: calcBorderUAVsInRegion(coords, uavFlightSpeed,
monitoringPeriodInSeconds)
}
}

/**
 * Розрахунок відстані між двома точками на площині
 * @param point1 - координати першої точки
 * @param point2 - координати другої точки
 * @returns {number} - відстань між точками (в метрах)
 */
function calcDistanceBetweenPoints(point1: LatLng, point2: LatLng): number { //

```

```

https://uk.martech.zone/calculate-great-circle-distance/
let theta = point1.lng - point2.lng;
let distance = 60 * 1.1515 * (180/Math.PI) * Math.acos(
  Math.sin(point1.lat * (Math.PI/180)) * Math.sin(point2.lat * (Math.PI/180)) +
  Math.cos(point1.lat * (Math.PI/180)) * Math.cos(point2.lat * (Math.PI/180)) *
  Math.cos(theta * (Math.PI/180))
);

return distance * 1.609344 * 1000; // distance in meters
}

</script>

<style lang="scss" scoped>
button {
padding: 8px 8px;
border: 1px solid dodgerblue;
//border: 1px solid #399eff;
border-radius: 5px;
background-color: dodgerblue;
//background-color: #399eff;
cursor: pointer;
transition: all ease-in-out .2s;

&:hover {
border-color: black;
scale: 105%;
//rotate: 3deg;
}
}

.control-btn {
// content: "+□□□-ok □ X-no";

width: 40px;
height: 40px;
z-index: 1002;

border-radius: 10px;
transition: all ease-in-out .3s;
font-size: 36px;

background-color: white;
color: #2c3e50;

border: 1px solid #2c3e50;
background-clip: padding-box;

display: inline-block;
overflow: clip;
user-select: none;

```

```
cursor: pointer;

div::before {
  content: "+";
}

&.btn-close div {
  rotate: 45deg;
}

&:hover {
  color: #2c3e50;
  border-color: #2c3e50;
  background-color: #ebedef;
  transform: scale(1.1);
}
}

.control-minimized {
  position: fixed;
  top: 0;
  right: 0;
  margin: 20px;
  z-index: 1000;
}

.control-opened {
  position: fixed;
  top: 0;
  right: 0;
  width: 600px;
  @media (max-width: 640px) {
    width: 100%;
  }
}

height: 100%;
z-index: 1000;
background-color: white;
box-shadow: -0px 0px 20px 10px rgba(0, 0, 0, 0.2);

padding: 20px;

display: flex;
align-items: flex-start;
flex-direction: column;
gap: 30px;

overflow-x: hidden;
overflow-y: auto;

hr {
  width: 100%;
```

```

}

header {
  display: flex;
  flex-direction: row;
  justify-content: left;
  gap: 20px;
  align-items: center;

  h3 {
    margin: 0;
    font-size: 24px;
    width: 100%;
    text-align: left;
    overflow: clip;
    white-space: nowrap;
    text-overflow: ellipsis;
  }
}

section {
  width: 100%;
  display: flex;
  flex-direction: column;
  gap: 10px;

  div {
    display: flex;
    justify-content: space-between;
    text-align: left;
    align-items: center;
    gap: 8px;
    width: 100%;

    label {
      overflow: hidden;
      white-space: nowrap;

      &::after {
        content: "
....."
....."
      }
    }
  }

  select,
  input[type=number]#points-count,
  input[type=number] {
    padding: 8px 8px;
    border: 1px solid black;
    border-radius: 5px;
    min-width: 250px;
  }
}

```

```

}

button {
  padding: 8px 8px;
  border: 1px solid dodgerblue;
  border-radius: 5px;
  background-color: dodgerblue;
  cursor: pointer;
  transition: all ease-in-out .2s;

  &:hover {
    border-color: black;
    scale: 105%;
    //rotate: 3deg;
  }

  &.full-width {
    padding: 16px;
    width: 100%;
  }
}

input[type=number]#points-count {
  min-width: 50px;
}

select {
  border-color: dodgerblue;
}

@media (max-width: 500px) {
  select,
  input[type=number] {
    min-width: 150px;
  }
}

@media (max-width: 400px) {
  flex-direction: column;

  label {
    width: 100%;
  }

  button,
  select,
  input[type=number] {
    width: 100%;
    min-width: 100px;
  }
}

```

```

    }
  }
}

</style>

```

Лістинг В.9 – Код модуля LeafletMap.vue

```

<template>
  <div>
    <div id="map" style="height:100vh;"></div>
  </div>
</template>

<script setup lang="ts">
import {onMounted, ref, Ref, watch} from 'vue';
import * as L from 'leaflet';
import "leaflet/dist/leaflet.css";
import "leaflet-extra-markers"
import "leaflet-extra-markers/dist/css/leaflet.extra-markers.min.css";
import "leaflet-extra-markers/dist/js/leaflet.extra-markers.js";
import {leafletLinkedStore, UAVPos, UAVPosInternal} from "@stores/leafletLinkerStore";

// ---- Виправлення помилки зображення маркера на мапі ----
delete (L.Icon.Default.prototype as never)[ "_getIconUrl" ];

L.Icon.Default.mergeOptions({
  iconRetinaUrl: require('leaflet/dist/images/marker-icon-2x.png'),
  iconUrl: require('leaflet/dist/images/marker-icon.png'),
  shadowUrl: require('leaflet/dist/images/marker-shadow.png'),
});
// -----

let customMap: L.Map = undefined as never; // Мапа
let userMarkersLayer: L.LayerGroup = undefined as never; // Група маркерів користувача
let userPolygonsLayer: L.LayerGroup = undefined as never; // Група полігонів користувача
let uavPolygonsLayer: L.LayerGroup = undefined as never; // Група полігонів БпЛА
let uavMarkersLayer: L.LayerGroup = undefined as never; // Група маркерів БпЛА

type MapSettings = {
  center: L.LatLngExpression,
  zoom: number
}

const defaultMapSettings: MapSettings = {
  center: [50.04437331176693, 36.29183292388917],
  zoom: 14
}

/**
 * Завантажує налаштування мапи з локального сховища

```

```

* @returns {MapSettings} - Налаштування мапи
*/
function loadMapSettings(): MapSettings {
  return JSON.parse(localStorage.getItem('map-settings') ?? JSON.stringify(defaultMapSettings))
}

/**
* Зберігає налаштування мапи в локальне сховище
*/
function saveMapSettings() {
  localStorage.setItem('map-settings', JSON.stringify({
    center: customMap.getCenter(),
    zoom: customMap.getZoom()
  })))
}

onMounted(=> {

  let mapSettings = loadMapSettings()
  const tileMaxZoom = 19;

  customMap = L.map('map') // Створюємо мапу
    .setView(
      mapSettings.center,
      mapSettings.zoom < tileMaxZoom ? mapSettings.zoom : tileMaxZoom
    ) // Центруємо мапу на заданих координатах
    .on('moveend', saveMapSettings) // Зберігаємо налаштування центру мапи при зміні
    .on('zoomend', saveMapSettings) // Зберігаємо налаштування наближення мапи при зміні
    .on('contextmenu', onMapRightClick); // Встановлюємо обробник правого кліку по мапі

  L.tileLayer('https://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png', {
    maxZoom: tileMaxZoom,
    attribution: '&copy; <a href="http://www.openstreetmap.org/copyright">OpenStreetMap</a>',
  }).addTo(customMap);

  userMarkersLayer = L.layerGroup().addTo(customMap);
  userPolygonsLayer = L.layerGroup().addTo(customMap);
  uavPolygonsLayer = L.layerGroup().addTo(customMap);
  uavMarkersLayer = L.layerGroup().addTo(customMap).remove(); // сховати за замовчуванням

  L.control.layers(undefined, {
    "Маркери кутів": userMarkersLayer,
    "Полігони БпЛІА": uavPolygonsLayer,
    "Маркери БпЛІА": uavMarkersLayer
  }, {
    position: "topleft",
    collapsed: false
  }).addTo(customMap); // Додаємо панель керування шарами мапи

  L.control.scale().addTo(customMap); // Додати шкалу масштабу мапи

```

```

// Завантаження маркерів з локального сховища
(JSON.parse(localStorage.getItem('markers-cords') || '[]') as {lat: number, lng:
number}[]).forEach((cord) => {
  markers.addMarker(cord.lat, cord.lng);
})

});

/**
 * Масив кольорів для маркерів. [Колір маркера, Колір тексту]
 */
const ITERABLE_COLORS: [string, string][] = [
  ['#8B0000']/*darkred*/, 'white'],
  ['#FF4500']/*orangered*/, 'white'],
  ['#FFA500']/*orange*/, 'black'],
  ['#ecec0e']/*yellow*/, 'black'],
  ['#32CD32']/*lime*/, 'black'],
  ['#228B22']/*green*/, 'white'],
  ['#28bb86']/*sea-green*/, 'white'],
  ['#1E90FF']/*dodgerblue*/, 'white'],
  ['#0000FF']/*blue*/, 'white'],
  ['#483D8B']/*dark-slate-blue*/, 'white'],
  ['#800080']/*purple*/, 'white'],
  ['#FF00FF']/*magenta*/, 'white'],
  ['#FF1493']/*deeppink*/, 'white'],
  ['#FF69B4']/*hotpink*/, 'white'],
  ['black', 'white']
]

/**
 * Клас керування користувацькими маркерами на мапі
 */
const markers = new class {
  readonly markers: Ref<L.Marker[]> = ref([])
  private polygon: L.Polygon = undefined as never

  /**
   * Оновлює або створює полігон на мапі відповідно до розташування маркерів
   * @private
   */
  private updatePolygon() {
    if (!this.polygon) // Якщо полігон не існує - створюємо його
      this.polygon = L.polygon([]).addTo(userPolygonsLayer)

    // Оновлюємо координати вершин полігону
    this.polygon.setLatLngs(this.markers.value.map(marker => marker.getLatLng()))
  }

  /**
   * Видаляє всі маркери з мапи та оновлює полігон
   */

```

```

ease() {
  this.markers.value.forEach(marker => marker.removeFrom(userMarkersLayer))
  this.markers.value = []
  this.updatePolygon()
}

/**
 * Додає маркер на мапу та оновлює полігон
 * @param lat - Широта
 * @param lng - Довгота
 */
addMarker(lat: number, lng: number) {
  const id = this.markers.value.length;
  const markerColor = ITERABLE_COLORS[id % ITERABLE_COLORS.length]; //
  Отримуємо колір для маркера

  // Створюємо маркер
  const marker = L.marker([lat, lng], {
    draggable: true,
    icon: L.ExtraMarkers.icon({
      shape: 'circle',
      prefix: 'fa',
      icon: 'fa-number',
      svg: true,
      number: (id + 1).toString(),
      markerColor: markerColor[0] as never,
      iconColor: markerColor[1],
    })
  })
  .on('contextmenu', e => this.onMarkerRightClick(e)) // Обробник правого кліку
  .on('dragend', e => this.onMarkerCordsChanged(e)) // Обробник зміни координат
  маркера
  .addTo(userMarkersLayer) // Додаємо маркер на мапу

  this.bindPopupLatLng(marker) // Додаємо впливаюче вікно з координатами маркера
  this.markers.value.push(marker) // Додаємо маркер в масив маркерів

  this.updatePolygon() // Оновлюємо полігон
}

/**
 * Видаляє маркер з мапи та оновлює полігон
 * @param marker - Маркер, який потрібно видалити
 */
private removeMarker(marker: L.Marker) {
  const {lat: tlat, lng: tlng, alt: talt} = marker.getLatLng()
  marker.removeFrom(userMarkersLayer)

  const newMarkers = this.markers.value.filter(marker => {
    const {lat, lng, alt} = marker.getLatLng()
    return !(lat === tlat && lng === tlng && alt === talt) // Видаляємо маркер з масиву якщо його
    координати збігаються
  })
}

```

```

    })

    this.markers.value = []
    newMarkers.forEach(mark => {
      const {lat, lng} = mark.getLatLng()
      this.addMarker(lat, lng)

      mark.removeFrom(userMarkersLayer)
    })

    this.updatePolygon()
  }

  /**
   * Додає впливаюче вікно з координатами маркера
   * @param marker - Маркер, якому потрібно додати впливаюче вікно
   */
  private bindPopupLatLng(marker: L.Marker) {
    const {lat, lng} = marker.getLatLng()
    marker.bindPopup(`<p>Ш: ${lat}</p><p>Д: ${lng}</p>`, {
      closeButton: false,
      keepInView: true
    })
  }

  /**
   * Обробник правого кліку по маркеру. Видаляє маркер
   * @param e - Подія кліку
   */
  private onMarkerRightClick(e: L.LeafletMouseEvent) {
    const target = e.target as L.Marker
    this.removeMarker(target)
  }

  /**
   * Обробник зміни координат маркера. Оновлює полігон та впливаюче вікно
   * @param e - Подія зміни координат
   */
  private onMarkerCordsChanged(e: L.DragEndEvent) {
    this.updatePolygon()
    this.bindPopupLatLng(e.target as L.Marker)
    updateLinkedMarkers()
  }

  /**
   * Обробник кліку ПКМ на мапу. Додає новий маркер на задані координати
   * @param e - Подія кліку
   */
  function onMapRightClick(e: L.LeafletMouseEvent) {
    markers.addMarker(e.latlng.lat, e.latlng.lng)
  }

```

```

/**
 * Очікує на зміну стану видалення маркерів та видаляє їх
 */
watch(
  () => leafletLinkedStore.value.markedForErase,
  (newOne) => {
    if(newOne) {
      markers.ease()
      leafletLinkedStore.value.markedForErase = false
    }
  }
)

/**
 * Очікує на зміну маркерів (додавання / видалення)
 */
watch(
  () => markers.markers.value,
  () => {
    updateLinkedMarkers()
  }, {
    deep: true
  }
)

/**
 * Оновлює координати маркерів у глобальному сторі
 */
function updateLinkedMarkers() {
  leafletLinkedStore.value.markersCords = markers.markers.value.map(marker =>
  marker.getLatLng())
}

/**
 * Клас керування полігонами БпЛА на мапі
 */
const uavs = new class {
  private uavs: UAVPosInternal[] = []

  /**
   * Видаляє всі маркери та полігони БпЛА з мапи
   */
  ease() {
    this.uavs.forEach(uav => {
      uav.polygon.removeFrom(uavPolygonsLayer)
      uav.centerMarker?.removeFrom(uavMarkersLayer)
      uav.cornersMarkers.forEach(marker => marker.removeFrom(uavMarkersLayer))
    })
    this.uavs = []
  }
}

```

```

/**
 * Додає БпЛА на мапу
 * @param obj - Об'єкт з координатами БпЛА
 */
add(obj: UAVPos) {
  const id = this.uavs.length;
  const visId = id + 1;
  const markerColor = ITERABLE_COLORS[id % ITERABLE_COLORS.length];

  // Створюємо маркер розташування БпЛА (центр полігону)
  const centerMarker = L.marker([obj.centerCords.lat, obj.centerCords.lng], {
    draggable: false,
    title: `БПЛА №${visId}`,
    icon: L.ExtraMarkers.icon({
      shape: 'circle',
      prefix: 'fa',
      icon: 'fa-number',
      svg: true,
      number: visId.toString(),
      markerColor: markerColor[0] as never,
      iconColor: markerColor[1],
    })
  }).addTo(uavMarkersLayer)

  // Створюємо полігон, який відображає зону спостереження БпЛА
  const polygon = L.polygon(obj.cornersCords, {
    color: markerColor[0],
    fillColor: markerColor[0],
    fillOpacity: 0.5
  }).addTo(uavPolygonsLayer)

  this.uavs.push({
    centerMarker: centerMarker,
    cornersMarkers: [], // Не використовується через непотрібність відображення кутів
    polygon
  })
}
}

/**
 * Очікує на передачу нових координат полігонів БпЛА
 * Видаляє попередні елементи та додає на мапу нові
 */
watch(
  () => leafletLinkedStore.value.uavsPos,
  (newOne) => {
    uavs.ease()
    newOne.forEach((uav) => {
      uavs.add({
        centerCords: uav.centerCords,

```

```

        cornersCords: uav.cornersCords
      })
    })
  }
)

```

```
</script>
```

```

<style>
.leaflet-control-layers-list {
  text-align: left;
}
</style>

```

Лістинг В.10 – Код модуля ModalAlert.vue

```

<script setup lang="ts">
import {defineProps, defineEmits} from 'vue';

```

```

defineProps<{
  title: string;
  description: string
  isPrompt: boolean
}>()

```

```

const emit = defineEmits<{
  close: [];
  yes: [];
  no: [];
}>()

```

```

function close() {
  emit('close')
}

```

```
</script>
```

```

<template>
  <transition name="modal-fade">
    <div class="modal-backdrop" @click="close">
      <transition name="drop-in">
        <div class="modal"
          role="dialog"
          aria-labelledby="modalTitle"
          aria-describedby="modalDescription"
          @click.stop
        >
          <header v-if="title" class="modal-header">
            {{ title }}
          </header>

```

```

<section class="modal-body">
  {{ description }}
</section>
<footer class="modal-footer">
  <div v-if="!isPrompt">
    <button type="button" @click="close" class="bordered" aria-label="Close modal">
      Закрити
    </button>
  </div>
  <div v-else>
    <button type="button" @click="() => emit('no')" class="bordered" aria-label="Close
modal">
      Відмінити
    </button>
    <button type="button" @click="() => emit('yes')">
      Продовжити
    </button>
  </div>
</footer>
</div>
</transition>
</div>
</transition>
</template>

```

```

<style scoped>
.modal-backdrop {
  position: fixed;
  top: 0;
  bottom: 0;
  left: 0;
  right: 0;
  z-index: 1001;
  background-color: rgba(0, 0, 0, 0.3);

```

```

  display: flex;
  justify-content: center;
  align-items: center;
}

```

```

.modal {
  background: #FFFFFF;
  box-shadow: 2px 2px 20px 1px;
  overflow-x: auto;
  display: flex;
  gap: 10px;
  flex-direction: column;

```

```

  padding: 20px;
  border-radius: 10px;

```

```

  margin: 10px;

```

```
max-width: 500px;
width: 100%;
}

.modal-header,
.modal-footer {
display: flex;
align-items: flex-start;
justify-content: space-between;
}

.modal-header {
font-size: 1.5rem;
font-weight: bold;
color: var(--color-primary)
}

.modal-footer {
align-self: flex-end;
}

.modal-body {
position: relative;
text-align: left;
}

footer div {
display: flex;
gap: 10px;
}

button {
padding: 8px 8px;
border: 1px solid dodgerblue;
border-radius: 5px;
background-color: dodgerblue;
cursor: pointer;
transition: all ease-in-out .2s;

&.bordered {
background-color: transparent;
color: #2c3e50;
border-color: #2c3e50;
}

&:hover {
border-color: #2c3e50;
scale: 105%;
}
}

input {
```

```
padding: 8px 8px;
border: 1px solid black;
border-radius: 5px;
min-width: 250px;

&.error {
  border-color: red;
}
}

.btn-close {
  position: absolute;
  top: 0;
  right: 0;
  border: none;
  font-size: 20px;
  padding: 10px;
  cursor: pointer;
  font-weight: bold;
  color: #4AAE9B;
  background: transparent;
}

.btn-green {
  color: white;
  background: #4AAE9B;
  border: 1px solid #4AAE9B;
  border-radius: 2px;
}

.modal-fade-enter-from,
.modal-fade-leave-to {
  opacity: 0;
}

.modal-fade-enter-active,
.modal-fade-leave-active {
  transition: opacity .5s cubic-bezier(0.4, 0, 0.2, 1);
}

.drop-in-enter-active,
.drop-in-leave-active {
  transition: all 0.5s cubic-bezier(0.4, 0, 0.2, 1);
}

.drop-in-enter-from,
.drop-in-leave-to {
  opacity: 0;
  transform: translateY(-100%);
}
</style>
```

Лістинг В.11 – Код модуля ModalInput.vue

```

<script setup lang="ts">
import {defineProps, defineEmits, ref} from 'vue';

defineProps<{
  title: string;
  placeholder: string
}>()

const text = ref("")
const inp = ref<HTMLInputElement | null>(null)

const emit = defineEmits<{
  close: [];
  save: [string];
}>()

function close() {
  emit('close');
}

function save() {
  if (!text.value) {
    inp.value?.setCustomValidity('Поле не може бути пустим');
    inp.value?.reportValidity();
    return;
  }

  emit('save', text.value);
  text.value = "";
}

</script>

<template>
<transition name="modal-fade">
<div class="modal-backdrop" @click="close">
  <transition name="drop-in">
    <div class="modal"
      role="dialog"
      aria-labelledby="modalTitle"
      aria-describedby="modalDescription"
      @click.stop
    >
      <header class="modal-header">
        {{ title }}
      </header>

      <section class="modal-body">
        <input ref="inp" type="text" :placeholder="placeholder" maxlength="50" v-
model="text"/>

```

```

</section>

<footer class="modal-footer">
  <div>
    <button type="button" @click="close" class="bordered" aria-label="Close modal">
      Відмінити
    </button>
    <button type="button" @click="save">
      Зберегти
    </button>
  </div>
</footer>
</div>
</transition>
</div>
</transition>
</template>

```

```

<style scoped>
.modal-backdrop {
  position: fixed;
  top: 0;
  bottom: 0;
  left: 0;
  right: 0;
  z-index: 1001;
  background-color: rgba(0, 0, 0, 0.3);

```

```

  display: flex;
  justify-content: center;
  align-items: center;
}

```

```

.modal {
  background: #FFFFFF;
  box-shadow: 2px 2px 20px 1px;
  overflow-x: auto;
  display: flex;
  gap: 10px;
  flex-direction: column;

```

```

  padding: 20px;
  border-radius: 10px;
}

```

```

.modal-header,
.modal-footer {
  display: flex;
  align-items: flex-start;
  justify-content: space-between;
}

```

```
.modal-footer {
  align-self: flex-end;
}

.modal-body {
  position: relative;
}

footer div {
  display: flex;
  gap: 10px;
}

button {
  padding: 8px 8px;
  border: 1px solid dodgerblue;
  border-radius: 5px;
  background-color: dodgerblue;
  cursor: pointer;
  transition: all ease-in-out .2s;

  &.bordered {
    background-color: transparent;
    color: #2c3e50;
    border-color: #2c3e50;
  }

  &:hover {
    border-color: #2c3e50;
    scale: 105%;
  }
}

input {
  padding: 8px 8px;
  border: 1px solid black;
  border-radius: 5px;
  min-width: 250px;

  &.error {
    border-color: red;
  }
}

.btn-close {
  position: absolute;
  top: 0;
  right: 0;
  border: none;
  font-size: 20px;
  padding: 10px;
  cursor: pointer;
}
```

```
font-weight: bold;
color: #4AAE9B;
background: transparent;
}

.btn-green {
color: white;
background: #4AAE9B;
border: 1px solid #4AAE9B;
border-radius: 2px;
}

.modal-fade-enter-from,
.modal-fade-leave-to {
opacity: 0;
}

.modal-fade-enter-active,
.modal-fade-leave-active {
transition: opacity .5s cubic-bezier(0.4, 0, 0.2, 1);
}

.drop-in-enter-active,
.drop-in-leave-active {
transition: all 0.5s cubic-bezier(0.4, 0, 0.2, 1);
}

.drop-in-enter-from,
.drop-in-leave-to {
opacity: 0;
transform: translateY(-100%);
}
</style>
```

ДОДАТОК Г

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., Brezhniev, 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](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), pp. 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), pp. 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), pp. 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), pp. 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), pp. 50-55. Available at: <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.37.07>.

19. Компанієць, О. М., Ключніков, І. М. & Литвинчук, Д. В. (2023) 'Стратегії функціонування безпілотної літальних апаратів та автоматизованих обмінно-зарядних станцій в бездротових мережах', *Системи обробки інформації*, 2(173), pp. 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), pp. 70-76. Available at: <https://doi.org/10.30748/soi.2023.174.10>.

21. Ключніков, І. М. (2024) 'Оцінка безпеки застосування безпілотної літальних апаратів з використанням марковських моделей', *Системи озброєння і військова техніка*, 4(76), pp. 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 безпілотної літальних апаратів', *Системи управління, навігації та зв'язку*, 4, pp. 22-29. Available at:

23. Ключніков, І. М., Федоренко, Г. Л., Фесенко, Г. В. & Харченко, В. С. (2023) 'Методи пошуку та ідентифікації вибухонебезпечних предметів з використанням багатоцільових інтелектуальних безпілотної систем', In: Харченко, В. С. & Морозова, О. І. (eds.) *Методи та технології забезпечення якості та безпеки інтелектуальних систем*. Харків: Національний аерокосмічний університет «ХАІ», pp. 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), pp. 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. 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. 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 IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, 20-22 Feb. 2022. 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. pp. 299–306. Available at: <https://doi.org/10.1109/IDT59031.2023.10194443>.

30. Kliushnikov, I., Fesenko, H., Fedorenko, G., Rudakov, S., Mikhalevskiy, V., Kompaniets, O. (2022) 'Swarm of Unmanned Aerial Vehicles as a Multi-State Queueing System with Non-Controlled and Controlled Degradation', In: *2023 12th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Athens, Greece, 9-11 Dec. 2022. 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 IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Athens, Greece, 13-15 Oct. 2023. pp. 1-7. Available at: <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416509>.

32. Ключніков, І. М., Шалигін, А. А., Нерубацький, В. О. & Черепенько 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, р. 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 безпілотних літальних апаратів', In: *Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій: матеріали Третьої міжнар. наук.-практ. конф.*. Київ, Україна, 22-26 січня 2021. Київ, pp. 104-107.

35. Ключніков, І. М. & Середюк, А. О. (2023) 'Планування місій з використанням безпілотних 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, р. 96.

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

37. Ключніков, І. М. & Прозорова, К. В. (2023) 'Моделі функціонування флоту безпілотних 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 безпілотних 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, pp. 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, pp. 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, р. 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, р. 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, р. 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, р. 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, pp. 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), pp. 59-66. Available at: <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.60.08>

46. Ключніков, 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), pp. 113–119. Available at: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-113-119>.

47. Гайдук, К. С., Ключніков, 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», pp. 265-279.

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

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

50. Федоренко, Г. Л., Ключніков, 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., Фесенк,о 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.

ДОДАТОК Д

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

кандидат технічних наук, доцент

Андрій ГУМЕННИЙ

_____ 2025 року



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи

Клюшнікова Ігоря Миколайовича, виконаної на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук, у навчальному процесі на кафедрі комп'ютерних
систем, мереж і кібербезпеки

Комісія у складі Голови комісії - декана факультету радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій к.т.н., доцента Одокієнка Олексія Володимировича та Членів комісії - д.т.н., професора Фесенко Германа Вікторовича, д.т.н., професора Морозової Ольги Ігорівни, к.т.н., професора Фурманова Клайда Костянтиновича, встановила, що наукові результати, а саме:

- онтології моделей функціонування та оцінювання функційної надійності та гарантоздатності сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів (СОМС БПЛА);

- комплекс моделей функціонування та оцінки гарантоздатності СОМС БПЛА у вигляді систем масового обслуговування;

- комплекс моделей оцінки функційної надійності СОМС БПЛА;

реалізовані у навчальному процесі у вигляді лекційного матеріалу та практичних занять з використання зазначених вище моделей і методів при розробці моделей функціонування та оцінювання функційної надійності та кібербезпеки, а також розробки та застосування онтологій при побудові

інтелектуальних систем у навчальних дисциплінах «Надійність та функційна безпека інформаційно-керуючих систем», «Методи штучного інтелекту для кібербезпеки», «Безпека мобільних систем», «Мобільні інтелектуальні системи».

Це дозволило підвищити фундаментальність, наочність та практичну спрямованість навчального процесу, а також якість підготовки фахівців за означеними напрямками.

Голова комісії:



Олексій ОДОКІЄНКО

Члени комісії:



Герман ФЕСЕНКО



Ольга МОРОЗОВА



Клайд ФУРМАНОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Національного аерокосмічного університету

«Харківський авіаційний інститут»

доктор технічних наук, професор

Володимир ПАВЛІКОВ

2025 року



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи

Клюшнікова Ігоря Миколайовича, виконаної на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук, у науково-дослідних роботах, які виконувалися
кафедрою комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки

Комісія у складі Голови комісії - декана факультету радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій к.т.н. Одокієнка Олексія Володимировича та Членів комісії - д.т.н., професора Фесенко Германа Вікторовича, д.т.н., професора Морозової Ольги Ігорівни, к.т.н., професора Фурманова Клайда Костянтиновича, встановила, що наукові результати, а саме:

- методологія створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів (СОМС БПЛА);
- онтології моделей функціонування та оцінювання функційної надійності та гарантоздатності СОМС БПЛА;
- метод визначення опорної структури та складу СОМС БПЛА;
- комплекс моделей функціонування та оцінки гарантоздатності СОМС БПЛА у вигляді систем масового обслуговування;
- комплекс моделей оцінки функційної надійності СОМС БПЛА;

реалізовані у науково-дослідницькій роботі у вигляді науково-теоретичних положень, що використані при виконанні науково-дослідних робіт:

- Методи, моделі та інформаційні технології підвищення надійності та безпечності складних ІТ-систем на етапах розроблення та впровадження (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0121U113842, 2021- 2023 рр.);

- Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0121U112172, 2021-2023 рр.);

- Методологія та інформаційні технології оцінювання та забезпечення безпеки цифрової інфраструктури малих модульних реакторів (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0122U000977, 2022- 2024 рр.);

- Методи та засоби виявлення вибухонебезпечних предметів з використанням багатофункційних інтелектуальних систем БПЛА (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0123U101992, 2023- 2024 рр.);

- Методи, засоби та технології моделювання, розроблення, розгортання та забезпечення гарантоздатності мобільних інтелектуальних систем для об'єктів критичної інфраструктури (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0124U003250, 2024 р. - по т.ч.);

- Методи, засоби та технологія забезпечення гарантоздатності і резильєнтності інтелектуальних комплексів безпілотних літальних і безекіпажних апаратів з комбінованими стратегіями використання (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», № ДР 0124U000945, 2024 р. -по т.ч.).

Це дозволило підвищити фундаментальність та практичну спрямованість наукової діяльності, якість проведення досліджень за

означеними напрямками, а також отримати ефективне вирішення науково-практичних задач під час виконання науково-дослідних робіт.

Голова комісії:



Олексій ОДОКІЄНКО

Члени комісії:



Герман ФЕСЕНКО



Ольга МОРОЗОВА



Клайд ФУРМАНОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

Андрій ГУМЕННИЙ
«30» 2025 року



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи

Ключнікова Ігоря Миколайовича, виконаної на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук, у міжнародних проєктах, які виконувалися у
Національному аерокосмічному університеті
«Харківський авіаційний університет»

Комісія у складі Голови комісії – д.т.н., професорки Морозової Ольги Ігорівни та Членів комісії – д.т.н., професора Фесенко Германа Вікторовича, к.т.н., професора Орехова Олександра Олександровича, к.т.н., професора Узуна Дмитра Дмитровича, встановила, що наукові результати, а саме:

- метод визначення структури та складу сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі БПЛА;

- комплекс моделей функціонування сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі БПЛА;

пов'язані з міжнародною співпрацею здобувача та відображені у вигляді матеріалів у наступних міжнародних проєктах:

- «Baltic Sea Neighbourhood Programme): WILDFire preparedness and prevention framework for unmanned vehiCle plATforms» (“WILDCAT”), сумісно з КТН (Швеція), SAHER (Естонія) (2024 - 2026 pp.), зокрема при розробці обрисів автономних систем моніторингу та боротьби з лісовими пожежами;

- «AutoDrone UA», сумісно з Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF (Fraunhofer IFF, Німеччина) (договір PR758743 4500639807, 2024-2025 рр.), зокрема при розробці системи пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів з використанням БПЛА.

Це дозволило отримати ефективне вирішення науково-практичних задач, а також покращити міжнародні зв'язки університетів-учасників проектів у галузі міжнародного наукового співробітництва.

Голова комісії:



Ольга МОРОЗОВА

Члени комісії:



Герман ФЕСЕНКО



Олександр ОРСХОВ



Дмитро УЗУН

Прим № 1

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Командувач авіації – заступник командувача
 Повітряних Сил Збройних Сил України
 Олександр ДЯКІВ
 2025 року



А К Т

реалізації результатів докторської дисертаційної роботи
 КЛЮШНІКОВА Ігоря Миколайовича

Комісія, призначена відповідно до наказу начальника штабу – заступника командувача Повітряних Сил Збройних Сил України від 21.12.2024 № 331 у складі:

голови комісії: начальника відділу підготовки управління безпілотних авіаційних систем Командування авіації Командування Повітряних Сил Збройних Сил України полковника Геннадія ТИМЧУКА;

членів комісії: старшого офіцера відділу підготовки управління безпілотних авіаційних систем Командування авіації Командування Повітряних Сил Збройних Сил України підполковника Василя ХУДОЯНА;

офіцера відділу планування застосування безпілотних авіаційних систем управління безпілотних авіаційних систем Командування авіації Командування Повітряних Сил Збройних Сил України майора Михайла ЯКИМА,

у період з 01.05.2025 року по 03.05.2025 року комісія розглянула використання наукових результатів дисертаційного дослідження КЛЮШНІКОВА Ігоря Миколайовича в науково-дослідній роботі шифр "Взаємодія", номер державної реєстрації 0119U000059д, виконаної на підставі тактико-технічного завдання, затвердженого Командувачем Повітряних Сил Збройних Сил України від 07 грудня 2018 року.

ВСТАНОВИЛА:

1. В ході виконання науково-дослідної роботи шифр "Взаємодія" були використані результати дисертаційного дослідження КЛЮШНІКОВА Ігоря Миколайовича, а саме:

- методологія створення гарантоздатних сервіс-орієнтованих мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів (СОМС БпЛА), яка на відміну від відомих, базується на концепції побудови гарантоздатних (надійних і безпечних) СОМС з недостатньо надійних і безпечних БпЛА та їх множин;

- метод визначення структури та складу СОМС БпЛА, який базується на онтологіях моделей функціонування, оцінки гарантоздатності та онтології предметної області функціонування, що описує типові завдання, умови їх виконання, технічні характеристики елементів СОМС, і забезпечує синтез гарантоздатних СОМС БпЛА для виконання різноманітних завдань з

- організаційна модель СОМС БпЛА у вигляді мультиагентної системи, яка реалізована з холонів керування, виконання та забезпечення, і дозволяє описувати склад та структуру холонів-агентів, що формуються для виконання різноманітних завдань, і у такий спосіб обґрунтовувати системну архітектуру СОМС БпЛА;

- комплекс моделей функціонування та оцінки гарантоздатності СОМС ФБпЛА у вигляді систем масового обслуговування, якій враховує можливість відмов внаслідок фізичних причин та кібератак, стратегії та параметри процесів відновлення та профілактичного обслуговування БпЛА, а також процеси деградації та керованого зменшення якості виконання завдань, що дозволяє підвищити точність розрахунків показників гарантоздатності, обґрунтовувати склад СОМС ФБпЛА і комплексу засобів для забезпечення надання сервісів;

- комплекс моделей оцінки функційної надійності СОМС БпЛА, який враховує фрагментацію цільової області, різні варіанти формування маршрутів для її покриття в умовах відмов БпЛА та підсистеми обслуговування, а також багатоступеневу деградацію їх характеристик БпЛА, що дозволяє підвищити точність розрахунків показників надійності та ризиків ненадання сервісів СОМС, а також обґрунтовувати вимоги до відповідних показників, кількості і типів БпЛА;

2. Розроблені автором методологія, моделі та методи дозволяють забезпечити підвищення ефективності застосування мобільних систем на основі БпЛА в інтересах Повітряних Сил Збройних Сил України під час виконання завдань за призначенням.

3. Результати дисертаційного дослідження КЛЮШНІКОВА Ігоря Миколайовича використані в науково-дослідній роботі шифр, "Взаємодія" вважати реалізованими.

Голова комісії: полковник
Члени комісії: підполковник
майор



Геннадій ТИМЧУК
Василь ХУДОЯН
Михайло ЯКИМ

Прим № 1

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника університету з
 наукової роботи Харківського
 національного університету Повітряних
 Сил імені Івана Кожедуба
 факультету науки і техніки України
 доктор технічних наук, професор



Костянтин ВАСЮТА

2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи Ключнікова Ігоря Миколайовича,
 виконаної на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Комісія, призначена відповідно до наказу начальника Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба від 09.12.2024 № 2098 у складі:

голови комісії: начальника льотного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба полковника Віктора ІЩУКА;

членів комісії:

заступника начальника факультету з навчальної та наукової роботи – начальника навчальної частини льотного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба підполковника Олександра МІРОШНІЧЕНКА;

начальника науково-організаційного відділу Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба підполковника Олександра КУРЕНКА;

докторанта науково-організаційного відділу Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба підполковника Олега КОМПАНИЙЦЯ;

старшого наукового співробітника науково-дослідної лабораторії льотного факультету Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба підполковника Сергія МАРТИНЕНКА;

наукового співробітника науково-дослідної лабораторії льотного факультету Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба майора Дмитра ЛИТВИНЧУКА.

у період з 20 червня 2025 року по 30 червня 2025 року розглянула звіт з виконання оперативного завдання "Дослідження шляхів побудови та застосування багатопозиційної сенсорної системи навігації бойових

літальних апаратів та моніторингу обстановки”, шифр “Атрос”, виконаного на підставі доручення начальника Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба та

ВСТАНОВИЛА:

1. Результати наукових досліджень кандидата технічних наук старшого наукового співробітника КЛЮШНІКОВА Ігоря Миколайовича реалізовані в ході виконання оперативного завдання “Дослідження шляхів побудови та застосування багатопозиційної сенсорної системи навігації бойових літальних апаратів та моніторингу обстановки”, шифр “Атрос”, а саме:

- метод визначення складу угруповання БПЛА, необхідного для розгортання багатопозиційної сенсорної системи навігації літальних апаратів та моніторингу обстановки;


- моделі функціонування угруповання БПЛА при покритті цільової області під час розгортання багатопозиційної сенсорної системи навігації літальних апаратів та моніторингу обстановки, та оцінки ефективності їх реалізації.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження дозволить отримувати достовірну оцінку ефективності комплексного використання мережі різномірних сенсорів та угруповання БПЛА, обґрунтовувати прийняття рішень під час розгортання та застосування перспективних систем навігації і моніторингу обстановки в умовах обмеженого функціонування геоінформаційних систем при забезпеченні виконання завдань пілотованою та безпілотною авіацією.

Голова комісії: полковник  Віктор ШЦУК

Члени комісії: підполковник  Олександр МІРОШНІЧЕНКО

підполковник  Олександр КУРЕНКО

підполковник  Олег КОМПАНИЄЦЬ

підполковник  Сергій МАРТИНЕНКО

майор  Дмитро ЛИТВИНЧУК

ЗАТВЕРДЖЕНО
 Перший проректор з навчальної
 роботи Національного університету
 цивільного захисту України
 Олександр ДАВУШАЙ

« 22 » _____ 2025 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
 наукових результатів дисертаційної роботи
 Ключнікова Ігоря Миколайовича, виконаної
 на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Комісія у складі Голови комісії – т.в.о. начальника кафедри спеціальної підготовки та підводного розмінування навчально-наукового інституту цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України (НУЦЗ України), PhD, Євгена МАКАРОВА та Членів комісії – доцента кафедри спеціальної підготовки та підводного розмінування навчально-наукового інституту цивільного захисту НУЦЗ України, кандидата технічних наук, доцента Ігоря ТОЛКУНОВА та старшого викладача кафедри спеціальної підготовки та підводного розмінування навчально-наукового інституту цивільного захисту НУЦЗ України Сергія СТЕПАНЧУКА, склала цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження Ключнікова І.М. впроваджено в освітньому процесі Національного університету цивільного захисту України під час викладання освітніх компонентів (навчальних дисциплін) «Управління діяльністю піротехнічних підрозділів», «Технічні засоби забезпечення піротехнічних робіт» та «Ідентифікація вибухонебезпечних предметів», а саме:


- метод визначення структури та складу сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА);
- моделі функціонування та оцінки гарантоздатності сервіс-орієнтовних мобільних систем на основі БПЛА.

Зазначені результати було використано під час викладання тем, пов'язаних із організацією та проведенням заходів з розгортання системи пошуку, виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів з використанням БПЛА.

Голова комісії:

 Євген МАКАРОВ

Члени комісії:

 Ігор ТОЛКУНОВ

 Сергій СТЕПАНЧУК