

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛОСЬ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.316.1:517.977:629.735

ДИСЕРТАЦІЯ
АВТОНОМНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ КОМПЛЕКСІВ
БЕЗПЕРЕРВНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ БЕЗПІЛОТНИХ
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



_____ А.М.Лось

Науковий керівник Велігорський Олександр Анатолійович, канд. техн. наук

Чернігів - 2025

АНОТАЦІЯ

Лось А. М. Автономні системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розробленню підходів до оптимізації енергетичного балансу комплексу безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів (дронів).

У результаті проведених досліджень вперше розроблено комплексний підхід до оцінки параметрів системи спостереження на базі дронів, який враховує енергоспоживання дронів, технології акумуляторних батарей, та баланс роботи системи збереження та генерації електроенергії. Основний акцент зроблено на створенні нових моделей, методів і алгоритмів, які забезпечують розробку стабільної, і надійної системи безпосереднього спостереження у різних експлуатаційних умовах.

Отримані такі наукові та практичні результати:

1. Розроблено нову концептуальну модель системи електрозабезпечення комплексів спостереження на основі безпілотних літальних апаратів, її діаграму станів та переходів між ними, які описують взаємодію між всіма елементами системи.

2. Вдосконалено методику вибору технології акумуляторних батарей для наземної частини на основі комплексного критерію оптимальності, яка на відміну від існуючих є двоетапною та враховує експлуатаційні, технічні, та економічні вимоги, встановлено, що для такого застосування акумулятори на основі літієво-нікелево-марганцево-оксидної та літієво-нікелево-кобальтово-алюмінієво-оксидної технологій є найкращими.

3. Вдосконалено математичну модель ємності акумуляторної батареї, яка на відміну від існуючих враховує зміну температури та атмосферного тиску на основі технічних даних, отриманих від підприємства-виробника, що дозволяє врахувати

зміну ємності акумуляторної батареї безпілотного літального апарату під час польоту та уточнити тривалість польоту дрона.

4. Вперше розроблено математичні моделі та методику оцінки енергоспоживання окремої секції системи спостереження, яка дозволила врахувати енергетичні обмеження, параметри зони спостереження, та визначити оптимальну кількість дронів, необхідних для забезпечення безперервного спостереження.

5. Для запропонованої нової концептуальної моделі системи електрозабезпечення комплексів спостереження на основі безпілотних літальних апаратів запропоновано вдосконалену методику визначення її енергетичних параметрів, яка на відміну від існуючих враховує обмеження, що накладаються параметрами зони спостереження, та безперервністю процесу спостереження. Використання запропонованої методики на основі зазначених параметрів, а також технічних показників дронів, ККД перетворювачів, мінімального часу автономної роботи та координат розміщення комплексу дозволило визначити параметри системи накопичення енергії та номінальну потужність фотоелектричних перетворювачів, які забезпечуватимуть автономну роботу та безперервне спостереження по всьому периметру зони.

Розроблені моделі та методики мають практичне значення для проєктування, і вдосконалення систем спостереження у сферах безпеки, пошуково-рятувальних завдань, сільського господарства, та інших. Отримані результати дозволяють оптимізувати систему електроживлення, кількість необхідних дронів, та розширити основні можливості таких систем.

Ключові слова: система електроживлення, автономна система електроживлення, накопичувачі електричної енергії, фотоелектричні перетворювачі, енергетичний баланс, безпілотний літальний апарат, дрон, система спостереження, математична модель.

Список публікацій здобувача

1. Лось А., Рудніченко С., Соболев В., Велігорський О. Огляд основних параметрів системи електроспоживання сучасних безпілотних літальних апаратів вертикального зльоту та посадки стаття Технічні науки та

- технології, 2021, №1 (23), 239–248. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1\(23\)-239-248](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1(23)-239-248). (Особистий внесок – визначено розподіл електроспоживання між основними складовими елементами дрона).
2. Veligorskyi, O., Los, A., Chakirov, R. Persistent Continuous Surveillance of Remote Local Objects by Multirotor UAVs Конф. CPE-POWERENG 2023 - 17th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, 2023, 1-6. <https://doi.org/10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227404>. (Особистий внесок – виконано розрахунки та аналіз отриманих результатів).
 3. А. Лось, О. Велігорський, А. Роженков, Є. Хоменко Оцінка впливу зміни температури зовнішнього середовища на розряд акумуляторної батареї БПЛА Стаття Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 2023, 17(3), 31-36. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.17.2023.04>. (Особистий внесок – розроблено математичну модель прогнозування впливу температури та атмосферного тиску на енергоспоживання дронів).
 4. А. Лось, О. Велігорський Методика вибору технології акумуляторних батарей для автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів Стаття Технічні науки та технології, 2024, №2 (36), 227-241. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2\(36\)-227-241](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2(36)-227-241). (Особистий внесок – вперше розроблено методику вибору акумуляторних батарей для дронів на основі багатокритеріального аналізу для системи безперервного спостереження. Розроблено узагальнену концепцію автономної системи безперервного спостереження за допомогою дронів).
 5. А. Лось, О. Велігорський Оцінка комбінованого електроживлення систем безперервного спостереження на базі дронів Стаття Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2024, №4, 37–46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-37-46>. (Особистий внесок – вперше створено модель електрозабезпечення для системи безперервного спостереження з оптимізацією основної та допоміжної систем енергоживлення на основі моделювання часових, енергетичних і просторових характеристик).

6. А. Лось, О. Велігорський Energy and operational analysis of continuous surveillance systems based on multicopter UAVs Стаття Вісник ХПІ, 2024, №3 (21), 39–51. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.03.06>. (Особистий внесок – вперше розроблено метод оцінки, який на відміну від існуючих враховує модель замкнутого контуру спостереження, та дозволяє визначити мінімально необхідну кількість дронів та максимально досяжну дальність спостереження. Запропонований метод оцінки вдосконалено на основі експериментальних даних.).

ABSTRACT

Los A. M. Autonomous Power Supply Systems for Continuous Surveillance Complexes Based on Unmanned Aerial Vehicles – Qualification scientific work submitted in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 – Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics. National University “Chernihiv Polytechnic”, Chernihiv, 2025.

This dissertation focuses on developing approaches for optimizing the energy balance of a continuous surveillance system based on unmanned aerial vehicles (UAVs, drones).

As a result of the conducted research, a comprehensive approach has been developed for the first time to assess the parameters of a drone-based surveillance system. This approach considers drone power consumption, battery technologies, and the balance between energy storage and generation systems. The primary focus is on creating new models, methods, and algorithms to ensure a stable and reliable real-time surveillance system under various operational conditions.

The following scientific and practical results were obtained:

1. A new conceptual model of the power supply system for surveillance complexes based on unmanned aerial vehicles, its diagram of states and transitions between them, which describe the interaction between all elements of the system, has been developed.

2. The methodology for selecting the technology of batteries for the ground part based on a comprehensive optimality criterion, which, unlike the existing ones, is two-stage and takes into account operational, technical and economic requirements, is improved, and it is established that batteries based on lithium-nickel-manganese-oxide and lithium-nickel-cobalt-aluminium-oxide technologies are the best for such applications.

3. A mathematical model of battery capacity has been improved, which, unlike the existing ones, takes into account changes in temperature and atmospheric pressure based on technical data obtained from the manufacturer, which allows to take into account changes in the capacity of the battery of an unmanned aerial vehicle during flight and to specify the duration of the drone's flight.

4. For the first time, mathematical models and methods for estimating the power consumption of a separate section of the surveillance system were developed, which allowed to take into account energy constraints, parameters of the surveillance area, and determine the optimal number of drones required to ensure continuous surveillance.

5. For the proposed new conceptual model of the power supply system of surveillance complexes based on unmanned aerial vehicles, an improved methodology for determining its energy indicators is proposed, which, unlike the existing ones, takes into account the limitations imposed by the parameters of the surveillance area and the continuity of the surveillance process. The use of the proposed methodology based on these indicators, as well as the technical parameters of drones, efficiency of converters, minimum battery life and coordinates of the complex location, made it possible to determine the parameters of the energy storage system and the rated power of photovoltaic converters, which will ensure autonomous operation and continuous surveillance around the entire perimeter of the zone.

The developed models and methodologies have practical significance for designing and improving surveillance systems in security, search-and-rescue missions, agriculture, and other fields. The obtained results enable the optimization of power supply system, the required number of drones and enhance the fundamental capabilities of such systems.

Keywords: power supply system, autonomous power supply system, electric energy storage, photovoltaic converters, energy balance, unmanned aerial vehicle, drone, surveillance system, mathematical model.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	6
ЗМІСТ	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1 КОМПЛЕКСИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ БПЛА – СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ.....	17
1.1 Огляд сучасного стану комплексів спостереження на базі БпЛА	17
1.2 Актуальні виклики в комплексах безперервного спостереження з використанням дронів	23
1.2.1 Забезпечення безперервного спостереження в умовах нестабільного електропостачання	23
1.2.2 Пошук надійного джерела живлення для комплексу безперервного спостереження	25
1.2.3 Оцінка впливу зовнішніх факторів на розряд акумуляторних батарей дронів	27
1.2.4 Оптимізація дальності польоту та кількості дронів для індивідуальних моделей спостереження.....	28
1.3 Сучасні досягнення в дослідженнях систем спостереження на основі дронів та перспективи їх подальшого вдосконалення	32
1.3.1 Розробка концепції енергозабезпечення комплексу безперервного спостереження та топології заряджання дронів	32
1.3.2 Оптимізація кількості необхідних дронів та вдосконалення алгоритму забезпечення безперервного спостереження.....	36
1.3.3 Оптимізація кількості необхідних дронів для забезпечення безперервного спостереження з енергетичними обмеженнями.....	39
1.3.4 Оптимізація маршрутів польоту з урахуванням енергетичних обмежень	41
1.3.5 Розроблення автономної мобільної зарядної станції.....	42
1.3.6 Оптимізація кількості дронів з урахуванням характеристик цільового навантаження	43

1.4 Системи безперервного спостереження на базі дронів з комбінованим електроживленням та можливістю автономної роботи.....	44
1.4.1 Узагальнена концепція комбінованої системи електрозабезпечення	44
1.4.2 Концептуальна модель системи електрозабезпечення	45
1.4.3 Модель спостереження	48
1.5 Оцінка складових споживання електричної енергії дронів.....	51
1.5.1 Визначення основних складових споживання електричної енергії	51
1.5.2 Взаємозв'язок між кількістю двигунів та енергоспоживанням дрону	52
1.5.3 Вплив інших факторів на енергоспоживання дронів для спостереження	52
1.6 Висновки до розділу 1	53
РОЗДІЛ 2 НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ АВТОНОМНИХ КОМПЛЕКСІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ БПЛА.....	
2.1 Узагальнена концепція автономної системи безперервного спостереження за допомогою дронів.....	55
2.2 Вдосконалення методики вибору технології акумуляторних батарей для системи безперервного спостереження на базі дронів.....	57
2.2.1 Існуючі методики порівняння та вибору технологій акумуляторних батарей	57
2.2.2 Вдосконалена методика вибору технологій акумуляторних батарей	60
2.2.3 Апробація запропонованої методики оцінки для вибору технології акумуляторних батарей для наземної станції системи спостереження.....	65
2.3 Моделі та режими роботи акумуляторних батарей, як складових систем безперервного спостереження на базі дронів.....	72
2.4 Вдосконалення моделі ємності акумуляторної батареї для умов змінної температури та атмосферного тиску	76
2.5 Висновки до розділу 2	80
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ БПЛА У СКЛАДІ КОМПЛЕКСУ СПОСТЕРЕЖЕННЯ	
3.1 Оцінка максимальної дальності спостереження для базового профілю польоту	82
3.1.1 Споживання енергії та граничні умови для постійного спостереження.	85
3.1.2 Моделювання процесів у системах безперервного спостереження	87

3.2	Оцінки режимів роботи системи електроспоживання для оптимізованого профілю польоту	94
3.2.1	Можливі профілі польоту	94
3.2.2	Моделювання споживання енергії на політ та вибір оптимального профілю польоту	99
3.2.3	Часові характеристики та детальний профіль польоту.....	105
3.2.4	Моделювання максимально-досяжної дальності польоту	107
3.2.5	Оцінка впливу кількості дронів.....	109
3.3	Висновки до розділу 3	110
РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НАЗЕМНОЇ ЧАСТИНИ КОМПЛЕКСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ ДРОНІВ		112
4.1	Основні компоненти та режими роботи системи електроживлення	112
4.2	Режими роботи системи електроживлення.	114
4.3	Методика визначення параметрів компонентів електроживлення.....	115
4.3.1	Вихідні дані для розрахунків.....	118
4.3.2	Визначення енергетичного навантаження для однієї секції спостереження	119
4.3.3	Розрахунок ємності акумуляторних батарей СЗЕ.....	123
4.3.4	Результати моделювання СЗЕ	125
4.3.5	Розрахунок кількості панелей ФЕС	127
4.3.6	Результати моделювання ФЕС	128
4.4	Оцінювання комбінованого електроживлення та застосування методу оцінки енергетичного балансу.....	131
4.5	Висновки до розділу 4	133
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ ДРОНІВ.....		135
5.1	Електроспоживання в основних профілях польоту	135
5.1.1	Профіль польоту 1	136
5.1.2	Профіль польоту 3	138
5.2	Результати експериментальних досліджень	140
5.2.1	Вплив зовнішніх факторів	141
5.2.2	Різниця між теоретичними та експериментальними робочим струмами навантаження	142

5.2.3	Результати визначення дальності спостереження з урахуванням експериментальних даних	143
5.3	Висновки до розділу 5	145
	ВИСНОВОК.....	147
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	150
	ДОДАТОК А	161
	Список публікацій здобувача.....	161
5.4	Апробація результатів дисертації	163
	ДОДАТОК Б.....	164
5.5	Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи.....	164
	ДОДАТОК В	165
5.6	Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи.....	165
	ДОДАТОК Г.....	165

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БпАК – безпілотний авіаційний комплекс.

БпЛА – безпілотний літальний апарат.

WPT – wireless power transfer (бездротової передачі енергії).

СЗЕ – система збереження енергії.

ФЕС – фотоелектрична система.

ФЕП – фотоелектрична панель.

ВЕС – вітрова електростанція.

СНЕ – система накопичення енергії.

CC – constant current (постійний струм).

CV – constant voltage (постійна напруга).

SOC – state of charge (стан заряду).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми досліджень

Сучасний розвиток технологій стимулює постійне вдосконалення систем автоматизації та безпілотних рішень, які відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного збору даних, спостереження й управління у різних галузях. Системи на основі безпілотних літальних апаратів (дронів) є одним із нових напрямів цього розвитку завдяки їхній мобільності, гнучкості та здатності виконувати завдання у важкодоступних або небезпечних для людини умовах.

Одним із перспективних способів використання систем на базі дронів є застосування їх груп, що працюють у координації між собою для виконання завдань моніторингу та спостереження. Групова робота дронів дозволяє масштабувати зони інтересу шляхом розподілу завдань та синхронізації роботи окремих елементів системи. Застосування мультикоптерних дронів, рушії яких приводяться в дію електричними двигунами з живленням від акумуляторних батарей, дозволяє застосовувати такі дрони у складі автономних (без участі людини) систем, в яких дрони виконують поставлені задачі, підзаряджаючись в автоматичному режимі на базовій станції комплексу спостереження. Однак одним з викликів ефективній роботі таких систем постає забезпечення тривалої експлуатації при обмежених енергетичних ресурсах. Зважаючи на це, комплексна оцінка та оптимізація енергоспоживання таких систем є актуальним науковим завданням.

Основна проблематика полягає у необхідності врахування впливу на енергетичні параметрів системи електроживлення як дрону, так і наземної базової станції значної кількості факторів, що включають параметри польоту дронів та відстань до точок спостереження, характеристики акумуляторних батарей, зовнішні умови та загальну взаємодію між компонентами системи. Для вирішення цих завдань необхідне застосування наукових методів, таких як системний аналіз, математичне моделювання, експериментальні дослідження, які дозволять розробити нові методи, методики та моделі, та за результатами їх застосування, оптимізувати автономні системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі дронів.

Вибір теми дослідження зумовлений потребою у створенні автономних систем електроживлення комплексів спостереження на основі груп дронів, які здатні забезпечувати безперервну роботу в умовах обмежених енергетичних ресурсів.

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

Дисертаційна робота виконана в Національному університеті “Чернігівська політехніка” за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки України “Енергетика та енергоефективність”.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності автономних систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів та їх складових.

Для досягнення мети поставлено наступні завдання:

1. Аналіз чинників споживання електричної енергії складовими безпілотного електричного літального апарату в різних режимах польоту та розробка відповідних математичних моделей.
2. Синтез концептуальної моделі електрозабезпечення комплексу безперервного спостереження на основі безпілотних літальних апаратів.
3. Синтез методики вибору технології акумуляторних батарей для використання у наземній частині комплексу безперервного спостереження.
4. Розробка вдосконаленої математичної моделі акумуляторної батареї безпілотного літального апарату, яка враховуватиме вплив зміни параметрів навколишнього середовища під час польоту.
5. Синтез методики оцінки енергетичних параметрів окремої секції комплексу спостереження та розробка відповідних математичних моделей, їх застосування задля визначення оптимальної кількості безпілотних літальних апаратів, здатних забезпечувати безперервне спостереження.
6. Синтез методики визначення енергетичних параметрів автономної системи електроживлення комплексу безперервного спостереження на базі мультикоптерних дронів з урахуванням параметрів зони спостереження.
7. Проведення експериментальних досліджень для перевірки отриманих аналітичних результатів.

Об'єктом дослідження є електроенергетичні процеси в системах електроживлення наземних та повітряних частин комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів.

Предметом досліджень є оптимізація енергетичних параметрів систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів з метою забезпечення їх енергетичної автономності.

Методи дослідження

У роботі для досягнення мети та поставлених наукових задач використано наступні методи дослідження: системний аналіз для визначення ключових параметрів енергоспоживання та оптимізації профілів польоту, математичне та комп'ютерне моделювання, регресійний аналіз, експериментальні дослідження та натурні експерименти.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше розроблено концептуальну модель автономної системи електроживлення комплексу безперервного спостереження на базі дронів, для якої запропоновано діаграму станів та переходів між ними, які описують взаємодію між всіма елементами системи.
2. Вдосконалено існуючу методику вибору технології акумуляторних батарей на основі комплексного критерію оптимальності, яка на відміну від існуючих є двоетапною та враховує експлуатаційні, технічні та економічні вимоги.
3. Вдосконалено існуючу математичну модель ємності акумуляторних батарей, яка на відміну від існуючих враховує зміну температури та атмосферного тиску на основі технічних даних отриманих від підприємства-виробника.
4. Вперше розроблено математичні моделі та методику оцінки енергоспоживання окремої секції системи спостереження, яка дозволяє врахувати енергетичні обмеження, параметри зони спостереження, та визначити оптимальну кількість дронів, необхідних для забезпечення безперервного спостереження.

5. Вдосконалено методику визначення енергетичних параметрів системи електроживлення комплексу безперервного спостереження на базі мультикоптерних дронів, яка на відміну від існуючих враховує обмеження, що накладаються параметрами зони та безперервністю процесу спостереження.

Практичне значення отриманих результатів

Результати досліджень можуть бути використані для проєктування автономних систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів, які будуть оптимальними за енергетичними параметрами для застосування у сферах безпеки, екологічного моніторингу та інфраструктурного контролю.

Розроблені методики дозволяють оптимізувати використання ресурсів акумуляторів дронів, що знижує витрати на експлуатацію таких систем.

Розроблені математичні моделі можуть бути впроваджені у програмне забезпечення для управління групами дронів з метою забезпечення ними функцій безперервного моніторингу визначеного периметра.

Особистий внесок здобувача

Наукові положення, теоретичні та практичні результати, викладені в дисертації, отримані здобувачем особисто.

Апробація результатів дисертації

Основні результати дослідження були представлені на 6 науково-технічних конференціях, а також опубліковані в 6 наукових публікаціях, серед яких 5 статей у періодичних наукових виданнях, що входять до категорії Б, та 1 публікація, яка включена до міжнародної наукометричної бази Scopus (з присвоєним ISSN та ISBN).

Обсяг і структура дисертації

Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 126 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 168 сторінок, в тому числі 160 сторінок основного змісту, 61 рисунків, 21 таблиць.

РОЗДІЛ 1

КОМПЛЕКСИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ БПЛА – СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

1.1 Огляд сучасного стану комплексів спостереження на базі БпЛА

Сучасні безпілотні літальні апарати (БпЛА) активно використовуються для вирішення широкого спектру завдань, включаючи моніторинг, розвідку, логістику, екологічний контроль, сільське господарство та безпеку. Завдяки своїм унікальним конструктивним особливостям і можливостям автономного функціонування, БпЛА здатні виконувати завдання в різноманітних умовах та у важкодоступних районах, що значно підвищує їхню цінність як інструменту для оперативного збору даних. Крім того, значний прогрес в енергоефективності та управлінні рухом БпЛА сприяє збільшенню тривалості їх роботи, що особливо важливо для забезпечення постійного моніторингу у віддалених зонах.

Сучасна класифікація БпЛА у цивільній сфері не визначена, та відрізняється в залежності від багатьох факторів, однак для цивільних завдань можливо використовувати загальну класифікацію державної авіації України, що наведена в Правилах виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України [1], яка поділяє їх на кілька основних категорій, які враховують масу, висоту польоту, тривалість роботи та призначення. Наприклад, до класу I належать легкі БпЛА, що використовуються переважно для короткотривалих розвідувальних завдань на низьких висотах, тоді як клас III включає великі стратегічні БпЛА, здатні до виконання багатогодинних завдань на значних висотах протягом тривалого часу. У даній дисертації основна увага зосереджена на БпЛА для спостереження, найкращими для таких завдань є мікро та малі БпЛА, які належать до I класу, в яких в якості рушія використовуються гвинти, які приводяться в рух електричними двигунами, що в свою чергу, живляться від акумуляторних батарей. Вони забезпечують оптимальний баланс між автономністю, дальністю польоту та здатністю до швидкого розгортання в зоні інтересу, що робить їх ефективними для забезпечення оперативного моніторингу. Такі БпЛА здебільшого мають мультироторну схему та відомі як дрони.

Одним з новітніх способів застосування дронів є використання їх груп для спостереження за окремими об'єктами, так і за визначеними маршрутами [2-8]. У порівнянні з традиційними методами спостереження, використання груп дронів для виконання складних завдань спостереження є більш вигідним і стійким варіантом, оскільки вони можуть охоплювати великі та важкодоступні території за короткий проміжок часу, зменшуючи втручання людини.

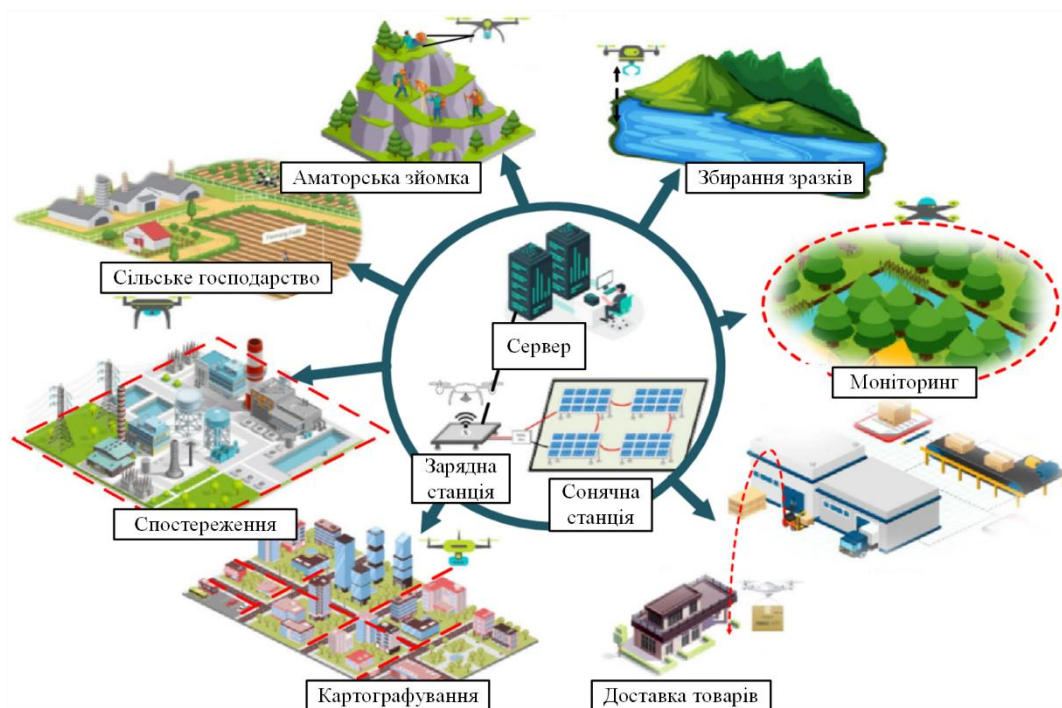


Рисунок 1.1 - Можливі варіанти застосування дронів [9]

Застосування груп дронів набуло широкого поширення в різних галузях завдяки їхній здатності до кооперативної роботи та ефективності виконання завдань. Приклади застосувань груп дронів показано на рисунку 1.1. В аграрному секторі дрони використовуються в закритих агросистемах для моніторингу мікроклімату та підтримки безпечного середовища, оптимального для росту рослин. Завдяки їхній здатності до точного збору даних, такі системи забезпечують своєчасне виявлення відхилень у температурі, вологості та освітленості, що дозволяє оперативно регулювати умови, необхідні для підвищення врожайності [10-14].

Групи дронів також успішно застосовуються для інфраструктурного моніторингу, зокрема для спостереження за лініями електропередач, автошляхами,

транспортними потоками та іншими об'єктами [3, 5, 8, 15, 16]. Дрони забезпечують безперервний збір інформації, що дозволяє вчасно виявляти пошкодження або загрози, мінімізуючи ризик аварійних ситуацій. Екологічний моніторинг є ще однією важливою сферою застосування, де дрони використовуються для оцінки рівня забруднення повітря, води та ґрунту, що сприяє виявленню джерел забруднення та вжиттю відповідних заходів [2, 17]. У сфері безпеки дрони ефективно застосовуються для охорони кордонів та патрулювання великих територій, а також для швидкого реагування в надзвичайних ситуаціях [18, 19]. Групи дронів є незамінними у пошуково-рятувальних операціях, забезпечуючи оперативне спостереження та розвідку в зонах стихійних лих, що дозволяє знизити час реагування та врятувати більше життів [7, 20, 21, 22].

У такому випадку актуальною задачею стає підвищення енергоефективності та автономності, покращення взаємодії між дронами, а також процесу їх заряджання. Однією з найважливіших проблем в таких системах стає покращення системи електроспоживання та електроживлення, оскільки саме це впливає на ефективність використання дронів в системах спостереження.

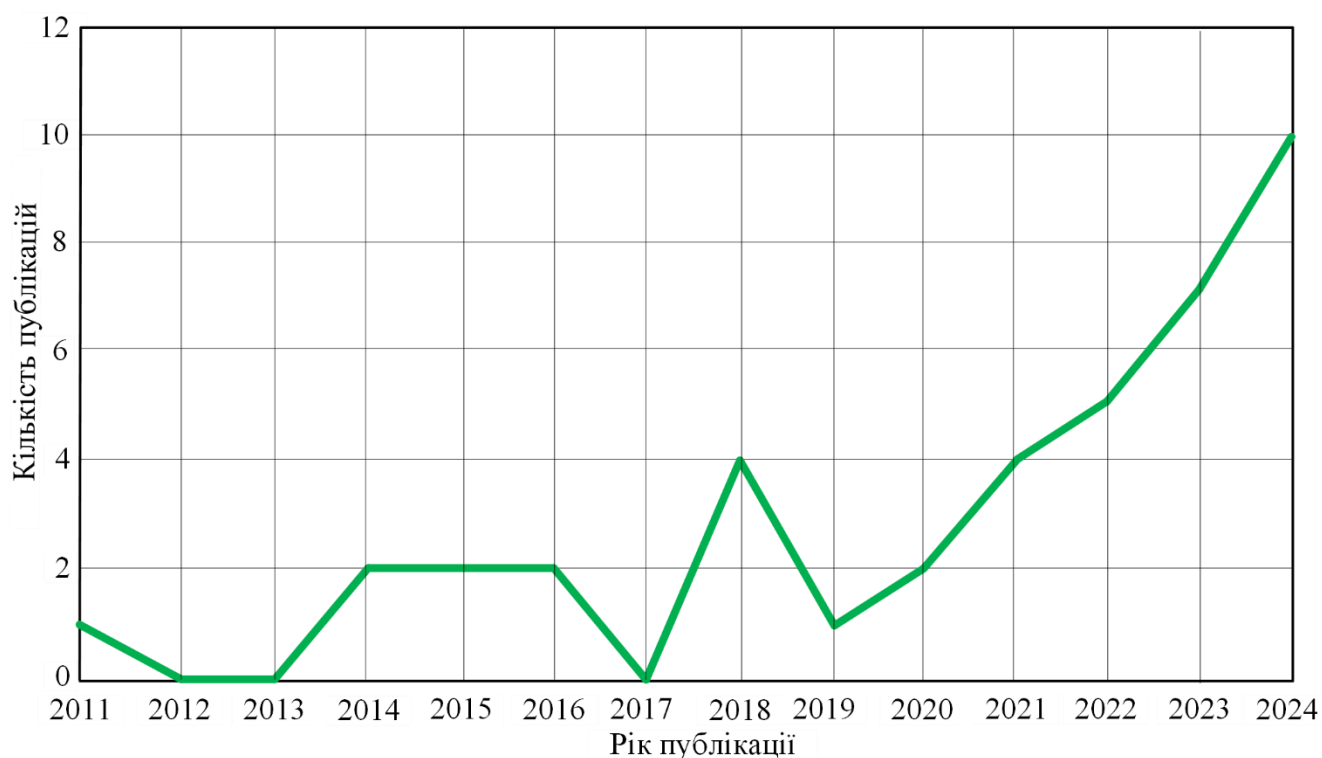


Рисунок 1.2 - Розподіл публікацій за роками

Підвищення ефективності енергетичних систем, де використовуються групи дронів для спостереження, є предметом інтенсивних досліджень науковців усього світу. З метою пошуку наукових публікацій за даною темою було використано метод на основі Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) [23], який є загальноприйнятим для виконання систематичного огляду академічних публікацій. Загалом було знайдено 39 опублікованих досліджень, перші з яких датуються 2011 роком. Аналіз розподілу публікацій за роками, що наведено на рисунку 1.2, показує про різке зростання їх кількості після 2021 року, що, ймовірно, пов'язано зі стрімким зростанням інтересу до використання роїв дронів, а також з успішним досвідом використання дронів класу I для спостереження під час військових дій в Україні.

У першу трійку країн за кількістю публікацій за тематикою увійшли Китай (11), США (5) та Корея (3), що наведено на рисунку 1.3.

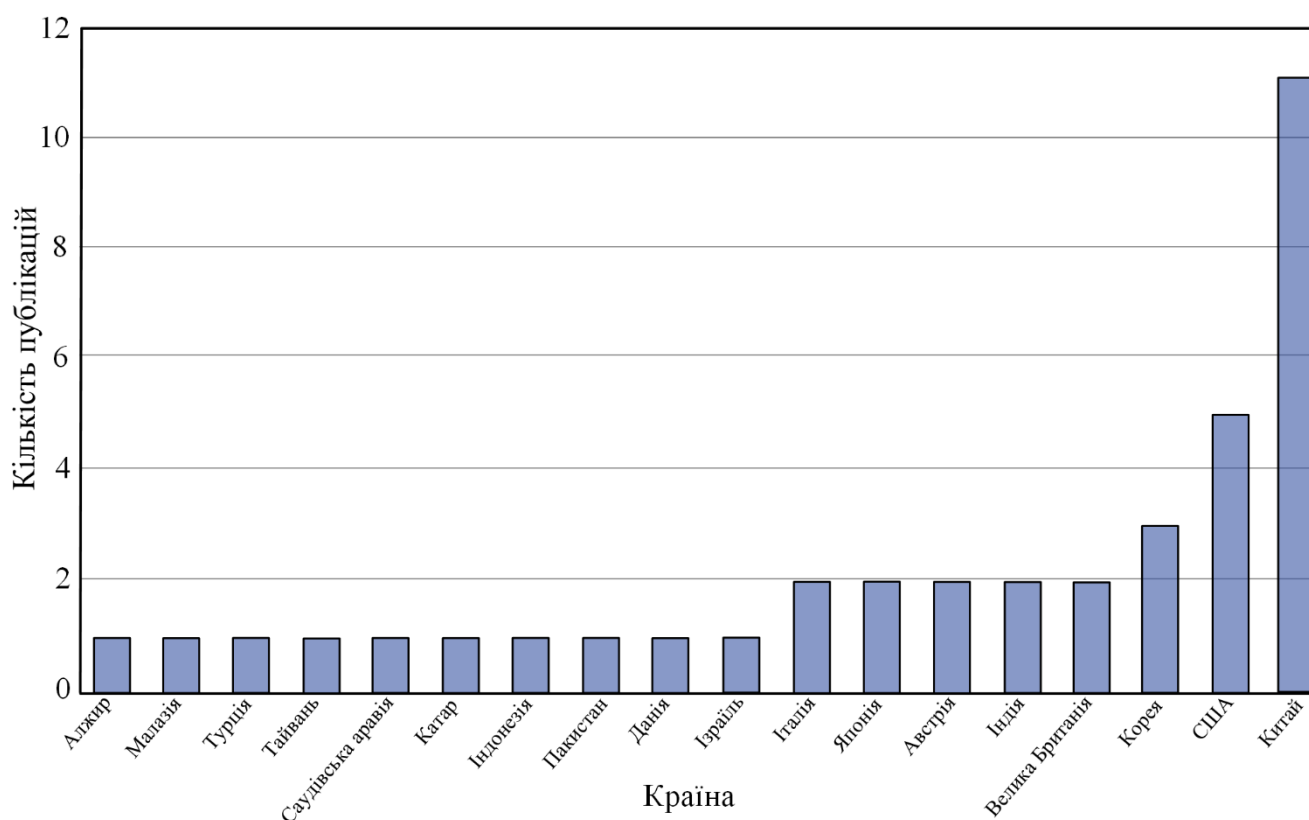


Рисунок 1.3 - Розподіл академічних публікацій за країнами

Китай та США входять до першої трійки країн за кількістю наукових публікацій на тему енергоефективного використання груп дронів, що є результатом значних інвестицій у дослідження та розвиток технологій. Це підкреслює важливість цієї

тематики для наукового та технологічного прогресу. Велика кількість публікацій з цих країн також свідчить про глобальний інтерес до проблеми і її значення для майбутніх інновацій.

Серед відібраних публікацій найбільша кількість цитувань, за даними “Google scholar”, у публікація автора Di Franco, С. “Energy-aware coverage path planning of UAVs”, яка має 426 цитувань [20]. В цьому дослідженні розглядається питання розробки енергозберігаючого профілю польоту групи дронів, з урахуванням впливу зовнішніх факторів.

Найпоширенішою проблемою, аналізуючи дані публікацій, є недостатня висвітленість аспектів координації та енергоефективності груп дронів, зокрема планування маршрутів і територіального покриття з урахуванням енергетичних обмежень, комунікації з базовими станціями, а також постійного обслуговування та підзарядки. Ці проблеми підкреслюють важливість розробки ефективних нових алгоритмів і систем управління для забезпечення безперервного спостереження та підтримки роботи дронів у складних умовах спостереження з врахуванням режимів роботи системи електроживлення дронів, на що й спрямована дана дисертація.

Дослідження щодо енергоефективності систем, де застосовуються групи дронів для спостереження, можна розділити на шість основних категорій:

- оптимізація енергоспоживання окремих дронів;
- оптимізація топології та енергоефективне керування траєкторією польоту;
- оптимізація енергоспоживання груп дронів;
- оптимізація безперервного забезпечення системи електроенергією для заряджання дронів;
- колаборація груп дронів та наземних роботизованих комплексів;
- оптимізація енергоефективності при патрулюванні за допомогою груп дронів.

Деякі статті можуть охоплювати кілька категорій, проте для кожної статті була вибрана найбільш відповідна для неї категорія. Таблиця 1.1 демонструє класифікацію та розподіл проаналізованих статей за категоріями.

Таблиця 1.1

Розподіл включених статей за категоріями

№ з/п	Категорія	Кількість публікацій	Загальна частка від усіх публікацій
1.	Оптимізація енергоспоживання окремих дронів [2], [5], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]	11	28,20%
2.	Оптимізація топології та енергоефективне керування траєкторією польоту дронів [21], [34], [37], [42]	4	10,26%
3.	Оптимізація енергоспоживання груп дронів [3], [7], [20], [43], [44], [46], [53]	7	17,95%
4.	Оптимізація безперервного забезпечення системи електроенергією для заряджання дронів [4], [9], [36], [41], [47], [55], [57], [58], [59]	9	23,08%
5.	Оптимізація енергоефективності при патрулюванні за допомогою груп дронів [8], [49], [51]	3	7,69%
6.	Колаборація груп дронів та наземних роботизованих комплексів [15], [16], [18], [22], [52]	5	12,82%

Результати розподілу публікацій за категоріями показують, що більшість розглянутих публікацій належать до категорії оптимізації енергоспоживання окремих дронів (з часткою 28.20%), за нею слідує оптимізація безперервного забезпечення системи електроенергією для заряджання дронів (23.08%), що говорить про актуальність даних тем, які також відповідають тематиці дисертаційного дослідження.

Системи спостереження у зазначених дослідженнях використовують алгоритм функціонування, що складається із забезпечення групою дронів обслуговування

певної цільової зони, перебуваючи в її межах, а також їх періодичного повернення до зарядних станцій для підзарядки або заміни акумулятора.

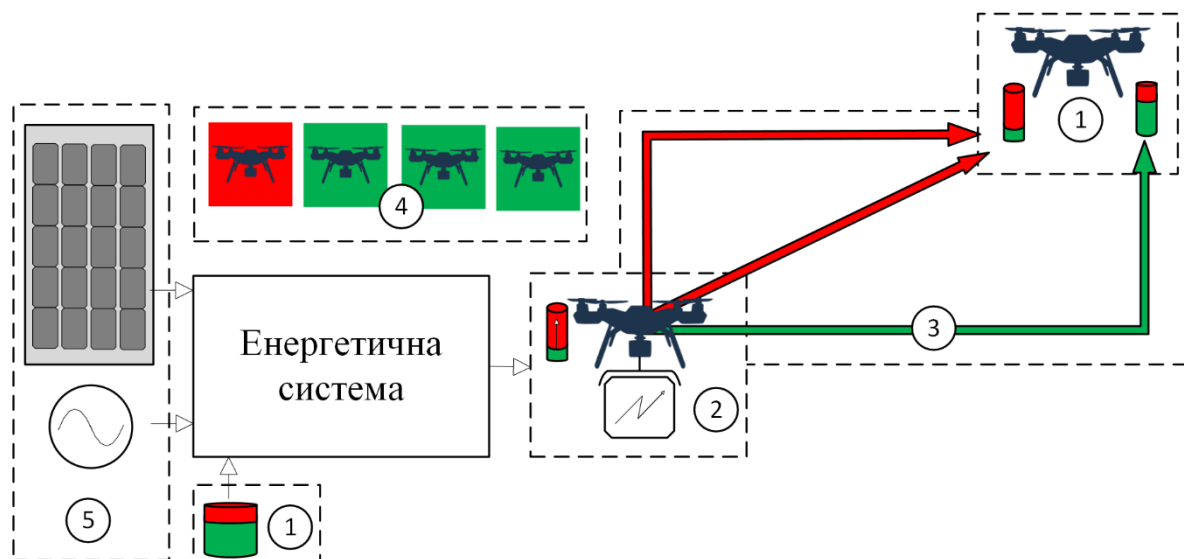


Рисунок 1.4 - Типова структура системи спостереження

Узагальнюючи виконаний аналіз, типова структура системи спостереження на базі дронів може бути представлена на схемі, як показано на рисунку 1.4, де 1 – оптимізована система збереження електроенергії (наземної та повітряної компоненти), 2 – оптимізовані режими роботи зарядної станції, 3 – оптимізовані профілі польоту з точки зору електроспоживання, 4 – оптимізація кількості дронів для безперервного спостереження, 5 – складові забезпечення автономності системи.

1.2 Актуальні виклики в комплексах безперервного спостереження з використанням дронів

1.2.1 Забезпечення безперервного спостереження в умовах нестабільного електропостачання

Один із ключових викликів у комплексах безперервного спостереження з використанням дронів полягає в забезпеченні їх електричною енергією для підзарядки у віддалених регіонах, або регіонах із нестабільним електропостачанням, що безпосередньо впливає на безперервність та масштабованість системи. Для систем спостереження на базі дронів, які призначені для надання оперативної (актуальної) інформації щодо ходу розвитку стихійних лих та катастроф, енергозабезпечення може відігравати вирішальну роль у збереженні життя та здоров'я людей.

Сейсмічна активність, виверження вулканів, або інші небезпечні події можуть вплинути на стабільність електроживлення, в такому випадку залишається актуальною проблемою забезпечення системи спостереження на базі дронів надійним джерелом електроенергії для можливості оперативної підзарядки. Одним з рішень цієї проблеми є використання мобільних наземних засобів (автобуси, наземні роботизовані системи тощо) в якості зарядних станцій [15, 16, 26, 41, 43]. Така концепція дозволяє деякий час, до відновлення основних (міських) електромереж, забезпечувати зарядні станції дронів електроенергією. Водночас такі наземні засоби використовуються для доставки дронів ближче до зони спостереження та у якості веж зв'язку, як показано на рисунку 1.5.

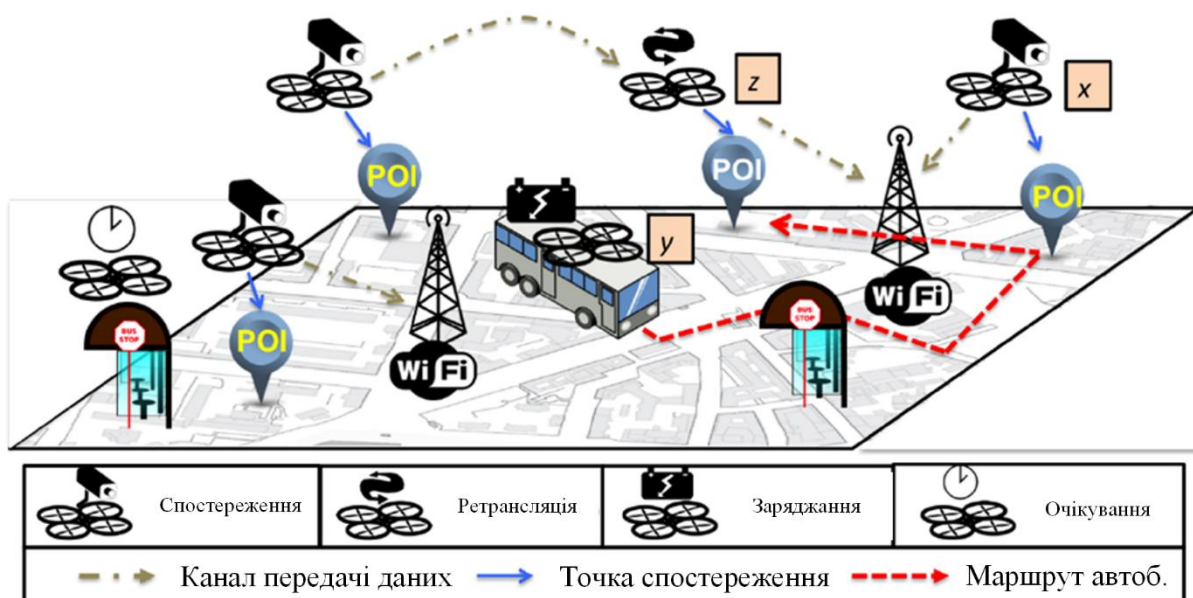


Рисунок 1.5 - Пропонована в дослідженні [15] архітектура заряджання дронів з допомогою наземних засобів.

Ще одним рішенням зазначеної проблеми є зменшення кількості дронів та оптимізація їх енергоспоживання шляхом адаптації маршрутів польоту з урахуванням енергетичних обмежень та обмежень каналів керування [7]. У цьому випадку дрони використовуються для виконання окремих завдань, спрямованих на моніторинг певних об'єктів для зменшення загальної потреби в електроживленні. Загалом дана проблема станом на сьогодні ще не вирішена для великих за масштабом моделей спостереження, та є актуальним науковим завданням.

Водночас, для систем спостереження, які призначені для підтримки безпечного середовища для росту рослин в землеробстві, однією з основних проблем є

віддаленість від електричних мереж та недостатня потужність для стабільного енергозабезпечення. З метою вирішення цих проблем в дослідженні [53, 54] розроблено адаптивні алгоритми підзарядки групи дронів, які враховують деякі обмеження щодо електрозабезпечення системи. В дослідженні [52] запропоновано використання технологій відновлюваної енергії, таких як сонячна енергія або енергія вітру для покриття потреби зарядних станцій дронів в електроенергії.

Основні дослідження, що вивчають проблеми забезпечення безперервного спостереження за допомогою дронів в умовах нестабільного електропостачання, здебільшого обмежуються теоретичними розрахунками та моделюванням. Такі дослідження потребують додаткового підтвердження експериментальними даними, отриманими під час польотів дронів в реальних або наближених до реальних умовах. Відсутність польових випробувань означає, що розробки можуть не враховувати важливі фактори, такі як нестабільні погодні умови, неочікувані втрати енергії та інші обмеження, які значно впливають на продуктивність дронів. Така невизначеність може спричинити збої у роботі системи спостереження, а також підвищити витрати на адаптацію обладнання та алгоритмів для реальних умов, що ускладнить забезпечення безперервного спостереження у надзвичайних ситуаціях. В цьому випадку також залишаються невирішеними питання щодо ефективності акумуляторних батарей як системи загалом, так і дронів з урахуванням умов їхнього застосування (зміна параметрів навколишнього середовища під час польоту).

1.2.2 Пошук надійного джерела живлення для комплексу безперервного спостереження

У випадку автономної роботи, енергоспоживання групи дронів накладає високі вимоги до продуктивності акумуляторних батарей системи спостереження, а також до батарей самих дронів [18, 28, 36]. У відомих наукових дослідженнях пропонується вирішувати ці проблеми шляхом покращення енергоефективності бортових компонентів дронів [31, 32], використання бездротової передачі енергії під час польоту [18, 28, 36, 55] та оптимізації планування маршрутів польотів і заряджання на станціях [3, 30] як показано на рисунку 1.6. Крім цього, комплексний аналіз досліджень вказує на необхідність додаткового врахування параметрів безпеки застосування, вартості експлуатації, значення ефективності в аспектах

енергозбереження та екологічних викидів для вибору акумуляторних батарей в автономних системах спостереження на базі дронів.

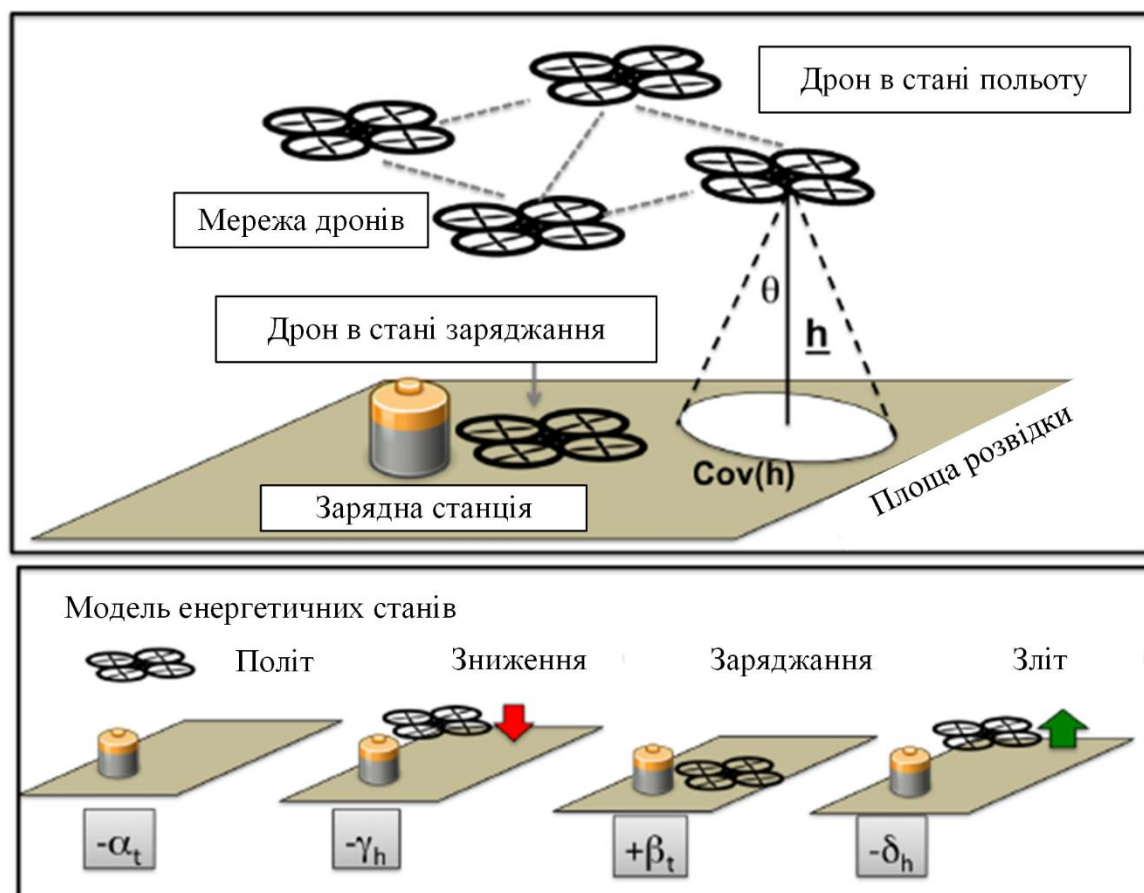


Рисунок 1.6 - Система спостереження на базі дронів з зарядною станцією на землі. [30]

Системи, що використовують бездротову передачу енергії, мають кілька недоліків порівняно із традиційними методами заряджання. Серед них – необхідність стабілізації дронів у повітрі для належної взаємодії з зарядним пристроєм та значні втрати енергії під час її передачі до дрону.

Хоча для систем зі схожим принципом роботи питання вибору надійного джерела живлення здебільшого вирішене, для систем спостереження на базі дронів із автономною або комбінованою системою електроживлення залишається актуальною проблема вибору відповідного типу акумуляторної батареї, здатної забезпечувати зарядні станції електроенергією. Така батарея має відповідати низці вимог, серед яких компактність, висока ємність, стійкість до несприятливих погодних умов тощо.

Недостатня увага до вирішення цих проблем може призвести до зниження енергоефективності та надійності системи спостереження, що, своєю чергою, може

спричинити збої в роботі зарядних станцій. Це, у свою чергу, спричинить перебої в безперервності спостереження, зниження оперативності реагування та збільшення витрат на обслуговування і часту заміну батарей, що знижує ефективність системи в умовах реальної експлуатації.

Загалом, ненадійність джерела живлення загрожує зменшенням ефективності спостереження, а також підвищує ризики у разі використання дронів для моніторингу критичних об'єктів або в умовах, де важлива безперервність спостереження. Одночасно, вплив зовнішніх факторів на розряд акумуляторних батарей дронів є важливим чинником у можливості виконання завдань комплексом безперервного спостереження.

1.2.3 Оцінка впливу зовнішніх факторів на розряд акумуляторних батарей дронів

Основні зовнішні фактори, що впливають на розряд батарей, включають температуру повітря, вологість, атмосферний тиск і швидкість вітру. Температурні умови безпосередньо впливають на хімічні процеси всередині акумуляторних батарей, знижуючи їхню ефективність у низьких і високих температурах. Низькі температури можуть зменшувати ємність батареї та її здатність швидко заряджатися, що ускладнює виконання завдань за умов, наприклад, зимових спостережень або пошуково-рятувальних операцій [7]. Крім того, атмосферний тиск і швидкість вітру можуть суттєво впливати на енергоспоживання дронів під час польоту.

Оцінка цих факторів є важливою для точного моделювання розряду батарей у реальних умовах експлуатації дронів, та дозволяє адаптувати маршрути та режим польоту для зменшення витрат енергії та збільшення тривалості виконання завдання. Приклад перепланування маршруту польоту в залежності від погодних умов наведений на рисунку 1.7.

Одночасно, для систем, які використовують бездротову зарядку [51, 57], висувуються додаткові вимоги щодо впливу зовнішніх факторів, таких як пориви вітру, дощ, сніг, туман тощо. Для таких систем актуальною залишається проблема розробки точної математичної моделі для планування польотів і заряджання груп дронів, яка враховувала б вплив цих зовнішніх факторів [26, 58]. З урахуванням

викладеного, ще одним важливим чинником у можливості виконання завдань комплексом безперервного спостереження є оптимізація дальності польоту та кількості дронів.

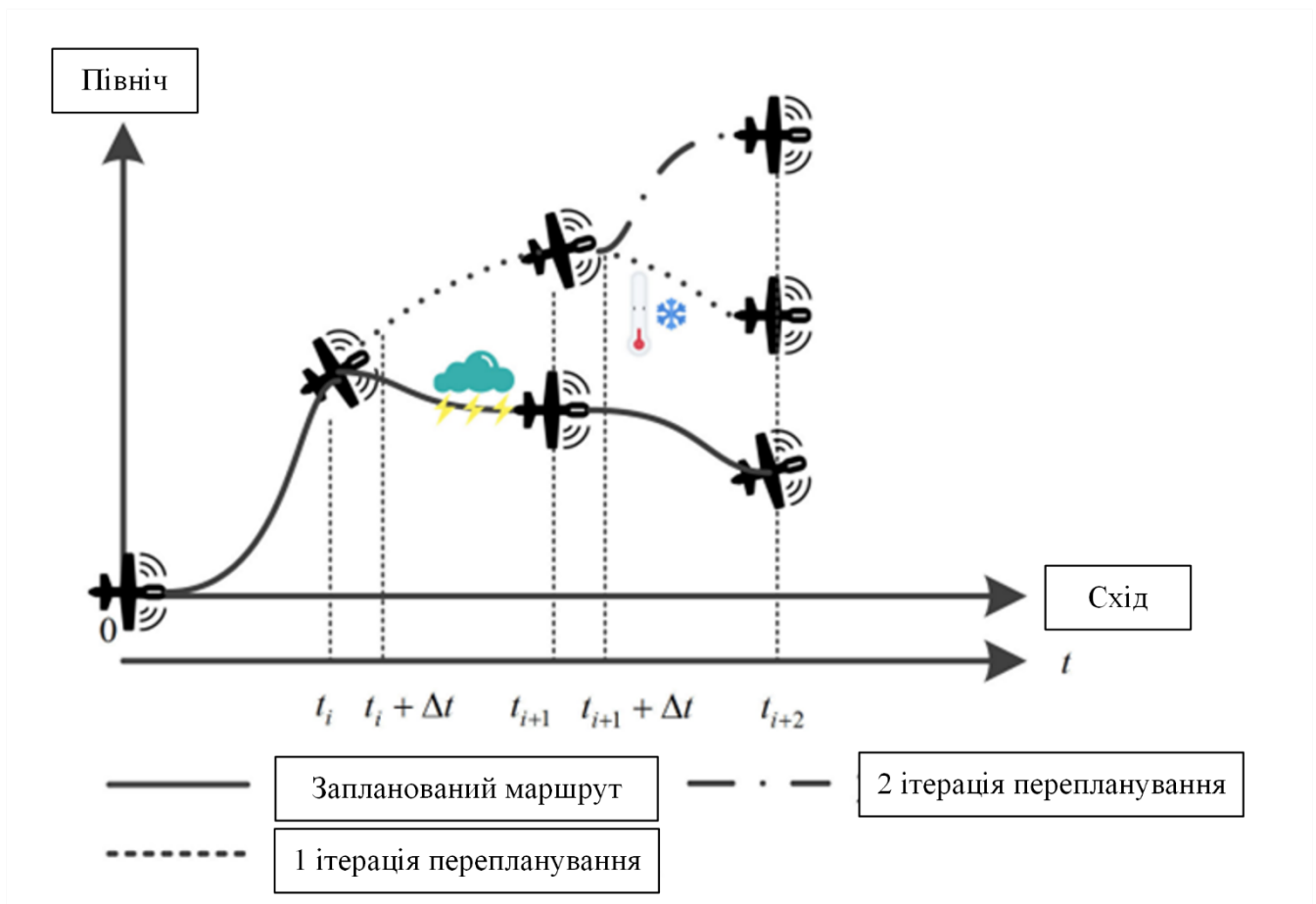


Рисунок 1.7 - Приклад перепланування маршруту польоту в залежності від погодних умов [56]

1.2.4 Оптимізація дальності польоту та кількості дронів для індивідуальних моделей спостереження

Використання груп дронів для боротьби зі стихійними лихами та катастрофами стикається з проблемою точного визначення максимальної дальності польоту та площі, яку можна забезпечити безперервним спостереженням [22, 34, 49]. Це створює ризик пропустити нові загрози, такі як пожежі, зсуви чи інші небезпечні події, які можуть швидко поширюватися та ставити під загрозу життя людей і рятувальників. Одним із нових варіантів вирішення цієї проблеми є використання ретрансляторів зв'язку для підвищення дальності покриття, як показано на Рисунку 1.8. Це, своєю чергою, потребує балансування енергії в системі для підтримання визначеної

топології польоту, що безпосередньо впливає на дальність передачі даних та керованість дронів [49]. Ці питання пропонується вирішувати через розробку нових алгоритмів оптимізації електроспоживання дронів з урахуванням індивідуальних моделей спостереження [2, 4].

Вирішення цих проблем є критично важливим для надання своєчасної, точної та безперервної інформації в зонах катастроф, щоб рятувальні служби могли оперативно приймати рішення, мінімізуючи ризики для людей та обмежуючи збитки від стихійних лих.



Рисунок 1.8 - Модель системи спостереження на базі дронів з ретрансляторами запропонований в дослідження [49]

Ще одним актуальним проблемним питанням, для спостереження за протяжними ділянками такими, як лінії електропередач або автомагістралі, є недостатня ємність акумуляторних батарей дронів для польоту по таким маршрутам польоту [5, 8]. Цю проблему пропонується вирішити за допомогою бездротової зарядки від лінії електропередач та оптимізації витрат ємності акумуляторної батареї дрону під час польоту, а також вдосконалення процедури заряджання та заміни дронів спостереження [8, 27]. Тривалий час заряджання дронів для таких систем спричиняє “ланцюгову” реакцію, яка вимагає оптимізації всіх параметрів комплексу безперервного спостереження [59]. Збільшення часу заряджання призводить до

необхідності збільшення кількості дронів у системі, а також розробки складніших алгоритмів управління чергою заряджання. Це, своєю чергою, збільшує навантаження на зарядну станцію та підвищує загальні вимоги до виділеної потужності для забезпечення заряджання всіх дронів у системі. Це значно підвищує витрати на закупівлю та обслуговування додаткових дронів і їх акумуляторів, що впливає на бюджет і ресурси для обслуговування інфраструктури.

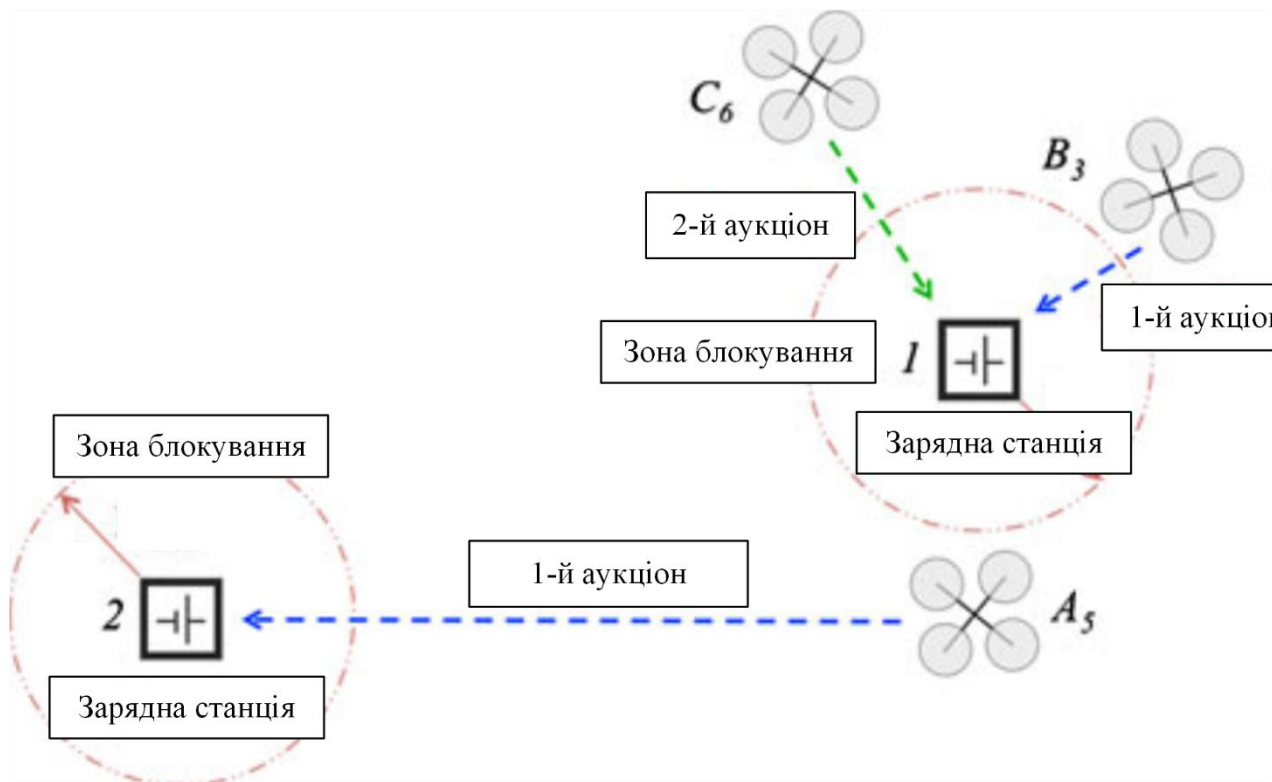


Рисунок 1.9 - Приклад заряджання дронів використовуючи алгоритм аукціонів [4]

Одночасно, використання кількох зарядних станцій може призвести до неузгодженого прибуття декількох дронів одночасно на одну зарядну станцію, що може викликати зіткнення кількох дронів у повітрі або втрати ємності бортової акумуляторної батареї на очікування в “черзі” на заряджання. Дану проблему пропонується вирішити за допомогою використання алгоритму на базі «аукціонів» [4], де зарядна станція визначається в залежності від дальності дрона до неї та швидкості підльоту дрона, як показано на рисунку 1.9.

Без вирішення зазначених проблем надійність систем спостереження значно знизиться, що загрожує безпеці об'єктів інфраструктури та підвищує ризики виникнення надзвичайних ситуацій на них.

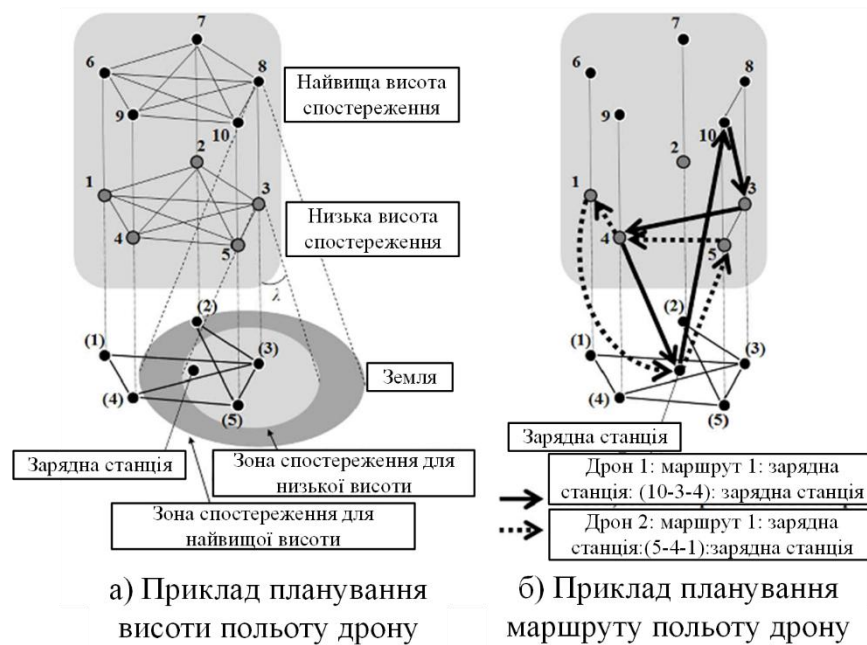


Рисунок 1.10 - Приклад програмування польоту дрону з урахуванням енергетичних обмежень та характеристик цільового спорядження запропонованого в дослідженні [21]

Як встановлено дослідниками, основні витрати енергії припадають на зліт, посадку та переміщення до зони спостереження [29, 34, 44]. Неефективна топологія польоту та профілі руху дронів підвищують розряд акумуляторів, знижуючи тривалість і ефективну дальність польоту. Автори досліджень [34, 37] пропонують автономний централізований алгоритм керування для досягнення постійного спостереження кількома дронами з урахуванням комбінованих енергетичних і комунікаційних обмежень, шляхом розбиття маршруту польоту на окремі комірочки.

Автори досліджень [44] пропонують енергоефективну топологію руху дронів за допомогою адаптивних програмованих алгоритмів польоту. В свою чергу автори дослідження [21] пропонують мінімізувати дальність польоту дрону шляхом покращення характеристик цільового спорядження дрону та його фотографічних характеристик, як показано на рисунку 1.10. В своє чергу, в роботі [29] пропонуються енергоефективні профілі польоту для зльоту, посадки та горизонтального польоту дронів.

Таким чином, розв'язання проблем забезпечення безперервного спостереження за допомогою груп дронів у критичних ситуаціях вимагає комплексного підходу до вибору джерел живлення, маршрутів та алгоритмів керування. Використання

бездротової передачі енергії, застосування ретрансляторів зв'язку та оптимізація топології польотів забезпечують розширення покриття, але водночас вимагають додаткової уваги до стабілізації польоту та балансування енергоспоживання. Для подовження польоту дронів над протяжними ділянками, такими як лінії електропередач, актуальним є вирішення питань щодо забезпечення їх безперервної зарядки та мінімізації енерговитрат. Невирішеність цих питань може знизити надійність систем спостереження та підвищити ризики у випадках застосування дронів для моніторингу критичних об'єктів. Пошук і впровадження енергоефективних алгоритмів, зокрема тих, що враховують оптимальні профілі польоту дронів (зліт, горизонтальний політ та посадка), є перспективними напрямками, що допоможуть зменшити експлуатаційні витрати, продовжити час безперервного спостереження та знизити ризики для систем у реальних умовах. Вибір профілю польоту з урахуванням умов навколишнього середовища та енергетичних обмежень дозволяє зменшити втрати енергії під час зльоту та посадки, а також підвищити ефективність польоту на маршрутах, що значно покращує загальну продуктивність комплексу безперервного спостереження та знизити ризики для систем у реальних умовах.

1.3 Сучасні досягнення в дослідженнях систем спостереження на основі дронів та перспективи їх подальшого вдосконалення

1.3.1 Розробка концепції енергозабезпечення комплексу безперервного спостереження та топології заряджання дронів

Побудова моделей автономних та комбінованих систем електроживлення для різних застосувань є предметом інтенсивних досліджень науковців усього світу. Серед багатьох наукових публікацій де вже реалізоване комбіноване або автономне електрозабезпечення, варто звернути увагу на наступні результати.

Однією з найбільших станом на сьогодні сфер застосування автономних енергетичних систем є енергозабезпечення зарядних станцій електромобілів. Зокрема, в роботі [60] авторами було запропоновано модель системи заряджання електромобілів, з використанням електроенергії, що генерується фотоелектричною системою. Натурним експериментом виявлено, що найбільше навантаження на

систему спостерігається вранці, коли сонячна електростанція не виробляє достатньої кількості електроенергії для зарядки електромобілів. В дослідженні в наслідок економічних обмежень не враховувалось довготривале забезпечення системи за допомогою акумуляторних батарей, а також відсутній розрахунок кількості фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) та додаткової енергії з мережі, яка повинна компенсувати недостачу енергії від ФЕП. В роботах [61-65] фокус досліджень полягає у моделюванні гібридної системи для заряджання електромобілів, де кількість сонячних панелей обмежується доступною площею паркувального місця, а в деяких випадках – також і формою навісів для авто. Для такої зарядної станції система використовує в основному електроенергію від мережі і меншій мірі – від фотоелектричної системи. Авторами пропонується заряджати електромобілі повільніше, з метою зменшення витрат на використання електроенергії від мережі з причини її високої вартості. В продовження цього питання, автори досліджень [66-68] висвітлюють проблему неузгодженості кількості електроенергії що генерується фотоелектричною системою та прибуття електромобілів (споживачів) на зарядну станцію. Це проблемне питання пропонується вирішувати за допомогою методів глибокого навчання системи в результаті якого планується корегувати стан заряду системи збереження енергії.

Ще однією сферою автономних та гібридних енергетичних систем є енергозабезпечення віддалених телекомунікаційних веж. В статтях [69-71] було запропоновано модель невеликої гібридної енергетичної системи, де використовуються ФЕП, дизельний генератор та СЗЕ. В дослідженні визначена потреба в потужності та необхідна кількість електроенергії для компенсації від дизельного генератора. Результати дослідження показують про ефективність зазначених систем, однак невирішеною залишається проблематика зміни потужності споживачів, одночасно повністю енергонезалежність системи за допомогою сонячних електростанцій не визначається з причини використання дизельного генератора, який вимагає дозаправлення та обслуговування. На відміну від попередніх робіт, автори статей [72, 73] розраховували повністю енергонезалежну систему з забезпечення електроенергією групу телекомунікаційних веж за допомогою фотоелектричних систем. Вказані системи за результатами моделювання показують задовільні

результати автономного енергозабезпечення, однак не враховують можливі оновлення штатного обладнання систем та забезпечення адаптивності енергетичної системи.

Значним сегментом застосувань є системи спостереження для охорони, моніторингу поширення стихійних явищ, забруднення повітря, та доставлення з дронів. Зокрема, в статті [74] авторами було представлено модель автономної системи для знищення комах в деяких регіонах Азії та Африки за допомогою дронів. Система використовує невелику фотоелектричну станцію для заряджання дронів. Однак в дослідженні використання системи обмежене п'ятьма місяцями автономної роботи за умови використання в день з 10 ранку до 10 вечора. В свою чергу, авторами робіт [75, 76] розроблено фотоелектричну систему для живлення системи бездротової зарядки дронів які здійснюють моніторинг місцевості. Дослідниками було обмежено фотоелектричну систему площею поверхні даху на якому вона розміщувалась, тому така модель автономної системи не дозволяє забезпечити повну автономність. В продовження цього питання, автори досліджень [77, 78] розробили систему бездротової зарядки дронів з доставлення комерційних товарів. Живлення зарядних пристроїв забезпечується шляхом фотоелектричної системи, модель якої створена з метою забезпечення максимально автономної системи з доставлення та заряджання. В моделі зроблено акцент саме на бездротову систему заряджання, однак, математична модель фотоелектричної системи не містила в собі врахування зміни погодних умов та інсоляції впродовж року.

Попередні дослідження в галузі енергозабезпечення дронів, які відповідають тематиці дисертаційного дослідження, зокрема [52], пропонують концепцію енергозабезпечення системи безперервного спостереження, яка включає в себе такі елементи:

- дрони, що здійснюють політ за запрограмованим маршрутом;
- зарядну станцію;
- сонячну станцію невеликої потужності;
- вітрову станцію невеликої потужності;
- підключення до мережі.

Варто відмітити, що приклад концепції електрозабезпечення, що запропонована в дослідженні [52] (представлено на рисунку 1.11), не супроводжується глибоким аналізом балансу електроживлення, хоча він є критично важливим для безперервної роботи в умовах нестабільності енергопостачання.

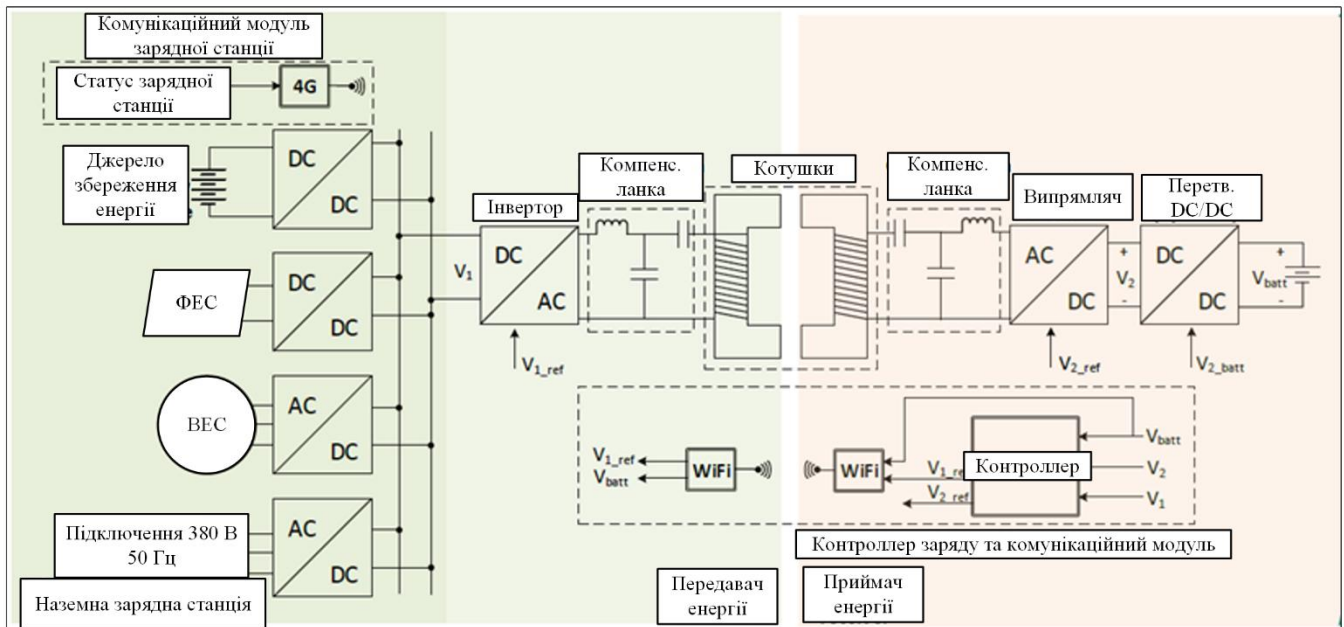


Рисунок 1.11 - Енергозабезпечення системи безперервного спостереження за допомогою дронів в запропонований в дослідженні [52].

Окрім того, в запропонованій в дослідженні [52] системі використовуються технології збору відновлюваної енергії, такі як сонячна енергія та енергія вітру, що сприяє досягненню стану, за якого зібрана енергія покриває потреби дронів на виконання їхніх завдань. Незважаючи на перспективність вказаної системи, її ефективність може бути значно підвищена шляхом оптимізації алгоритмів управління енергією, які будуть враховувати періоди, коли доступна відновлювана енергія (наприклад, сонячне світло вдень), і відповідно оптимізувати використання акумуляторних джерел живлення під час її нестачі.

Для досягнення максимальної ефективності необхідно поєднати різні джерела енергії – акумулятори, бездротові зарядні станції та системи збору енергії – в єдину енергетичну мережу. Це дозволить створити інтегровану систему електроживлення, де різні джерела енергії будуть взаємодіяти для підтримки безперервної роботи дронів з мінімальними енерговитратами.

Попередні дослідження в цій галузі, зокрема [52], показали важливі результати щодо бездротової передачі енергії (БПЕ) для дронів, де запропоновано п'ять варіантів забезпечення заряджання акумуляторних батарей дронів, як показано на рисунку 1.12:

- заряджання дронів на землі за допомогою БПЕ;
- послідовне заряджання дронів в небі, через технології радіозв'язку;
- заряджання в небі від одного важкого дрону;
- заряджання дронів в небі між собою в точній послідовності (2D);
- заряджання дронів в небі між собою у змішаній послідовності (3D).

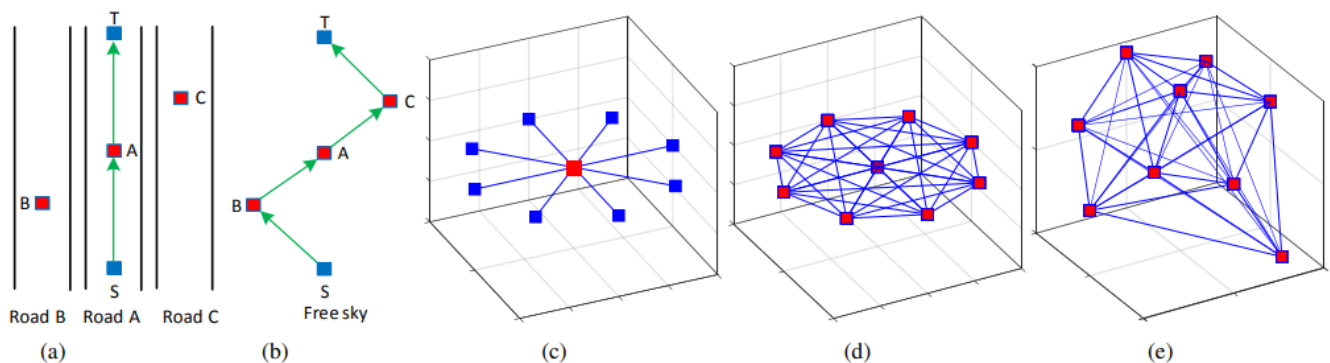


Рисунок 1.12 - Варіанти заряджання дронів: (а) заряджання дронів на землі; (б) послідовне заряджання дронів в небі; (с) заряджання в небі від одного дрону; (д) заряджання дронів в небі між собою 2D; (е) заряджання дронів в небі між собою 3D запропонований в дослідженні [52].

Подальший розвиток цієї концепції потребує оптимізації кількості залучених дронів, а також вдосконалення алгоритмів, що забезпечують безперервне спостереження за обмежених ресурсів.

1.3.2 Оптимізація кількості необхідних дронів та вдосконалення алгоритму забезпечення безперервного спостереження

Дослідження, зокрема [54], показали важливі результати щодо вдосконалення алгоритму забезпечення безперервного спостереження, де враховано кілька сценаріїв польоту коли точки спостереження знаходяться на одній та на різних відстаностях

від зарядної станції. Розроблена модель враховує як час польоту до зарядної станції та від неї, так і час на заміну акумуляторної батареї, як показано на рисунку 1.13.

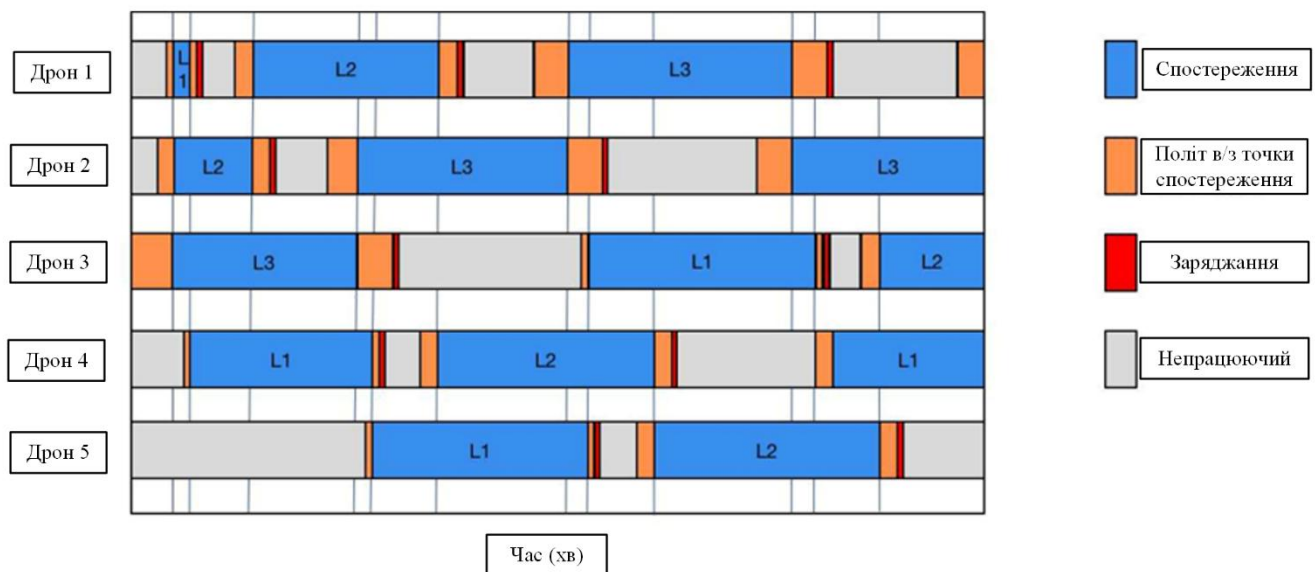


Рисунок 1.13 - Алгоритм забезпечення безперервного спостереження, де $N = 3$ - кількість дронів, $f = 45$ хв. - максимальний час польоту дронів, $s = 15$ сек. час на заміну акумуляторної батареї дрону, $g = \{1, 5, 9\}$ хв. - час польоту в точку спостереження [54].

У цьому дослідженні алгоритм не враховує модель батареї дрона та особливості заряджання акумуляторної батареї через відсутність відповідного процесу (заряджання). Така конфігурація алгоритму в реальних умовах потребує значної потужності для одночасного заряджання великої кількості батарей, які замінює система. На розряд акумуляторної батареї дронів можуть також впливати зовнішні погодні фактори, які в алгоритмі не враховані. Вплив цих факторів на ефективність системи можна визначити шляхом експериментальних досліджень. Крім того, алгоритм не враховує витрати ємності акумуляторної батареї дрона на зліт та посадку, що є суттєвим показником у більшості випадків.

В дослідженні [54] запропоновано метод оцінки мінімальної кількості дронів для кількох локацій спостереження та різної віддаленості від зарядної станції. Залежність кількості потрібних дронів від кількості локацій спостереження для різних показників максимального часу польоту дронів надано на рисунку 1.14.

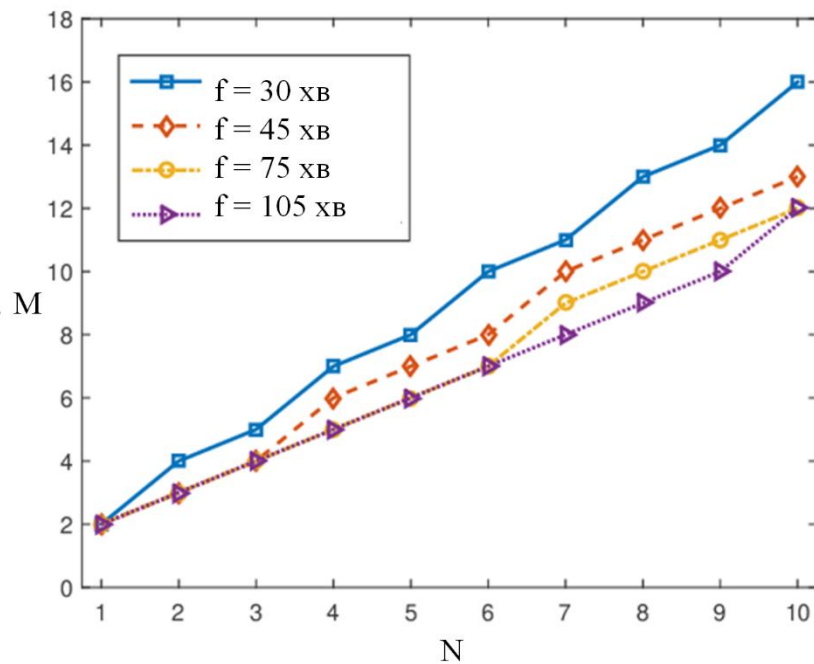


Рисунок 1.14 - Залежність кількості потрібних дронів M від кількості локацій спостереження N відповідно до розробленого алгоритму [54] для різних показників максимального часу польоту дронів f .

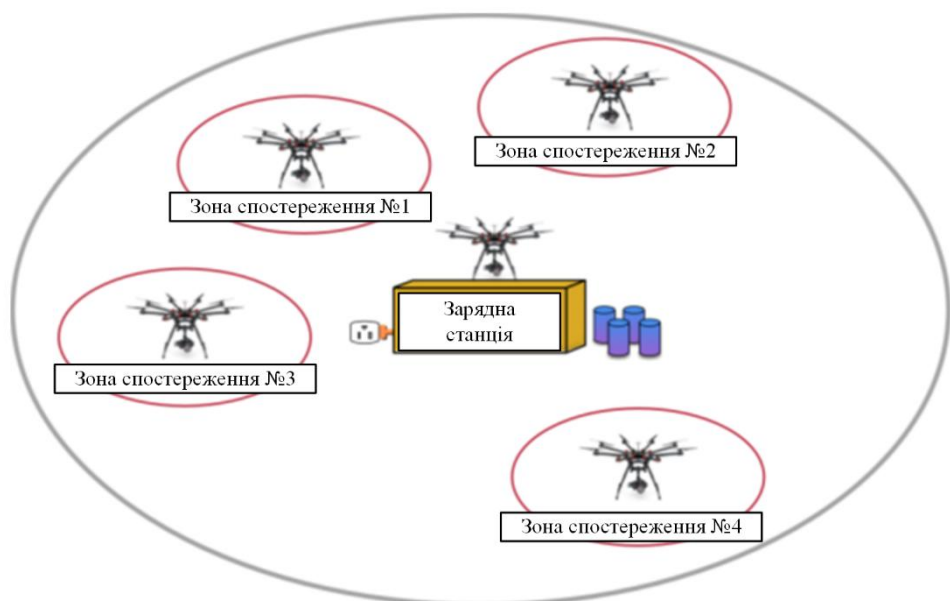


Рисунок 1.15 - Сценарій спостереження запропонований в дослідженні [54]

Результати моделювання відповідно до запропонованого сценарію, як показано на рисунку 1.15, та методу оцінки кількості дронів показують про незначну різницю (1-2 дрони) від алгоритму який розроблений для сценаріїв польоту коли точки спостереження знаходяться на одній віддаленості від зарядної станції.

Даний метод оцінки кількості дронів доцільно розглядати для типових моделей спостереження, такий метод можливо удосконалити шляхом врахування моделі

батареї дрона та характеристик заряджання акумулятора, що дозволить більш точно розраховувати енергоспоживання. Крім того, алгоритм може бути вдосконалений шляхом оцінки витрат ємності батареї на зліт та посадку, що є суттєвим аспектом енергоспоживання.

Основною умовою стабільного виконання завдань таких систем є обмеження, за яким час на політ до точки спостереження і назад не повинен перевищувати максимально доступного часу польоту. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності таких систем є вдосконалення алгоритмів польоту дронів, зокрема оптимізація траєкторій для різних відстаней та площ зон розвідки. Стандартний алгоритм польоту передбачає повернення дрону до зарядної станції по мінімальній відстані після виконання завдання. Однак, залежно від конфігурації точок спостереження, така стратегія може бути неефективною через нераціональне використання енергії.

Оптимізація алгоритмів для різних відстаней може передбачати адаптивну стратегію польоту: для зон з різною віддаленістю від зарядної станції можливо використовувати альтернативні траєкторії, що дозволяють мінімізувати час та енергоспоживання. Замість прямого повернення до зарядної станції після виконання завдання, дрони можуть оптимізувати свій маршрут через непрямолінійний рух. Адаптивна стратегія польоту дозволяє значно підвищити енергоефективність системи. Проте для забезпечення безперервного спостереження важливо також визначити оптимальну кількість дронів з урахуванням енергетичних обмежень.

1.3.3 Оптимізація кількості необхідних дронів для забезпечення безперервного спостереження з енергетичними обмеженнями

Система спостереження на базі дронів також потребує оптимізації для різних сценаріїв використання, зокрема автори дослідження [42], показали важливі результати щодо безперервного виконання завдань групою дронів з обмеженою ємністю батареї.

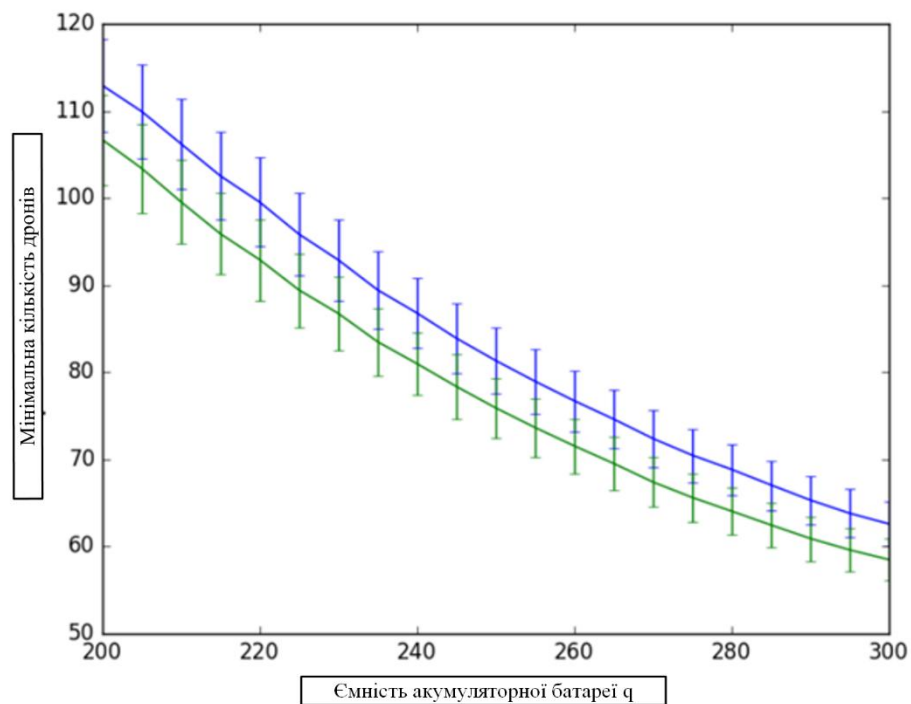


Рисунок 1.16 - Мінімальна кількість дронів в залежності від ємності їх батарей q , наведено в дослідженні [42]

В дослідженні представлено модель оцінки кількості дронів від ємності акумуляторних батарей, кількості зарядних станцій та дальності спостереження, результати моделювання для таких систем показано на рисунку 1.16. Однак, дослідження обмежувалися переважно розглядом невеликого числа локацій для спостереження. Крім того, в роботі не враховували впливу зовнішніх факторів на розряд дронів, що є важливими факторами для забезпечення ефективності системи.

Такі зовнішні фактори, як температура, атмосферний тиск, вологість та швидкість вітру, суттєво впливають на ефективність польоту дронів і, відповідно, на енергоспоживання. В умовах низьких температур, наприклад, спостерігається значне зниження ефективності акумуляторів, що потребує додаткових замін дронів або збільшення часу на підзарядку. Зміна тиску на великих висотах також може впливати на витрати енергії, що вимагає більш ретельного планування маршрутів та точного графіку заміни дронів.

1.3.4 Оптимізація маршрутів польоту з урахуванням енергетичних обмежень

В дослідженні [46] запропонована концепція побудови системи орієнтована на вирішення проблеми перевантаження зарядних станцій, а також забезпечує ефективне використання енергоресурсів та мінімізацію простоїв.

Система використовує підхід, заснований на ймовірнісному обчисленні, де кожен дрон ділиться лише ймовірністю свого відвідування зарядних станцій у різний час, не розкриваючи точних маршрутів або пунктів призначення. Основною математичною моделлю, що використовується для визначення оптимальних маршрутів і графіків заряджання, є байєсова гра, у якій кожен дрон діє як незалежний учасник. Оптимальні рішення визначаються через рівновагу Неша, що досягається за допомогою алгоритму Беллмана-Форда, який забезпечує найкоротший маршрут з урахуванням енергетичних витрат та часу прибуття до зарядних станцій.

Оптимізація режимів та профілів польоту може стати наступним кроком у підвищенні енергоефективності запропонованої системи. Один із ключових факторів енергоспоживання дронів – це їхня траєкторія і швидкість польоту. Використання різних режимів польоту, що відповідають конкретним етапам виконання завдання, може значно скоротити витрати електроенергії.

Запровадження адаптивних профілів польоту дозволить кожному дрону самостійно коригувати свою траєкторію, залежно від поточних умов, таких як рівень заряду батареї, відстань до станції підзарядки та кількість доступних ресурсів.

Крім того, для подальшої оптимізації роботи системи можна впровадити диференційовані профілі польоту на основі погодних умов, зокрема врахування вітрових навантажень або температури повітря, що може суттєво впливати на ефективність батарей. Включення таких зовнішніх факторів у модель оптимізації дозволить додатково зменшити споживання енергії та покращити час роботи дронів в умовах обмежених ресурсів.

В дослідженні [24] запропонована концепція побудови системи спостереження для створення бездротових мереж, де дрони виконують функцію мобільних точок доступу та ретрансляторів сигналу.

Для підвищення ефективності вказаної системи пропонується врахувати реальні обмеження щодо кількості дронів, а також підвищити точність моделювання енергетичних витрат шляхом розробки методики вибору акумуляторних батарей.

Для ефективного функціонування системи важливо правильно підібрати акумулятори, які відповідатимуть як енергетичним потребам, так і вимогам до часу заряджання. Необхідно розробити багатофакторний підхід для вибору батарей, який буде враховувати такі критерії, як:

- ємність акумуляторних батарей, що забезпечать максимальну тривалість роботи системи при мінімальному часі заряджання;
- швидкість заряджання, що є критичним параметром для забезпечення безперервної роботи мережі;
- вага та габарити акумуляторів.

1.3.5 Розроблення автономної мобільної зарядної станції

Ще одним рішенням щодо зниження впливу втрати ємності акумуляторної батареї дронів, під час польоту до зарядної станції, є розроблення автономної мобільної зарядної станції, як запропоновано в дослідженні [25], яка може знижувати протяжність маршруту дронів шляхом безпосереднього руху зарядної станції в сторону зони польоту дрону. Ключовим елементом системи є модуль заряджання з кількома контактними точками, що дає змогу одночасно заряджати декілька дронів.

Крім того, система включає програмні алгоритми управління системою підзарядки та політикою покриття області зони інтересу. Ці алгоритми дозволяють оптимізувати черговість підзарядки дронів в групі, враховуючи поточний рівень заряду акумуляторних батарей та розташування дронів у зоні моніторингу. Така гнучка система значно підвищує витривалість групи дронів та ефективність покриття визначеної області інтересу.

Одним із основних факторів, що впливають на тривалість польоту та загальну ефективність роботи групи дронів, є вибір акумуляторної батареї мобільної зарядної станції. Тому для подальшого вдосконалення системи доцільним є розробка методики вибору оптимальної акумуляторної технології. Така методика має враховувати різноманітні технічні та експлуатаційні фактори, зокрема:

- ємність та щільність енергії;
- вагу та розміри;
- температурна стійкість;
- термін служби та кількість циклів заряджання.

Для реалізації методики доцільно використовувати багатокритеріальну оцінку, яка дозволить оцінити різні варіанти акумуляторів за сукупністю критеріїв і визначити найбільш оптимальний варіант для виконання завдань з урахуванням навантажень та впливу зовнішніх факторів. Оптимізуючи вибір акумуляторів, можна досягти значного покращення тривалості польотів, скоротити час простою на підзарядку та забезпечити більшу гнучкість у виконанні довготривалих завдань.

1.3.6 Оптимізація кількості дронів з урахуванням характеристик цільового навантаження

Комплекс безперервного спостереження запропонований у дослідженні [20] враховує планування польоту та заряджання дронів з урахуванням характеристик бортової камери. Такий алгоритм планування представляє собою ефективний інструмент для покриття зони спостереження з урахуванням наявних дронів. Оптимізація необхідної кількості дронів, які здатні забезпечити виконання задачі спостереження, є актуальною науковою проблемою.

Сучасні досягнення в дослідженнях систем спостереження на основі дронів вказують на перспективи їх подальшого вдосконалення шляхом розробки нових моделей електрозабезпечення та електроживлення та розробки методик їх оцінки.

Майбутні дослідження можуть включати моделювання систем на різних територіях з використанням мінімальної кількості дронів та оптимізацію енергоспоживання з урахуванням зміни висоти польоту, різних умов зовнішнього середовища та інших факторів. Крім того, важливими напрямками можуть стати розробка мобільних зарядних станцій, вдосконалення алгоритмів стеження й управління дронами в реальних умовах, а також оптимізація управління електроенергією для підвищення ефективності та точності роботи в різних середовищах.

1.4 Системи безперервного спостереження на базі дронів з комбінованим електроживленням та можливістю автономної роботи

1.4.1 Узагальнена концепція комбінованої системи електрозабезпечення

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень та публікацій за темою моделей ефективної автономних та гібридних систем електроживлення в основних сферах їх застосування, говорить про те, що подібна задача вже вирішена, зокрема, для заряджання електромобілів, віддалених телекомунікаційних веж та енергетичних систем для заряджання дронів. За результатами огляду встановлено, що науковцями вже запропоновано різні методи забезпечення автономності, що базуються на використанні систем ФЕП, генераторів, СЗЕ, та електроенергії від промислових електромереж. Адаптивність систем може забезпечуватися за допомогою інтелектуальних алгоритмів (зокрема, використання нейронних мереж) та техніко-економічного аналізу споживання електроенергії. Таким чином, результати опублікованих досліджень надають комплексне розуміння способів забезпечення автономності, а також прокладають шлях для майбутніх досліджень у сферах інтеграції відновлюваних джерел електричної енергії для реалізації автономного та напівавтономного електроживлення систем безперервного спостереження за допомогою дронів.

Такий підхід дозволяє здійснювати безперервне спостереження, використовуючи різні способи живлення для зарядки дронів. Проте, у віддалених регіонах з обмеженнями доступу до електричних мереж, система вимагає рішень, де забезпечується автономне, або, у випадку наявності деяких потужностей електромереж, комбіноване живлення з частковим доповненням від промислової електромережі. Досягнення високого рівня автономності можливе за допомогою комбінації відновлюваних джерел енергії, таких як фотоелектричні системи, і систем збереження енергії (СЗЕ) – акумуляторних батарей. У такому випадку актуальними задачами стають задачі підвищення автономності шляхом розрахунку оптимальних режимів роботи системи електрозабезпечення з урахуванням профілів польоту та споживання енергії дронами, ефективності фотоелектричної системи та системи збереження енергії.

Узагальнена концепція комбінованої системи електрозабезпечення, яка використовує як підключення до промислової електромережі, так і електроенергії, що генерується від відновлюваних джерел енергії, зображена на рисунку 1.17.



Рисунок 1.17 - Узагальнена концепція комбінованої системи електрозабезпечення

Виходячи з викладеного, станом на зараз стоїть, і є актуальним, питання забезпечення автономності енергозабезпечення комплексу безперервного спостереження на основі дронів, оскільки саме це впливає на можливості функціонувати системи в умовах невизначеності енергозабезпечення. Забезпечення надійного та стабільного електропостачання стає критично важливим фактором для реалізації безперервних завдань. Наступним кроком у вирішенні цієї проблеми є розробка концептуальної моделі системи електрозабезпечення, яка враховує всі аспекти живлення дронів.

1.4.2 Концептуальна модель системи електрозабезпечення

Запропонована комплексу безперервного спостереження на основі дронів, з кількома секціями спостереження, кожна з яких включає в себе два елементи: зарядну станцію та визначену зону спостереження для дронів що заряджаються на ній. Схема системи безперервного спостереження на базі дронів з комбінованою системою живлення, показана на рисунку 1.18. Зображена на ній система складається з 4 секцій, однак, точна кількість секцій розраховується в залежності від периметру зони спостереження таким чином, щоб дрони під час спостереження перекривали увесь периметр зони, що буде наведено у подальших розділах дисертації.

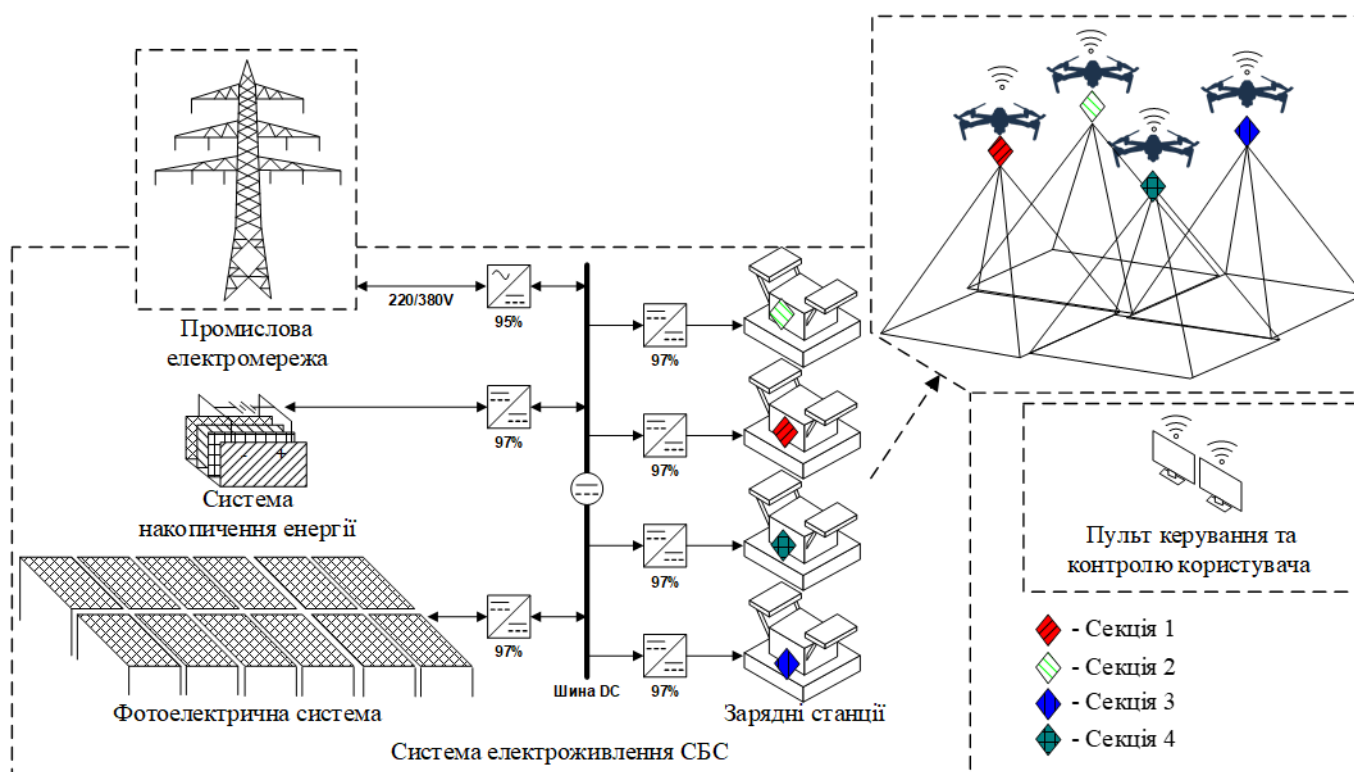


Рисунок 1.18 - Схема системи безперервного спостереження на базі дронів з комбінованою системою живлення

Система складається з двох складових електрозабезпечення – основної та допоміжної. Основна система електрозабезпечення ґрунтується на використанні електроенергії, згенерованої від ФЕС (фотоелектрична система) та СЗЕ. Враховуючи те, що акумуляторні батареї дронів заряджаються постійним струмом, як проміжну ланку в системі запропоновано використовувати ланку постійного струму. Таким чином, всі перетворювачі в системі, що забезпечують інтеграцію зарядних пристроїв, ФЕС та СЗЕ, будуть DC-DC перетворювачами. В свою чергу, допоміжна система змінного струму використовуватиме електроенергію від промислових електромереж, яка за допомогою ізолюваного AC/DC перетворювача буде підключатися до проміжної шини постійного струму. Типовий к.к.д. кожного елементу в системі показаний на рисунку 1.18 під зображенням відповідного перетворювача, як видно, за рахунок використання ланки постійного струму запропонована система матиме вищий к.к.д., у порівнянні з перетворенням у змінний струм та навпаки.

В запропонованій системі, за умови наявності достатньої вихідної потужності, яка залежить від кількості ФЕП, коефіцієнту інсоляції, та навантаження (кількість зарядних пристроїв для дронів, які використовуються), ФЕС буде одночасно

здійснювати як живлення зарядних пристроїв для дронів, так і накопичення залишків енергії у СЗЕ. У випадку відсутності інсоляції, або зниження потужності фотоелектричної системи, живлення зарядних пристроїв для дронів здійснюватиме СЗЕ. Промислова електромережа, у випадку її наявності, за необхідності, забезпечуватиме компенсацію нестачі енергії для живлення зарядних пристроїв дронів від основної системи електрозабезпечення, та слугуватиме для відведення залишків електроенергії від основної системи в мережу за умови повного заряджання СЗЕ та енергії від ФЕП більшої, ніж потрібно для заряджання дронів. Рисунок 1.19 демонструє відповідну діаграму станів системи електроживлення та переходи між ними.

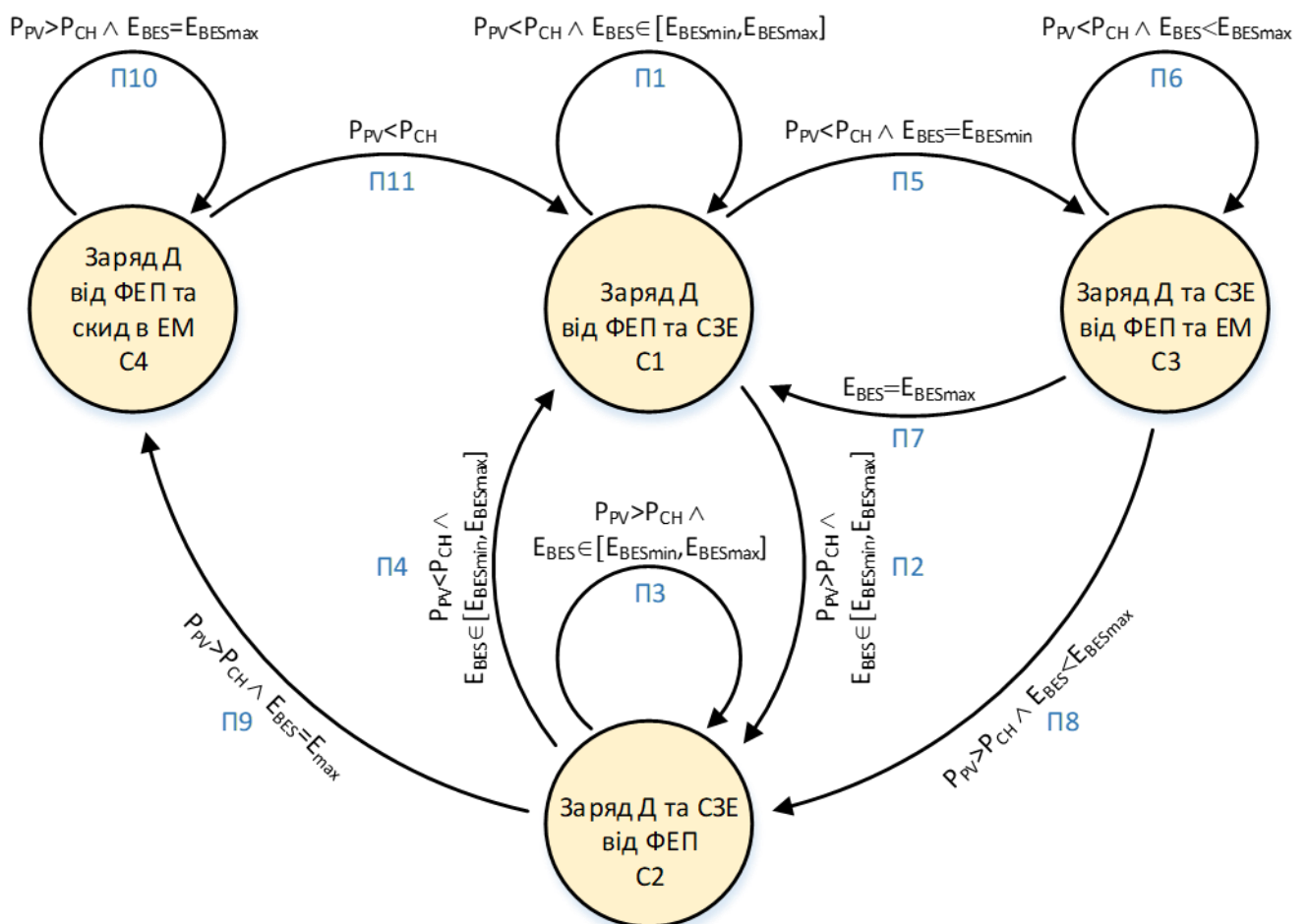


Рисунок 1.19 - Діаграма станів комбінованої системи електроживлення

Запропонована система електроживлення має 4 стани, показані колами на рисунку 1.19 з номерами, записаними у вигляді «Сх», й 11 переходів між станами, показаних блакитним кольором у вигляді «Пх». Початковим станом системи є стан С1, в якому дрони Д заряджаються від ФЕС (які виробляють в такому стані

потужність, меншу, ніж потрібно для живлення дронів, що заряджаються, або не виробляють взагалі), та СЗЕ, яка має певну накопичену заздалегідь енергію. У випадку, якщо залишок енергії у СНЕ більше, ніж мінімальний, то система залишається у цьому ж стані, й ФЕС та СЗЕ разом живлять зарядні станції дронів (перехід П1 на рисунку 1.19). У випадку, якщо потужність ФЕС перевищить необхідну для заряджання дронів потужність, то система перейде (П2) у С2, в якому ФЕС буде заряджати дрони та СЗЕ одночасно, залишаючись у цьому стані (П3) до зміни умов. Якщо потужність від ФЕС впаде нижче за необхідну для заряджання дронів, система знову повернеться в С1 (П4), й СЗЕ знову працюватиме в режимі розряду. Якщо ж рівень заряду СЗЕ впаде до мінімального, й потужності від ФЕС не вистачатиме для заряджання дронів, необхідне примусове підключення до електромережі (П5 у С3), та використання її для заряджання СЗЕ, поки рівень заряду СЗЕ буде меншим за повний (П6). Вихід з цього стану можливий або у випадку повної зарядки СЗЕ (П7 до С1) й переходу на живлення від неї, або, у випадку збільшення потужності ФЕС до рівня, достатнього для заряджання всіх дронів (залишок витрачатиметься на підзарядку СЗЕ) – П8 у С2. У випадку, якщо енергії від ФЕС буде більше, ніж необхідно, і СЗЕ буде повністю заряджена, залишок енергії буде передаватися в мережу (П9 у С4), де система буде залишатися (П10) до тих пір, поки ФЕС вироблятимуть менше, ніж необхідно енергії, й система перейде (П11) у основний стан С1, коли для заряджання дронів будуть одночасно використовуватися ФЕС та СЗЕ.

Варто відзначити, що запропонований алгоритм роботи реалізує максимальне використання СЗЕ та ФЕС, а живлення від мережі відбувається лише у випадку відсутності достатньої кількості енергії в основній системі. Наступним етапом є розробка детальної моделі спостереження, яка враховує всі аспекти функціонування системи.

1.4.3 Модель спостереження

Порівняно низька енергетична щільність акумуляторних батарей, що використовуються в дронах, та значний час процесу заряджання є основними обмеженнями для завдань з тривалого спостереження. Одним з варіантів вирішення

цієї проблеми пропонується безперервне спостереження великої території за рахунок групи дронів [79]. Кількість дронів має визначатися профілем польоту та тактико-технічними характеристиками цих дронів. Для забезпечення безперервного спостереження з урахуванням обмежених енергетичних характеристик кожного дрона, які потребують періодичної підзарядки, можуть використовуватися оптимізаційні методи, такі як класичний Марківський процес прийняття рішень [80] або вдосконалений алгоритм на основі ітерації зменшення стану [81]. Водночас безперервне спостереження також можливе за допомогою комбінації різних типів безпілотних систем – наземних і повітряних [82], що можуть бути оптимізовані з урахуванням енергетичних обмежень та процедур підзарядки.

Згадані вище дослідження зосереджені на моніторингу визначених ділянок уздовж маршрутів, особливо коли площа спостереження є значною. Водночас, для обмежених територій існує ще один важливий метод безперервного спостереження – зависання або політ на фіксованій позиції з передачею відео чи потокових даних із заданої зони. Цей спосіб є надзвичайно важливим для моніторингу під час природних катастроф, таких як виверження вулканів [83], забезпечення громадського порядку під час великих заходів [84], нагляду за випасом худоби [85], а також для військових операцій, коли об'єкт спостереження залишається статичним і може контролюватися з однієї позиції. У таких випадках для забезпечення безперервного спостереження можна використовувати один дрон, який, з огляду на обмежений час польоту, періодично замінюється іншим.

В окремих завданнях відстань до точки спостереження є порівнянною або меншою за висоту польоту, проте для моніторингу небезпечних зон (вулкани, стихійні лиха, бойові дії) час польоту до точки спостереження може бути значно тривалішим. Існуючі наукові дослідження розглядають вплив відмов дронів на безперервність моніторингу у подібних умовах [86], але ще недостатньо уваги приділено питанням кількості необхідних дронів для виконання таких завдань залежно від відстані до об'єкта спостереження. Водночас, деякі важливі результати вже були представлені, зокрема дослідження динаміки польоту дронів та характеристик їх акумуляторних систем [87], а також можливі рішення для

забезпечення підзарядки дронів під час виконання завдань спостереження [88], що можуть сприяти вирішенню цього питання.

Враховуючи викладене, модель спостереження повинна ґрунтуватися на умові що кожна ділянка зони спостереження повинна бути постійно в полі зору камери дрону.

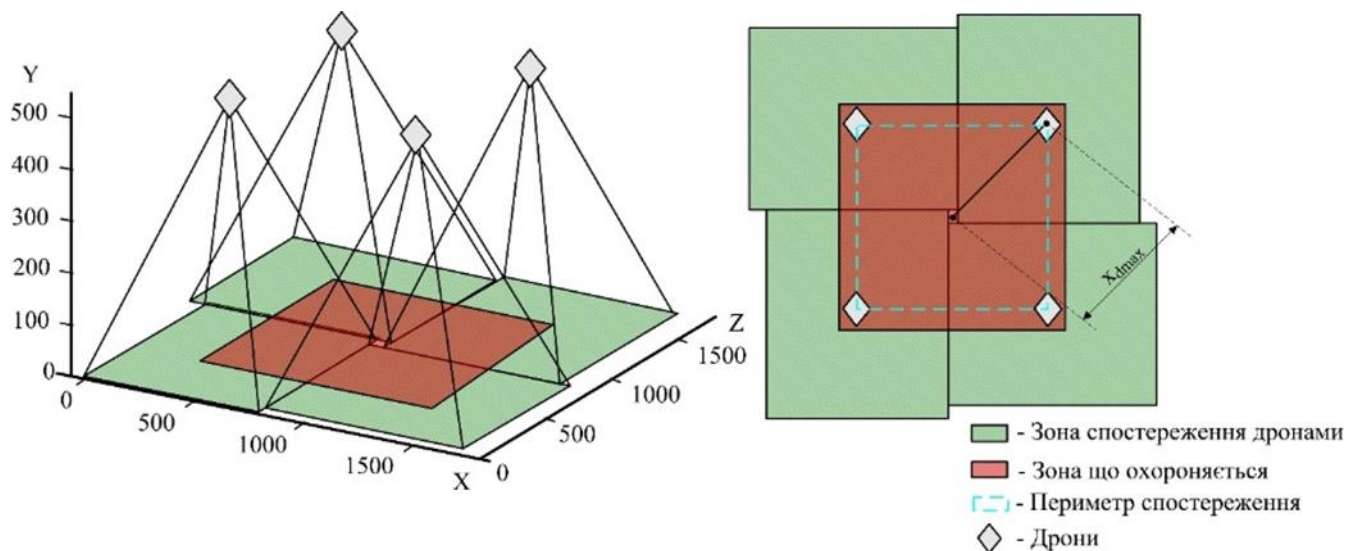


Рисунок 1.20 - Положення дронів для перекриття периметру 1 кілометр на 1 кілометр

В такому випадку дрони зависають кожен в своїх заздалегідь визначених координатах і розміщуються у відповідних секціях вздовж периметру спостереження, відповідно до заздалегідь визначеної схеми польоту. Приклад розміщення дронів для перекриття зони що охороняється в один кілометр на один кілометр чотирма секціями зображено на рисунку 1.20.

Запропонована модель спостереження, враховує порядок розміщення дронів та характеристики їх бортових камер, дозволяє визначити необхідну загальну кількість дронів що буде використано в системі та зону спостереження. Врахування параметрів цільового спорядження дозволяє точно визначити кількість дронів і зону спостереження. Наступним етапом стане оцінка споживання електричної енергії, що є критичним для забезпечення автономності.

1.5 Оцінка складових споживання електричної енергії дронів

1.5.1 Визначення основних складових споживання електричної енергії

Система електроживлення сучасних дронів забезпечує роботу широкого спектру бортового обладнання, яке виконує критично важливі функції для стабільного та ефективного виконання завдань за призначенням. Це обладнання включає в себе основні системи, такі як силові установки і системи автоматичного управління польотом, так і додаткові модулі, що розширюють функціональні можливості дрона, наприклад, гіростабілізовані оптико-електронні системи, системи передачі відео та засоби навігації.

З огляду на стрімке збільшення попиту на дрони та розширення сфери їх застосування у цивільних, комерційних та військових цілях, існує тенденція до оснащення дронів все більшою кількістю додаткового бортового обладнання. Це, у свою чергу, створює додаткове навантаження на систему електроживлення апарату. Електроспоживання бортових систем напряду впливає на час автономної роботи дрона, а також на його здатність виконувати завдання на великій відстані або в умовах виконання тривалих завдань.

Дослідження, проведене у [89], демонструє розподіл споживання електроенергії різними системами дрона. В таблиці 3 представлені отримані результати щодо частки енергоспоживання основного обладнання розповсюджених дронів, отримані результати внесені в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2

Частка споживання основних елементів електроспоживання виділених дронів

№ з/п	Назва обладнання	Частка споживання
1.	Силовая установка (електродвигуни)	99,3%
2.	Система автоматичного управління польотом	0,03%
3.	Навігаційне обладнання	0,008%
4.	Модем керування та телеметрії	0,03%
5.	Система передачі відео (з підсилювачем потужності)	0,14%
6.	Система підігріву акумуляторної батареї	0,28%
7.	Гіростабілізована оптико-електронна система	0,17%

Отримані результати показують, що найбільша частка споживання електроенергії припадає на силову установку, яка складає 99,3% від загального енергоспоживання дрона. Це очікувано, оскільки саме електродвигуни відповідають за рух дрону та підтримку його в повітрі. Інші компоненти, такі як система підігріву акумуляторної батареї (0,28%) та гіростабілізована оптико-електронна система (0,17%), мають значно менший вплив на загальне енергоспоживання.

1.5.2 Взаємозв'язок між кількістю двигунів та енергоспоживанням дрону

Проведені дослідження показують, що вплив кількості двигунів на енергоспоживання дрона є неоднозначним і залежить від швидкості польоту та їх режимів. Зокрема результати дослідження [90] показують, що на малих швидкостях, до 9 м/с, збільшення кількості двигунів зменшує енергоспоживання завдяки покращенню аеродинамічних характеристик при умовах збереження параметрів електроспоживання. Проте, при збільшенні швидкості до 12 м/с, електроспоживання зростає через необхідність створення додаткової тяги двигунів.

1.5.3 Вплив інших факторів на енергоспоживання дронів для спостереження

Фактори, що впливають на енергоспоживання дронів для спостереження, охоплюють конструкційні особливості дронів, умови навколишнього середовища та динаміку польоту. У кожній з цих категорій враховуються параметри, які суттєво визначають витрату енергії під час виконання завдань. Дослідження [91] надає деталізований перелік ключових змінних для аналізу цих аспектів, серед яких можна виділи параметри, як на рисунку 1.21.

Конструкція дрона: – маса дрона; – кількість двигунів; – діаметр гвинтів; – розміри корпусу дрона; – маса акумуляторної батареї; – ємність батареї; – габаритні характеристики батареї; – максимальна швидкість та вантажопідйомність.	Умови навколишнього середовища: – щільність повітря; – вітрові умови; – температура навколишнього середовища.	Динаміка польоту дрона: – повітряна швидкість; – режими руху (зліт, посадка, зависання, крейсерський політ); – прискорення та гальмування; – кут атаки; – кут нахилу під час польоту; – висота польоту.
--	--	---

Рисунок 1.21 - Фактори, що впливають на енергоспоживання дронів

Таким чином, кожна з цих категорій містить взаємозалежні фактори, що впливають на енергоспоживання дрона. Усі вони мають бути враховані в контексті завдань і умов експлуатації для оптимізації витрат енергії та збільшення тривалості виконання спостережних завдань.

1.6 Висновки до розділу 1

1. В результаті проведеного аналізу сучасного стану наукових досліджень, що стосуються використання дронів для систем безперервного спостереження, визначено ключові напрями та проблеми, які потребують подальшого дослідження та вдосконалення.

2. Запропонована концептуальна модель електрозабезпечення комплексів спостереження на основі безпілотних літальних апаратів (дронів), що базується на основній та допоміжній системі енергопостачання, яка відповідно до алгоритму функціонування забезпечує максимальне використання сонячної енергії та накопичувача електроенергії, з підключенням до електромережі за умов невизначеності енергопостачання.

3. Запропонована модель спостереження, яка враховує порядок розміщення дронів та основні характеристики їх бортових камер, дозволяє визначити необхідну загальну кількість дронів що буде використано в системі та зону спостереження.

4. Проаналізовано основні чинники споживання енергії складовими дрону та необхідні для цього енергетичні витрати, що дозволить визначити в подальшому режими роботи всієї системи, умови автономної роботи та можливі максимально досяжні зони спостереження, що є критично важливими для забезпечення ефективної роботи системи у реальних умовах.

РОЗДІЛ 2

НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ АВТОНОМНИХ КОМПЛЕКСІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ БПЛА

2.1 Узагальнена концепція автономної системи безперервного спостереження за допомогою дронів

З метою забезпечення безперервності спостереження, використовується кілька дронів (група), яка буде працює за певним алгоритмом, коли одні дрони будуть висіти у повітрі для моніторингу обстановки, в той час як інші дрони будуть підзаряджатися на землі, та замінювати ті дрони, які у повітрі, коли їх заряд впаде до мінімального рівня, достатнього для повернення на точку підзарядки. Така система безперервного спостереження може працювати від промислової однофазної мережі 220В 50 Гц або ж трифазної мережі 380В 50 Гц, яка буде забезпечувати безперервний потік енергії для заряджання дронів. Однак, у випадку використання такої системи у зоні військових дій, віддалених регіонах без наявної електричної мережі, необхідно забезпечувати автономне живлення системи, яке може бути здійснене шляхом використання додаткових відновлюваних джерел енергії (наприклад, фотоелектричних перетворювачів), та накопичувача енергії (аккумуляторної батареї). В такому випадку актуальною задачею є покращення автономності, оптимізація енергозабезпечення та енергоспоживання, а також зменшення масо-габаритних показників та вартості.

Враховуючи те, що різні хімічні складові акумуляторних батарей пропонують різні рівні енергетичної щільності, терміни служби, швидкості заряджання та розряджання, а також різні рівні безпеки, задача вибору оптимальної технології акумуляторних батарей є однією з ключових та актуальною для досягнення оптимальної продуктивності, економічної ефективності і довговічності системи зберігання енергії, а також підтримки стабільності експлуатації системи безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів.

Узагальнена концепція автономної системи безперервного спостереження за допомогою дронів, як показано на рисунку 2.1, включає в себе три підсистеми:

1. Підсистема керування та контролю виконання завдань дронами.

Основними завданнями підсистеми є:

- розрахунок необхідної кількості дронів, яку необхідно запустити для виконання завдання, а саме – для забезпечення безперервного спостереження;
- ретрансляція каналу керування та передачі даних до користувача;
- оптимізація режимів заряджання акумуляторних батарей дронів з метою найбільш ефективного виконання завдання.

2. Підсистема забезпечення автономності.

Основним завданнями підсистеми є забезпечення достатню кількістю електроенергії підсистеми забезпечення живленням, з урахуванням тривалих перебоїв. У більшості випадків, для досягнення автономності системи, використовуються відновлювані джерела електричної енергії – фотоелектричні перетворювачі, вітрогенератори.

3. Підсистема забезпечення живленням.

Основним завданнями підсистеми забезпечення живленням є доставка достатньої кількості електроенергії до підсистеми керування та контролю виконання завдань дронами, з урахуванням гнучкості системи в напрямку збереження необхідних характеристик безперервного спостереження. Дана підсистема базується на акумуляторних батареях, які накопичують заряд від підсистеми забезпечення автономності, в той час, коли виробленої відновлюваними джерелами енергії більше, ніж потрібно для підзарядки дронів, та віддають його, коли такої енергії недостатньо.

Окремо від системи слід виділити пульт керування та контролю користувача, який може включати в себе декілька систем моніторингу, яка існує для узагальнення та керівництва завданнями.

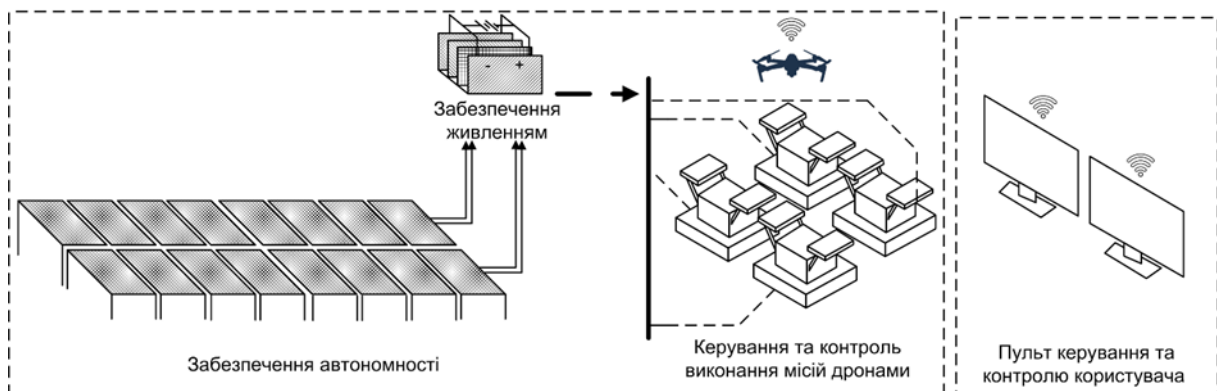


Рисунок 2.1 - Узагальнена концепція автономної системи безперервного спостереження за допомогою дронів

Як видно з рисунку 2.1, акумуляторні батареї в системі безперервного спостереження входять як до системи електроживлення наземної станції, так і до дрону, забезпечуючи його живлення під час польоту.

Враховуючи те, що ключовим елементом наземної частини системи є акумуляторні батареї, саме від їх вибору залежать техніко-економічні показники автономної системи безперервного спостереження. Постійне вдосконалення електрохімічних джерел енергії, для яких досягаються все більш високі результати в ефективності та безпечності, спонукає багатьох дослідників до розроблення методик порівняння та вибору технологій акумуляторних батарей. Станом на сьогодні існує кілька основних груп акумуляторних батарей, які умовно можна назвати свинцевими, нікелевими, літієвими (по основному матеріалу, який входить до складу батареї), та окремо виділити групу перспективних технологій, які ще не знайшли широкого розповсюдження.

Виходячи з викладеного, станом на зараз стоїть, і є актуальним, питання вибору технології акумуляторних батарей для використання у якості елемента накопичення енергії в системах безперервного спостереження на основі дронів, оскільки саме це впливає на основні техніко-економічні показники системи живлення.

2.2 Вдосконалення методики вибору технології акумуляторних батарей для системи безперервного спостереження на базі дронів

2.2.1 Існуючі методики порівняння та вибору технологій акумуляторних батарей

Питанням побудови моделей та вибору найкращих технологій акумуляторних батарей, як накопичувачів енергії для систем електроживлення різноманітних застосувань, науковцями з усього світу приділяється значна увага. Серед значної кількості опублікованих робіт, варто виділити наступні отримані результати.

Однією з найбільших станом на сьогодні сфер застосування акумуляторних батарей є електромобілі. В роботі [92] авторами було запропоновано метод оцінки акумуляторних батарей для електромобілів, заснований на нейромережі та параметрах що надали виробники акумуляторних батарей. В статті [93] авторами

виділені критерії для оцінки акумуляторних технологій, які використовуються в якості накопичувача електроенергії в електромобілях та проведено їх техніко-економічне порівняння. В продовження цього питання, автори дослідження [94] також розглянули різні технології батарей, в тому числі перспективних, та навели результати порівняльного аналізу, де встановили, що для електромобіля в сучасних умовах найбільш доцільним є використання літій-іонних батарей, однак, в найближчому майбутньому вони можуть бути замінені на перспективні, такі як твердотілі та кремнієві акумуляторні батареї. Фокус дослідження [95] полягає у хімічному складі основних типів акумуляторних батарей з точки зору їх застосування в електромобілях, а також задачах моніторингу та керування процесом розрядки та зарядки таких батарей.

Ще однією сферою застосувань акумуляторних батарей в якості джерела енергії для основного рушія, є водні транспортні засоби. В статті [96] авторами було порівняно основні типи акумуляторних батарей з точки зору їх хімічних властивостей, ємності, об'ємів, ваги, енергії, питомої енергії, вартості та життєвого циклу за методом TOPSIS, і вибирається найкраща батарея для гібридних рушіїв кораблів. За результатами порівняння було встановлено, що найкращими для такого застосування є літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї.

Значним сегментом застосувань акумуляторних батарей є системи зберігання енергії у складі електричних систем (зокрема, мікро- та нано-мереж). Зокрема, в дослідженні [97] пропонується багатокритеріальна модель прийняття рішень, яка поєднує підхід нечіткої логіки для створення комплексної системи оцінки технологій акумуляторних батарей для мікро-мереж, які складаються з вітрогенераторів, фотоелектричних перетворювачів та акумуляторних батарей. За результатами застосування даного методу було встановлено, що найкращими для такої сфери застосувань є літій-іонні акумулятори. На відміну від попередньої роботи, автори статті [98] розглянули можливі технології акумуляторних батарей для накопичувачів енергії в складі мікро-мереж з точки зору мінімальної вартості всієї системи. В свою чергу, автори роботи [99] провели огляд існуючих і нових технологій акумуляторних батарей для великомасштабних накопичувачів енергії, які повинні стати альтернативою гідроакумулявальним електростанціям. Авторами зроблено

висновок, що найкращими для такого застосування є натрієві та літій-іонні акумулятори, а нові перспективні типи з високою щільністю енергії все ще не можуть бути застосовані. В дослідженні [100] авторами було проведено порівняльний аналіз гібридної системи електрифікації сільської місцевості в Індії з різними системами резервного накопичення енергії для мікромережі села Коркаду, штат Пудучеррі, Індія, та встановлено, що для такої сфери застосувань найкращими є літій-іонні акумуляторні батареї. Робота [101] містить моделювання ефективності з'єднаної з мережею системи накопичення електричної енергії на різних типах акумуляторних батарей, та робляться висновки про найбільш оптимальне рішення. В дослідженні [102] виконано імітаційну модель і техніко-економічний аналіз літій-іонних і свинцево-кислотних акумуляторів, інтегрованих у фотоелектричну систему, з'єднану з мережею, з урахуванням реальних комерційних профілів навантаження та даних про ресурси. Авторами встановлено, що літій-іонні акумулятори забезпечують нижчу вартість електроенергії в такій системі, що є їх перевагою. Варто також відзначити дослідження [103], де представлено методологію оцінки техніко-економічних показників підключеної до мережі системи зі зберіганням електроенергії за тарифом на електроенергію та часом використання, та встановлено, що й літій-іонні, й свинцево-кислотні батареї поки не можуть бути економічно вигідними у таких системах, однак, літій-іонні мають певну перевагу.

Таким чином, проведений аналіз говорить про те, що подібна задача вже вирішена, зокрема, для електромобілів, водних транспортних засобів, енергетичних систем з накопичувачами електричної енергії, та мікро-мереж. За результатами огляду встановлено, що науковцями вже запропоновано різні методи оцінки, включаючи такі, що базуються на нейронних мережах, математичному апараті нечіткої логіки, багатокритеріальних моделях прийняття рішень та техніко-економічному аналізу. Таким чином, ці результати досліджень надають комплексне розуміння різноманітних критеріїв, які можуть бути використані у процесі відбору, а також прокладають шлях для майбутніх досліджень у сферах інтеграції накопичувачів енергії на базі акумуляторних батарей, зокрема, для відновлюваної енергетики, підкреслюючи важливість розгляду як технічних, так і економічних

факторів акумуляторних батарей для ефективного прийняття рішень у плануванні та реалізації автономної енергетичної системи.

Варто відзначити, що аналіз останніх публікацій говорить про те, що хоча й розробці методик вибору технологій акумуляторних батарей для різних застосувань вже присвячена значна увага науковців та запропоновано певні рішення, не вирішеними все ще наступні частини проблеми. В роботах [93, 96] основними критеріями методики вибору авторами виділено ціну батареї, значення ваги та об'єму. Однак, ці критерії оцінки не включають в себе такі важливі параметри як, зокрема, безпека застосування, а також вартість експлуатації. В дослідженні [103] найважливішими параметрами системи виділено вартість придбання акумуляторної батареї та кількість циклів до виходу з ладу, які визначають вартість придбання батареї на кВт·г циклу, однак, не проаналізовано інші важливі показники системи. Найбільш повним є метод, запропонований в дослідженні [97], де система індексів для методу вибору містила три якісних підкритерії (технологічні, економічні та соціальні), а значення ефективності за ними визначалися висновками експертів. Однак, всі зазначені результати отримані або для підключених до мережі електричних систем з накопичувачами енергії, або для таких автономних систем, як транспортні засоби. Таким чином, питання розробки комплексної методики вибору акумуляторних батарей та її застосування для акумуляторних батарей у складі джерел живлення автономних систем спостереження на базі дронів, які мають низку принципових відмінностей від розглянутих вище, станом на зараз не вирішене. Крім цього, аналіз джерел вказує на необхідність додаткового врахування параметрів безпеки застосування, вартості експлуатації, значення ефективності в аспектах енергозбереження та екологічних викидів для повнішої оцінки акумуляторних батарей в системах безперервного спостереження на базі дронів.

2.2.2 Вдосконалена методика вибору технологій акумуляторних батарей

Базуючись на розглянутих вище методиках вибору акумуляторних батарей, в роботі було запропоновано вдосконалену методику оцінки та вибору технологій акумуляторних батарей для їх застосування у складі автономних систем спостереження на базі дронів. Методика складається з двох етапів. На першому етапі

(етап попереднього відбору) здійснюється відсіювання тих технологій акумуляторних батарей, які не підходять для системи, оскільки не задовольняють найбільш важливим критеріям. На другому етапі здійснюється порівняння всіх тих технологій, які пройшли попередній етап, а отже, можуть бути використані в системі.

I етап - попередній відбір.

Автономні систем спостереження на базі дронів мають критичні обмеження щодо забезпечення мобільності, а саме щодо максимальної допустимої ваги та об'єму батареї. Для визначення впливу критичних обмежень на систему пропонується використовувати два критерії, а саме мінімальне значення об'ємної щільності енергії (E_{d_min} , Вт· год/л) та мінімальне значення питомої густини енергії (S_{e_min} , Вт· год/кг). Розрахунок базується на використанні максимальних допустимих значень ваги (m_{max} , кг) та об'єму (v_{max} , л) для системи за формулами (2.1) та (2.2):

$$S_{e_min} = \frac{E}{m_{max}}, \quad (2.1)$$

$$E_{d_min} = \frac{E}{v_{max}}, \quad (2.2)$$

де E – загальна необхідна енергія для роботи системи впродовж визначеного проміжку часу, Вт·год.

II етап - багатокритеріальний відбір.

Після здійснення відсіву тих технологій акумуляторних батарей, які не задовольняють базовим вимогам до системи, здійснюється порівняння всіх відібраних технологій. Задля цього пропонується методика, побудована на багатокритеріальному порівнянні за допомогою методу розрахунку вектору вагових коефіцієнтів за основним методом Сааті [104]. Цей метод не дозволяє групувати критерії для розуміння впливу на систему безперервного спостереження кожного з них. Враховуючи наведене, було виконано розподілення критеріїв оцінки та введено індекс для кожного типу батареї за формулою:

$$I_{bat} = E_i + T_i + P_i, \quad (2.3)$$

де E_i – експлуатаційний індекс; T_i – технічний індекс; P_i – економічний індекс; I_{bat} – загальний індекс технології акумуляторної батареї.

Кожен з трьох індексів являє собою критерій, значення якого відповідає сумі добутків вагових коефіцієнтів (w_i), та величини критерію. Кожен критерій визначається залежно від впливу на систему безперервного спостереження.

Для забезпечення коректного порівняння показників, які мають різні одиниці виміру, кожен показник індексу нормалізується до діапазону значень від 0 до 1, нормалізоване значення показника критерію визначається за формулою:

$$N_i = \frac{(i_n - i_{min})}{(i_{max} - i_{min})}, \quad (2.4)$$

де i_n – значення показника; i_{min} – мінімальне значення показника; i_{max} – максимальне значення показника.

Експлуатаційний індекс E_i відповідає за фактори батареї, які змінюються залежно від умов експлуатації автономних систем спостереження, та враховує показники:

- діапазон робочих температур T_r , який повинен враховувати можливості системи безперервного спостереження функціонувати як в зимню, так і в літню пору року в різних кліматичних умовах;
- показник безпечності S_s , повинен враховувати можливі випадки аварійного стану батареї через який може статися займання, задимлення або вибух;
- показник саморозряду η , повинен враховувати вплив на батарею довгого невикористання, що призводитиме до зменшення ємності шляхом саморозряду через процеси в середині батареї або на її поверхні.

Експлуатаційний індекс розраховується за наступною запропонованою формулою:

$$E_i = T_r \cdot w_{tr} + S_s \cdot w_{ss} + \eta \cdot w_{\eta}. \quad (2.5)$$

Для визначення діапазону робочих температур пропонується використовувати різницю між максимальною T_{max} та мінімальною експлуатаційними температурами, відповідно, за формулою:

$$T_r = T_{max} - T_{min}. \quad (2.6)$$

Показник безпечності S_s є комплексним показником, базуючись на аналізі публікацій, спрямованих на тему безпечності акумуляторних батарей [105-112]. У складі цього показника пропонується врахувати максимальний час безпечного заряджання, максимальну швидкість розрядки T_{sd} , максимальну потужність заряджання P_{mc} . Показник безпечності пропонується розраховувати за формулою:

$$S_s = T_s + T_{sd} + P_{mc}. \quad (2.7)$$

Для визначення показника саморозряду η пропонується використовувати метод визначення необоротних та оборотних втрат ємності батареї, запропонований у [113]:

$$\eta = \frac{(C - C_1)}{C} \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

де C – номінальна ємність батареї, Вт·год; C_1 – ємність розряду, Вт·год.

Розрахунок експлуатаційного індексу дозволяє отримати дані щодо стійкості батареї до змінних зовнішніх умов експлуатації, технічної досконалості, а також безпечності експлуатації в заданих умовах. В системі безперервного спостереження експлуатаційний індекс має одне з найважливіших значень, оскільки визначає можливість безперервного використання системи протягом тривалого часу без погіршення її експлуатаційних характеристик та технічних відмов.

Технічний індекс T_i відповідає за фактори які впливають на технічні характеристики (специфікацію) системи безперервного спостереження, він враховує показники:

- питома густина енергії S_e , який відповідає за кількість накопиченої у батареї енергії на одиницю ваги батареї;
- об'ємна щільність енергії E_d , який відповідає за кількість накопиченої в батареї енергії на її об'єм;
- показник життєвого циклу L , який відповідає за максимальну тривалість безперервного використання батареї (цикли “заряд”-”розряд”) в роках.
- показник стабільності номінальної ємності при зміні температури навколишнього середовища S_t .

Технічний індекс розраховується за наступною запропонованою формулою:

$$T_i = S_e \cdot w_{se} + E_d \cdot w_{ed} + L \cdot w_l + S_t \cdot w_{st}. \quad (2.9)$$

Показник питомої енергії та щільності енергії розраховуються за формулами:

$$S_e = \frac{E}{m}, \quad (2.10)$$

де E – кількість накопиченої енергії, Вт·год; m – вага батареї, кг,

$$E_d = \frac{E}{v}, \quad (2.11)$$

де v – об'єм батареї, м³.

Показник життєвого циклу L розраховується за формулою (2.12), і залежить від часу заряджання C_r , розряджання D_r та гарантійної кількості робочих циклів батареї C_l . Загальна інформація про життєвий цикл акумуляторної батареї наведена у [114-116].

$$L = (C_r + D_r) \cdot C_l, \quad (2.12)$$

Показник стабільності номінальної ємності при зміні температури навколишнього середовища розраховується як температурний коефіцієнт ємності акумуляторної батареї за наступною формулою:

$$S_t = \Delta C / (C_0 \cdot \Delta T) \cdot 100\%, \quad (2.13)$$

$$\Delta C = C_0 - C_1, \quad (2.14)$$

$$\Delta T = T_0 - T_1, \quad (2.15)$$

де C_0, C_1 – ємність при T_0 та T_1 , Вт·год, T_0, T_1 – поточна (мінімальна) та еталонна температура навколишнього середовища, °C.

Розрахунок технічного індексу дозволяє, серед іншого, оцінити об'єктивну інформацію щодо майбутніх розмірів системи безперервного спостереження та скільки часу система зможе функціонувати в заданих умовах. Для нашої системи технічний індекс може бути пріоритетним над іншими в зв'язку з вимогами щодо мобільності і довготривалості експлуатації.

Економічний індекс відповідає за вплив ціни акумуляторної батареї, тобто впливає на загальний бюджет побудови системи, і, відповідно, на можливість реалізації концепції взагалі, та враховує показники:

– вартості батареї C_b , яка безпосередньо впливає на вартість системи, оскільки ціна батареї може бути головною статтею витрат на побудову системи безперервного спостереження.

– вартості обслуговування батареї C_s , показник опосередковано впливає на можливості системи безперервного спостереження щодо автономності.

Економічний індекс розраховується за наступною запропонованою формулою:

$$P_i = C_b \cdot w_{cb} + C_s \cdot w_{cs}, \quad (2.16)$$

Дані щодо вартості батареї отримуються від виробника, однак вартість обслуговування не наводиться виробником, і тому розраховується індивідуально. Вартість обслуговування в більшій частині залежить від віддаленості системи безперервного спостереження та якості виконання збірки акумуляторного блоку, можливості заміни окремих елементів у випадку виходу їх з ладу тощо.

Таким чином, II етап дозволяє здійснити багатокритеріальне порівняння можливих варіантів технологій акумуляторних батарей на основі розрахунку розподілених критеріїв оцінки для розуміння впливу на систему кожного з них.

Запропонована методика дозволяє врахувати всі основні техніко-економічні показники акумуляторних батарей, такі як стійкість батареї до змінних зовнішніх умов експлуатації, технічну досконалість, безпечність експлуатації, оцінити відносні майбутні розміри системи безперервного спостереження. Одночасно, методика також враховує показник життєвого циклу, що дозволяє оцінити час функціонування системи безперервного спостереження в заданих умовах, а також вартість батареї та її обслуговування. Такий підхід є досить ефективним інструментом для аналізу різних акумуляторних батарей.

2.2.3 Апробація запропонованої методики оцінки для вибору технології акумуляторних батарей для наземної станції системи спостереження

Попередній відбір.

Відповідно до першого етапу вибору виконаємо попередній відбір технологій акумуляторних батарей для їх роботи у складі джерел живлення автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів. Спроектована система спостереження виключає можливість збільшення ваги акумуляторної батареї понад 300 кг, а об'єму 0,12 м³. Крім цього, за результатами попередніх розрахунків, встановлено, що необхідна кількість енергії для автономної системи безперервного

спостереження складає 25687,3 Вт*год. Таким чином, отримано значення S_{e_min} та E_{d_min} :

$$S_{e_min} \approx 85,5 \text{ (Вт} \cdot \text{ год/кг)}, \quad (2.17)$$

$$E_{d_min} \approx 214 \text{ (Вт} \cdot \text{ год/л)}. \quad (2.18)$$

Використовуючи бази даних про технології акумуляторних батарей [92 - 94], на першому етапі методики було виключено ті технології батарей (позначені червоним), які не відповідають за критичними показниками для забезпечення живлення системи безперервного спостереження. Дані відображені на рисунках 2.2 та 2.3, відповідно.

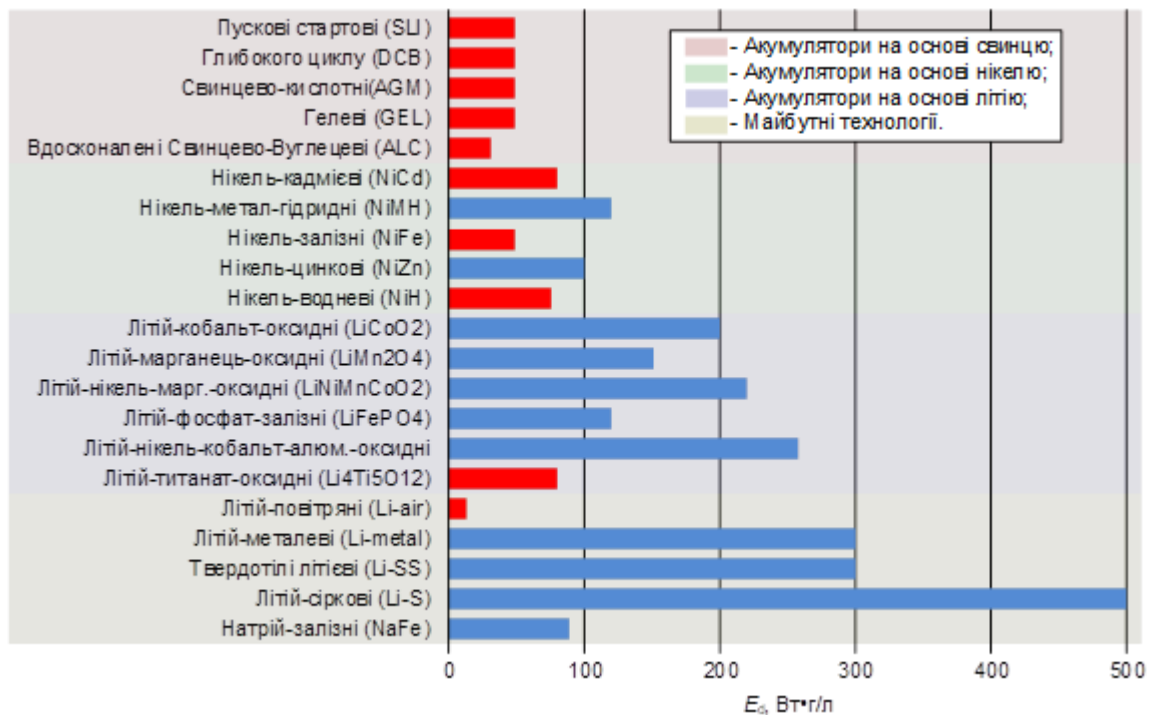


Рисунок 2.2 - Значення об'ємної щільності енергії (Вт· год/л)

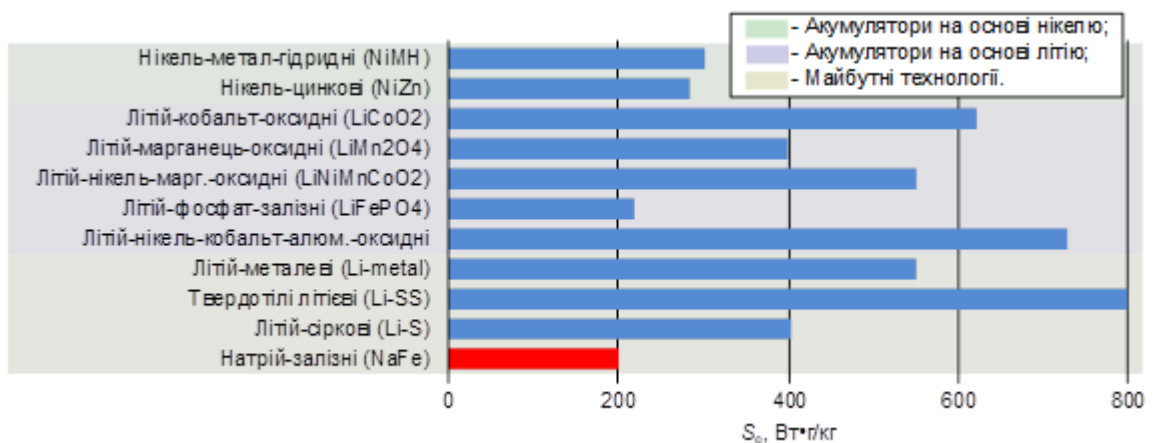


Рисунок 2.3 - Значення питомої густини енергії (Вт· год/л)

Значення щільності енергії та питомої ваги енергії є наближеними до реальних і можуть змінюватися залежно від конкретного хімічного складу, технології виробництва та інших факторів.

Отримані результати попереднього відбору, згруповані за технологіями, наведені в таблиці 2.1, та показують, що літєві акумуляторні батареї в більшості є прийнятними для використання, оскільки забезпечують мінімально необхідні технічні показники, в той час, як свинцеві взагалі не підходять для системи безперервного спостереження.

Таблиця 2.1

Результати попереднього відбору

Нікелеві	Літєві	Свинцеві	Майбутні
NiMH	LiCoO ₂	-	Li-metal
NiZn	LiMn ₂ O ₄	-	Li-S
-	LiNiMnCoO ₂	-	Li-SS
-	LiFePO ₄	-	-
-	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	-	-

Застосування багатокритеріального відбору

Враховуючи те, що для певних перспективних технологій акумуляторних батарей, таких як **літій-металеві** та **натрій-іонні**, у відкритих джерелах станом на зараз відсутня об'єктивна інформація щодо їх параметрів та показників, їх також усунуто від подальшого порівняння. З появою нових даних дана методика повинна бути застосована ще раз, що може призвести у майбутньому до зміни найбільш прийнятної технології для даної сфери застосувань.

Для встановлення вагових коефіцієнтів у методиці було застосовано метод експертних оцінок, результати наведені в таблиці, внесені в таблицю 2.2 та нанесено на рисунок 2.4.

Таблиця 2.2

Вагові коефіцієнти показників

E_i		T_i		P_i	
w_{tr}	0,03	w_{se}	0,32	w_{sb}	0,1
w_{ss}	0,23	w_{ed}	0,09	w_{cs}	0,02
w_{η}	0,04	w_l	0,06	-	-
-	-	w_{st}	0,11	-	-

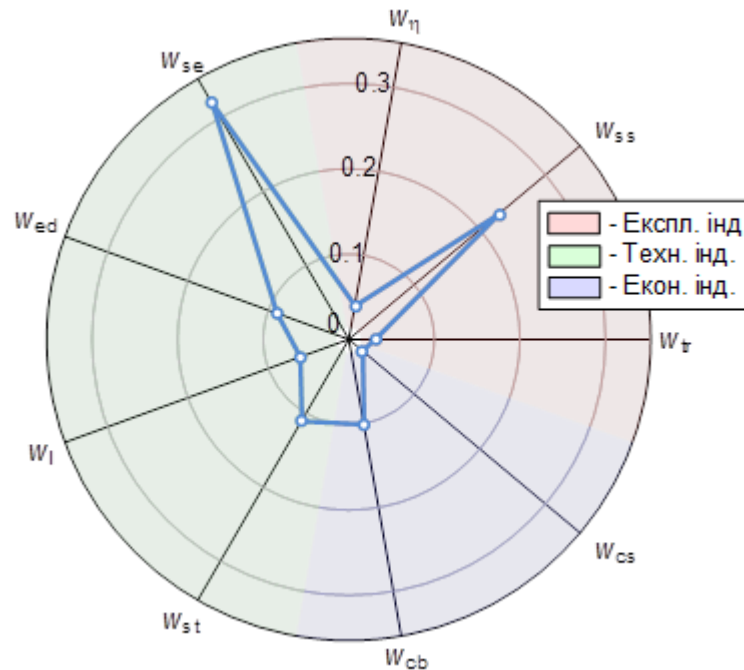


Рисунок 2.4 - Дані вагових коефіцієнтів

Пріоритет надано показнику питомої енергії з коефіцієнтом 0,32 та показнику безпеки з коефіцієнтом 0,23. Таким чином забезпечуються основні вимоги до системи в мінімальній вазі та максимальній безпеці. Розподіл значень показників по технологіях акумуляторних батарей надано в таблиці 2.3.

За допомогою розробленої методики оцінки, та за результатами моделювання, отримуються значення сум індексів. Чим вище значення суми індексів, тим краще технологія підходить для використання в системі безперервного спостереження, враховуючи розподіл вагових коефіцієнтів показників, що оцінювались.

Як видно з рисунку 2.5, нікель-метал-гідридні акумуляторні батареї (NiMH) є найкращими для нашого застосування з точки зору експлуатаційного індексу, в якому визначаючим є показник безпечності. Літій-кобальт-оксидні (LiCoO₂), літій-марганцевий-оксидні (LiMn₂O₄), літій-нікель-марганцево-оксидні (LiNiMnCoO₂),

літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні (NCA) акумуляторні батареї - за експлуатаційним індексом показали себе найгірше. Дані щодо безпечності NiMH акумуляторних батарей вказують на їх стабільність та високу стійкість до неконтрольованого теплового розповсюдження вогню в порівнянні з іншими технологіями.

Таблиця 2.3

Диференційний розподіл значень показників

Параметр	NiMH	NiZn	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiNiMnCoO ₂	LiFePO ₄	NCA
$T_r, ^\circ\text{C}$	65	70	80	80	80	95	80
T_r , р.у.	0	0,167	0,5	0,5	0,5	1	0,5
$T_r \cdot w_{tr}$	0	0,005	0,015	0,015	0,015	0,03	0,015
S_s (коефіцієнт)	18	9	9	9	9	16	9
S_s , р.у.	1	0	0	0	0	0,778	0
$S_s \cdot w_{ss}$	0,23	0	0	0	0	0,179	0
η (% на місяць)	15	30	2	2	2	2	2
η , р.у.	0,464	1	0	0	0	0	0
$\eta \cdot w_\eta$	0,019	0,04	0	0	0	0	0
E_i	0,249	0,045	0,015	0,015	0,015	0,209	0,015
S_e , Вт·г/кг	120	150	200	150	220	120	220
S_e , р.у.	0	0,3	0,8	0,3	1	0	1
$S_e \cdot w_{se}$	0	0,096	0,256	0,096	0,32	0	0,32
E_d , Вт·г/л	300	250	620	400	550	220	730
E_d , р.у.	0,157	0,059	0,784	0,353	0,647	0	1
$E_d \cdot w_{ed}$	0,014	0,005	0,071	0,032	0,058	0	0,09
L , днів	500	300	1000	700	2000	2000	500
L , р.у.	0,118	0	0,412	0,235	1	1	0,118
$L \cdot w_L$	0,007	0	0,025	0,014	0,06	0,06	0,007
S_t , коеф.	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3

S_t , р.у.	0	0,5	1	0,5	1	0,5	1
$S_t \cdot w_{st}$	0	0,055	0,11	0,055	0,11	0,055	0,11
T_i	0,021	0,156	0,461	0,197	0,548	0,115	0,527
C_b , у.о.·кВт·г	300	400	600	500	700	500	800
C_b , р.у.	0	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	1
$C_b \cdot w_{cb}$	0	0,02	0,06	0,04	0,08	0,04	0,1
C_s , у.о.·кВт·г	150	200	300	250	350	250	400
C_s , р.у.	0	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	1
$C_s \cdot w_{cs}$	0	0,004	0,012	0,008	0,016	0,008	0,02
P_i	0	0,024	0,072	0,048	0,096	0,048	0,12
I_{bat}	0,27	0,225	0,548	0,26	0,659	0,372	0,662

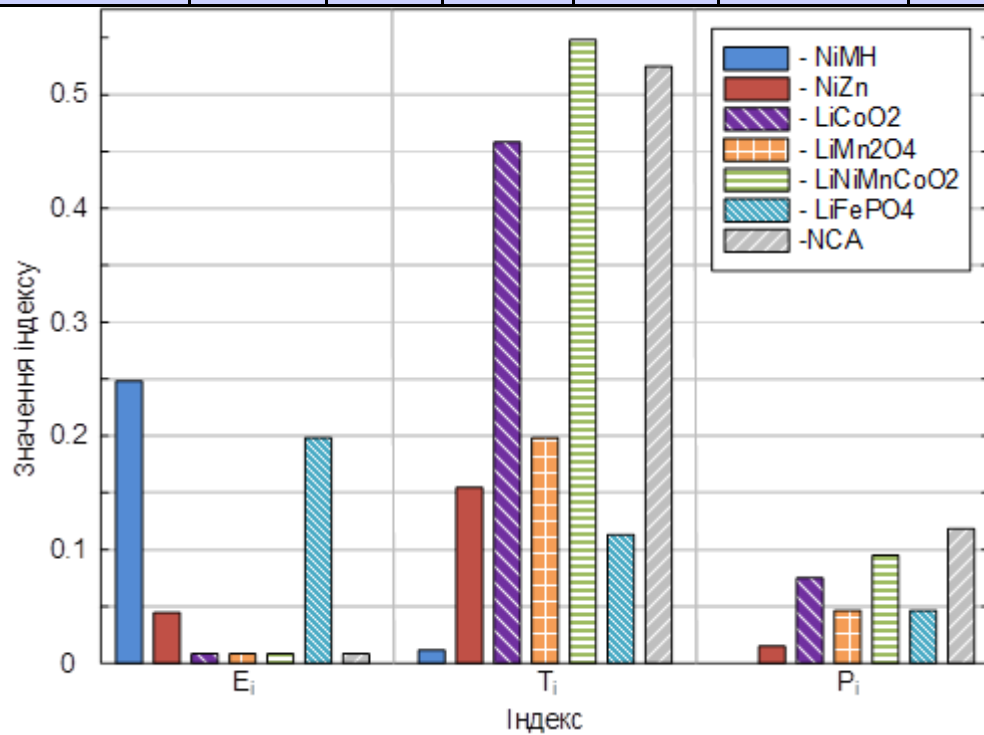


Рисунок 2.5 - Результати розрахунку індексів технологій батареї

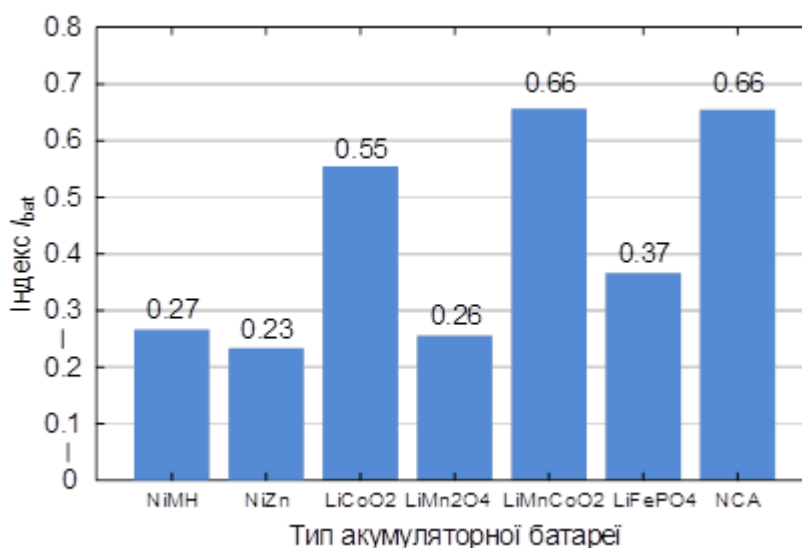


Рисунок 2.6 - Результати значень розрахунку загального індексу технологій акумуляторної батареї I_{bat}

За відомостями, представленими на рисунку 2.5, літій-нікель-марганцево-оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO_2) та літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні акумуляторні батареї (NCA) є найбільш відповідними для нашого застосування з урахуванням технічного індексу, який базується на показнику питомої енергії. Літій-фосфат-залізні (LiFePO_4) та нікель-метал-гідридні (NiMH) акумуляторні батареї - мають найнижчі показники питомої енергії, що впливає на безпосередньо вагу акумуляторної батареї, що є одним з найважливіших критеріїв при виборі відповідної технології для автономної системи.

Як можна помітити на рисунку 2.5 літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні акумуляторні батареї (NCA) та літій-нікель-марганцево-оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO_2) мають найвищий економічний індекс безпосередньо на нього найбільше впливає показник ціни батареї. Найнижчим показником ціни і відповідно найдорожчими є нікель-метал-гідридні (NiMH) акумуляторної батареї.

Результати розрахунків, що наведені на рисунку 2.6, показують, що максимальний загальний індекс батареї (суми окремих індексів) мають літієво-нікелево-марганцеві оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO_2) та літієво-нікелево-кобальтово-алюмінієві оксидні акумуляторні батареї (NCA), що робить ці технології найкращими для даної сфери застосування та можуть бути використані в подальших дослідженнях.

2.3 Моделі та режими роботи акумуляторних батарей, як складових систем безперервного спостереження на базі дронів

Акумуляторна батарея дрона є ключовим елементом для забезпечення безперервного спостереження, оскільки разом з електричною руховою системою (безщітковими двигунами) визначає основні технічні характеристики дрона [117], та впливає на час польоту, що є важливим для розрахунку часу безперервного спостереження та мінімально необхідну кількість дронів у системі. Найпростіша модель акумуляторної батареї дрона може бути представлена як ідеальне джерело напруги з послідовним резистором, що відображає внутрішній опір акумулятора, як показано на рисунку 2.7. Однак, така модель не враховує важливі параметри, як-от ємність акумулятора та вплив рівня заряду (SOC, State of Charge) на його напругу.

Однією з найпоширеніших математичних моделей, яка враховує ці параметри, є модель Шеперда [118]. Вона ґрунтується на керованому джерелі напруги, де вихідна напруга визначається обсягом вилученого заряду та ємністю акумулятора, як показано на рисунку 2.7b. Ця модель забезпечує більш точне прогнозування поведінки акумулятора під час експлуатації дронів, що є важливим для ефективного планування польотів і забезпечення їх енергоефективності.

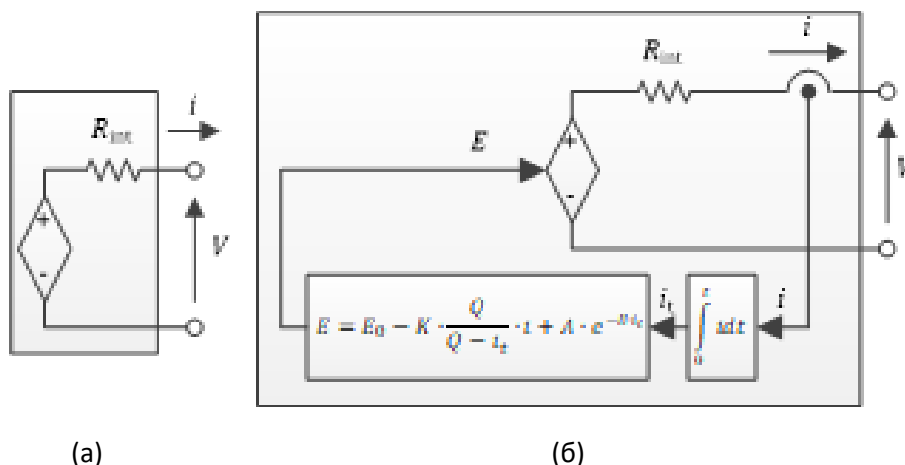


Рисунок 2.7 - Спрощена (a) та модель Шеперда (b) моделі акумуляторів.

$$\begin{cases} E = E_0 - K \frac{Q_b}{Q_b - i_t} i + A e^{-B i_t} = E_0 - K \frac{1}{SOC} i + A e^{-B i_t} \\ V = E - R_{int} \cdot i \\ i_t = \int_0^t i dt \end{cases} \quad (2.19)$$

де E – напруга без навантаження (напруга холостого ходу), В; E_0 – номінальна напруга акумулятора, В; K – коефіцієнт поляризаційного опору, Ом; Q_b – ємність акумулятора, А·год; i_t – вилучений заряд акумулятора, А·год; A – амплітуда експоненціальної зони, В; B – зворотна постійна часу експоненціальної зони, А·год⁻¹; R_{int} – внутрішній опір акумулятора, Ом; V – напруга акумулятора, В; i – струм акумулятора, А; $SOC = (Q_b - i_t)/Q_b$ – рівень заряду акумулятора.

Коефіцієнти моделі Шеперда (K , A , B) залежать від типу акумулятора та електрохімічних процесів у ньому. Їх можна визначити емпіричним шляхом за допомогою експериментальних випробувань акумуляторів. Проте крива розряду всіх типів акумуляторів має подібну форму, показану на рисунку 2.8, і складається з трьох частин: експоненціальний режим, коли акумулятор повністю заряджений, номінальний режим, коли акумулятор віддає накопичений заряд. Цей режим триває до моменту глибокого розряду, коли напруга акумулятора різко падає. Акумулятор можна використовувати до кінця номінального режиму, коли заряд, вилучений з акумулятора, досягає Q_{nom} . Максимальний заряд акумулятора Q_{max} не може бути досягнутий на практиці, оскільки напруга в цьому режимі значно нижча за номінальну напругу акумулятора і наближається до 0.

Хоча ємність акумулятора та профіль його розряду визначають час роботи дрона, профіль заряджання є важливим для дронів в автономних системах постійного спостереження, де дрон заряджається, а акумулятор не замінюється на повністю заряджений оператором. У найпростішому профілі заряджання може використовуватися режим постійного струму (CC), але в такому разі акумулятор буде швидше деградувати, якщо зарядний струм буде високим. Водночас, низький струм не буде впливати на продуктивність акумулятора, але процес заряджання буде занадто повільним, що неприйнятно для автономних систем, коли дрон має заряджатися якнайшвидше. Зарядний профіль з постійним струмом і постійною напругою (CC-CV), як показано на рисунку 2.9, рекомендується для літій-іонних акумуляторів, оскільки він забезпечує баланс між швидким заряджанням (CC з високим струмом для SOC до 60-70%) та старінням акумулятора, викликаним швидким заряджанням.

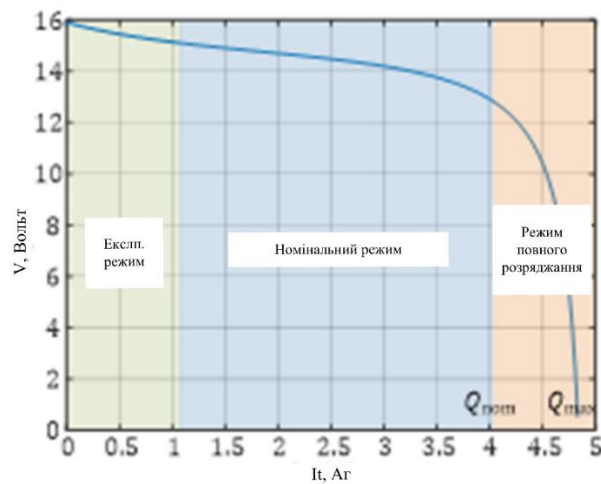


Рисунок 2.8 - Крива розряду літій-іонного акумулятора на основі моделі Шеперда.

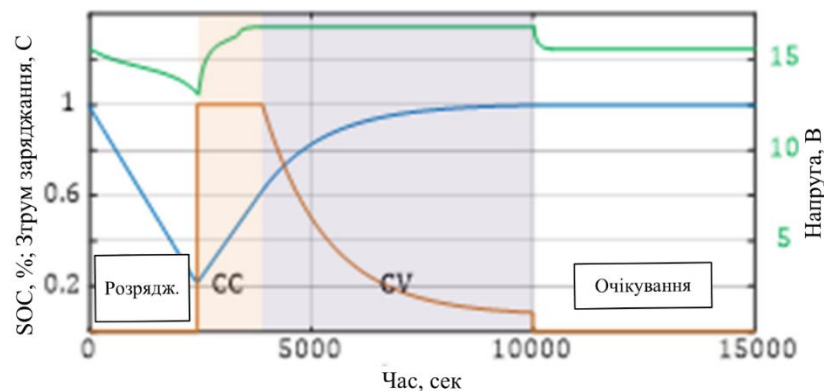


Рисунок 2.9 - Профіль заряджання літій-іонних акумуляторів з постійним струмом і постійною напругою (CC-CV).

Слід зазначити, що з урахуванням нелінійних змін SOC у режимі CV важко аналітично обчислити точний час заряджання акумулятора і забезпечити повну аналітичну модель системи.

Запропоновані спрощені моделі акумуляторів ефективно описують основні етапи розряду та заряджання акумуляторів, що є важливим для аналізу енергоспоживання дрону. Такі моделі дозволяють зрозуміти поведінку акумуляторів під час стандартної експлуатації та можуть бути застосовані для оцінки тривалості спостереження і розробки стратегій оптимізації енергозабезпечення. Однак ці моделі не враховують значну кількість зовнішніх факторів, які можуть мати критичний

вплив на фактичні робочі умови дронів, таких як температурні коливання, вологість, швидкість і напрям вітру, а також інші аеродинамічні характеристики.

Наприклад, у дослідженні автора Li Niansi [119] наведено, що високі температури можуть суттєво зменшити термін служби батарей. Це дослідження показує, що для забезпечення стабільності енергопостачання в екстремальних умовах необхідні додаткові заходи з охолодження та теплового захисту акумуляторів.

Інше дослідження, автора Wang S [120], розглядає вплив струму та температури на внутрішню теплову реакцію батареї, виявляючи складну залежність між цими параметрами. У статті [121] акцент зроблено на оптимізації польотів дрону з урахуванням невизначеності тривалості заряду акумуляторів та змін температури навколишнього середовища. Це дослідження підкреслює необхідність інтеграції адаптивних стратегій планування польоту для підвищення продуктивності польотів. Прогнозування стану заряду (SOC) є ще однією важливою темою, розглянутою у дослідженні [122], де автори пропонують метод опорних векторів для точного визначення SOC у складних умовах експлуатації. Нарешті, автори публікації [123] пропонує глибокий аналіз характеристик та стратегій використання акумуляторів у різних температурних умовах, пропонуючи практичні рішення для подовження терміну їх служби.

В публікаціях авторів [82, 124] були розглянуті основні фактори, які можуть впливати на тривалість польоту дронів. З цих факторів можна виділити ті, що впливають на розряд бортової акумуляторних батарей, а саме:

- температура зовнішнього середовища;
- значна зміна висоти (більше 50 м);
- пориви вітру;
- вага цільового навантаження.

З огляду на критичний вплив температури, висоти та вітру на роботу акумуляторних батарей, важливо оцінити ці фактори комплексно. Наступний підрозділ фокусується на аналізі ефективності накопичувачів енергії в умовах змінних зовнішніх впливів.

2.4 Вдосконалення моделі ємності акумуляторної батареї для умов змінної температури та атмосферного тиску

Збільшення інтересу до проведення досліджень у напрямку адаптації акумуляторних батарей до впливу низьких та високих температурних умов підтверджує важливість врахування цих факторів для надійної роботи систем спостереження.

З метою врахування в моделі ємності акумуляторних батарей впливу зовнішніх факторів, були отримані дані, результатів перевірок (випробувань), від одного з провідних підприємств-виробників дронів. Зазначені дані дозволяють аналізувати показники бортових акумуляторних батарей в різних умовах експлуатації.

Діапазон значень показників умов перевірки у наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Умови перевірок (випробувань)

Умови середовища польоту дрону	Діапазон значень	Крок значень з якими проводилась перевірка
Температура (°C)	-20...+50	5
Атмосферний тиск (гПа)	998...1016	1
Висота ASL (м)	230...480	1

Підприємством-виробником були надані дані про коефіцієнт ефективності акумуляторної батареї, як комплексного параметру, в різних умовах експлуатації. За результатами проведеного аналізу дані були систематизовані та занесені до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Коефіцієнт ефективності акумуляторної батареї дрону

	-20°C	-15°C	-10°C	-5°C	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C
1018	95	96	97	98	99	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91
1017	94.3	95.4	96.4	97.7	98.1	99.2	98.1	97.7	96.4	95.4	94.3	93.3	92.2	91.2	90.1
1016	93.7	94.8	95.8	97.3	97.7	98.5	97.7	97.3	95.8	94.8	93.7	92.5	91.4	90.4	89.3
1015	93.0	94.2	95.2	97.0	97.4	98	97.4	97.0	95.2	94.2	93.0	91.8	90.6	89.6	88.4

	-20°C	-15 °C	-10 °C	-5 °C	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C
1014	92.4	93.6	94.6	96.6	97.1	97.8	97.1	96.6	94.6	93.6	92.4	91.1	89.8	88.8	87.6
1013	91.7	93.0	94.1	96.3	96.8	97.6	96.8	96.3	94.1	93.0	91.7	90.3	89.0	88.0	86.7
1012	91.0	92.4	93.5	95.9	96.5	97.4	96.5	95.9	93.5	92.4	91.0	89.6	88.2	87.2	85.9
1011	90.4	91.8	92.9	95.6	96.2	97.2	96.2	95.6	92.9	91.8	90.4	88.8	87.4	86.4	85.0
1010	89.7	91.2	92.3	95.2	95.9	97	95.9	95.2	92.3	91.2	89.7	88.1	86.6	85.6	84.1
1009	89.1	90.6	91.7	94.9	95.6	96.8	95.6	94.9	91.7	90.6	89.1	87.4	85.8	84.8	83.3
1008	88.4	90.0	91.1	94.5	95.3	96.6	95.3	94.5	91.1	90.0	88.4	86.6	85.0	84.0	82.4
1007	87.7	89.4	90.5	94.2	95	96.4	95	94.2	90.5	89.4	87.7	85.9	84.2	83.2	81.6
1006	87.1	88.8	89.9	93.8	94.7	96.2	94.7	93.8	89.9	88.8	87.1	85.2	83.4	82.4	80.7
1005	86.4	88.2	89.3	93.5	94.4	96	94.4	93.5	89.3	88.2	86.4	84.4	82.6	81.6	79.9
1004	85.8	87.6	88.7	93.1	94.1	95.8	94.1	93.1	88.7	87.6	85.8	83.7	81.8	80.8	79.0
1003	85.1	87.0	88.1	92.8	93.8	95.6	93.8	92.8	88.1	87.0	85.1	83.0	81.0	80.0	78.1
1002	84.4	86.4	87.6	92.4	93.5	95.4	93.5	92.4	87.6	86.4	84.4	82.2	80.2	79.2	77.3
1001	83.8	85.8	87.0	92.1	93.2	95.2	93.2	92.1	87.0	85.8	83.8	81.5	79.4	78.4	76.4
1000	83.1	85.2	86.4	91.7	92.9	95	92.9	91.7	86.4	85.2	83.1	80.8	78.6	77.6	75.6
999	82.5	84.6	85.8	91.4	92.6	94.8	92.6	91.4	85.8	84.6	82.5	80.0	77.8	76.8	74.7
998	81.8	84.0	85.2	91.0	92.3	94.6	92.3	91.0	85.2	84.0	81.8	79.3	77.0	76.0	73.9

Попередній аналіз даних дозволяє встановити, що залежності є майже кусково-лінійними, причому точка зміни залежності відповідає значенню температури акумулятору, що дорівнює 5°C, як ілюстровано на рисунку 2.10.

Таким чином, в узагальненому вигляді залежність можна представити системою лінійних рівнянь.

$$k_e = a_1 \cdot T + b_1, \text{ для } T \leq 5^\circ C, \quad (2.20)$$

$$k_e = a_2 \cdot T + b_2, \text{ для } T \geq 5^\circ C, \quad (2.21)$$

Більш детально проаналізувавши залежності до та після точки, яка відповідає $T = 5^\circ C$ можна встановити, що залежності є симетричними відносно цієї точки, тобто, в розрахунках можна враховувати не абсолютну температуру, а зміну температури $\Delta T = T - T_0$, де $T_0 = 5^\circ C$, сама залежність таким чином прийме вигляд:

$$k_e = a \cdot \Delta T + b, \quad (2.22)$$

Коефіцієнт ефективності також залежить від тиску, який змінює коефіцієнти a та b , тобто, вони є функціями від p : $a = f(p)$, $b = f(p)$, які також є лінійними залежностями. Перейшовши до відносних змін, прийнявши $p_0 = 1018 \text{ hPa}$, отримаємо: $\Delta p = p - p_0$, $a = a_3 \cdot \Delta p + b_3$, $b = a_4 \cdot \Delta p + b_4$. Для лінеаризації використаємо наступні опорні точки: 5°C та 1018 hPa , 5°C та 998 hPa , -20°C та 1018 hPa , -20°C та 998 hPa . Склавши декілька систем алгебраїчних рівнянь визначимо всі невідомі коефіцієнти a_3 , a_4 , b_3 , b_4 .

Таким чином, отримуємо кінцеве рівняння, яке визначатиме залежність коефіцієнту ефективності акумуляторної батареї від температури та атмосферного тиску:

$$k_e = f(\Delta p, \Delta T) = -(0,0156 \cdot \Delta p + 0,2) \cdot \Delta T + (-0,27 \cdot \Delta p + 100). \quad (2.23)$$

З використанням отриманої формули визначимо похибку лінеаризації, розрахувавши значення k_e для всіх значень температури та тиску, наведених в таблиці 2.5. Результати розрахунку наведено на рисунку 2.11, з яких видно, що похибка лінеаризації лежить в межах $-3,17\% \dots +2,02\%$ - що є прийнятним значенням.

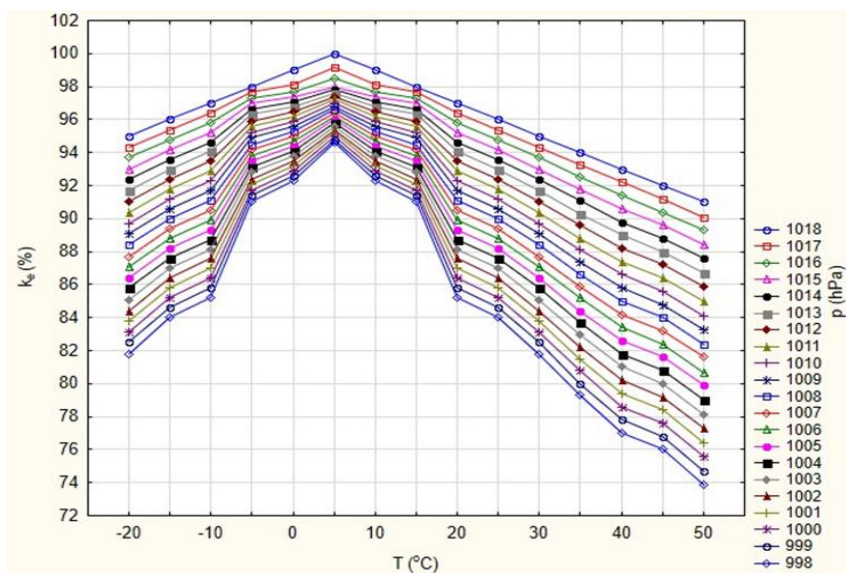


Рисунок 2.10 - Коефіцієнт ефективності ($k_e, \%$) АКБ в залежності від зовнішньої температури ($T^\circ\text{C}$) та атмосферного тиску (hPa).

	25	20	15	10	5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1	0,04%	0,02%	0,10%	-0,13%	0,56%	0,53%	0,56%	-0,13%	0,10%	0,02%	0,04%	-0,04%	-0,02%	-0,10%	-0,08%
2	-0,02%	0,04%	0,20%	-0,16%	0,62%	0,97%	0,62%	-0,16%	0,20%	0,04%	-0,02%	0,03%	-0,04%	-0,21%	-0,27%
3	0,02%	0,06%	0,30%	-0,29%	0,57%	1,21%	0,57%	-0,29%	0,30%	0,06%	0,02%	-0,02%	-0,05%	-0,31%	-0,36%
4	-0,04%	0,08%	0,41%	-0,31%	0,52%	1,15%	0,52%	-0,31%	0,41%	0,08%	-0,04%	-0,06%	-0,07%	-0,42%	-0,56%
5	0,00%	0,10%	0,40%	-0,45%	0,48%	1,08%	0,48%	-0,45%	0,40%	0,10%	0,00%	0,01%	-0,09%	-0,53%	-0,65%
6	0,04%	0,12%	0,51%	-0,48%	0,43%	1,01%	0,43%	-0,48%	0,51%	0,12%	0,04%	-0,03%	-0,11%	-0,65%	-0,85%
7	-0,02%	0,14%	0,62%	-0,61%	0,38%	0,94%	0,38%	-0,61%	0,62%	0,14%	-0,02%	0,04%	-0,13%	-0,76%	-0,95%
8	0,02%	0,16%	0,72%	-0,64%	0,33%	0,87%	0,33%	-0,64%	0,72%	0,16%	0,02%	0,00%	-0,15%	-0,88%	-1,04%
9	-0,04%	0,18%	0,83%	-0,77%	0,28%	0,80%	0,28%	-0,77%	0,83%	0,18%	-0,04%	-0,05%	-0,17%	-1,00%	-1,26%
10	0,00%	0,20%	0,94%	-0,80%	0,23%	0,72%	0,23%	-0,80%	0,94%	0,20%	0,00%	0,02%	-0,19%	-1,12%	-1,36%
11	0,05%	0,22%	1,06%	-0,94%	0,18%	0,65%	0,18%	-0,94%	1,06%	0,22%	0,05%	-0,02%	-0,21%	-1,24%	-1,58%
12	-0,02%	0,24%	1,17%	-0,97%	0,13%	0,58%	0,13%	-0,97%	1,17%	0,24%	-0,02%	-0,07%	-0,23%	-1,37%	-1,69%
13	0,02%	0,27%	1,29%	-1,11%	0,08%	0,51%	0,08%	-1,11%	1,29%	0,27%	0,02%	0,01%	-0,25%	-1,50%	-1,92%
14	-0,05%	0,29%	1,40%	-1,14%	0,03%	0,44%	0,03%	-1,14%	1,40%	0,29%	-0,05%	-0,04%	-0,27%	-1,63%	-2,04%
15	0,00%	0,31%	1,52%	-1,28%	-0,02%	0,37%	-0,02%	-1,28%	1,52%	0,31%	0,00%	-0,08%	-0,30%	-1,76%	-2,15%
16	0,05%	0,33%	1,53%	-1,32%	-0,07%	0,29%	-0,07%	-1,32%	1,53%	0,33%	0,05%	-0,01%	-0,32%	-1,90%	-2,40%
17	-0,02%	0,36%	1,65%	-1,46%	-0,12%	0,22%	-0,12%	-1,46%	1,65%	0,36%	-0,02%	-0,06%	-0,34%	-2,04%	-2,52%
18	0,02%	0,38%	1,77%	-1,49%	-0,18%	0,15%	-0,18%	-1,49%	1,77%	0,38%	0,02%	-0,10%	-0,37%	-2,18%	-2,77%
19	-0,05%	0,40%	1,89%	-1,63%	-0,23%	0,07%	-0,23%	-1,63%	1,89%	0,40%	-0,05%	-0,03%	-0,39%	-2,33%	-2,90%
20	0,00%	0,43%	2,02%	-1,67%	-0,28%	0,00%	-0,28%	-1,67%	2,02%	0,43%	0,00%	-0,08%	-0,42%	-2,47%	-3,17%

Рисунок 2.11 - Похибка лінеаризації коефіцієнту АКБ.

Враховуючи відповідні значення для вдосконалення моделі ємності акумуляторної батареї необхідне виконання рівності:

$$C \geq \frac{\sum_{i=0}^n q_i - q_r}{0,01 \cdot k_e}, \quad (2.24)$$

де q_i – споживання енергії на політ (включаючи зліт, посадку та прямолінійний рух) які витрачаються на хвилину польоту, $\text{мА} \cdot \text{год}$, q_r – необхідний зарезервований залишок енергії, $\text{мА} \cdot \text{год}$.

З метою визначення доцільності використання запропонованих змін в модель ємності, розраховано тривалість польоту дрону (t_{max} , хв) для спостереження певної території.

$$t_{max} = \frac{C - q_r}{100 \cdot q_i} \cdot k_e \quad (2.25)$$

Використовуючи дані моделі дрону з таблиці 2.6, розраховано час польоту дрону при різних умовах експлуатації. Отримані результати свідчать про зменшення тривалості польоту на 1...5 хвилин в порівнянні з розрахованою тривалістю польоту без урахування коефіцієнта ефективності. Рисунок 2.12 візуалізує результати розрахунку.

Таблиця 2.6

Розрахункові значення параметрів для розрахунку тривалості польоту дрону

Показник	Значення (мА·год)
q_r	600
q_i	240

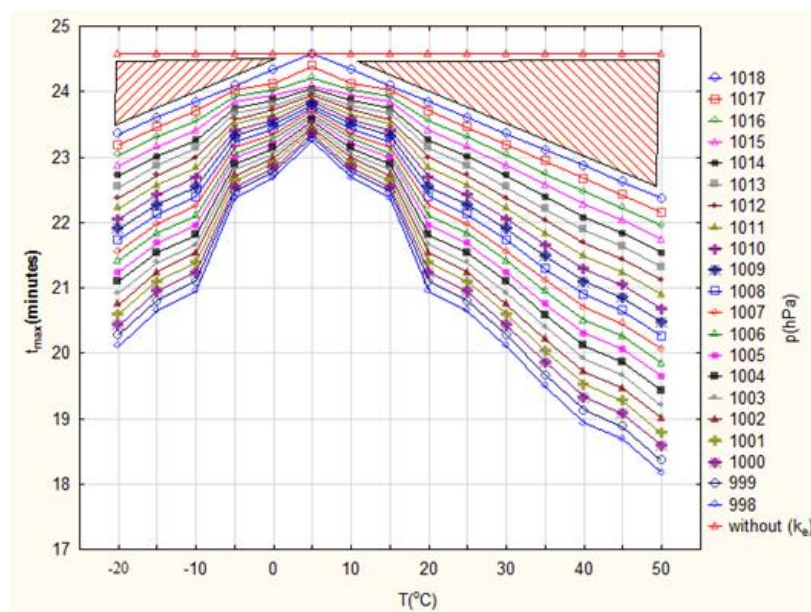


Рисунок 2.12 - Розрахункова тривалість польоту без/з урахуванням коефіцієнта ефективності акумулятору.

Таким чином підтверджено значний вплив коефіцієнту ефективності акумуляторних батарей на тривалість польоту дронів. Отримані результати дозволяють врахувати реальні умови експлуатації при проєктуванні систем безперервного спостереження на базі дронів

2.5 Висновки до розділу 2

Акумуляторні батареї є основними компонентами автономних систем енергозабезпечення комплексів безперервного спостереження на основі мультикоптерних безпілотних літальних апаратів з електричними рушіями. Вони використовуються як у самих безпілотах – для живлення електричних двигунів, так і у складі наземної компоненти – для заряджання акумуляторних батарей

безпілотників, що повернулися для підзарядки. В рамках проведених досліджень, пов'язаних із особливостями застосуванням акумуляторних батарей у таких системах, було отримано нові наукові результати, до основних з яких відноситься наступне.

1. Вдосконалено існуючу методику вибору технології акумуляторних батарей на основі комплексного критерію оптимальності, яка на відміну від існуючих складється з двох етапів відбору та базується на застосуванні трьох індексів – експлуатаційного, технічного та економічного.

2. В результаті застосування запропонованої методики та проведеного багатокритеріального аналізу за методом Сааті встановлено, що акумулятори на основі літійово-нікелево-марганцево-оксидної та літійово-нікелево-кобальтово-алюмінієво-оксидної технологій є найкращими для застосування у якості накопичувачів електричної енергії у складі наземної складової системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на основі мультикоптерних безпілотних літальних апаратів з електричними рушіями.

3. Вдосконалено математичну модель ємності акумуляторних батарей, яка на відміну від існуючих враховує зміну температури та атмосферного тиску на основі технічних даних отриманих від підприємства-виробника, що дозволяє врахувати зміну ємності акумуляторної батареї безпілотного літального апарату під час польоту.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ БПЛА У СКЛАДІ КОМПЛЕКСУ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

У попередніх розділах було розглянуто концептуальну модель системи безперервного спостереження на основі дронів, яка включає декілька секцій спостереження з комбінованим електроживленням (підрозділ 1.4.2). Запропонована система складається з основної наземної системи електрозабезпечення, що містить фотоелектричну систему (ФЕС) та систему зберігання енергії (СЗЕ), а також допоміжної системи електрозабезпечення – промислової електромережі змінного струму. Кожна секція спостереження містить зарядну станцію та визначену зону, де дрони виконують спостереження та з якої періодично повертаються для заряджання. У розділі 1 було наведено загальну архітектуру системи, яка забезпечує безперервну роботу дронів шляхом оптимального управління електроенергією та використання ланок постійного струму.

На відміну від загальної моделі з кількома зонами спостереження, цей розділ зосереджується на аналізі ефективності роботи системи в межах однієї визначеної зони спостереження. Такий підхід дозволяє детально вивчити основні енергетичні параметри дронів у базовому профілі польоту, а також сформулювати методику оцінки, яка може бути застосована для розширених сценаріїв з декількома зонами спостереження.

3.1 Оцінка максимальної дальності спостереження для базового профілю польоту

Максимальна дальність польоту дронів, а також час зависання в точці спостереження залежать від ряду факторів, серед яких: режим профілю польоту, технічні характеристики акумуляторної батареї, енергоспоживання на різних етапах польоту, а також зовнішні умови. У даному підрозділі розглянуто базовий профіль польоту для комплексу безперервного спостереження, який включає вертикальний зліт, горизонтальний політ до точки спостереження, зависання, повернення назад, а також процеси заряджання акумуляторних батарей. Проведено оцінку складових енергетичних витрат на кожному етапі польоту та визначено критерії заміни дронів для забезпечення безперервності спостереження.

Схематичний вигляд польоту до бажаної точки спостереження наведено на рисунку 3.1. Початок системи координат $(0,0)$ відповідає зарядній станції акумуляторних батарей, тоді як координати точки спостереження, де дрон повинен зависнути і здійснювати спостереження, становлять (x_D, y_D) . Траєкторія польоту для спрощення є ортогональною: вертикальний зліт до досягнення висоти дрона y_D , горизонтальний політ до точки спостереження та зависання там, надсилення команди на запуск наступного дрона, коли рівень заряду акумуляторної батареї знизиться до певного рівня, зависання й очікування наступного дрона, після чого повернення тим самим маршрутом для перезарядки. Деталізований профіль польоту, що включає зміни в координатах x і y дронів з часом, струм та стан заряду батареї (SOC), показано на рисунку 3.2.

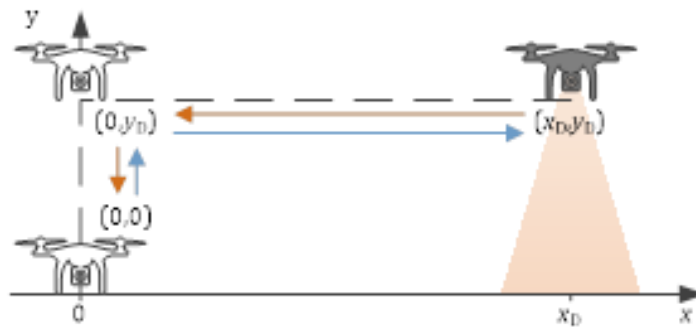


Рисунок 3.1 - Схематичний вигляд польоту до точки спостереження та від неї.

Запропонований профіль польоту складається з наступних етапів – режимів профілю польоту, що повторюються циклічно (де n – номер дрона: $n \in [1, N]$, N – загальна кількість дронів, що використовуються для безперервного спостереження, i – номер польоту).

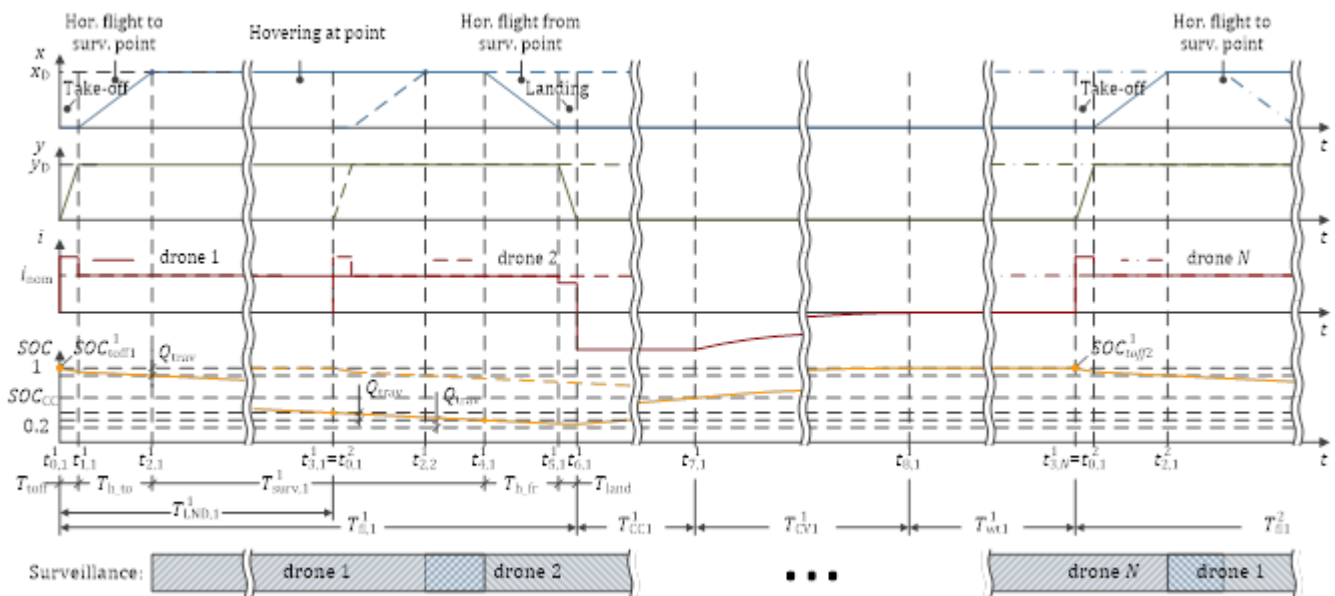


Рисунок 3.2 - Детальний профіль польоту для постійного спостереження

Вертикальний зліт ($T_{toff} = t_{1,n}^i - t_{0,n}^i$) з постійною швидкістю. Початкове значення SOC дорівнює 1 (повністю заряджена батарея). Робочий струм навантаження перевищує номінальний струм польоту I_{nom} , перехідні процеси зміни значень струму на цьому та наступних етапах ігноруються. Етап завершується в момент часу $t_{1,n}$, коли дрон досягає висоти y_D .

Горизонтальний політ до точки спостереження ($T_{h-to} = t_{2,n}^i - t_{1,n}^i$) з постійною швидкістю та номінальним струмом польоту I_{nom} . Етап завершується в момент часу $t_{2,n}^i$, коли дрон досягає точки x_D . Ємність акумуляторної батареї, витрачена на політ від точки заряджання до точки спостереження Q_{trav} , обчислюється за формулою:

$$Q_{trav} = SOC_n(t_{0,n}^i) - SOC_n(t_{2,n}^i). \quad (3.1)$$

Зависання в точці спостереження ($T_{surv,n}^i(i,n) = t_{4,n}^i - t_{2,n}^i$) з номінальним струмом I_{nom} . Етап завершується в момент $t_{4,n}^i$, коли SOC знизиться до:

$$SOC_n(t_{4,n}^i) = SOC_{min} + Q_{trav}, \quad (3.2)$$

де $SOC_{min} = 0.2$ – рівень SOC з максимальним можливим розрядом батареї, коли напруга батареї починає різко знижуватися. Коли SOC у момент часу $t_{3,n}^i$ досягає рівня:

$$SOC_n(t_{3,n}^i) = SOC_{min} + 2 \cdot Q_{trav}, \quad (3.3)$$

команду на запуск наступного дрона $n+1$ буде відправлено для забезпечення безперервного спостереження. У цьому випадку дрон n у точці спостереження буде замінений дроном $n+1$, коли його SOC знизиться до рівня $SOC_n(t_{4,n}^i)$. Тривалість інтервалу від початку польоту дрона з точки заряджання до моменту відправлення команди на запуск наступного дрона $T_{LND,n}^i(i, n) = t_{3,n}^i - t_{0,n}^i$.

Горизонтальний політ від точки спостереження ($T_{h_fr} = t_{5,n}^i - t_{0,n}^i$) з постійною швидкістю та струмом I_{nom} .

Посадка ($T_{land} = t_{6,n}^i - t_{5,n}^i$) з постійною швидкістю та робочим струмом навантаження, нижчим за струм I_{nom} .

Заряджання в режимі CC ($T_{CC,n}^i(i, n) = t_{7,n}^i - t_{6,n}^i$) з постійним струмом.

Заряджання в режимі CV ($T_{CV,n}^i(i, n) = t_{8,n}^i - t_{7,n}^i$) з постійною напругою.

Очікування команди на запуск наступного польоту $i+1$ від дрона номер $n-1$ ($T_{wt,n}^i(i, n) = t_{3,n-1}^i - t_{8,n}^i$).

Такий профіль польоту забезпечує перекриття спостереження під час кожного польоту i ($t_{2,n+1}^i - t_{4,n}^i$), оскільки витрати на політ вперед від зарядної станції до точки спостереження, буде трохи більшим, ніж для зворотного польоту. Однак, для точнішого планування завдань необхідно детальніше оцінити споживання енергії на кожному етапі польоту, враховуючи зміну умов середовища, параметри акумуляторної батареї та ефективність систем енергозабезпечення дрона. Це потребує встановлення граничних умов, за яких можливе підтримання постійного спостереження протягом тривалого часу, що й стане предметом розгляду в наступному підрозділі.

3.1.1 Споживання енергії та граничні умови для постійного спостереження

Розрахунок часових інтервалів, а також електроспоживання на кожному етапі профілю польоту, описаних вище, є ключовим моментом для оцінки можливості безперервного спостереження за допомогою дронів. Важливими складовими є зліт, горизонтальний політ до точки спостереження, зависання, повернення та посадка.

Для цього слід провести розрахунок витрат електроенергії, враховуючи як характеристики дрона, так і параметри польоту. Формули нижче визначають обсяг електроенергії, що витрачається на зліт, горизонтальний політ та посадку відповідно:

$$Q_{toff} = I_{toff} \cdot T_{toff} = I_{toff} \cdot \frac{y_D}{S_{ver}}, \quad (3.4)$$

$$Q_{h-to} = Q_{h-fr} = I_{nom} \cdot T_{h-to} = I_{nom} \cdot \frac{x_D}{S_{hor}}, \quad (3.5)$$

$$Q_{land} = I_{land} \cdot T_{land} = I_{land} \cdot \frac{y_D}{S_{ver}}, \quad (3.6)$$

де Q_j – споживання енергії у j -режимі, А·год; I_j – робочий струм навантаження у j -режимі, А; S_{ver} і S_{hor} – вертикальна та горизонтальна швидкість дрона, км/год.

Альтернативно, тривалість часових інтервалів, таких як $T_{(surv,n)}^i = f(SOC_{toffn}^i)$, $T_{LND,n}^i = f(SOC_{toffn}^i)$, $T_{(CC,n)}^i = f(SOC_{toffn}^i)$ та відповідні частини енергоспоживання загалом залежать від початкового рівня заряду SOC_{toffn}^i для дрона на початку кожного польоту, який своєю чергою залежить від SOC під час попереднього польоту $i-1$ SOC_{toffn}^{i-1} , і так далі. Це означає, що для кожного польоту та кожного дрона слід знайти рекурентні співвідношення SOC: $SOC_{toffn}^i = f(SOC_{toffn}^{i-1})$. Враховуючи, що зміна SOC під час режиму CV є нелінійною, аналітичне рішення може бути складно знайти, але можна використовувати чисельні розрахунки та комп'ютерне моделювання.

Профіль польоту, показаний на рисунку 3.2, забезпечує гарантоване безперервне спостереження, оскільки батарея дрона 1 у момент $t_{8,1}^1$ вже повністю заряджена після першого польоту, і команда на запуск цього дрона надходить після цього часу від дрона $n-1$: $t_{0,1}^2 = t_{3,n-1}^1 > t_{8,1}^1$, $T_{wt1}^1 \geq 0$, $T_{wt1}^1 \geq 0$, $SOC_{toff2}^i = 1$. В деяких випадках, коли дрон не повністю заряджений перед наступним польотом, $SOC_{toffn}^i < 1$, можливі два варіанти:

- після перехідного процесу та кількох послідовних польотів рівень заряду батареї досягне певного стабільного значення $SOC_{toffn}^i = SOC_{ss}^i > 0$;
- рівень заряду буде постійно знижуватись до 0, кожен наступний політ буде коротшим за попередній, і безперервне спостереження стане неможливим.

Умови для таких варіантів та розрахунки стабільного значення не обговорюються в даному розділі дисертації та можуть бути детально досліджені в майбутньому.

З іншого боку, якщо точка спостереження буде надто далеко, безперервне спостереження буде неможливим через те, що енергоспоживання для польоту від зарядної станції до точки спостереження і назад, а також для очікування заміни дрона перевищить максимальний доступну ємність акумуляторної батареї Q_{nom} . Іншими словами, дрон n повинен надіслати команду для наступного дрона $n+1$ ще до того, як дрон n досягне точки спостереження. Враховуючи, що споживання енергії $Q_{toff}, Q_{hto} = Q_{hfr}, Q_{land}$, як видно з формули (3.3), залежить тільки від координат точки спостереження і специфікацій дрона, вираз, що описує можливість безперервного спостереження, можна записати так:

$$\begin{aligned} Q_{max} &\geq 2Q_{toff} + 2Q_{hto} + Q_{hfr} + Q_{land} + SOC_{min} \\ &= \frac{y_D}{s_{ver}} (2I_{toff} + I_{land}) + 3I_{nom} \cdot \frac{x_D}{s_{hor}} + SOC_{min} \cong \\ &\cong 3 \cdot Q_{trav} + SOC_{min}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Для подальшого аналізу можливостей безперервного спостереження важливо не лише розрахувати споживання енергії на різних етапах профілю польоту, але й врахувати стабільність системи під час багаторазових циклів польоту. Саме рекурентні співвідношення, що визначають початковий рівень заряду батареї на початку кожного польоту, є ключовими для визначення сталого режиму роботи дронів під час тривалих завдань. У підрозділі 3.1.2 розглянуто результати чисельного моделювання, що демонструють поведінку рівня заряду батарей у таких циклічних умовах, а також оцінку граничних умов, за яких можлива підтримка безперервного спостереження.

3.1.2 Моделювання процесів у системах безперервного спостереження

Моделювання процесів у системах безперервного спостереження з використанням дронів потребує встановлення чітких початкових умов та обґрунтованих припущень, що враховують особливості енергоспоживання, параметри польоту та характеристики зарядних профілів дронів. У цьому підрозділі представлено ключові допущення, що спрощують моделювання, але дозволяють

зберегти достатню точність результатів для аналізу системи. Вибір цих допущень базується на аналізі сучасних комерційних моделей дронів, таких як DJI Mavic 3, та їх експлуатаційних характеристик. Зокрема, було враховано типові режими польоту, профілі зарядки, а також параметри батарей, що мають найбільший вплив на тривалість та стабільність роботи дронів у системах спостереження.

3.1.2.1. Початкові умови для моделювання

Наступні припущення використовувалися для моделювання процесів у системах спостереження з використанням дронів:

- усі дрони мають однакові параметри батареї та стан батареї, вплив старіння батареї не враховується;
- робочий струм навантаження залежить тільки від режиму польоту, як показано на рисунку 3.2, і є постійним, поки режим не змінюється;
- перехідні процеси під час зміни робочого струму навантаження, вплив температури на ємність батареї Q_b і напругу батареї на робочий струм не враховуються;
- процес заряджання починається одразу після посадки дрона на зарядну платформу;
- дрон $n+1$ злітає одразу після отримання команди від дрона n , що зависає в точці спостереження, навіть якщо він ще не повністю заряджений.

Основні параметри дрона, використані в моделюванні, наведені в Таблиці 3.1, вони відповідають одній з найпопулярніших моделей – DJI Mavic 3. Для заряджання використовується профіль CC-CV із режимом CC для рівня заряду $SOC \leq 0.6$ і режимом CV для $1 < SOC < 0.6$.

Таблиця 3.1
Специфікація дрона

Назва параметра	Значення	Одиниці
Ємність батареї, Q_b	5000	мА·год
Номінальна напруга батареї, V_{nom}	15.4	В
Струм зарядки в режимі CC, I_{CC}	5	А

Назва параметра	Значення	Одиниці
Номінальний струм під час горизонтального польоту або зависання, I_{nom}	5.8	А
Струм під час зльоту, $I_{toff}=1.5I_{nom}$	8.7	А
Струм під час посадки, $I_{land}=0.7I_{nom}$	4.06	А
Горизонтальна швидкість дрона, S_{hor}	10	м/с
Вертикальна швидкість дрона, S_{ver}	5	м/с

3.1.2.2. Мінімальна кількість дронів для безперервного спостереження

Максимальну відстань до точки спостереження розраховано за допомогою формули 3.7 для $y_D = 300$, $SOC_{min} = 0.2$ та інших параметрів дрона з таблиці 3.1. На рисунку 3.3 показано результат розрахунку енергоспоживання Q_{trav} для різних значень x_D і рівня заряду батареї, який повинен мати наступний дрон $n + 1$ на момент зльоту для польоту до точки спостереження і повернення до зарядної станції. Визначена максимальна можлива відстань, на якій ще можливе безперервне спостереження, дорівнює $x_{Dglmax} = 7346.5$ м.

За допомогою чисельних розрахунків у середовищі MATLAB була змодельована батарея дрона, відповідно до формули 2.19. Ця модель може використовуватися для рекурентних розрахунків напруги батареї дрона V і SOC для заданого часового кроку Δt під час польоту та заряджання. Модель батареї дрона була використана в розробленому m-скрипті, який в циклі обчислює параметри батареї дрона, координати та режим польоту для кожного дрона відповідно до поданого вище профілю польоту. Шляхом зміни відстані до точки спостереження x_D і кількості дронів n , що використовувалися для спостереження, було проведено експерименти з моделювання, щоб знайти максимальну відстань до точки спостереження, яку можна гарантувати для безперервного спостереження. Моделювання проводилося протягом 120 000 секунд з часовим кроком $\Delta t = 1$ сек.

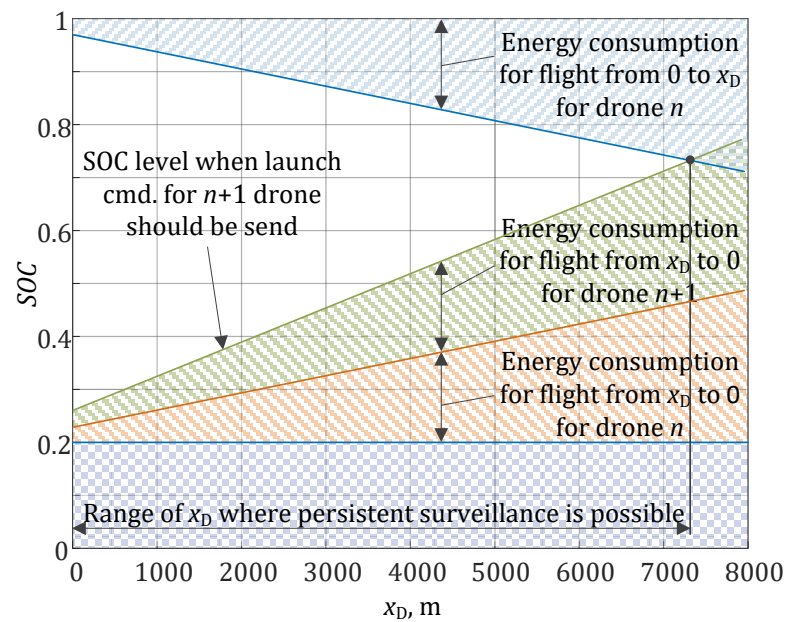


Рисунок 3.3 - Зміни енергоспоживання дрону залежно від відстані до точки спостереження x_D та максимальна можлива відстань x_D , на якій можливе безперервне спостереження.

Як видно з результатів моделювання, що наведені на рисунку 3.4, мінімальна кількість дронів для забезпечення безперервного спостереження становить 3. Така кількість може використовуватися для забезпечення безперервного спостереження на відстанях до 1230 м. Збільшення кількості дронів від 3 до 6 значно розширює дальність до точки спостереження до 5190 м. Подальше збільшення кількості дронів може збільшити дальність для безперервного спостереження, але вплив кожного наступного дрона буде меншим, ніж попереднього. Водночас, 11 дронів можуть забезпечити безперервне спостереження на відстані до 7205 м, що майже дорівнює теоретично досяжному $x_{D_{gl_{max}}} = 7346.5$ м.

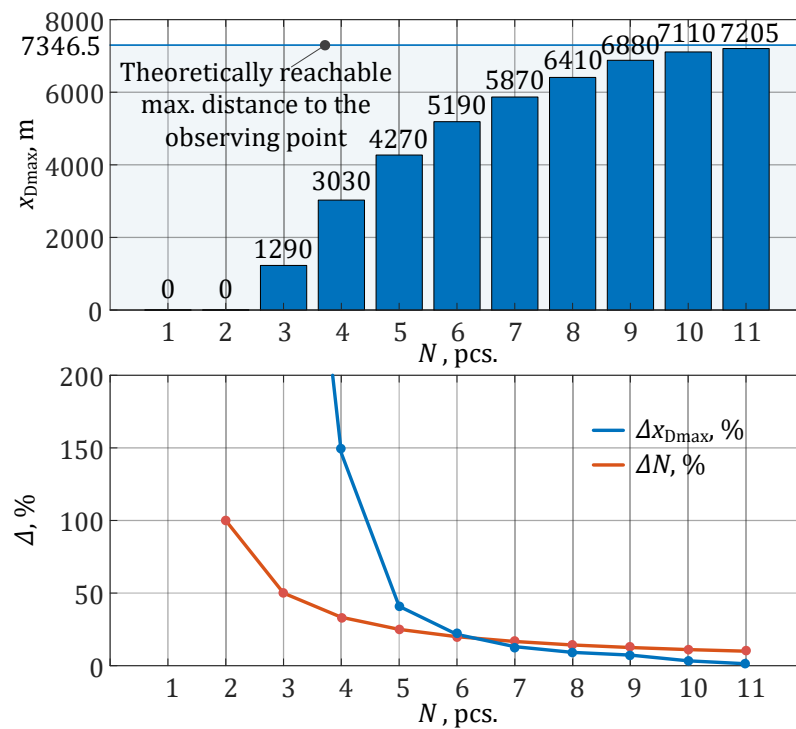


Рисунок 3.4 - Максимальна відстань до точки спостереження x_D для безперервного спостереження залежно від кількості дронів N в абсолютних і відносних значеннях.

На рисунках 3.5 (а) та 3.5 (б) показані приклади змін параметрів дронів під час польоту у випадках, коли забезпечується, та не забезпечується безперервне спостереження. Як видно, коли кількість дронів недостатня або точка спостереження знаходиться занадто далеко, дрон не може достатньо зарядитися, і кожен наступний політ буде коротшим за попередній, і врешті-решт спостереження доведеться відкласти для повної зарядки всіх дронів (час 2500 с, як видно з рисунку 3.5 (а)). З іншого боку, у деяких випадках, коли дрон навіть не повністю заряджений перед польотом, безперервне спостереження можливе, коли рівень SOC на момент зльоту дрону досягає деякого стаціонарного значення SOC_{SS} , як видно на рисунку 3.5 (б), і система стабільна та може забезпечувати постійне спостереження.

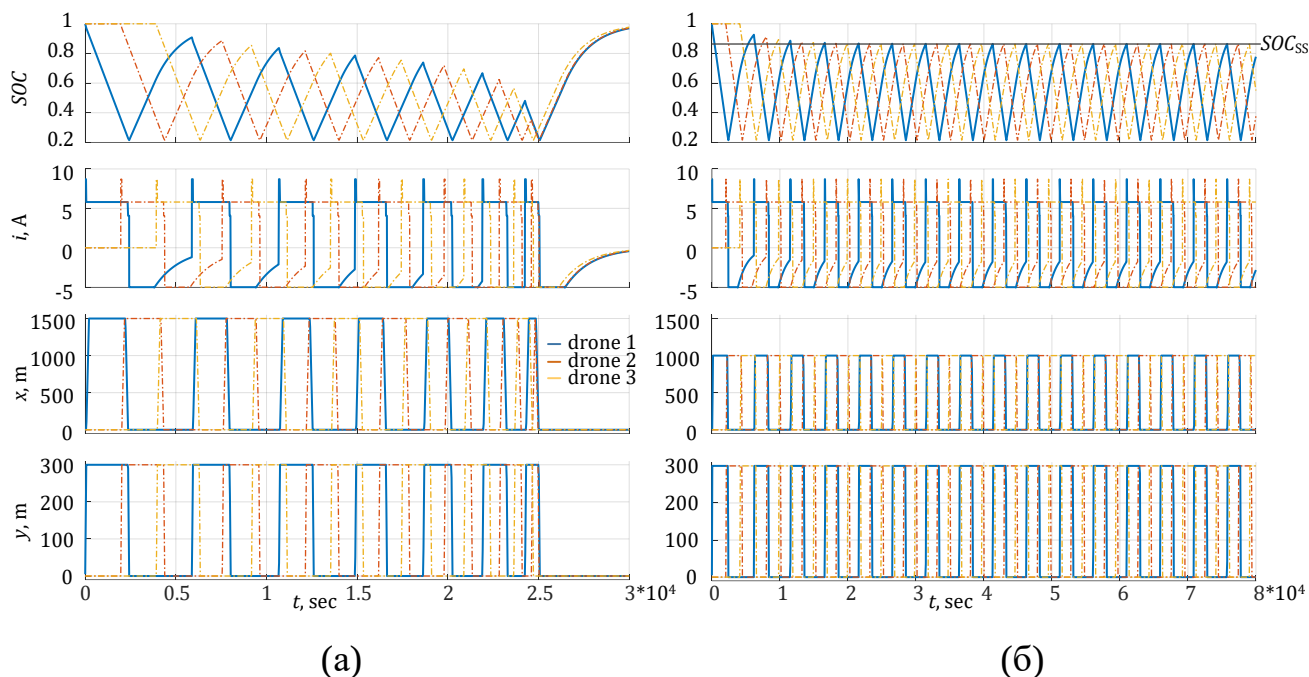


Рисунок 3.5 - Графіки параметрів і координат дрона для $N=3$, $y_D=300$ м: $x_D=1500$ м спостереження протягом деякого часу (а), $x_D=1000$ м, постійне спостереження (б).

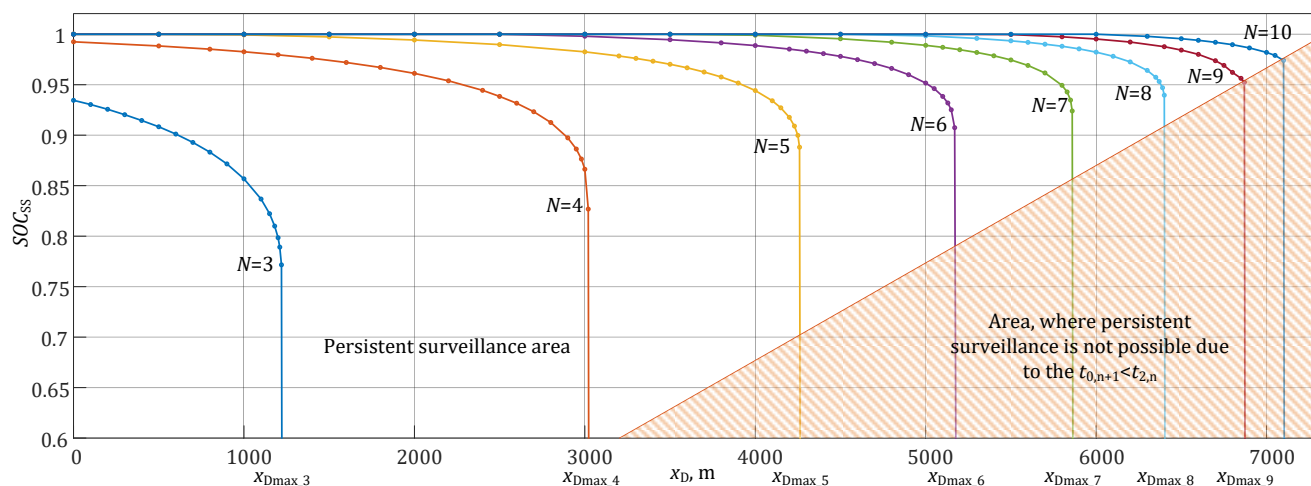


Рисунок 3.6 - Залежність стаціонарного значення SOC перед польотом від кількості дронів N та відстані до точки спостереження x_D .

Шляхом моделювання було досліджено вплив кількості дронів n та відстані до точки спостереження x_D на значення SOC_{ss} , результати показані на рисунку 3.6. З цього рисунка видно, що SOC_{ss} для відстаней, близьких до максимальної можливої відстані x_{Dmax_n} , різко падає. На практиці це може призвести до прогалин у безперервному спостереженні через впливи, не враховані в моделюванні, або невідповідності параметрів дронів. Це означає, що в практичних випадках слід використовувати рівні ділянки графіків. Для відстаней, що наближаються до теоретично досяжної x_{Dglmax} ($N \geq 9$), безперервне спостереження можливе майже

тільки при $SOC_{SS} = 1$, для менших значень SOC_{SS} швидко знижується до зони, де команда на запуск повинна бути надіслана наступному дрону ще до того, як поточний досягне точки спостереження (штрихована зона на рисунку 3.6). Для $N = 3$ і $N = 4$ SOC_{SS} завжди менше 1, але система залишається в режимі безперервного спостереження до досягнення відстані x_{Dmax_n} .

Дослідження виявило дві умови, коли безперервне спостереження неможливе: неможливість досягти стаціонарного значення SOC під час серії польотів та досягнення межі енергії для польоту до точки спостереження та очікування наступного дрона. Максимальна вигода від збільшення кількості дронів спостерігається до 6 дронів, тоді як для 7 і більше відносне збільшення досяжної відстані для кожного наступного дрона менше за відповідне відносне збільшення кількості дронів. Подальші дослідження виявили також різке зниження усталеного значення SOC батареї дронів в кінці заряджання для діапазону поблизу максимальних відстаней до точки спостереження, що обмежує максимальну відстань для безперервного спостереження в практичних випадках. Отримані в дослідженні результати будуть корисні для практичного використання багатороторних дронів у системах безперервного спостереження. Вони можуть бути розширені з урахуванням таких факторів, як недосконаlostі дронів, та дослідження аналітичних залежностей для безперервного спостереження та стаціонарного значення SOC дронів.

Як результат, у цьому підрозділі було проаналізовано енергетичні характеристики дронів для ортогонального профілю польоту, що включає: вертикальний зліт, горизонтальний політ до точки спостереження та зависання там, після чого повернення тим самим маршрутом до зарядної станції. Однак, реальні операційні профілі можуть бути значно складнішими через різноманітні фактори. Враховуючи ці обставини, простий профіль польоту, що був використаний у моделюванні, слід розглядати як базовий. Подальше дослідження спрямоване на розробку більш оптимальних профілів польоту, що враховують динамічні зміни умов експлуатації, а також на оцінку енергоспоживання з урахуванням реалістичних сценаріїв. Це дозволить підвищити ефективність використання дронів для безперервного спостереження та розширити область їх практичного застосування.

У наступному підрозділі буде розглянуто більш складні та оптимізовані профілі польоту, які враховують специфіку різних операційних режимів дронів. Це дозволить встановити оптимальний профіль польоту та кількість дронів, необхідну для спостереження на різних відстанях від зарядної станції, а також максимально можливу дальність спостереження для цих профілів.

3.2 Оцінки режимів роботи системи електроспоживання для оптимізованого профілю польоту

3.2.1 Можливі профілі польоту

Для розробки оптимального профілю польоту, який відповідає більшості існуючих дронів, необхідно проаналізувати основні профілі польоту, що можуть бути використані в таких системах. Моделюючи ці профілі, можна визначити енергетичні закономірності або фактори, що впливають на розряд дрона, і, як наслідок, збільшити дальність польоту. Такий підхід дозволить знайти універсальні характеристики дронів, які впливатимуть як на кількість дронів, так і на дальність польоту.

Замість тривимірної (3D) системи координат для подальших розрахунків використовується ортогональна двовимірна (2D) система координат, вирівняна для кожної точки спостереження. Для визначення найвигіднішого профілю польоту з точки зору енергоспоживання необхідно проаналізувати три потенційні сценарії польоту, представлені на рисунку 3.7.

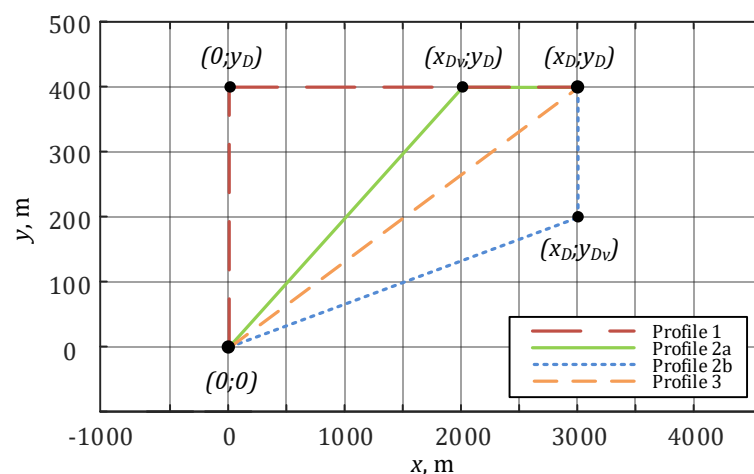


Рисунок 3.7 - Можливі профілі польоту від зарядної станції до точки спостереження

Профіль польоту 1

Перший варіант профілю польоту показаний на рисунку 3.7 як "профіль 1", це та сама траєкторія, яка була запропонована в підрозділі 3.1. Такий профіль польоту забезпечує класичну концепцію польоту до будь-якої точки, що включає такі етапи: вертикальний зліт до необхідної висоти, потім горизонтальний політ до точки спостереження, зависання в точці спостереження до моменту, коли заряд акумулятора знизиться до мінімального рівня, необхідного для повернення. Горизонтальний політ у зворотному напрямку і, нарешті, вертикальна посадка для заряджання акумуляторної батареї.

Витрати ємності Q_1 для польоту за першим профілем польоту можна обчислити як суму споживання енергії Q_{1top} (політ до точки спостереження від зарядної станції) і Q_{1tol} (у зворотному напрямку – від точки спостереження до зарядної станції), згідно з формулами:

$$Q_{1top} = T_{1toff} \cdot I_{toff} + T_{1hor} \cdot I_{hor}, \quad (3.8)$$

$$Q_{1tol} = T_{1tol} \cdot I_{land} + T_{1hor} \cdot I_{hor}, \quad (3.9)$$

де T_{1toff} – час польоту від точки $(0; 0)$ до точки $(0; y_D)$, год; T_{1tol} – час польоту від точки $(0; y_D)$ до точки $(0; 0)$, год; T_{1hor} – час польоту від точки $(0; y_D)$ до точки $(x_D; y_D)$ і у зворотному напрямку, год; I_{toff} , I_{hor} , I_{land} – робочий струм навантаження дрону під час зльоту, горизонтального польоту та посадки відповідно, А.

Час польоту, згаданих у формулах (3.8) та (3.9), можна знайти через координати $(x_D; y_D)$ та швидкість польоту в горизонтальному та вертикальному напрямках S_{hor} і S_{ver} відповідно. Робочий струм навантаження, у першому наближенні може бути прийнята як постійна величина, що залежить лише від згаданого режиму польоту. На практиці робочий струм також залежить від зовнішніх умов, таких як швидкість і напрям вітру, пориви вітру. Ці змінні можливо врахувати в розрахунках тільки через статистичний аналіз на основі численних експериментальних випробувань.

Хоча дрони зазвичай демонструють нижчу швидкість спуску порівняно зі швидкістю зльоту, у цьому розділі дисертації, вертикальна швидкість для підйому та спуску вважається однаковою.

Профіль польоту 2

Згідно з другим сценарієм польоту, як показано на рисунку 3.7 ("профіль 2a" та "профіль 2b"), політ виконується за більш складною траєкторією, що складається з двох сегментів:

Перший сегмент охоплює політ від точки $(0; 0)$ до точки $(x_{Dv}; y_{Dv})$ і назад, виконується прямолінійно з метою досягнення максимальної горизонтальної та вертикальної швидкостей S_{hor_lim} , S_{ver_lim} . Споживання енергії $Q_{2_{top_1}}$ для польоту в напрямку від точки $(0; 0)$ до точки $(x_{Dv}; y_{Dv})$ та споживання енергії $Q_{2_{tol_1}}$ у зворотному напрямку можна обчислити за такими формулами:

$$Q_{2_{top_1}} = T_{2_{top}} \cdot I_{2_{top}}, \quad (3.10)$$

$$Q_{2_{tol_1}} = T_{2_{tol}} \cdot I_{2_{tol}}, \quad (3.11)$$

де $T_{2_{top}}$, $T_{2_{tol}}$ – час польоту від точки $(0; 0)$ до точки $(x_{Dv}; y_{Dv})$ і назад, год; $I_{2_{top}}$, $I_{2_{tol}}$ – робочий струм навантаження під час набору та зниження висоти зі швидкостями S_{hor_lim} та S_{ver_lim} , А.

Другий сегмент охоплює політ від точки $(x_{Dv}; y_{Dv})$ до точки спостереження $(x_D; y_D)$ і назад. На цьому сегменті політ виконується або горизонтально, або вертикально, в залежності від того, чи досягне дрон швидше y_D , як показано на рисунку 3.7 ("профіль 2a") або x_D ("профіль 2b"). Час досягнення відповідних точок маршруту можна визначити за такими умовами:

якщо $T_{2_{hor}} - T_{2_{ver_t}} > 0$, тоді досягається y_D ;

якщо $T_{2_{hor}} - T_{2_{ver_t}} < 0$, тоді досягається x_D ;

якщо $T_{2_{hor}} - T_{2_{ver_t}} = 0$, тоді координати $(x_{Dv}; y_{Dv})$ and $(x_D; y_D)$ збігаються.

У згаданих вище рівняннях $T_{2_{hor}}$ і $T_{2_{ver_t}}$ є часом польоту від точки $(x_{Dv}; y_{Dv})$ до $(x_D; y_D)$ залежно від того, чи швидше дрон досягне y_D або x_D .

Споживання ємності акумуляторної батареї на відповідному сегменті розраховується за такими формулами:

$$\begin{aligned}
Q_{2_{top2}} &= (T_{2_{hor}} - T_{2_{vert}}) \cdot I_{hor}, \text{ або} \\
Q_{2_{top2}} &= (T_{2_{vert}} - T_{2_{hor}}) \cdot I_{toff},
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
Q_{2_{tol2}} &= (T_{2_{hor}} - T_{2_{ver_l}}) \cdot I_{hor}, \text{ або} \\
Q_{2_{tol2}} &= (T_{2_{ver_l}} - T_{2_{hor}}) \cdot I_{land},
\end{aligned} \tag{3.13}$$

де $T_{2_{hor}}, T_{2_{ver_l}}$ – час польоту від точки $(x_D; y_D)$ до точки $(x_{Dv}; y_{Dv})$ залежно від того, чи дрон швидше досягне y_{Dv} або x_{Dv} , год.

Загальне споживання ємності батареї Q_2 можна визначити як суму споживання енергії на політ до точки спостереження $(x_D; y_D)$ та у зворотному напрямку.

Слід зазначити, що для польотів на відстані більше ніж 1 км дрон переважно спочатку досягатиме необхідної висоти, а лише потім буде рухатися прямолінійно. Такий профіль польоту відображає ідею, що максимальні швидкості на початку польоту призведуть до скорочення тривалості польоту в порівнянні з першим профілем польоту. Крім того, загальне споживання енергії на політ зменшиться через менше робочий струм навантаження під час горизонтального польоту.

Профіль польоту 3

Згідно з третім сценарієм польоту, як показано на рисунку 3.7 ("профіль 3") передбачається, що дрон злітає з точки $(0; 0)$, а його швидкість і положення регулюються таким чином, щоб вектор швидкості буде направлений на точку $(x_D; y_D)$. Цей профіль польоту обирається на основі припущення, що споживання енергії під час польоту буде оптимальним завдяки оптимізації швидкості руху, а час прибуття на точку спостереження буде мінімальним.

Загальне споживання енергії за політ Q_3 безпосередньо залежать від зміну робочого струму навантаження I_d . Одним із доступних методів визначення I_d є пошук зв'язків між параметрами польоту та I_d шляхом використання методу лінійної регресії [125]. Метод базується на пошуку взаємозв'язків між залежною змінною та матрицею незалежних змінних для прогнозування значень I_d на основі двох вхідних факторів: S_{ver} та S_{hor} . Представлення моделі включає формулу моделі, оцінені коефіцієнти та накопичену статистику. Модель загалом може бути виражена наступним рівнянням:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i, i = 1, \dots, m, \quad (3.14)$$

де m – кількість спостережень; y_i – i -та відповідь; β_k – k -й коефіцієнт; β_0 – стала частина моделі; x_{ij} – i -те спостереження j -ї змінної предиктора ($j=1, \dots, p$); ε_i – i -та частина шуму, тобто випадкова помилка.

У нашому випадку, коли значення I_d прогнозується за допомогою лінійного рівняння двох параметрів (швидкостей), рівняння (3.14) буде представлено наступним чином:

$$I_d = a \cdot S_{ver} + b \cdot S_{hor} + c. \quad (3.15)$$

де a і b визначають ваги S_{ver} і S_{hor} у моделі, а c – коефіцієнт випадкової помилки.

Витрата ємності акумуляторної батареї може бути знайдена як сума споживання енергії на політ до точки спостереження Q_{3top} та Q_{3tol} , що відповідає за споживання енергії на повернення дрону, відповідно до простих розрахунків:

$$Q_{3top} = I_{dtop} \cdot T_{3top}, \quad (3.16)$$

$$Q_{3tol} = I_{dtol} \cdot T_{3tol}, \quad (3.17)$$

де I_{dtop} і I_{dtol} – робочий струм навантаження під час польоту до точки спостереження та та у зворотному напрямку, А.

Відповідно, час польоту до точки спостереження T_{3top} визначені, як відношення x_D до S_{hor} або y_D до S_{ver} , мають будуть однаковими. Для визначення S_{hor} і S_{ver} використовуються дані про програмне обмеження швидкості польоту дронів S_{vlim} і S_{hlim} , на рисунку 3.8 показана залежність S_{hor} і S_{ver} як функція x_D для $y_D = 400$ м, $S_{vlim} = 3$ м/с і $S_{hlim} = 15$ м/с.

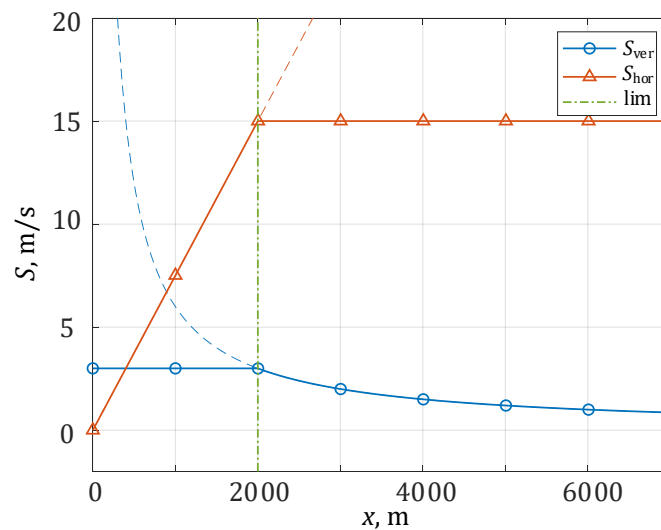


Рисунок 3.8 - Залежність S_{ver} і S_{hor} від x_D для $y_D = 400$ м

Рисунок 3.8 демонструє оптимальну вертикальну і горизонтальну швидкість для досягнення певної дальності польоту x , отримані залежності дозволяють визначити S_{hor} і S_{ver} за формулами:

$$S_{hor} = \frac{S_{vlim} \cdot x_D}{y_D}, \quad (3.18)$$

$$S_{ver} = \frac{S_{hlim} \cdot y_D}{x_D}. \quad (3.19)$$

У підрозділі 3.2.1 було розглянуто три потенційні профілі польоту, кожен із яких має свої енергетичні характеристики та особливості. Проте через складність факторів, що впливають на енергоспоживання, у доступних дослідженнях поки що не визначено універсального рішення для систем безперервного спостереження. Для отримання об'єктивної оцінки та вибору найкращого профілю необхідні розрахунки, які дозволять врахувати реалістичні умови експлуатації та мінімізувати енергетичні витрати. Такий підхід сприятиме створенню ефективних алгоритмів для застосування дронів.

3.2.2 Моделювання споживання енергії на політ та вибір оптимального профілю польоту

Метою моделювання є визначення профілю польоту, який забезпечить мінімальні енергетичні витрати, відповідаючи заданим технічним обмеженням і експлуатаційним вимогам.

Моделювання здійснювалося з урахуванням ключових обмежень, зокрема граничних швидкостей горизонтального польоту (S_{hor}) і вертикального зльоту (S_{ver}), які дорівнюють 15 м/с та 3 м/с відповідно. Діапазон висот польоту (y_D) встановлено в межах 100-500 м, а дальності до точки спостереження (x_D) – 1000-7000 м. У процесі вибору оптимального профілю польоту має бути встановлено максимально допустимий рівень споживання енергії на політ (Q_{lim}), що відповідає 26% від початкової ємності батареї. Вибір порогу Q_{lim} базується на припущенні, що ця величина забезпечує безпечне повернення дрона в умовах штатної експлуатації.

Таблиця 3.2

Робочий струм навантаження I при різних значеннях S_{ver} і S_{hor}

Параметр		S_{ver} , м/с	S_{hor} , м/с	I, А
від (0; 0) до (x_D ; y_D)	I_{d_top}	3	15	12,5
	I_{hor}	0	15	11
	$I_{toff} = I_{loit}$	3	0	5,5
від (x_D ; y_D) до (0; 0)	I_{d_tol}	3	15	8,5
	I_{hor}	0	15	11
	I_{land}	3	0	4,5

Для оцінки витрат енергії використано експериментальні дані, отримані для дрона DJI Mavic 2 Enterprise (таблиця 3.2), які характеризують робочий струм навантаження залежно від параметрів польоту.

Моделювання споживання енергії на політ для профілю польоту 1

У рамках першого профілю польоту споживання енергії на політ (Q_1) визначається як сума двох компонентів: Q_{1top} – споживання енергії на горизонтальний політ та Q_{1tol} – споживання енергії на вертикальний зліт. Обчислення цих складових виконувалися за формулами (3.8) та (3.9).

Результати моделювання, отримані за допомогою програмного забезпечення MATLAB, представлені у вигляді кольорової карти (рисунок 3.9а та рисунок 3.9b). Візуалізація дозволяє побудувати двовимірний графік, де кольорова шкала відображає інтенсивність споживання енергії (Q) залежно від дальності до точки спостереження (x_D) та висоти (y_D). Точки в центрі комірок карти вказують на області, де споживання енергії є нижчими за встановлений поріг $Q_{lim} = 0,26$ від SOC.

Моделювання показало, що максимальне споживання енергії (Q) досягається при значеннях $x_D = 4000$ метрів та $y_D = 200$ метрів. Разом із тим, аналіз результатів свідчить, що максимальна дальність польоту може бути досягнута на нижчих висотах. Це пов'язано зі значними енергетичними витратами на набір висоти, які суттєво впливають на загальне споживання енергії при незмінній горизонтальній відстані.

Зазначені результати підтверджують доцільність обраного підходу для аналізу енергоспоживання та створюють основу для порівняння з іншими профілями польоту (2 та 3).

Моделювання споживання енергії для профілю польоту 2

У другому профілі польоту споживання енергії Q_2 складається з компонентів Q_{2top} та Q_{2tol} , які було визначено відповідно до прийнятих методик. Результати моделювання представлені на рисунках 3.9с та 3.9d.

Аналіз отриманих результатів показує, що для $x_D > 2000$ метрів зміна значення y_D практично не впливає на загальне споживання енергії. Це явище пояснюється тим, що після досягнення заданої висоти y_D дрон переходить у режим горизонтального польоту, який характеризується нижчим рівнем робочого струму. Таким чином, вертикальний компонент споживання енергії Q_{2tol} обмежується початковою фазою польоту і не вносить суттєвого впливу на подальший загальний енергобаланс.

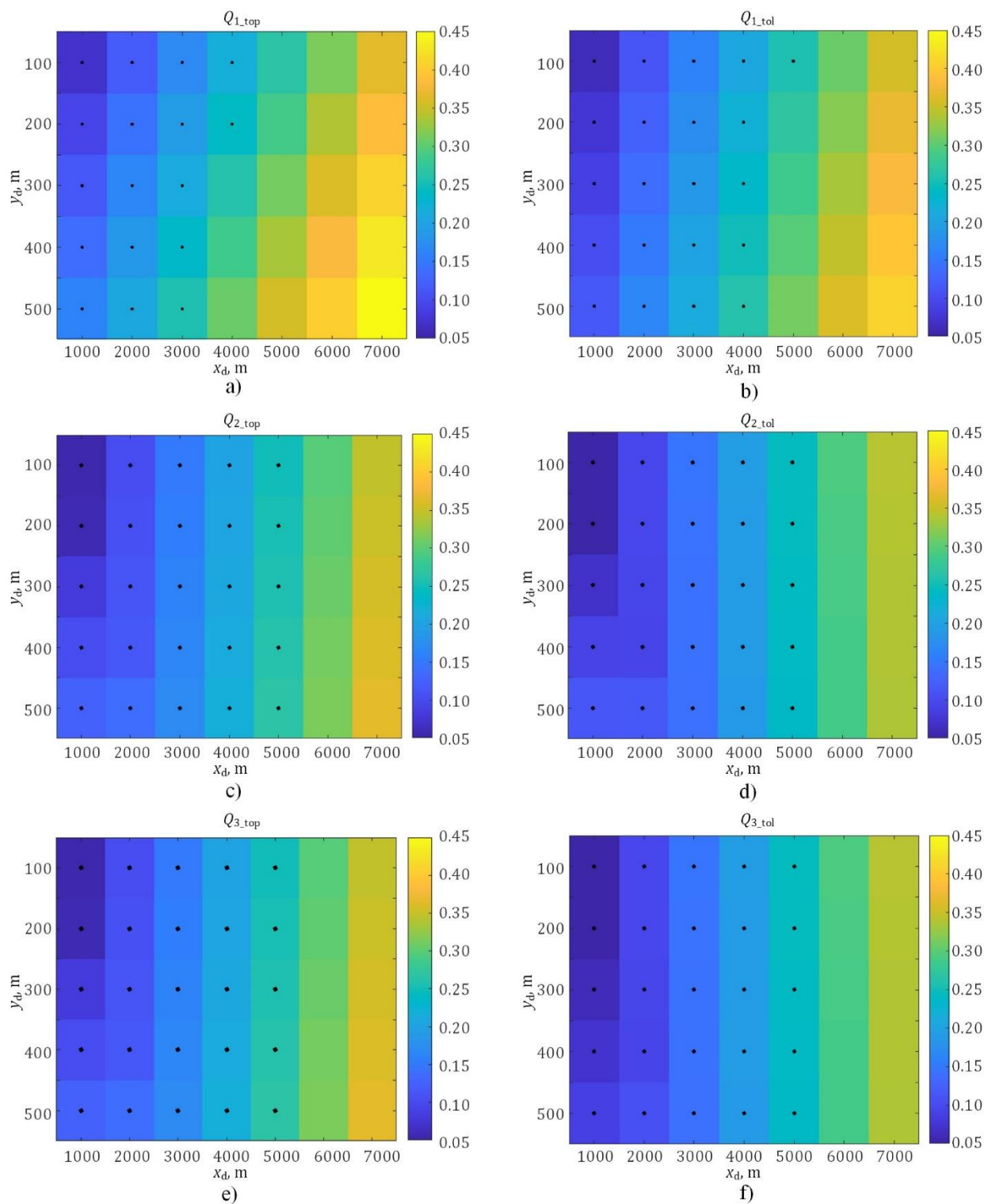


Рисунок 3.9 - Кольорова карта результатів моделювання споживання енергії дрону

Однією з ключових переваг другого профілю є більш ефективне використання енергії на горизонтальних ділянках польоту, що суттєво знижує загальні споживання енергії в порівнянні з першим профілем. Зокрема, це досягається завдяки скороченню

частки енергозатратного вертикального польоту та оптимальної роботи двигунів при сталих швидкостях і відсутності додаткових маневрів.

Результати моделювання дозволяють зробити висновок, що другий профіль польоту може бути кращим вибором для завдань, що потребують значних горизонтальних переміщень.

Моделювання споживання енергії для профілю польоту 3

Третій профіль польоту характеризується використанням лінійної регресійної моделі для прогнозування робочого струму навантаження (I_d) під час польоту дрона. Ця модель базується на еталонних значеннях робочого струму навантаження з Таблиці 3.1, і апроксимується лінійним рівнянням (3.15) у середовищі MATLAB. В результаті було визначено коефіцієнти регресії, наведені в Таблиці 3.3.

Лінійна регресійна модель включає окремі траєкторії польоту: політ до точки спостереження та повернення до зарядної станції. Для кожної частини було виконано окрему апроксимацію. Візуалізація результатів, що зіставляє вихідні дані (I_d) з апроксимованими значеннями, показана на рисунках 3.10a і 3.10b. Апроксимація демонструє високу кореляцію між даними, що свідчить про адекватність обраної моделі для прогнозування енергоспоживання.

Таблиця 3.3

Коефіцієнти лінійної регресії для струму

Частина траєкторії польоту	a	b	c
від (0; 0) до (x_D ; y_D)	0,5	0,47	4
від (x_D ; y_D) до (0; 0)	-0.83	0.27	7

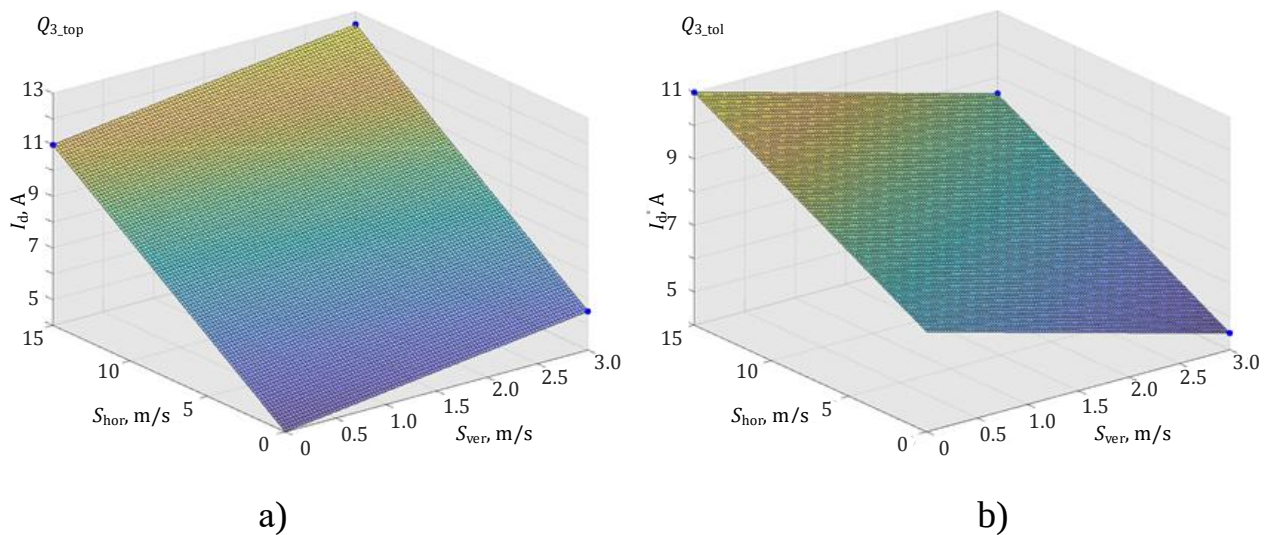


Рисунок 3.10 - Лінійна апроксимація регресійної моделі, де сині точки – вихідні дані I_d для розрахунку Q_{3_top} (a) та Q_{3_tol} (b)

Результати моделювання споживання енергії Q_{3_top} і Q_{3_tol} представлені на рисунках 3.9e та 3.9f. Вони демонструють, що для $x_D \leq 5000$ метрів загальне споживання енергії залишаються нижче допустимого порогу $Q < Q_{lim}$. Це вказує на можливість ефективного виконання завдань з такими параметрами.

Детальний аналіз виявив, що для аналогічних значень x_D і y_D результати споживання енергії третього профілю схожі на результати другого профілю польоту. Проте ключовою перевагою третього профілю є більш оптимальна траєкторія дрона, яка сприяє зменшенню робочого струму навантаження.

У порівнянні з першим і другим профілями, третій профіль виявляється найкращим у контексті мінімізації споживання енергії. Це досягається за рахунок збалансованого співвідношення між вертикальним підйомом, горизонтальним польотом і поверненням до зарядної станції.

Таким чином, обраний третій профіль польоту забезпечує найбільш ефективне використання енергоресурсів дрона, що робить його доцільним для завдань, які вимагають тривалого спостереження та мінімізації енергетичних витрат. Подальші дослідження в розділі 3.2.3 будуть зосереджені на аналізі часових та енергетичних характеристик цього профілю. Зокрема, будуть розглянуті аспекти організації безперервного спостереження, включаючи визначення кількості дронів, необхідних для забезпечення ефективної роботи системи в заданих умовах.

3.2.3 Часові характеристики та детальний профіль польоту

У рамках розробленої стратегії безперервного спостереження з використанням групи дронів та обраного третього профілю польоту дозволяє досягти оптимальному використанню енергоресурсів. Політ починається з зарядної станції, дрон прямує до точки спостереження $(x_D; y_D)$, де виконує завдання спостереження, передаючи відеосигнал до пункту управління. Інші дрони в цей час або знаходяться в режимі очікування, або проходять процес заряджання на станціях.

Основною метою є забезпечення безперервного спостереження, що досягається за рахунок динамічної заміни дронів у точці спостереження. Коли SOC першого дрона досягає мінімального рівня, необхідного для безпечного повернення на зарядну станцію, система надсилає команду на виліт наступного дрона. Це дозволяє забезпечити безперервність без втрат у покритті спостереження.

Визначення часових характеристик системи

Визначення моментів старту, прибуття, повернення та завершення заряджання кожного дрона виконується за формулами:

Час старту T_{start}^i визначається для кожного i -го дрона на основі часу польоту попереднього дрона:

$$T_{start}^i = (i - 1) \cdot (T_{lout} + T_{3tol}), \quad (3.20)$$

де i – номер дрона в порядку вильоту, T_{lout} – час доступного зависання на точці спостереження.

Час прибуття в точку спостереження T_{arr} :

$$T_{arr} = T_{start} + T_{3top}. \quad (3.21)$$

Час подачі команди на зліт дрона $i+1$ T_{next} :

$$T_{next} = T_{arr} + T_{lout}. \quad (3.22)$$

Час подачі команди i -го дрона на повернення на зарядну станцію:

$$T_{return} = T_{3top} + T_{next}, \quad (3.23)$$

Час початку заряджання $T_{start_{ch}}$:

$$T_{start_{ch}} = T_{return} + T_{3tol}. \quad (3.24)$$

Час завершення заряджання $T_{end_{ch}}$:

$$T_{end_{ch}} = T_{start_{ch}} + T_{ch}. \quad (3.25)$$

Час заряджання T_{ch} і час зависання в точці спостереження T_{loit} можна визначити за формулою:

Час заряджання T_{ch} :

$$T_{ch} = \frac{Q - Q \cdot 0.2}{I_{ch}} \cdot 60, \quad (3.26)$$

де I_{ch} – струм заряджання, А.

Час зависання T_{loit} :

$$T_{loit} = \frac{Q - Q_{3_{tol}} - Q_{3_{top}} - Q \cdot 0.2}{I_{loit}} \cdot 60, \quad (3.27)$$

де I_{loit} – струм заряджання, А.

Візуалізація профілю польоту та роботи системи електроспоживання та електроживлення

Рисунок 3.11 демонструє зміну координат x та y дрона у часі, а також відповідну динаміку робочого струму та SOC. Це дозволяє наочно оцінити енергоспоживання на кожному етапі польоту, а також прогнозувати тривалість спостереження при різних параметрах завдання.

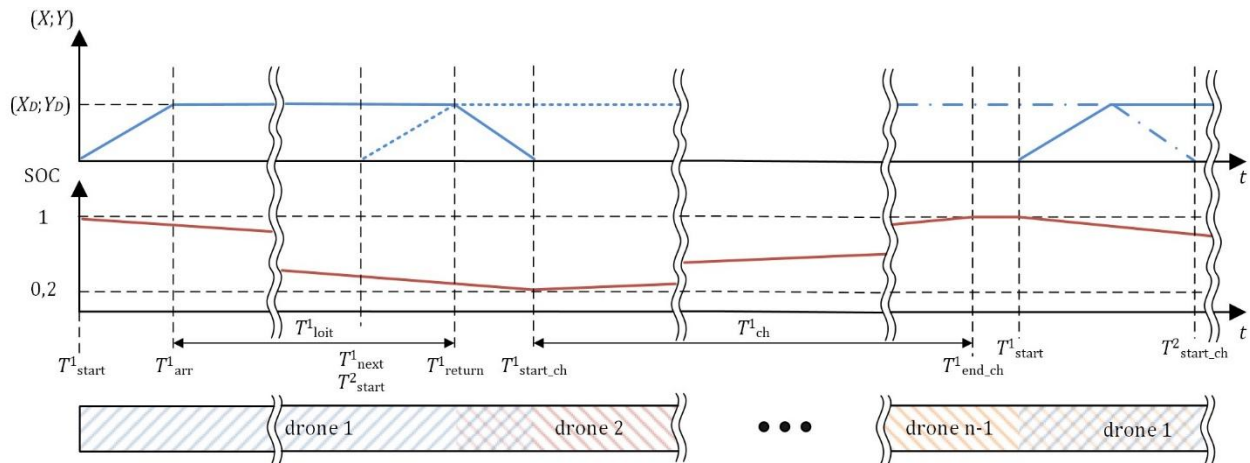


Рисунок 3.11 - Детальний профіль польоту

Наступний етапом буде оцінка споживання енергії з урахуванням накопиченої статистики польотів на дроні, а також визначенню необхідної кількості дронів для забезпечення безперервного спостереження в залежності від тривалості завдання, параметрів місцевості та інтенсивності спостереження.

3.2.4 Моделювання максимально-досяжної дальності польоту

Для визначення максимальної відстані до точки спостереження $x_{D_{max}}$, яку може подолати дрон за умов безперервного спостереження, були встановлені такі умови:

- Безперервність спостереження забезпечується, коли хоча б один дрон постійно перебуває в точці спостереження.
- В польоті до точки спостереження $(x_D; y_D)$ може бути лише один дрон.
- Усі дрони мають однакові параметри акумулятора, включаючи ємність та напругу; ефект старіння акумулятора не враховується.
- Робочий струм навантаження дрона залежить тільки від режиму польоту, показаного на рисунку 3.11.
- Зміни струму під час перехідних режимів та вплив температури не враховуються.
- Процес заряджання починається одразу після приземлення дрона на зарядну станцію $(0; 0)$.
- Дрон $i+1$ злітає відразу після отримання команди від дрона i у час T_{next} .
- Вертикальна та горизонтальна швидкості обмежені $S_{v_{lim}}$ та $S_{h_{lim}}$ відповідно.

У моделюванні використані характеристики дрона DJI Mavic 2 Enterprise, наведені в Таблиці 3.4. Значення I_d прогножуються за на основі формули (3.15).

Таблиця 3.4

Основні параметри дрона, використані у дослідженні

Назва параметра	Значення
Ємність акумулятора, Q_{bat} , Аг	3,85
Номінальна напруга акумулятора, V_{nom} , V	15,4
Струм заряджання в режимі CC, A	4,53
Обмеження горизонтальної швидкості, $S_{h_{lim}}$, м/с	15
Обмеження вертикальної швидкості, $S_{v_{lim}}$, м/с	3

Дані про ємність акумулятора та швидкісні обмеження взято з технічної документації дрону DJI Mavic 2 [126].

Розрахунок енергетичного балансу

Для досягнення точки спостереження та безпечного повернення дрон повинен мати ємність акумуляторної батареї Q_{com} , який розраховується за формулою:

$$Q_{com} = Q_{3tol} + 0,2 \cdot Q_{bat} + Q_{3loit}, \quad (3.28)$$

де:

- Q_{3tol} – споживання енергії на зворотний політ, А·год;
- $0,2 \cdot Q_{bat}$ – аварійний резерв, А·год;
- Q_{3loit} – споживання енергії на зависання (А·год) визначені як:

$$Q_{3loit} = \frac{y_D}{S_{ver} \cdot 3600} \cdot I_{loit}. \quad (3.29)$$

Енергетичний стан дрона виражається у відносних одиницях SOC:

- SOC при досягненні точки спостереження:

$$SOC_{top} = 1 - \frac{Q_{3top}}{Q_{bat}}. \quad (3.30)$$

- SOC, необхідний для безпечного повернення

$$SOC_{com} = \frac{Q_{com}}{Q_{bat}}. \quad (3.31)$$

Для забезпечення успішного виконання завдань має виконуватися умова:

$$SOC_{top} \geq SOC_{com}. \quad (3.32)$$

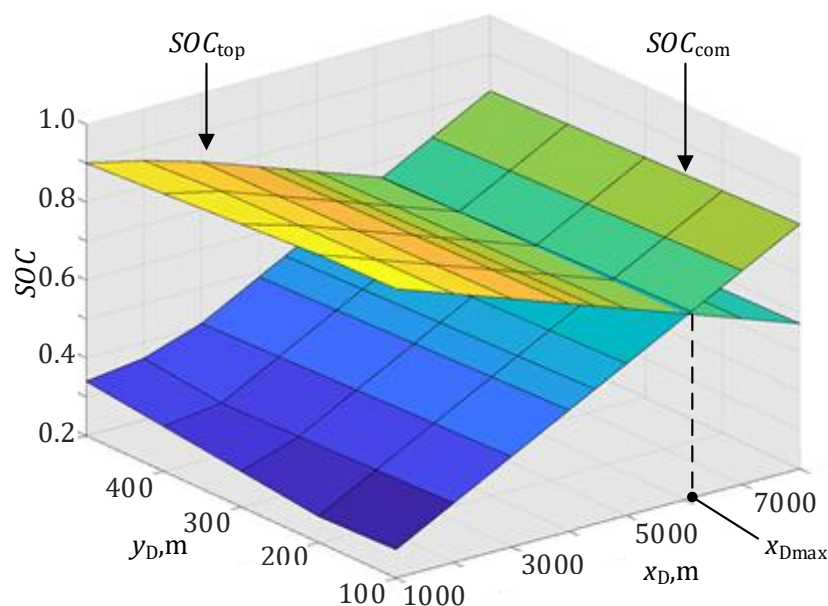


Рисунок 3.12 - Результати розрахунків SOC_{top} та SOC_{com} .

На рисунку 3.12 представлені результати розрахунків поверхонь SOC_{top} та SOC_{com} при варіації x_D та y_D . Точка перетину цих поверхонь визначає максимальну досяжну відстань $x_{D_{max}}$, яка складає 6138 метрів. Ця величина підтверджує ефективність обраного профілю для тривалого спостереження із забезпеченням енергетичної безпеки.

Таким чином, результати моделювання підтверджують важливість енергетичного балансу для досягнення оптимальної дальності польоту. У наступному підрозділі буде розглянуто вплив кількості дронів на забезпечення безперервності спостереження.

3.2.5 Оцінка впливу кількості дронів

Для забезпечення безперервного спостереження у заданій точці спостереження мінімально необхідна кількість дронів залежить від декількох ключових параметрів: відстані до точки спостереження, часу заряджання, споживання енергії в різних режимах польоту та висоти польоту. За базовим припущенням, для кожної точки спостереження необхідно щонайменше два дрони: один виконує спостереження, зависаючи на місці, а інший заряджається. Однак у реальних умовах така кількість дронів може бути недостатньою через вплив обмежень системи.

Для точного визначення мінімальної кількості дронів, необхідних для підтримання безперервного спостереження, було використано модель акумулятора дрона на основі представленої в розділі 2.2 даної дисертації. Ця модель дозволяє відстежувати зміни енергії в системі як під час заряджання, так і розрядження. Розрахунки виконані в середовищі MATLAB із часовим кроком 1 секунда, що забезпечує високу точність результатів. Початковий рівень заряду акумулятора (SOC) для всіх дронів встановлювався на рівні 1.

У моделі кожен дрон має чітко визначений цикл дій, що охоплює наступні режими:

- заряджання;
- очікування польоту;
- політ до точки спостереження;
- зависання;

- передача команди наступному дрону на старт.

Моделювання проводилось для різної кількості дронів $n=2\dots6$ та висот точки спостереження $y_D=100\dots500$ м. Результати моделювання представлені на рисунку 3.13.

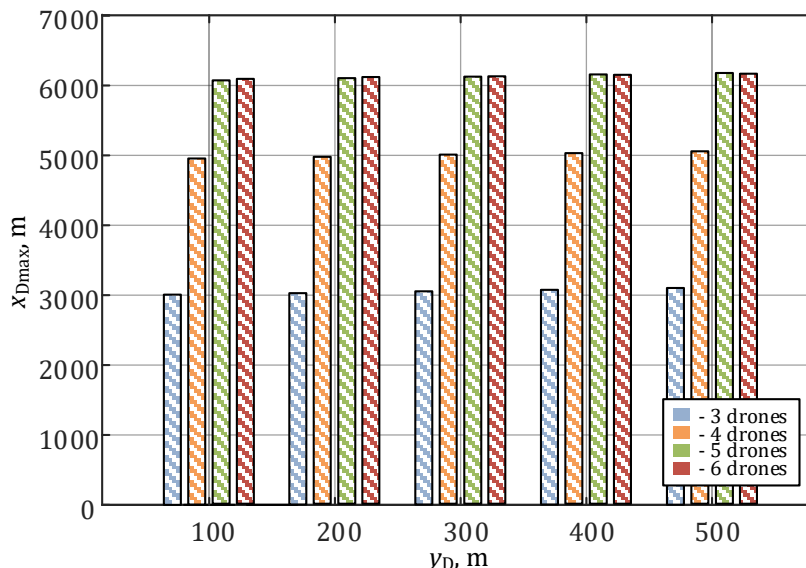


Рисунок 3.13 - Результати моделювання безперервного спостереження

Аналіз результатів показав, що мінімальна кількість дронів для забезпечення безперервного спостереження становить 3. Ця конфігурація дозволяє підтримувати постійне спостереження на відстані до 3084 метрів.

Збільшення кількості дронів до 6 суттєво підвищує максимальну досяжну відстань до точки спостереження до 6138 метрів. Проте подальше збільшення кількості дронів понад шість не призводить до значного підвищення $x_{D_{max}}$ через обмеження часу польоту та необхідність у точній синхронізації. Якщо дрон $i+1$ злітає до того, як дрон $i-1$ досягне точки спостереження, система втрачає безперервність спостереження.

3.3 Висновки до розділу 3

У даному розділі проведено дослідження електроспоживання однієї секції комплексу безперервного спостереження із використанням групи дронів для забезпечення режиму безперервного спостереження. Всі кількісні оцінки, наведені у розділі та у висновках, розраховані за умови використання як базових дронів DJI Mavic 3 та 2 Enterprise. Шляхом розробки математичних моделей з використанням

моделей АКБ, отриманих у попередньому розділі, проведеного комплексного аналізу на основі математичного та комп'ютерного моделювання, було отримано наступні результати:

1. Вперше розроблено методику оцінки енергоспоживання, оптимізації профілів польоту та визначення мінімальної кількості дронів, необхідних для забезпечення безперервного спостереження, що дозволяє врахувати відстань від точки заряджання до точки спостереження та висоту спостереження.

2. Вперше розроблено математичні моделі, які дозволяють точно розраховувати всі часові та енергетичні показники використання дронів в рамках секції спостереження (час заряджання, час польоту, час зависання, момент повернення, витрати енергії), які на відміну від існуючих враховують умови безперервного спостереження, детальний профіль польотного завдання та його окремі етапи: зліт, прибуття до точки спостереження, зависання, повернення до зарядної станції, початок і завершення заряджання.

3. На основі проведеного аналізу вперше запропоновано оптимальний профіль польоту, який забезпечує мінімальне енергоспоживання та відповідає заданим експлуатаційним параметрам. За результатами виконаних розрахунків визначено енергетичний баланс системи, що дозволяє дрону виконувати завдання з поверненням на станцію зарядки, та розраховано максимальну відстань до точки спостереження за умови використання дрона DJI Mavic 3, яка склала 7346 метрів.

4. За результатами математичного моделювання встановлено вплив кількості дронів на забезпечення безперервного спостереження для однієї секції. За результатами використання запропонованої методики та математичного моделювання за умови використання дрона DJI Mavic 2 Enterprise встановлено, що з урахуванням енергетичних обмежень для виконання завдання на відстані до 3084 метрів достатньо трьох дронів, а збільшення кількості дронів до шести дозволяє розширити максимальну відстань до точки спостереження до 6138 метрів. Водночас, подальше збільшення кількості дронів не є доцільним через синхронізаційні обмеження та зниження показника «відношення приросту максимально досяжної відстані спостереження до збільшення кількості дронів» до значень, які становитимуть менше одиниці.

РОЗДІЛ 4

СИСТЕМА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НАЗЕМНОЇ ЧАСТИНИ КОМПЛЕКСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ ДРОНІВ

4.1 Основні компоненти та режими роботи системи електроживлення

Система електроживлення наземної частини системи безперервного спостереження на базі дронів спрямована на забезпечення енергетичної автономності та надійності електроживлення зарядних станцій дронів. Система електроживлення передбачає основне та допоміжне електрозабезпечення, що дозволяє адаптувати її до зовнішніх умов і потреб.

Основна система (рис. 4.1) базується на використанні наступних систем:

- Фотоелектричної системи (ФЕС), яка генерує енергію завдяки сонячному випромінюванню. ФЕС включає в себе фотоелектричні панелі (ФЕП), однонаправлений перетворювач постійного струму (DC-DC2), який забезпечує слідкування за точкою максимуму потіженості та перетворення рівня напруги з виходу до рівня напруги на ланці постійного струму (шина DC).
- Системи зберігання енергії (СЗЕ) на базі акумуляторних батарей, яка акумулює надлишкову енергію для використання в періоди низької генерації ФЕС. СЗЕ включає в себе акумуляторну батарею та двонаправлений перетворювач постійного струму (DC-DC1), який здійснює перетворення напруги батареї до необхідного на ланці постійного струму (шина DC) та виконання функцій зарядних контролерів (Battery Management System).

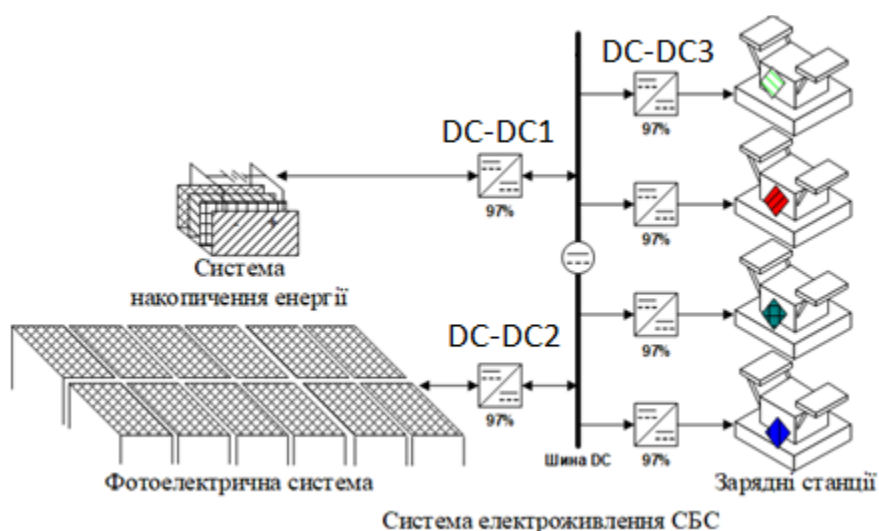


Рисунок 4.1 - Елементи основної системи та ККД перетворювачів

– Зарядних станцій дронів (кількість станцій відповідає кількості секцій спостереження – рис. 1.18, 1.20). Кожна зарядна станція підключена до проміжної ланки постійного струму та містить однонаправлені перетворювач постійного струму (DC-DC3), які здійснюють перетворення напруги з ланки постійного струму (шина DC) в напругу/струм для заряджання акумуляторних батарей дронів.

Основна система функціонує в умовах достатньої сонячної інсоляції, забезпечуючи шину DC, як основного джерела електроенергії для зарядних станцій дронів, як показано на рисунку 1.18.

Допоміжна система може використовуватися для компенсації дефіциту електроенергії у випадках недостатньої генерації від ФЕС та наявності поруч з системою промислової електромережі змінного струму. Допоміжна система включає в себе промислову електромережу, як джерело резервного живлення, ізольований AC-DC перетворювач та додаткове обладнання відповідно до потреб споживача, таке як реле автоматичного перемикавання, системи керування енергоспоживанням, пристрої захисту від перенапруг тощо.

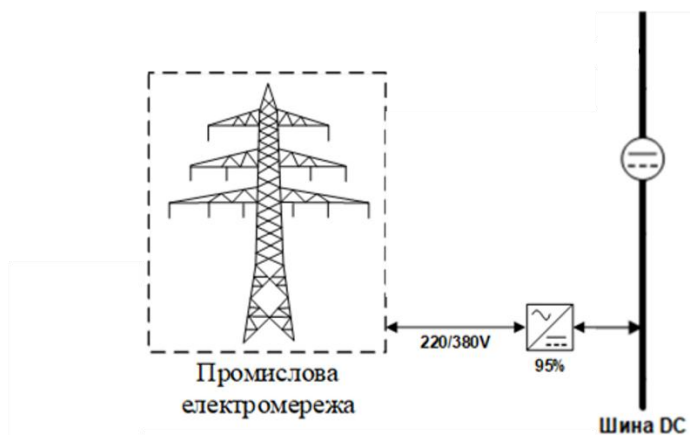


Рисунок 4.2 - Елементи допоміжної системи та ККД перетворювачів

Допоміжна система активується при необхідності компенсації дефіциту електроенергії, за умов довгострокового зниження генерації електроенергії ФЕС, що дозволяє мінімізувати залежність від мережі.

ККД перетворювачів елементів допоміжної та основної системи залежать від топологій відповідних перетворювачів, режимів роботи, наявності або відсутності гальванічної ізоляції тощо. Враховуючи зазначене та базуючись на проведеному

огляді літературних джерел, загальне значення ККД для перетворювачів основної системи прийняте на рівні **97%**, як показано на рисунку 4.1, та допоміжної системи на рівні **95%**, як показано на рисунку 4.2. Значення ККД перетворювачів може змінюватись в залежності від згаданих умов, однак в подальших розрахунках, для спрощення, воно приймалось постійним.

Для досягнення енергетичної автономності та ефективного управління електроенергією необхідно проаналізувати взаємозв'язки між згаданими компонентами, що забезпечують безперервне живлення зарядних станцій дронів з метою оптимального їх використання.

4.2 Режими роботи системи електроживлення.

Функціональна схема системи безперервного спостереження на базі дронів з комбінованою системою живлення представлена на рисунку 1.18. Вона ілюструє взаємодію основної та допоміжної систем для забезпечення безперебійного живлення зарядних станцій дронів.

Робота системи визначається діаграмою переходів, наведеною на рисунку 1.19. Вона включає чотири стани:

- С1 (заряджання дронів від ФЕС та СЗЕ).
- С2 (одночасне заряджання дронів і СЗЕ при надлишковій генерації ФЕС).
- С3 (живлення зарядних станцій від мережі при дефіциті енергії в СЗЕ).
- С4 (передача надлишкової енергії в мережу, коли СЗЕ повністю заряджена).

Алгоритм переходів між станами забезпечує максимальне використання відновлюваних джерел енергії та мінімізацію споживання від мережі. Перехід між станами залежить від потужності генерації ФЕС, рівня заряду СЗЕ та енергетичних потреб дронів.

У разі відсутності сонячного випромінювання, зокрема в нічний час або за умов тривалої хмарності, енергозабезпечення комплексу спостереження здійснюється виключно за рахунок накопиченої електроенергії в акумуляторних батареях СЗЕ. Величина ємності акумуляторної батареї визначається на основі добової енергетичної потреби секцій та алгоритму управління енергоспоживанням, що враховує ККД перетворювачів. Електроенергія з акумуляторних батарей подається через DC-DC-

перетворювачі, забезпечуючи стабільне живлення всіх складових системи: систем керування, зв'язку, зарядних станцій дронів.

У денний час за відсутності сонячного випромінювання енергопостачання відбувається виключно від СЗЕ, однак за умов часткового освітлення може реалізовуватися комбінований режим, за якого частина енергії генерується фотоелектричними модулями, а нестача компенсується СЗЕ. Робота системи у такому режимі вимагає ретельного управління зарядно-розрядними процесами для запобігання глибокому розряду СЗЕ та максимального використання наявної енергії.

Протягом тривалих періодів низької інсоляції використовується електроживлення з мережі. Таким чином, забезпечується безперервність виконання завдань з спостереження навіть за умов відсутності генерації від сонячних панелей, що є критичним фактором для автономності комплексу.

Для оцінки ефективності автономної системи електроживлення необхідно враховувати низку ключових параметрів, які забезпечують її стабільну роботу та здатність адаптуватися до змінних умов. Правильно підібрані критерії дозволяють не лише забезпечити надійну роботу системи, а й оптимізувати витрати на її впровадження та експлуатацію. Враховуючи викладене пропонується використовувати наступні критерії автономності:

- частка використаної відновлюваної енергії в загальному балансі;
- здатність системи працювати в умовах змінного енергопостачання без перерв у роботі.

Взаємозв'язки між компонентами системи електроживлення та їх координація через алгоритми переходів у скінченному автоматі (рис. 1.19) створюють базу для моделювання та розрахунку енергетичних потреб системи спостереження. Наступний підрозділ фокусується на методиці визначення параметрів енергетичного забезпечення системи для оптимального планування ресурсів для забезпечення надійної роботи системи.

4.3 Методика визначення параметрів компонентів електроживлення

Ефективне функціонування системи безперервного спостереження на базі дронів значною мірою залежить від параметрів електроспоживання. Кожен

компонент системи електроживлення, від основної та додаткової системи, має бути налаштований для забезпечення енергетичної автономності та стабільної роботи в умовах змінного навантаження.

Для розрахунку параметрів електроживлення системи спостереження на базі дронів запропоновано методику, показану на рис. 4.3, яка складається з наступних етапів.

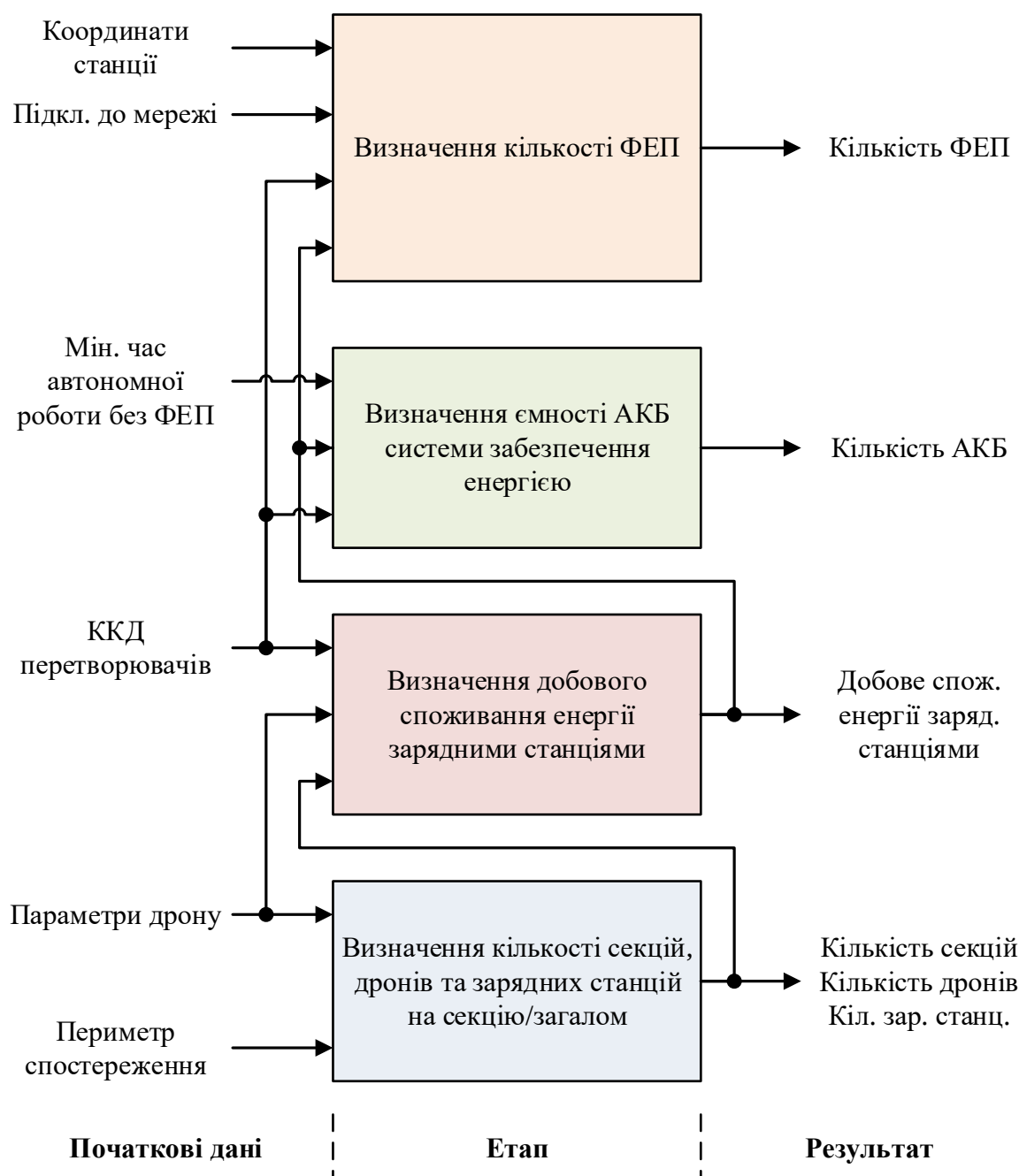


Рисунок 4.3 - Методика розрахунку системи електроживлення комплексу безперервного спостереження на базі дронів

Визначення кількості секцій та зарядних станцій

На першому етапі визначається кількість дронів, секцій та зарядних станцій на кожен секцію/загалом. Початковими даними для цього розрахунку виступають відстань до точки спостереження (периметр спостереження) та параметри дрону (ємність АКБ, споживання електричної енергії під час польоту). Розрахунки кількості дронів, необхідних для спостереження в одній точці в залежності від відстані, наведено у розділі 3 дисертаційного дослідження.

Визначення добового споживання електроенергії однією секцією

За результатами розрахунку кількості зарядних станцій, секцій та дронів на другому етапі визначається необхідна кількість електроенергії для забезпечення роботи однієї секції / всієї системи спостереження протягом доби. Ця величина є сталою та залежить виключно від таких параметрів, як відстань до точки спостереження (периметр спостереження), кількість задіяних для однієї точки спостереження дронів, а також ККД перетворювачів електричної енергії.

Розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї СЗЕ

На наступному етапі визначається ємність акумуляторної батареї СЗЕ, яка забезпечуватиме електроживлення системи протягом мінімального періоду автономної роботи (в подальших розрахунках обирався час не менше 24 годин) за відсутності генерації електроенергії ФЕС. Розрахунок виконується з урахуванням алгоритму управління енергоспоживанням (рис. 1.19), необхідної добової кількості енергії, а також ККД перетворювачів електричної енергії, що входять до складу системи (рис. 4.1).

Визначення необхідної кількості фотоелектричних панелей ФЕС

На фінальному етапі розраховується кількість фотоелектричних панелей ФЕС, необхідних для забезпечення електроживлення зарядних станцій. Визначення здійснюється з урахуванням географічного розташування системи спостереження, інсоляційних умов регіону, наявності підключення до промислової електричної мережі змінного струму, а також загальної енергетичної потреби всіх зарядних станцій. Додатково враховуються втрати в елементах перетворення електроенергії, включаючи ККД перетворювачів напруги (рис. 4.1).

4.3.1 Вихідні дані для розрахунків

Усі наведені розрахунки виконуються на основі визначених вихідних параметрів, поданих у таблиці 4.1, яка містить значення ключових змінних, таких як характеристики акумуляторних батарей та фотоелектричних панелей, а також коефіцієнти корисної дії та ефективності всіх енергетичних перетворень у системі. Вихідні дані характеризують енергетичні потреби дронів, ефективність зарядних пристроїв, акумуляторних батарей та фотоелектричних панелей. Варто відзначити, що в розрахунках як базові використовувалися фотоелектричні панелі з номінальною потужністю 250 Вт (площа фоточутливої поверхні $1,6 \text{ м}^2$ при стандартних умовах – номінальна інтенсивність випромінювання 1000 Вт/м^2 , температура поверхні панелі 25°C , AM2). Вибір всіх параметрів у таблиці базувався на аналізі літературних джерел та експлуатаційних характеристиках дронів.

Таблиця 4.1

Вихідні дані для розрахунків

Параметр	Значення
Ємність АКБ дрону, Q_{bat}	5000 мАг
Струм на виході з зарядного пристрою дрону, I_{ch}	5 А
Напруга на виході з зарядного пристрою дрону, U_{ch}	17,6 В
Горизонтальна швидкість, S_{hor}	10 м/с
Максимальний час польоту дрону, T_{one}	46 хв
Мінімальна напруга батареї, V_{min_bat}	51,2 В
Коефіцієнт врахування глибини розряду батареї, k	1,2
Ефективність фотоелектричного перетворення ФЕС, η_{PV}	15,5 %
Площа одії фотоелектричної панелі, S_{PV}	$1,6 \text{ м}^2$
К.к.д. перетворювачів зарядних пристроїв дронів, η_{ch}	0,97
К.к.д. перетворювача АС до шини DC, η_{ps_ac}	0,95
К.к.д. перетворювача СНЕ до шини DC, η_{ps_bat}	0,97
К.к.д. перетворювача ФЕС до шини DC, η_{ps_PV}	0,97

4.3.2 Визначення енергетичного навантаження для однієї секції спостереження

Одним із ключових компонентів системи безперервного спостереження є зарядні станції дронів, які відповідають за своєчасне заряджання і забезпечення безперервності виконання завдання. Ефективне управління енергетичним навантаженням цих станцій є критичним для досягнення автономності системи, мінімізації простоїв та забезпечення її надійності.

Для розрахунку параметрів електроживлення однієї секції системи спостереження на базі дронів запропоновано методику, показану на рис. 4.4, яка складається з наступних етапів.

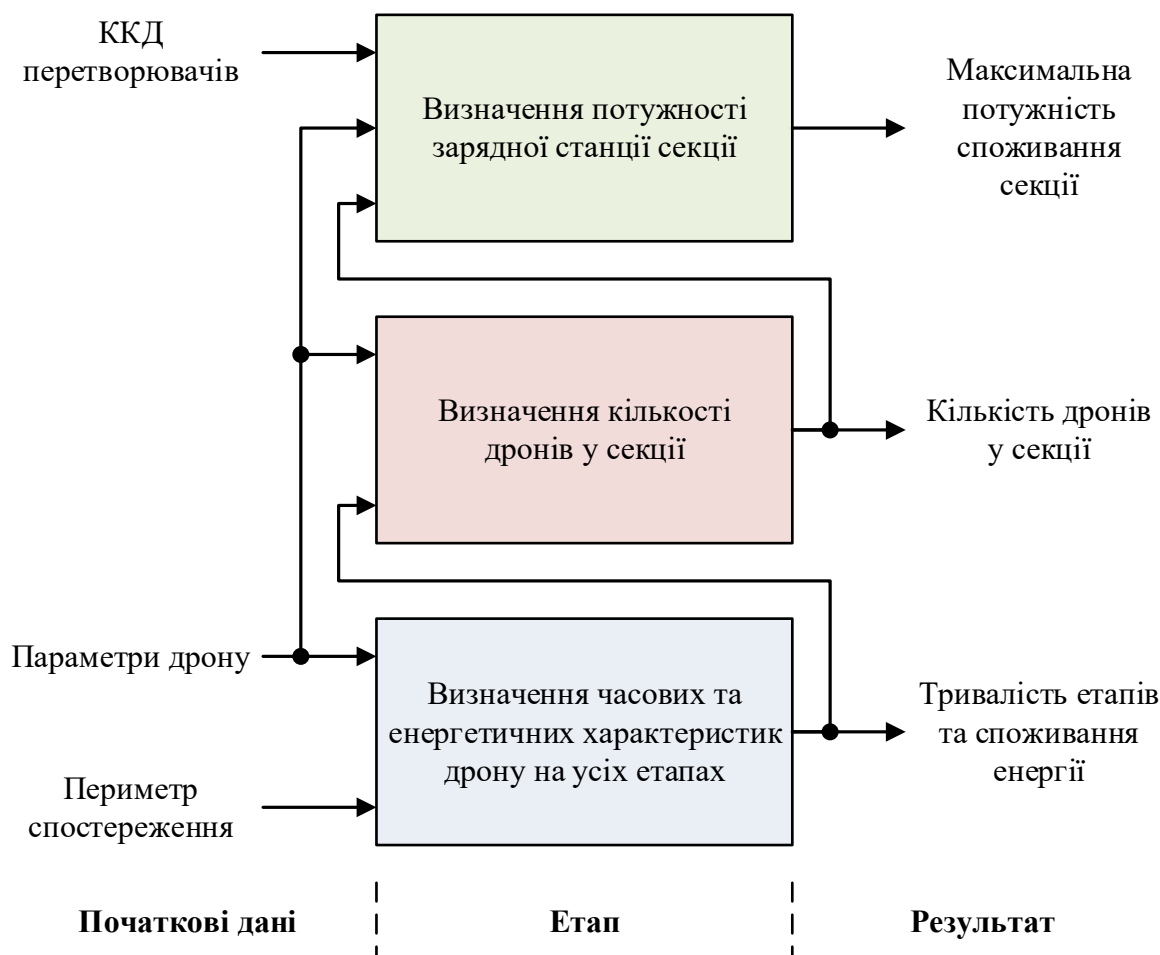


Рисунок 4.4 - Методика визначення енергетичного навантаження для однієї секції спостереження

Визначення часових та енергетичних характеристик дрону на усіх етапах польоту

Початковими даними для першого етапу є параметрів дронів, які будуть

використовуватись в комплексі, зокрема – основні енергетичні характеристики (номінальний струм споживання, струм заряджання та інше). З використанням цих даних оцінюються граничні умови для постійного спостереження та характеристики споживання енергії для різних профілів польоту (відповідно до розділу 3 дисертаційного дослідження).

Базуючись на даних про енергоспоживання оптимального профілю польоту обраного дрону визначаються оптимальний залишок ємності акумуляторної батареї дрону, часові та енергетичні характеристики всіх етапів (політ, спостереження, повертання назад, заряджання тощо) та максимальна дальність спостереження відповідно до умов безперервного спостереження та розрахунку енергетичного балансу.

Визначення кількості дронів в секції

На наступному етапі з метою визначення енергетичної потреби секції спостереження оцінюється загальна потреба в дронах, які необхідні для забезпечення безперервного спостереження. Вхідними даними для оцінювання є час заряджання, резервний залишок, максимальний час польоту одного дрону. Результатом оцінювання є кількість циклів польоту дрону дронів в секції та загальна кількість дронів в секції. Зазначені дані є пріоритетними у визначенні потужності зарядних станцій комплексу.

Визначення потужності зарядної станції секції

На фінальному етапі оцінюється потужність зарядної станції з урахуванням ККД перетворювачів та загального часу, що використовується для заряджання визначені кількості дронів. Оцінка потужності зарядних станцій дронів є ключовим етапом у процесі визначення загальної потреби в електроенергії комплексом спостереження.

Модель роботи зарядних станцій дронів включає в себе два стани:

- заряджання мінімальної кількості дронів;
- заряджання максимальної кількості дронів.

Для визначення параметрів споживання зарядних станцій дронів припущено що всі дрони, що на зарядних станціях - заряджаються безперервно.

Мінімальна кількість дронів на зарядній станції буде спостерігатись коли виконується один цикл заміни дрона, що включає в себе зліт дрона (n), який замінить дрон, що вже розрядився ($n+1$), політ зі швидкістю S_{hor} на дальність x_{Dmax} та

повернення дрона (n+1) зі швидкістю S_{hor} на дальність x_{Dmax} в точку посадки. Алгоритм одного циклу заміни дрона наведено на рисунку 4.4.

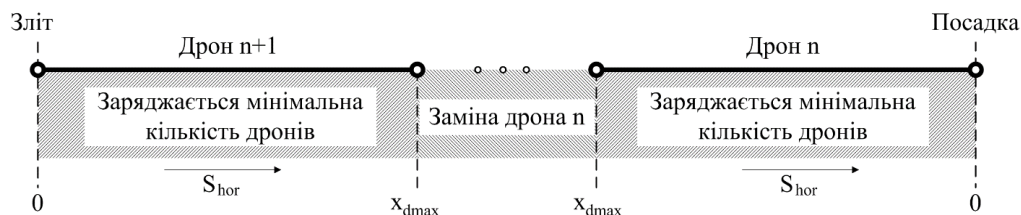


Рисунок 4.5 - Алгоритм одного циклу заміни дрона

Згідно наведеного алгоритму, період часу за один цикл, під час якого на зарядній станції заряджається мінімальна кількість дронів визначається, за формулою:

$$T_{mc} = 2 \cdot \frac{x_{Dmax}}{S_{hor}}. \quad (4.1)$$

де T_{mc} – час за один цикл, під час якого на зарядній станції заряджається мінімальна кількість дронів, год;

Загальна кількість циклів польоту визначається, як відношення періоду безперервного спостереження (доба) на максимальний час польоту одного дрону з урахуванням резервного залишку, за формулою:

$$n_{one} = \frac{T_{cont}}{T_{one} - (T_{one} \cdot SOC_{min})}, \quad (4.2)$$

де n_{one} – загальна кількість циклів польоту, од; T_{cont} – час безперервного спостереження, год, T_{one} – максимальний час польоту одного дрону, год, SOC_{min} – зарезервований залишок батареї дрону (зазвичай 0,2 або 20%).

Максимальний час польоту одного дрону (T_{one}) **залежить від робочого струму споживання у кожній точці польоту**. Одночасно, на робочий струм споживання дрона впливає значна кількість чинників, які неможливо передбачити, як пориви вітру в одну з проєкцій польоту. В розрахунках прийнято робочий струм споживання, та відповідний час польоту, з урахуванням факторів, які можливо врахувати (температура повітря, атмосферний тиск), що розрахований відповідно до методики запропонованої в розділі 3.2 даної дисертації.

Враховуючи зазначене, в рамках безперервного спостереження, загальний час заряджання мінімальної кількості дронів визначається за формулою:

$$T_{1sec} = T_{mc} \cdot n_{one}. \quad (4.3)$$

де T_{1sec} – загальний час використаний для заряджання мінімальної кількості

дронів час безперервного спостереження, год.

Тоді загальний час використаний для заряджання максимальної кількості дронів буде розраховуватись за формулою:

$$T_{2sec} = T_{cont} \cdot T_{1sec}. \quad (4.4)$$

де T_{2sec} – загальний час використаний для заряджання максимальної кількості дронів час безперервного спостереження, год.

Кількість дронів, які одночасно можуть бути в повітрі обмежуються відповідно до забезпечення ефективної роботи системи безперервного спостереження, та **не може бути більше двох на одну секцію**. Відповідно кількість зарядних пристроїв однієї секції, що постійно працюють, можна розрахувати за формулами:

$$c_{min} = r - 2, \quad (4.5)$$

$$c_{max} = r - 1, \quad (4.6)$$

де r – кількість дронів що знаходяться в циклі секції, од, c_{max} – максимальна кількість одночасно-заряджаємих дронів на секцію, од, c_{min} – мінімальна кількість одночасно-заряджаємих дронів на секцію, од.

Потужність зарядної станції, в одній секції, з урахуванням к.к.д перетворювачів зарядних пристроїв розраховується, як $P_{1s} + P_{2s}$, які визначаються за формулами:

$$P_{1s} = \frac{I_{ch} \cdot U_{ch} \cdot c_{min}}{\eta_{ch}}, \quad (4.7)$$

$$P_{2s} = \frac{I_{ch} \cdot U_{ch} \cdot c_{max}}{\eta_{ch}}, \quad (4.8)$$

де P_{1s} , P_{2s} – потужність зарядних станцій при заряджанні мінімальної та максимальної кількості дронів, Вт; I_{ch} – струм зарядного пристрою в режимі CC, А; U_{ch} – напруга зарядного пристрою в режимі CV, В; η_{ch} – к.к.д. перетворювача зарядних пристроїв (0.97).

Аналіз результатів розрахунків потужності зарядної станції для однієї секції показують про майже лінійну залежність з кількістю секцій, як показано на рисунку 4.5.

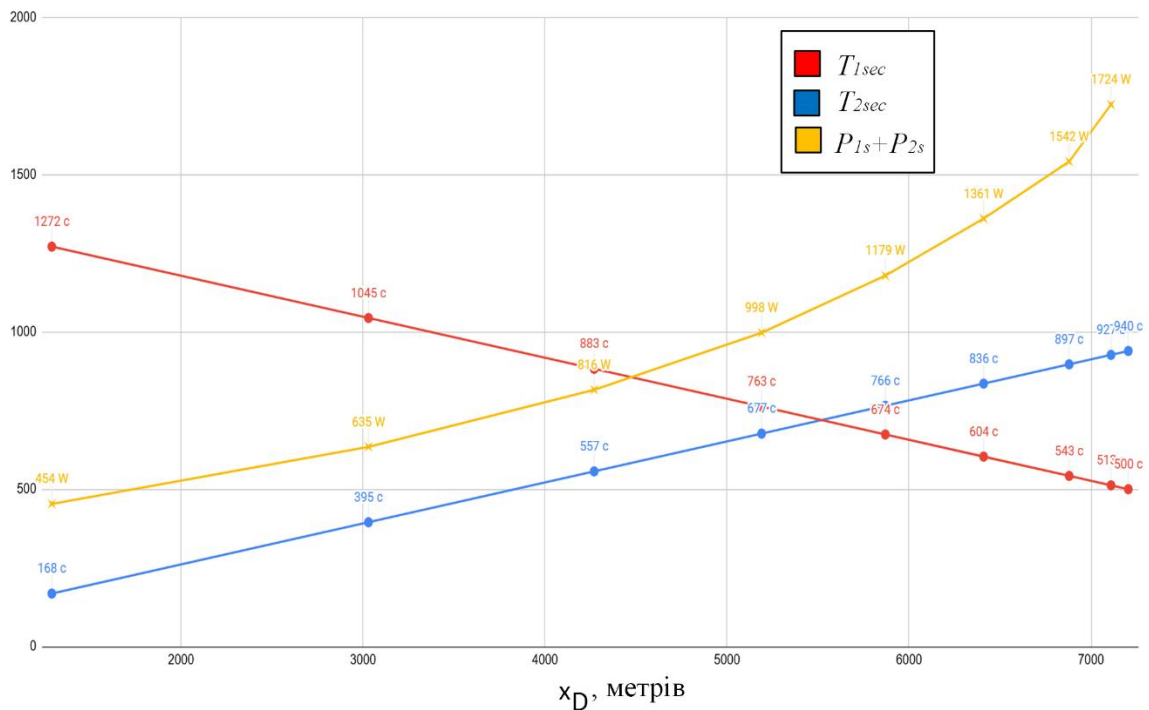


Рисунок 4.6 - Залежність потужності зарядної станції та часу заряджання (мінімальної та максимальної кількості дронів) від дальності спостереження x_D

Аналіз потужності, яка споживається зарядними станціями дронів є початковим етапом у процесі визначення загальної потреби в електроенергії. Проте, для забезпечення автономності системи, важливо не лише врахувати споживання, а й оптимізувати СЗЕ відповідно до реальних умов експлуатації. Далі розглядається методика розрахунку ємності акумуляторної батареї СЗЕ з урахуванням специфіки роботи дронів у режимі безперервного спостереження.

4.3.3 Розрахунок ємності акумуляторних батарей СЗЕ

Правильний вибір ємності акумуляторних батарей СЗЕ дозволяє забезпечити:

- енергетичну стабільність (система зберігає здатність функціонувати безперервно навіть за відсутності генерації від ФЕП);
- зниження витрат на обслуговування (важливо для економічної ефективності);
- покращення надійності системи (забезпечення достатнього запасу енергії мінімізує ризик відключення системи через енергетичний дефіцит).

Модель спостереження ґрунтується на умові, що кожна ділянка зони спостереження повинна бути постійно в полі зору камери дрону. В такому випадку дрони зависають кожен в своїх заздалегідь визначених координатах і розміщуються у

відповідних секціях вздовж периметру спостереження, відповідно до заздалегідь визначеної схеми польоту. Приклад розміщення дронів для перекриття зони що охороняється в один кілометр на один кілометр чотирма секціями зображено на рисунку 1.20.

Для спрощення подальшого аналізу, форму зони, що охороняється обрано у вигляді квадрату, причому зарядна станція системи електроживлення комплексу знаходиться в центрі зони, що охороняється. Таким чином, периметр спостереження визначається за формулою:

$$L = 4 \cdot x_{Dmax} \cdot \sqrt{2}. \quad (4.9)$$

де L – периметр спостереження, м;

Кут горизонтального огляду бортової відеокамери дрону використовується для розрахунку кількості секцій:

$$x = \frac{L}{2 \cdot y_D \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2})}, \quad (4.10)$$

де x – кількість секцій, од; y_D – висота польоту, м; α - горизонтальний кут огляду бортової відеокамери, град.

При несприятливих умовах, таких як опади, туман, низька хмарність, y_D зменшується.

Враховуючи кількість секцій та споживання енергії зарядними пристроями визначається загальне споживання енергії протягом безперервного спостереження за формулами:

$$E_1 = x \cdot P_{1s} \cdot T_{1sec}, \quad (4.11)$$

$$E_2 = x \cdot P_{2s} \cdot T_{2sec}, \quad (4.12)$$

де E_1, E_2 – споживання енергії, Вт·год, P_{1s}, P_{2s} – потужність, що витрачається при заряджанні максимальної та мінімальної кількості дронів, Вт.

Необхідна потреба в електроенергії, для забезпечення сталого споживання системою за час безперервного спостереження, визначається за формулою:

$$E = E_1 + E_2. \quad (4.13)$$

де E – необхідна потреба в електроенергії, Вт·год.

Таким чином ємність акумуляторної батареї, для забезпечення повної автономності можна визначити за формулою:

$$Q_{size} = \frac{E \cdot k}{V_{min_bat} \cdot \eta_{ps_bat}}, \quad (4.14)$$

де Q_{size} – ємність акумуляторної батареї, А·год; k – коефіцієнт врахування глибини розряду (1.2); V_{min_bat} – мінімально-допустима напруга батареї, В; η_{ps_bat} – к.к.д. перетворювача електроенергії від батареї до шини DC (0.97).

Проведений розрахунок ємності акумуляторних батарей дозволяє забезпечити стабільну роботу системи безперервного спостереження навіть за умов змінних енергетичних потреб. Однак для досягнення повної або часткової автономності одних лише акумуляторів недостатньо. Необхідно також оптимально інтегрувати фотоелектричну систему, яка стане основним джерелом генерації енергії. Наступний підрозділ присвячений розрахунку кількості сонячних панелей, що дозволяє забезпечити ефективну роботу системи в різних кліматичних умовах та мінімізувати залежність від зовнішніх джерел живлення.

4.3.4 Результати моделювання СЗЕ

Ефективна робота системи безперервного спостереження значною мірою залежить від ємності акумуляторних батарей СЗЕ, яка повинна забезпечувати живлення впродовж 24 годин безперервної роботи навіть за умов відсутності генерації від ФЕП. У цьому контексті розмір периметру спостереження є критичним фактором, який визначає необхідну ємність акумуляторних батарей. Відповідно до зазначеної в попередньому розділі, методики здійснено моделювання СЗЕ в середовищі MATLAB. Результати моделювання, роботи системи впродовж 24 годин безперервної роботи, відповідно до вихідних даних, які наведені в таблиці 4.1, (V_{min_bat} – 51,2 В та x_{Dmax} – від 1290 м до 7205 м), занесені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2

Результати моделювання ємності СЗЕ

x_{Dmax} , м	L , м	x , од. (округл)	E_1 , Вт·год	E_2 , Вт·год	E , Вт·год	Q_{size} , А·год
1290	7297	8	2035	30766	32801	793
3030	17140	18	21512	85305	106818	2581
4270	24154	25	63160	133518	196678	4752
5190	29359	30	122829	173061	295890	7149

x_{Dmax} , м	L , м	x , од. (округл)	E_1 , Вт·год	E_2 , Вт·год	E , Вт·год	Q_{sze} , А·год
5870	33205	34	196806	208005	404811	9781
6410	36260	37	280649	236501	517150	12496
6880	38919	39	370428	255977	626405	15135
7110	40220	41	459935	286003	745939	18024
7205	40757	41	524340	310100	834440	20162

Результати моделювання СЗЕ показують, що для різних периметрів ємність акумуляторних батарей може суттєво змінюватись, як показано на рисунку 4.6.

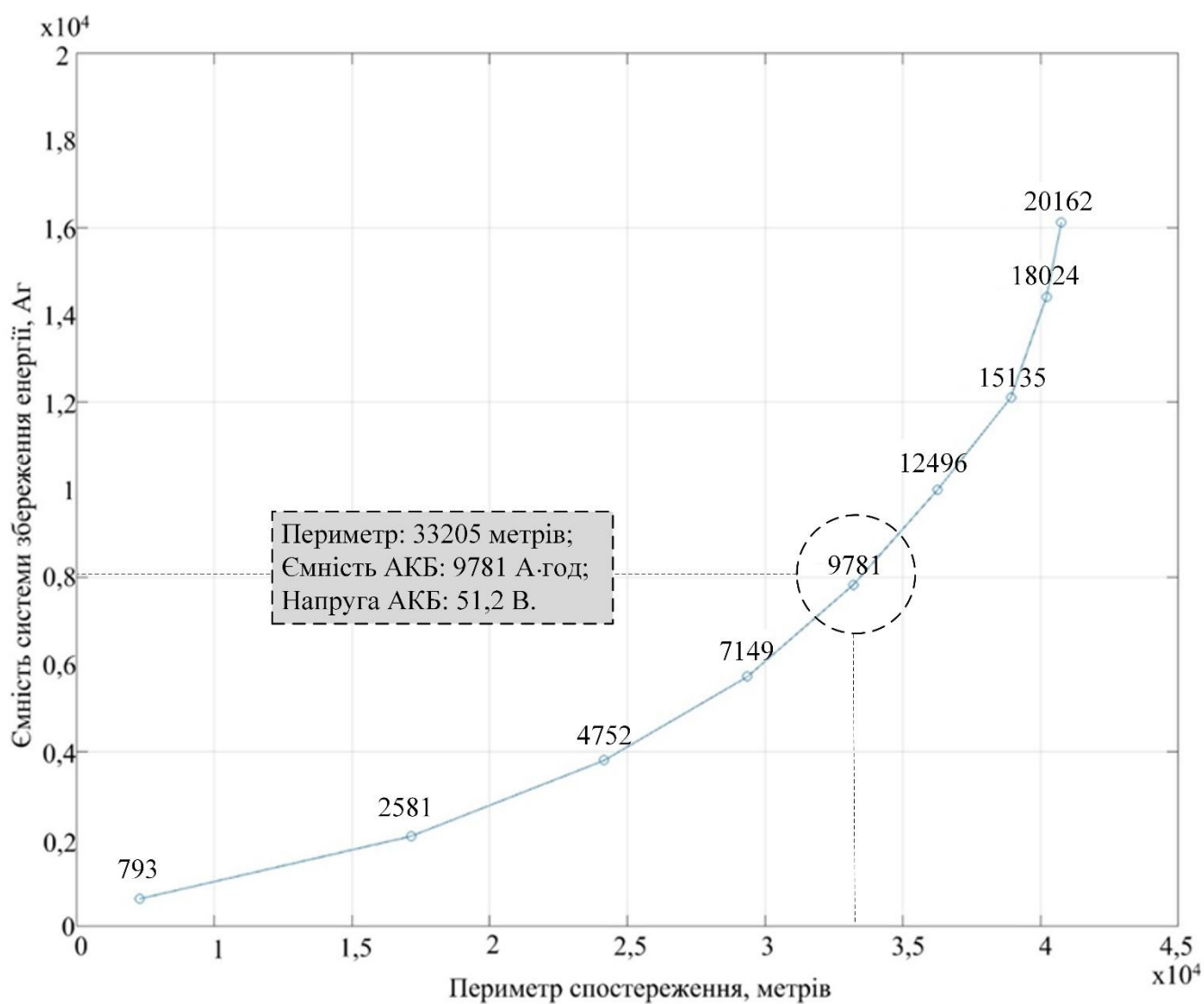


Рисунок 4.7 - Залежність ємності акумуляторної батареї від периметру спостереження

Результати визначення ємності акумуляторних батарей СЗЕ можна поділити на три конфігурації (по периметрам спостереження).

Для менших периметрів (до 10 000 м) достатньо акумуляторних батарей ємністю від 793 А·год.

Для середніх периметрів (від 10 000 до 25 000 м) ємність акумуляторних батарей збільшується до 4752 А·год.

Для великих периметрів (до 40 000 м) необхідна ємність акумуляторної батареї може сягати 20162 А·год.

Визначені конфігурації обумовлені необхідністю забезпечення резерву енергії для стабільної роботи системи в умовах високого навантаження.

В подальшому, для забезпечення ефективної роботи системи рекомендовано враховувати не лише поточний периметр спостереження, а й можливість його розширення в майбутньому. Для малих периметрів доцільно використовувати акумуляторні батареї з мінімальною ємністю, враховуючи можливість поступового збільшення. Для середніх та великих периметрів варто передбачити використання модульних систем акумуляторів, які дозволяють нарощувати ємність у разі потреби.

4.3.5 Розрахунок кількості панелей ФЕС

Для забезпечення автономності системи безперервного спостереження використовується ФЕС, що складається з набору фотоелектричних панелей (ФЕП). Визначення оптимальної кількості ФЕП залежить від енергетичних потреб системи, середньомісячної інсоляції, ефективності панелей та ККД перетворювачів. Розрахунок кількості ФЕП дозволяє адаптувати систему до умов конкретного регіону та забезпечити стабільне енергопостачання.

Необхідна кількість ФЕП для кожного місяця s визначається за формулою:

$$k_s = \frac{E \cdot 0,001}{I_{ns} \cdot S_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot 0,01 \cdot \eta_{ps.pv}}, \quad (4.15)$$

де k_s – необхідна кількість ФЕП для місяця s , од, η_{pv} – ефективність перетворення сонячної енергії, %, I_{ns} — показник сонячної інсоляції за місяць, кВт*год/м²/день, S_{PV} – площа модуля сонячної електростанції, м². $\eta_{ps.pv}$ – к.к.д. перетворювача електроенергії від ФЕС до шини DC (0.97).

Оптимізація кількості ФЕП є критичним етапом у забезпеченні автономності

системи безперервного спостереження. Для мінімізації витрат і забезпечення ефективної роботи системи пропонується поєднання ФЕС та СЗЕ, такий принцип електроживлення дозволяє адаптувати систему для різних регіонів та потреб. Інтеграція ФЕС із системою зберігання енергії дозволяє ефективно компенсувати сезонні коливання інсоляції, мінімізуючи залежність від зовнішніх джерел живлення та забезпечуючи надійну роботу системи протягом усього року.

4.3.6 Результати моделювання ФЕС

Моделювання з використанням даних сезонних змін інсоляції дозволяє визначити необхідну кількість фотоелектричних панелей для кожного місяця. Це забезпечує максимальну адаптацію системи до умов конкретного регіону, підвищуючи її адаптивність та надійність. Для моделювання було враховано коефіцієнти інсоляції для кожного місяця для Київської області [76], наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Вихідні дані для моделювання ФЕС

Місяць	Коефіцієнти інсоляції, I_{ns} , кВт*год/м ² /день
січень	2,04
лютий	3,3708
березень	5,193
квітень	6,578
травень	7,758
червень	8,185
липень	7,889
серпень	6,693
вересень	5,56
жовтень	3,8406
листопад	2,543
грудень	1,82

Згідно наведених даних в таблиці 4.3 та відповідно до (4.15) можливо змоделювати кількість ФЕП для зазначеного регіону. Результати моделювання ФЕП, в

серидовищі MATLAB, для x_{Dmax} — від 1290 м до 7205 м, та периметрів L — від 7297 до 40758 м занесена в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4

Результати моделювання для визначених L

L, м	k_s											
	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
7297	67	41	27	21	18	17	18	21	25	36	54	75
17140	218	132	86	68	58	55	57	67	80	116	175	244
24155	401	243	158	125	106	100	104	123	148	213	322	450
29359	603	365	237	187	159	151	156	184	222	321	484	676
33206	825	500	325	256	217	206	214	252	303	439	662	925
36260	1054	638	414	327	278	263	273	322	387	560	846	1182
38919	1277	773	502	396	336	319	331	390	469	679	1024	1431
40220	1521	920	598	472	400	379	394	464	558	808	1220	1704
40758	1701	1030	668	528	448	424	440	519	624	904	1365	1906

Зазначені результати показують, що для забезпечення адаптивності системи безперервного спостереження доцільно, по прикладу СЗЕ знайти оптимальні групи ФЕП, які будуть задовольняти потребу в балансі між кількома периметрами спостереження та кількістю ФЕП.

На рисунку 4.8 представлено зміну кількості ФЕП у різні місяці року для різних значень периметра спостереження, де кожна точка відповідає певному місяцю року.

Кожна множина точок на графіку відповідає певному периметру спостереження, а кожен ряд точок демонструє зміну необхідної кількості ФЕП упродовж року. Початковою точкою кожного ряду є місяць із найменшою потребою у ФЕП (червень, травень, липень), тоді як кінцева точка відповідає місяцю з найбільшою потребою у ФЕП (грудень).

Спостерігається закономірність, за якої збільшення периметра спостереження призводить до зростання кількості необхідних ФЕП. Відповідно, рядки даних на графіку мають різну довжину: коротші відповідають меншим периметрам спостереження, а довші — більшим.

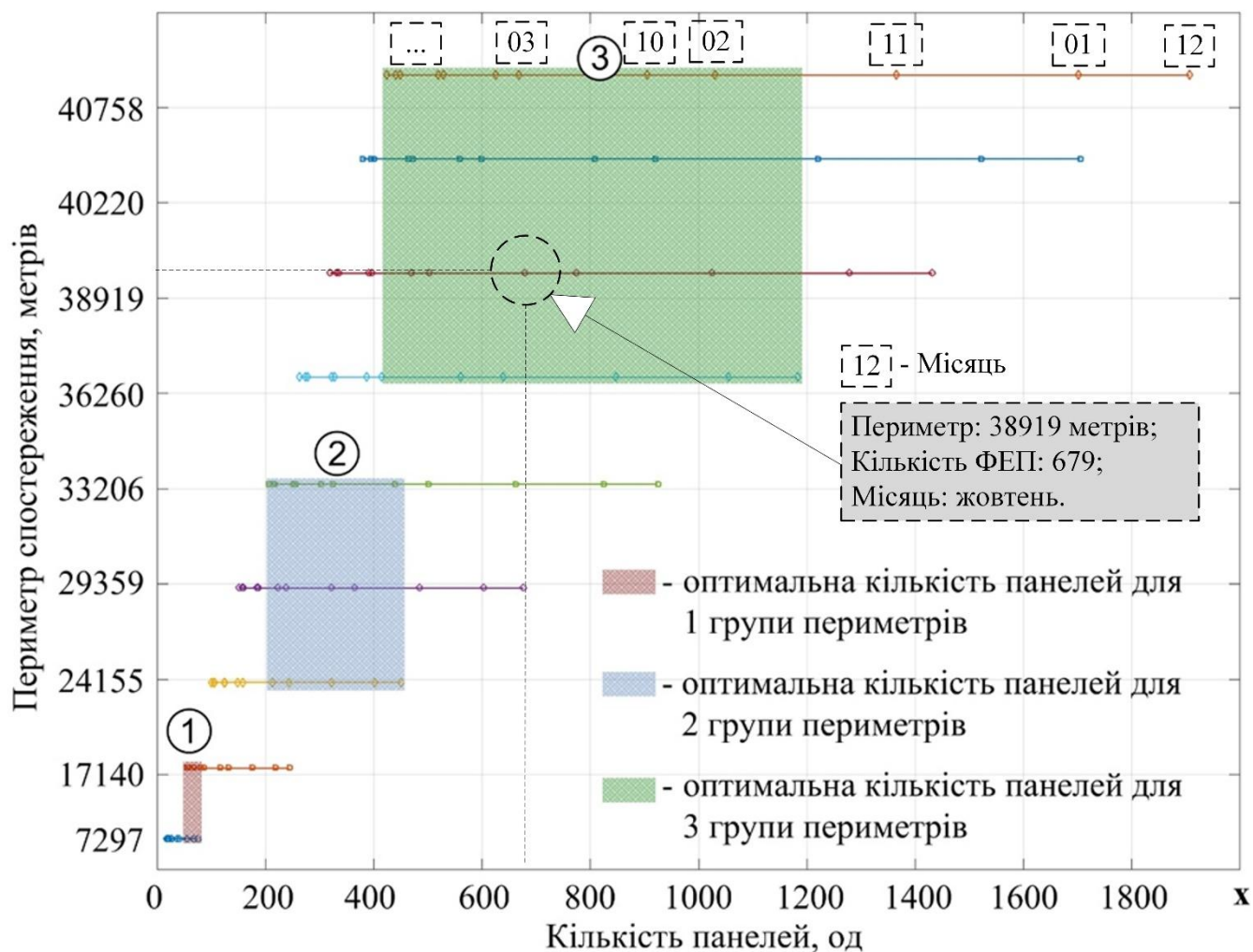


Рисунок 4.8 - Дані моделювання кількості ФЕП та результати групування.

Для оптимізації кількості ФЕП здійснено групування периметрів спостереження. Межі діапазонів визначені від мінімального значення кількості панелей для найбільшого периметра в межах групи до максимального значення кількості панелей для найменшого периметра в групі. В результаті було сформовано три групи, хоча метод дозволяє виділяти мінімум дві. Обраний розподіл забезпечує оптимальне співвідношення кількості ФЕП, що забезпечує гнучкість системи в залежності від площі зони спостереження.

Отримані наступні оптимальні конфігурації для різних периметрів:

- периметри від 7297 м до 17140 м (оптимальна кількість ФЕП: 55–75 панелей);
- периметри від 24155 м до 33206 м (оптимальна кількість ФЕП: 206–450 панелей);

– периметри від 36260 м до 40758 м (оптимальна кількість ФЕП: 424–1182 панелей).

Ці значення забезпечують енергетичну автономність системи в умовах між низькою та високою інсоляцією, дозволяючи адаптувати систему до різних масштабів зон спостереження.

Аналіз результатів моделювання дозволив виділити оптимальні параметри системи електроживлення для різних периметрів спостереження. Однак, у випадках зменшення кількості ФЕП виникає потреба у компенсації дефіциту енергії з мережі. Далі розглядається, як ці компенсаційні механізми можуть бути інтегровані в систему для забезпечення надійної роботи.

4.4 Оцінювання комбінованого електроживлення та застосування методу оцінки енергетичного балансу

У попередньому підрозділі детально розглянуті ключові аспекти автономного електрозабезпечення системи безперервного спостереження, зокрема, методику визначення енергетичних потреб та оптимізацію використання ФЕС і СЗЕ. Однак для забезпечення стабільної роботи в умовах непередбачуваних змін енергетичних ресурсів доцільно також враховувати комбіноване електроживлення, яке поєднує усі наявні джерела електроживлення.

Ефективне функціонування системи безперервного спостереження в умовах обмеженої генерації від ФЕП залежить від здатності компенсувати дефіцит енергії за рахунок зовнішніх джерел живлення. Створена модель дозволяє визначити кількість електроенергії що потрібно доповнити з мережі за умови зменшення кількості задіяних ФЕП.

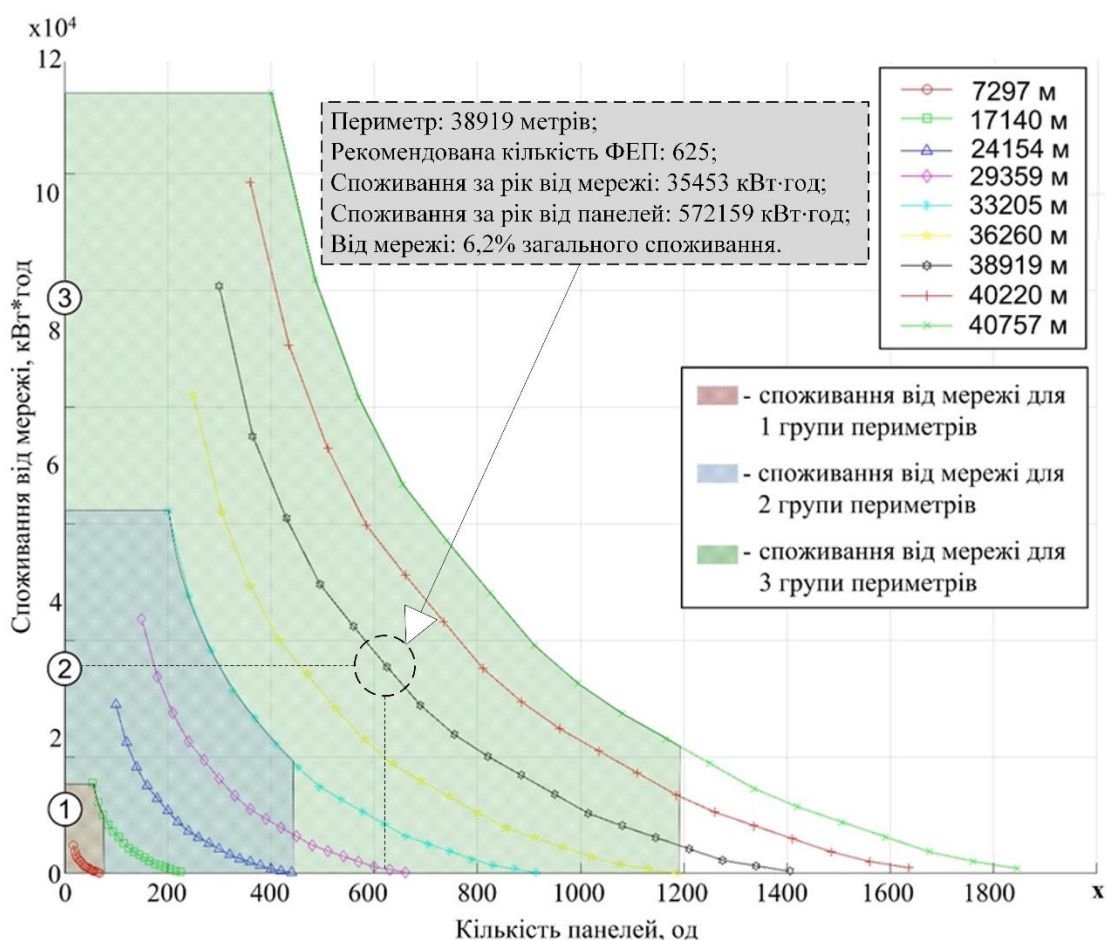


Рисунок 4.9 - Дані моделювання споживання енергії від мережі та результати групування периметрів.

Рисунок 4.9 ілюструє результати моделювання споживання електроенергії від мережі залежно від периметра спостереження та кількості встановлених ФЕП. Кожна точка на графіку відповідає конкретному значенню кількості ФЕП за певного рівня компенсації енергоспоживання мережею. Лінії, що проходять через точки, відображають залежність необхідного рівня компенсації електроенергії від кількості ФЕП для різних периметрів спостереження.

Точка з найбільшою кількістю ФЕП у кожній лінії відповідає мінімальному рівню споживання електроенергії від мережі, тобто максимальному рівню автономності системи. Водночас крайнє праве значення кількості ФЕП у межах групи периметрів визначає її максимальне значення для цієї групи. Верхня межа групи, що формується крайніми точками ліній, відповідає максимальному рівню енергетичної компенсації, необхідному для функціонування спостережного комплексу за заданих умов.

Виділені області на графіку ілюструють, скільки периметрів може бути забезпечено енергетичною автономністю у межах певної групи. Це дозволяє оцінити ефективність розподілу фотоелектричних ресурсів залежно від енергетичних потреб різних периметрів спостереження та оптимізувати їхню конфігурацію з метою мінімізації залежності від мережевого живлення.

Встановлено, що скорочення кількості ФЕП до мінімально достатнього рівня, необхідного для покриття енергетичних потреб у періоди з максимальною сонячною активністю, обумовлює необхідність додаткової компенсації енергоспоживання системи за рахунок мережевого живлення. За таких умов частка електроенергії, що постачається від мережі, може досягати **18%** від загального річного енергоспоживання системи.

Цей показник є ключовим для планування енергетичної автономності:

- періоди високої інсоляції (система здатна працювати виключно від ФЕП без використання мережі).
- періоди низької інсоляції (виникає потреба у додатковому живленні від мережі для підтримки безперебійної роботи зарядних станцій дронів та збереження автономності системи, або ж використання суттєво більшої кількості фотоелектричних перетворювачів).

Компенсація дефіциту енергії за допомогою зовнішніх джерел є важливим елементом забезпечення надійної роботи системи безперервного спостереження. Завдяки такому підходу, система може працювати стабільно впродовж усього року, незалежно від сезонних коливань інсоляції та погодних умов.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Розроблено методику визначення енергетичних параметрів системи електроживлення комплексу безперервного спостереження на базі мультикоптерних дронів, яка на відміну від існуючих враховує периметр спостереження та безперервність процесу спостереження. Методика на основі зазначених параметрів, а також технічних параметрів дронів, ККД перетворювачів, мінімального часу автономної роботи та координат розміщення комплексу дозволяє визначити

параметри системи накопичення енергії, а також номінальну потужність фотоелектричних перетворювачів.

2. З використанням запропонованої методики визначено:

– Залежність номінальної потужності зарядних станцій в одній секції комплексу від відстані до точки спостереження, яка для дрона класу DJI Mavic 3 складає від 454 до 1724 Вт для відстаней від 1000 м до 7100 м.

– Мінімальну ємність акумуляторних батарей наземної частини комплексу спостереження, яка забезпечуватиме автономну роботу комплексу протягом визначеного часу, як залежність від периметра зони спостереження. Встановлено, що мінімально необхідна ємність акумуляторних батарей, яка забезпечуватиме автономну роботу протягом 24 годин, складатиме від 793 до 20162 А·год для периметру спостереження від 5 до 41 км, відповідно.

– Мінімально необхідну номінальну потужність фотоелектричних перетворювачів, які забезпечуватимуть автономну роботу комплексу спостереження, як залежність від периметра зони спостереження та координат розташування комплексу. Встановлено, що для розташування в Київській області мінімально необхідна кількість фотоелектричних панелей потужністю 250 Вт складатиме від 75 до 1906 для периметрів спостереження від 5 до 41 км, відповідно.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ ДРОНІВ

5.1 Електроспоживання в основних профілях польоту

Експериментальні дослідження проводилися з метою перевірки запропонованої моделі, в підрозділі 3.2 даної дисертації, з урахуванням отриманих даних щодо впливу зовнішніх факторів, таких як швидкість вітру та температура на енергоспоживання дрону.

Досягнення поставленої мети потребувало вирішення низки завдань:

- підтвердження доцільності вибраної траєкторії польоту з точки зору електроспоживання за реальних умов експлуатації;
- оцінка фактичних енергетичних витрат дронів у різних режимах польоту для подальшого коригування математичних моделей;
- визначення кількості дронів, необхідних для забезпечення безперервного спостереження з урахуванням результатів реальних експериментів.

Ці завдання дозволяють створити комплексну картину впливу як експлуатаційних характеристик дронів, так і зовнішніх факторів на енергоефективність системи.

Для перевірки профілю польоту з точки зору енергоспоживання проаналізуємо два потенційні профілі польоту, представлені на рисунку 5.1.

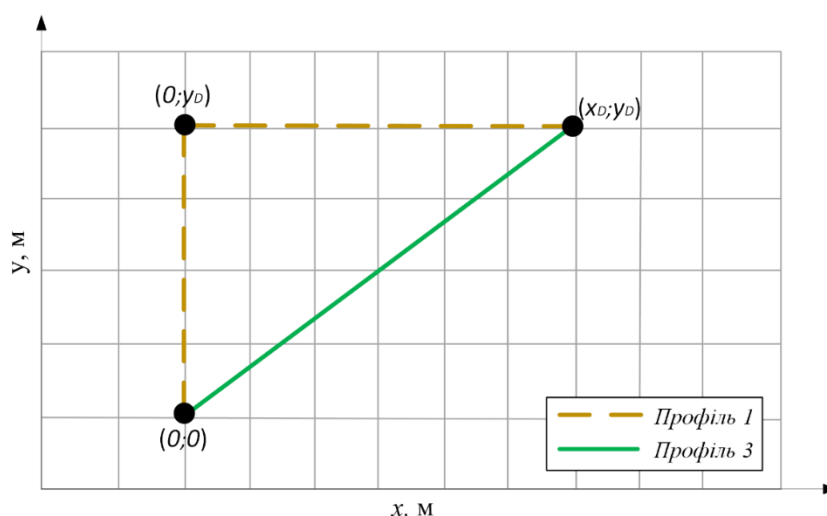


Рисунок 5.1 - Обрані профілі польоту від зарядної станції $(0;0)$ до точки спостереження $(x_D; y_D)$ для перевірки під час експерименту

Для експерименту використано дрон DJI Mavic 2 Enterprise, характеристики якого наведені в Таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Основні характеристики дрона

Назва параметра	Значення
Ємність акумулятора, Q_{bat} , А·г	3,85
Номінальна напруга акумулятора, V_{nom} , В	15,4
Струм заряджання в режимі CC, А	4,53
Обмеження горизонтальної швидкості, S_{hlim} , м/с	15
Обмеження вертикальної швидкості, S_{vlim} , м/с	3

Час польоту визначається відповідно до фактичних витрат на політ.

Робочий струм на всіх ділянках польоту визначався за формулою:

$$I_k = \frac{Q_{bat} \cdot SOC_{trav}}{T_{trav}}, \quad (5.1)$$

де T_{trav} – час польоту, год; $SOC_{trav} = 1 - SOC$ (поточне значення).

5.1.1 Профіль польоту 1

Перший варіант профілю польоту це та сама траєкторія, яка була запропонована в підрозділі 3.1. Такий профіль польоту забезпечує класичну концепцію польоту до будь-якої точки, що включає такі етапи: вертикальний зліт до необхідної висоти, потім горизонтальний політ до точки спостереження, зависання в точці спостереження до моменту, коли заряд акумулятора знизиться до мінімального рівня, необхідного для повернення. Горизонтальний політ у зворотному напрямку і, нарешті, вертикальна посадка для заряджання акумуляторної батареї.

Експериментальні дослідження проводились у реальних умовах, які максимально наближені до типових сценаріїв використання дронів для безперервного спостереження. Умови середовища експерименту наведено в Таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Умови експериментальних польотів

Параметр	Значення
Температура, °C	2 ... 3
Вологість, %	50 ... 60
Швидкість вітру, м/с	5.06 ... 13.90
Точка роси, °C	-5.6
Тиск, ГПа	1020 ... 1025

Отримані дані експериментальних польотів відповідно до 1 профілю польоту наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Отримані дані польотів

№	Координати		T_{trav} (сек)	SOC_{trav}	Швидкість вітру		V_v (м/с)	V_h (м/с)	I_k
	початк. точка ($x_d; y_d$)	кінцева точка ($x_d; y_d$)			початк. точка (м/с)	кінцева точка (м/с)			
1.	(0;0)	(0;500)	168	0,12	5,26	9,44	2,97		9,9
2.	(0;0)	(0;500)	167	0,11	5,51	8,47	2,99	-	9,13
3.	(0;500)	(1141;500)	244	0,16	8,47	8,61	-	4,67	9,09
4.	(1141;500)	(147;500)	214	0,12	8,61	8,64	-	5,33	7,77
5.	(147;500)	(147;33)	158	0,07	8,64	9,48	2,95	-	6,14

Результати першого експерименту показують, що для 1 профілю польоту необхідно витратити 46% ємності акумуляторної батареї для польоту в точку спостереження на дальності 1141 м і назад. Рисунок 5.2 демонструє витрати електроенергії на політ від зарядної станції (0;0) до точки спостереження ($x_D; y_D$) на кожному етапі польоту.

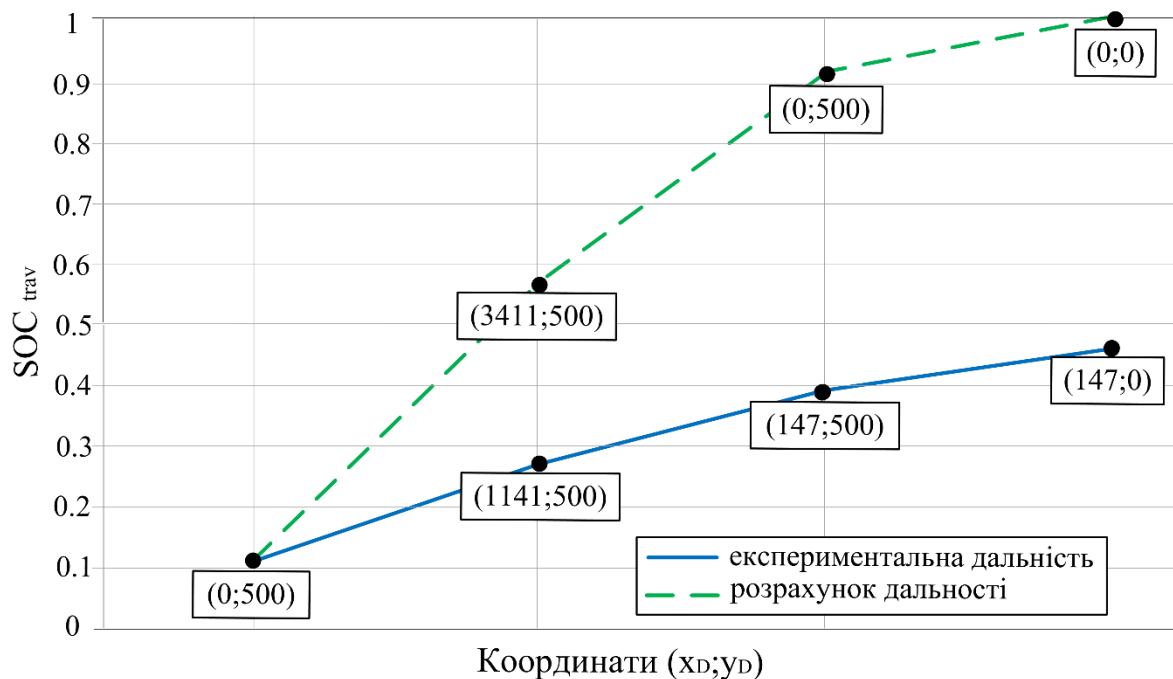


Рисунок 5.2 – Зміни значення SOC_{trav} відносно координат польоту

Отримані результати та розрахунки витрат підтверджують, що польоти на великі дистанції (понад 3411 м) теоретично неможливі для 1 профілю польоту.

5.1.2 Профіль польоту 3

Польоти за третім сценарієм польоту проводились в умовах, які максимально наближені до типових сценаріїв використання дронів для безперервного спостереження. Умови середовища експерименту наведено в Таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Умови експериментальних польотів

Параметр	Значення
Температура, °C	2 ... 18
Вологість, %	40 ... 71
Швидкість вітру, м/с	0.38 ... 12.24
Точка роси, °C	-5.5 ... 6
Тиск, ГПа	1007 ... 1021

Для забезпечення безпеки польотів та уникнення можливих перешкод (лінії електропередач, дерева тощо), польоти згідно з третім профілем проводилися з початковим підйомом на висоту 10 метрів від зарядної станції. Ця точка (0;10) слугувала стартовою для розрахунків. Енерговитрати на підйом до цієї висоти були виключені з основних розрахунків, щоб зосередити аналіз на маршрутному етапі польоту. На Рисунку 5.3с зображено траєкторію польоту дрона до точки спостереження за третім профілем польоту.

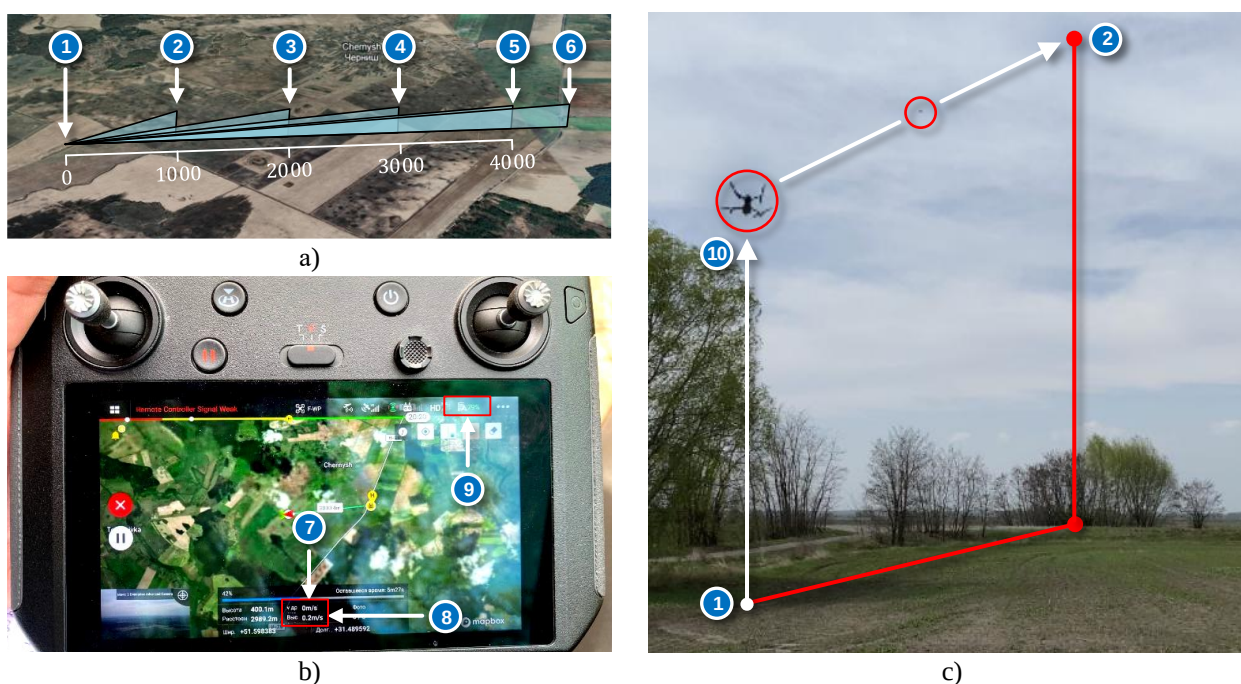


Рисунок 5.3 – Експеримент: (а) Маршрут польоту дрона на Google Maps; (б) оцінювані параметри на панелі управління; (с) фото траєкторії польоту дрона до точки спостереження згідно з третім профілем польоту; де 1 – місце зльоту, 2...6 – точки спостереження (1000, y_D), (2000, y_D), (3000, y_D), (4000, y_D), (4500, y_D) відповідно, 7 – S_{ver} , 8 – S_{hor} , 9 – SOC, 10 – висота 10 м.

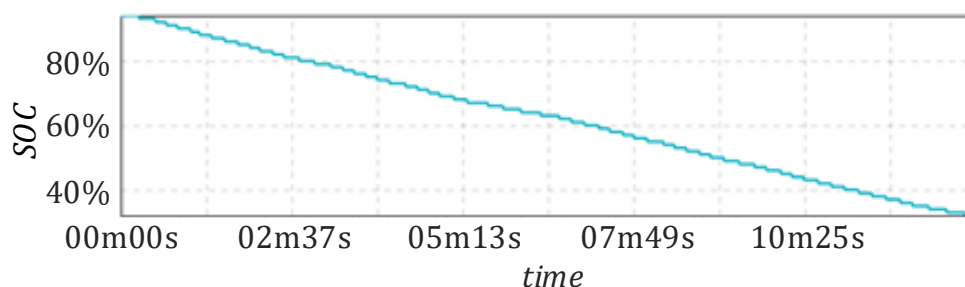


Рисунок 5.4 – Приклад зміни SOC з часом за даними лог-файлів з Aidata.com

Після досягнення кожної точки спостереження дрон виконував зависання протягом 60 секунд для збору стабільних даних. Якщо залишковий заряд батареї був достатнім для повторного польоту до наступної точки та повернення, виконувались додаткові польоти. Усі дані про параметри польотів записувались і аналізувались через програму **Aidata.com**, що дозволяло проводити точний моніторинг показників у реальному часі та після польотів, як показано на рисунку 5.4.

Наземна станція керування забезпечувала постійний контроль параметрів польоту, включаючи швидкість, висоту та SOC, як показано на рисунку 5.1b. Ця система дозволила своєчасно реагувати на зміну зовнішніх умов, забезпечуючи безперервність та надійність отриманих даних. Таким чином, експериментальні умови та методи контролю дозволяють забезпечити надійну оцінку впливу зовнішніх факторів на ефективність польотів, що є важливим етапом для валідації моделі енергоспоживання дронів у реальних умовах.

5.2 Результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження забезпечили цінну інформацію для валідації моделі енергоспоживання дронів у реальних умовах. Усі отримані результати, включаючи детальні таблиці даних та графіки, наведено у Додатку Г.

Порівняння між розрахованими значеннями робочого струму, отриманими шляхом математичної лінеаризації, та даними, зафіксованими під час тестових польотів, дозволяє зробити важливі висновки щодо точності моделі. Аналіз відмінностей показав, що використання параметрів горизонтальної швидкості (S_{hor}) та вертикальної швидкості (S_{ver}) як базових показників для визначення робочого струму навантаження було виправданим і ефективним підходом, як показано на рисунку 5.5.

На Рисунку 5.5 представлено графічне порівняння теоретичних і фактичних даних, що демонструє високу кореляцію між моделлю та експериментальними результатами. Таким чином, проведені дослідження підтверджують практичну цінність запропонованої методики моделювання для вирішення задач енергоефективного управління польотами.

5.2.1 Вплив зовнішніх факторів

Під час експериментальних досліджень було зафіксовано суттєві відхилення між розрахунковими та фактичними значеннями робочого струму навантаження, що свідчить про значний вплив зовнішніх факторів на енергоспоживання дронів. Зокрема, головну увагу приділено швидкості вітру в точці спостереження ($x_D; y_D$) (Рисунок 5.5).

Аналіз даних підтвердив, що збільшення швидкості вітру до 10 м/с і більше помітно підвищує енергоспоживання через необхідність стабілізації дрона в умовах турбулентності. Виявлено, що залежність між швидкістю вітру та струмовим навантаженням є нелінійною, оскільки вітер з різними азимутами впливає по-різному залежно від напрямку польоту. Водночас вплив азимуту напрямку вітру, швидкості поривів вітру та орієнтації дрона в польоті залишився поза межами цієї дисертації, що створює потенціал для подальших досліджень.

Не всі “піки” робочого струму співпадали з високою швидкістю вітру. Наприклад, в окремих точках спостереження було зафіксовано раптові стрибки енергоспоживання, які могли бути викликані іншими факторами, такими як раптові зміни навантаження на двигуни, особливості рельєфу місцевості чи мікротурбулентність.

Також встановлено, що зниження температури повітря не призводило до суттєвого зменшення ефективності батареї через втрати ємності у завдяки роботі системи автоматичного підігрівання бортової акумуляторної батареї. Висока вологість також могла впливати на аеродинамічні характеристики дрона, проте цей аспект потребує глибшого аналізу.

Таким чином, результати експерименту підкреслюють важливість врахування зовнішніх умов, зокрема швидкості та напрямку вітру, температури та вологості, під час розробки моделей енергоспоживання дронів. Це дозволить підвищити точність прогнозів та ефективність управління польотами в реальних умовах..

5.2.2 Різниця між теоретичними та експериментальними робочим струмами навантаження

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що розрахункові значення робочого струму за теоретичними моделями суттєво відрізняються від експериментальних даних. Для уточнення цих відмінностей було проведено регресійний аналіз, який дозволив скорегувати модель та отримати оновлені значення струму I_d . Розрахунок проводився методом лінійної регресії на основі експериментальних даних, використовуючи формулу:

$$I_d = a \cdot S_{ver} + b \cdot S_{hor} + c. \quad (5.2)$$

де a і b визначають ваги S_{ver} і S_{hor} у моделі, а c – коефіцієнт випадкової помилки.

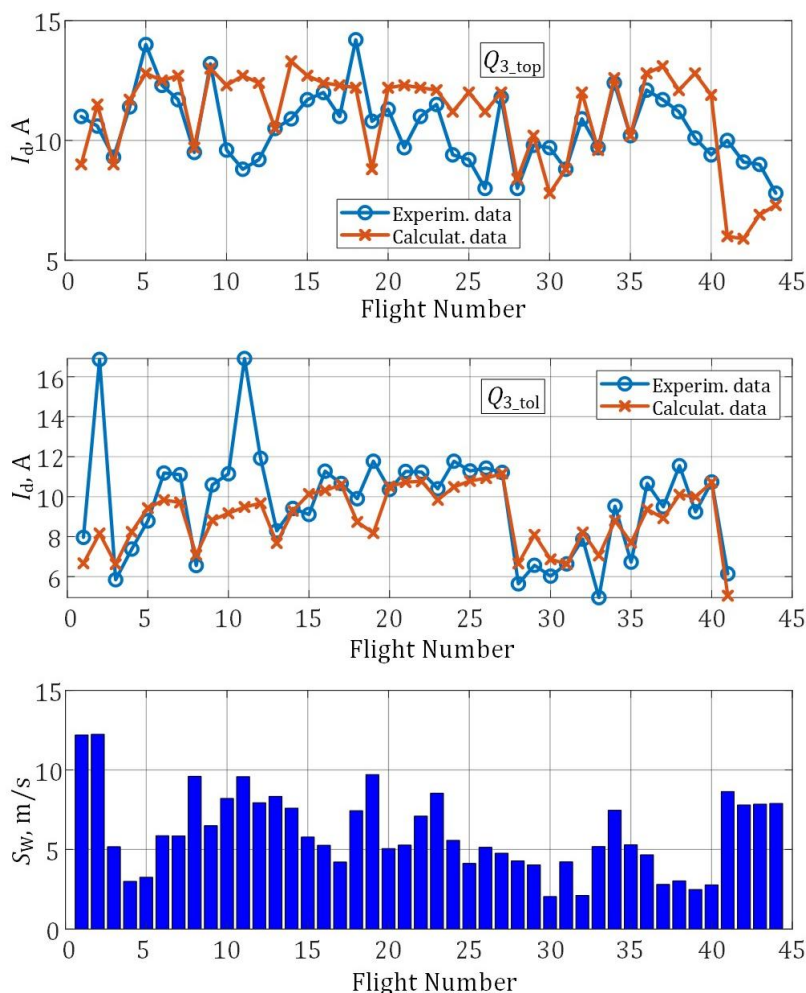


Рисунок 5.5 – Порівняння розрахункового та експериментального робочого струму навантаження для Q_{3top} і Q_{3tol} та швидкості вітру в точці спостереження (x_D ; y_D) для 44 тестових польотів.

Коефіцієнти лінійної регресії (a, b, c) для різних траєкторій польоту наведено в Таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Дані регресійного аналізу

Траєкторія польоту	a	b	c
від $(0; 0)$ до $(x_D; y_D)$	0.69	0.22	6.70
від $(x_D; y_D)$ до $(0; 0)$	-1.34	0.20	9.90

Таким чином, проведене дослідження підкреслює важливість адаптації теоретичних моделей до реальних умов експлуатації. Використання оновлених значень I_d , отриманих за допомогою лінійної регресії, дозволяє значно підвищити точність прогнозування енергоспоживання дронів і сприяє розробці ефективніших траєкторій польоту в різних умовах.

5.2.3 Результати визначення дальності спостереження з урахуванням експериментальних даних

Результати моделювання, доповнені експериментальними даними, продемонстрували суттєвий вплив фактичного робочого струму навантаження на оцінку максимально можливої відстані до точки спостереження та кількості дронів, необхідних для забезпечення безперервного спостереження. Аналіз порівняння теоретичних і оновлених результатів показав, що розрахунки, засновані на реальних експериментальних даних, дозволяють точніше оцінити можливості системи.

На Рисунку 5.6 наведено графічне порівняння результатів для чистої моделі симуляції та моделі, оновленої за результатами експериментів. Як видно, максимальна досяжна відстань для точок спостереження суттєво зменшується при врахуванні експериментальних даних. Наприклад, для трьох дронів чиста модель демонструє достатність такої кількості для забезпечення безперервного спостереження, однак результати експериментів показують, що реальні обмеження енергоспоживання унеможливають виконання цього завдання.

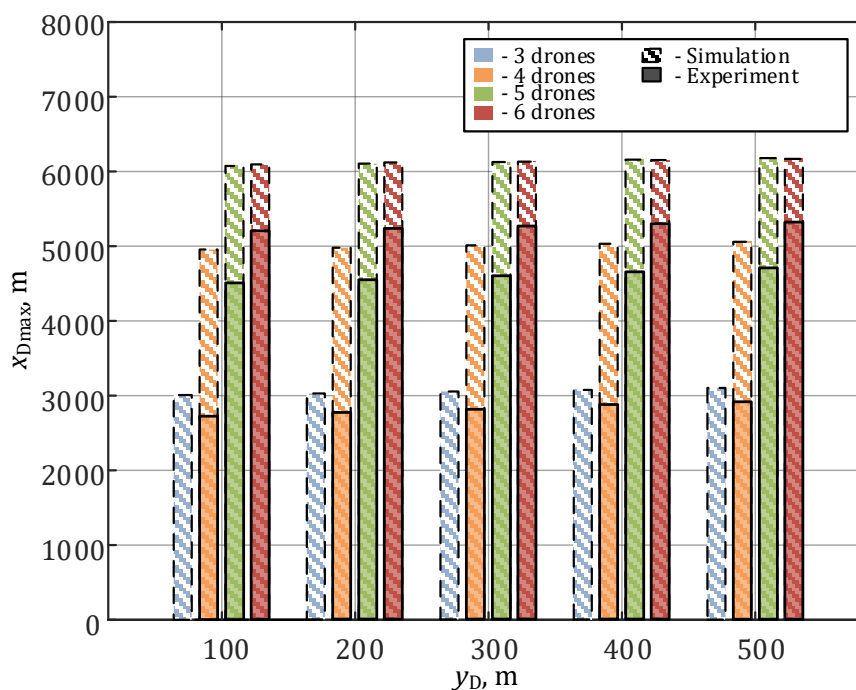


Рисунок 5.6 – Результат моделювання безперервного спостереження з урахуванням експериментальних даних

Із збільшенням кількості дронів різниця між двома підходами зменшується:

- для $n = 4$ (різниця становить близько 2100 м);
- для $n = 5$ (близько 1600 м);
- для $n = 6$ (менш ніж 700 м).

Ця тенденція свідчить про зростаючу стійкість системи до впливу зовнішніх факторів зі збільшенням кількості дронів. Однак навіть для більшої кількості дронів спостерігається певне зменшення максимальної дальності спостереження порівняно з теоретичною моделлю.

Оновлена модель енергоспоживання, розроблена на основі експериментальних даних, дозволяє оцінити мінімальну кількість дронів, необхідних для безперервного спостереження, залежно від висоти польоту (y_D) та відстані від зарядної станції до точок спостереження. Наприклад, при висоті спостереження 100 м і дальності до точки спостереження 3000 м, мінімальною кількістю дронів буде 5 з урахуванням впливу зовнішніх факторів.

Результати підтверджені на прикладі дрона DJI Mavic 2 Enterprise, але їх можна адаптувати до інших моделей шляхом корекції вихідних параметрів, таких як

номінальний струм та ємність батареї. Для цього необхідно провести додаткові польоти та оновити модель лінійної регресії відповідно до специфікацій нового дрона.

Таким чином, отримані результати є важливими для проектування та оптимізації систем безперервного спостереження, особливо у завданнях, де зовнішні умови суттєво впливають на тривалість польоту та енергоспоживання дронів.

5.3 Висновки до розділу 5

Шляхом проведення експериментальних досліджень було оцінено вплив зовнішніх факторів на енергоспоживання дрона під час польоту. Під час 44 випробувальних польотів визначено основні параметри, такі як вертикальна (горизонтальна) швидкість, час польоту, стан заряду батареї (SOC) та швидкість вітру, що дозволило вдосконалити моделі енергоспоживання для систем спостереження на основі дронів. Отримані результати вказують на те, що отримані аналітичні моделі, засновані лише на теоретичних розрахунках, повинні уточнюватися шляхом експериментальної валідації для більш точної відповідності реальним умовам польоту. За результатами проведених експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Вперше проведено регресійний аналіз робочого струму навантаження дрона на основі експериментальних значень, який на відміну від існуючих враховує вертикальну та горизонтальну швидкості польоту дрона. Отримані значення робочого струму навантаження дозволили вдосконалити аналітичну модель енергоспоживання дрона та уточнити розрахунки системи електроживлення системи безперервного спостереження, зокрема, шляхом уточнення оцінки мінімальної кількості дронів, необхідних для забезпечення безперервного спостереження залежно від відстані між точками заряджання та спостереження, а також висоти спостереження.

2. З урахуванням уточненої моделі енергоспоживання дрона вдосконалено результати розрахунків умов безперервного спостереження, які залежать від робочого струму дрона, та встановлено, що:

– Для забезпечення безперервного спостереження на висоті 100 м та на відстані 3000 м від точки заряджання, мінімальна кількість дронів складає 5, що на 2 більше у порівнянні з аналітичною моделлю, отриманою у розділі 3.

– Максимальна досяжна дальність спостереження менша від 700 м (для 6 дронів на одну точку спостереження) до 2100 м (для 4 дронів), у порівнянні з аналітичною моделлю, отриманою у розділі 3.

3. Отриманими експериментальними даними підтверджено припущення, що такий зовнішній чинник, як швидкість вітру, в особливості при значеннях понад 10 м/с, суттєво збільшує споживання енергії дроном під час польоту. Виявлено, що:

– Залежність між швидкістю вітру та струмовим навантаженням є нелінійною, оскільки вітер з різними азимутами впливає по-різному залежно від напрямку польоту.

– Не всі стрибки у струмі пояснюються впливом вітру, що вказує на наявність інших, не врахованих чинників, та створює потенціал для подальших досліджень.

4. Результати експериментальних досліджень показали, що зниження температури повітря не призвело до суттєвого зменшення ємності акумуляторної батареї, що може бути пояснено гарною температурною ізоляцією та ефектом саморозігріву.

ВИСНОВОК

В дисертаційній роботі вирішене актуальне наукове завдання забезпечення енергетичної автономності систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів шляхом розвитку методів аналізу та розробки математичних моделей як окремих складових, так і системи електроживлення такого комплексу в цілому. На відміну від існуючих, запропоновані моделі та методи враховують особливості комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів, та обмеження, які накладаються параметрами зони спостереження та вимогою забезпечення безперервного спостереження. Запропоновані моделі були перевірені шляхом проведення натурних експериментів з безпілотним літальним апаратом, що дозволило якісно підтвердити отримані теоретичні результати, та уточнити кількісно вплив неврахованих у теоретичних моделях зовнішніх стохастичних параметрів.

Вирішення поставленого наукового завдання стало можливим завдяки отриманню наступних основних наукових та практичних результатів:

1. Було запропоновано нову концептуальну модель системи електрозабезпечення комплексів спостереження на основі безпілотних літальних апаратів, її діаграму станів та переходів між ними, які описують взаємодію між всіма елементами системи. Використання запропонованої моделі дозволило в подальшому розробити моделі електроспоживання окремих складових системи та врахувати наявні енергетичні обмеження.

2. Було проаналізовано систему накопичення електроенергії у складі наземної (стаціонарної) складової комплексу спостереження. Запропоновано вдосконалену методику вибору технології акумуляторних батарей для наземної частини на основі комплексного критерію оптимальності, яка на відміну від існуючих є двоетапною та враховує експлуатаційні, технічні та економічні вимоги. З використанням даної методики встановлено, що акумулятори на основі літєво-нікелево-марганцево-оксидної та літєво-нікелево-кобальтово-алюмінієво-оксидної технологій є найкращими для застосування у якості накопичувачів електричної енергії у складі наземної складової системи електроживлення.

3. Було проаналізовано систему накопичення електроенергії у складі мобільної складової (дрони) комплексів спостереження. Запропоновано вдосконалену математичну модель ємності акумуляторної батареї, яка на відміну від існуючих враховує зміну температури та атмосферного тиску на основі технічних даних отриманих від підприємства-виробника, що дозволяє врахувати зміну ємності акумуляторної батареї безпілотного літального апарату під час польоту. З використанням запропонованої моделі встановлено, що врахування даних факторів призводить до зменшення тривалості польоту дрона на 1...5 хвилин у порівнянні з номінальною тривалістю польоту.

4. Було проаналізовано режими роботи та енергетичні параметри окремої секції комплексу безперервного спостереження, яка забезпечує моніторинг певної зони відповідальності. Було розроблено математичні моделі та методику оцінки енергоспоживання окремої секції системи спостереження, яка дозволяє врахувати енергетичні обмеження, параметри зони спостереження, та визначити оптимальну кількість дронів, необхідних для забезпечення безперервного спостереження. З використанням даних моделей та методики було оцінено енергетичний баланс окремої секції, та встановлено максимальну відстань до точки спостереження за умови використання дрона DJI Mavic 3, яка склала 7346 метрів. Встановлено, що з урахуванням енергетичних обмежень для виконання завдання на відстані до 3084 метрів достатньо трьох дронів, а збільшення кількості дронів до шести дозволяє розширити максимальну відстань до точки спостереження до 6138 метрів. Водночас подальше збільшення кількості дронів більше 6 не є доцільним через те, що відношення збільшення максимально досяжної відстані спостереження стає меншим збільшення кількості дронів.

5. Для запропонованої нової концептуальної моделі системи електрозабезпечення комплексів спостереження на основі безпілотних літальних апаратів було запропоновано методику визначення її енергетичних параметрів, яка на відміну від існуючих враховує обмеження, що накладаються параметрами зони спостереження та безперервністю процесу спостереження. Використання запропонованої методики на основі зазначених параметрів, а також технічних

параметрів дронів, ККД перетворювачів, мінімального часу автономної роботи та координат розміщення комплексу дозволило визначити параметри системи накопичення енергії, а також номінальну потужність фотоелектричних перетворювачів, які забезпечуватимуть автономну роботу та безперервне спостереження по всьому периметру зони. Було встановлено, що номінальна потужність всіх зарядних станцій для однієї секції комплексу спостереження складає від 454 до 1724 Вт для відстані від зарядної станції комплексу до точки спостереження від 1000 м до 7100 м. Було встановлено, що мінімальна ємність акумуляторних батарей наземної частини комплексу спостереження, яка забезпечуватиме автономну роботу комплексу протягом 24 годин, складатиме від 746 до 18970 А·год, а мінімально необхідна кількість фотоелектричних панелей потужністю 250 Вт складатиме від 75 до 1906, для розташування комплексу у Київській області з периметром спостереження від 5 до 41 км, відповідно.

Отримані нові науково підтверджені результати сприятимуть розвитку безпілотних систем для забезпечення задач моніторингу та спостереження, їх поширенню як в Україні так і в світі. Запропоновані моделі та методи дозволяють оптимізувати енергетичні параметри та показники автономної системи електроживлення такого комплексу. Їх прикладне застосування дозволить визначити ємність акумуляторних батарей та номінальну потужність фотоелектричних перетворювачів в залежності від розміру зони спостереження та технічних характеристик дронів, які використовуються в системі, що дозволить оптимізувати вартість комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України Міноборони України; Наказ, Правила, Класифікація [...] від 08.12.2016 № 661.
2. Nigam, N., Bieniawski, S., Kroo, I., & Vian, J. (2011). Control of multiple UAVs for persistent surveillance: Algorithm and flight test results. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(5), 1236-1251.
3. Trotta, A., Di Felice, M., Montori, F., Chowdhury, K. R., & Bononi, L. (2018). Joint coverage, connectivity, and charging strategies for distributed UAV networks. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(4), 883-900.
4. Leonard, J., Savvaris, A., & Tsourdos, A. (2014). Energy management in swarm of unmanned aerial vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74, 233-250.
5. Ahmed, F., Mahmood, H., & Niaz, Y. (2021). Mobility modelling for urban traffic surveillance by a team of unmanned aerial vehicles. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 36(2), 89-100.
6. Yao, Y., Zhu, Z., Huang, S., Yue, X., Pan, C., & Li, X. (2019). Energy efficiency characterization in heterogeneous IoT system with UAV swarms based on wireless power transfer. *IEEE Access*, 8, 967-979.
7. Zhou, Y., & Dorismond, J. (2024). Optimal Placement of UAVs to Provide Surveillance Coverage for a Ground Vehicle in a Collaborative Search-and-Rescue Operation. *AI, Computer Science and Robotics Technology*.
8. Choi, S., Lee, M., Park, H., & Han, J. (2024). Mathematical programming-based heuristic for highway patrol drone scheduling problem. *Socio-Economic Planning Sciences*, 93, 101907.
9. Chittoor, P. K., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2021). A review on UAV wireless charging: Fundamentals, applications, charging techniques and standards. *IEEE access*, 9, 69235-69266
10. A. Y. Raj, A. Venkatraman, A. Vinodh and H. Kumar, "Autonomous Drone for Smart Monitoring of an Agricultural Field," 2021 7th International Engineering Conference "Research & Innovation amid Global Pandemic" (IEC), Erbil, Iraq, 2021, pp. 211-212, doi: 10.1109/IEC52205.2021.9476097.
11. L. J. Jun, Y. K. Meng, E. K. Seng and Q. Ni, "Open Agricultural Burning Detection with Natural Inspired Swarm-based Detection Platform," 2022 *IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IICAIET55139.2022.9936849.
12. M. Liang and D. Delahaye, "Drone Fleet Deployment Strategy for Large Scale Agriculture and Forestry Surveying," 2019 *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 2019, pp. 4495-4500, doi: 10.1109/ITSC.2019.8917235.

13. I. Guven and M. Parlak, "Blockchain, AI and IoT Empowered Swarm Drones for Precision Agriculture Applications," *2022 IEEE 1st Global Emerging Technology Blockchain Forum: Blockchain & Beyond (iGETblockchain)*, Irvine, CA, USA, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/iGETblockchain56591.2022.10087152.
14. R. Mukkamala, S. Olariu, M. Aljohani, M. Sunkara and H. Aldabagh, "An Adaptive Drone-based Multigenerational Sensor System for Monitoring Large Ecosystems," *2024 20th International Conference on Distributed Computing in Smart Systems and the Internet of Things (DCOSS-IoT)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2024, pp. 361-368, doi: 10.1109/DCOSS-IoT61029.2024.00061.
15. Trotta, A., Andreagiovanni, F. D., Di Felice, M., Natalizio, E., & Chowdhury, K. R. (2018, April). When UAVs ride a bus: Towards energy-efficient city-scale video surveillance. In *Ieee infocom 2018-ieee conference on computer communications* (pp. 1043-1051). IEEE.
16. Sahraoui, Y., Kerrache, C. A., Amadeo, M., Vegni, A. M., Korichi, A., Nebhen, J., & Imran, M. (2022). A cooperative crowdsensing system based on flying and ground vehicles to control respiratory viral disease outbreaks. *Ad Hoc Networks*, 124, 102699.
17. H. M. S. Ali *et al.*, "Deciphering the Implications of Swarm Intelligence Algorithms in Efficiently Managing Drone Swarms," *2024 35th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Tampere, Finland, 2024, pp. 112-123, doi: 10.23919/FRUCT61870.2024.10516408.
18. Ahmadian, N., Lim, G. J., Torabbeigi, M., & Kim, S. J. (2022). Smart border patrol using drones and wireless charging system under budget limitation. *Computers & Industrial Engineering*, 164, 107891.
19. M. Tariq, A. Saadat, R. Ahmad, Z. Abaid and J. J. P. C. Rodrigues, "Enhanced Border Surveillance Through a Hybrid Swarm Optimization Algorithm," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 22, pp. 28172-28181, 15 Nov.15, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3317531.
20. Di Franco, C., & Buttazzo, G. (2015, April). Energy-aware coverage path planning of UAVs. In *2015 IEEE international conference on autonomous robot systems and competitions* (pp. 111-117). IEEE.
21. Singgih, I. K., Lee, J., & Kim, B. I. (2020). Node and edge drone surveillance problem with consideration of required observation quality and battery replacement. *IEEE access*, 8, 44125-44139.
22. Mersheeva, V. (2015). UAV routing problem for area monitoring in a disaster situation (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Alpen-Adria Universitat, Klagenfurt, Austria).
23. Mishra, V., & Mishra, M. P. (2023). PRISMA for Review of Management Literature—Method, Merits, and Limitations—An Academic Review. *Advancing Methodologies of Conducting Literature Review in Management Domain*, 125-136.

24. Shinkuma, R., & Goto, Y. (2016, October). Wireless multihop networks formed by unmanned aerial vehicles with separable access points and replaceable batteries. In 2016 IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON) (pp. 1-6). IEEE.
25. Zhang, P., Xu, S., Zhang, W., & Dong, W. (2019, December). A cooperative aerial inspection system with continuable charging strategy. In 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (pp. 770-777). IEEE.
26. Rifat, A. H., Raihan, M., & Nasir, N. (2022, September). Development of Autonomous Battery Charging Station for Campus Surveillance UAV. In International Seminar on Aeronautics and Energy (pp. 137-147). Singapore: Springer Nature Singapore.
27. Atat, R., Shaaban, M. F., Ismail, M., & Serpedin, E. (2023). Efficient unmanned aerial vehicle paths design for post-disaster damage assessment of overhead transmission lines. *IET Smart Grid*, 6(5), 503-521.
28. Huang, C. J., Hu, K. W., Cheng, H. W., & Sie Lin, Y. S. (2023). A Mission-Oriented Flight Path and Charging Mechanism for Internet of Drones. *Sensors*, 23(9), 4269.
29. Li, H., Zhan, Z., & Wang, Z. Energy-consumption model for rotary-wing drones. *Journal of Field Robotics*.
30. Celik, A., Ustaomer, E., & Satoglu, S. I. (2023). Single-drone energy efficient coverage path planning with multiple charging stations for surveillance. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 13(2), 171-180.
31. Yue, K. (2024). Application of EEUC-based inter aircraft ultraviolet communication network algorithm in energy consumption optimization of drone swarm. *Energy Informatics*, 7(1), 27.
32. Cabuk, U. C., Tosun, M., Dagdeviren, O., & Ozturk, Y. (2024). Modeling Energy Consumption of Small Drones for Swarm Missions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
33. Shoro, G. M., Rajput, P. S., Iqbal, F., Abro, M. A. J., Bhand, M. A., & Halepoto, I. A. (2021). Design of UAV Autonomous Charging Pad for Surveillance. *REVISTA GEINTEC-GESTAO INOVACAO E TECNOLOGIAS*, 11(3), 1552-1561.
34. Scherer, J., & Rinner, B. (2016, August). Persistent multi-UAV surveillance with energy and communication constraints. In 2016 IEEE international conference on automation science and engineering (CASE) (pp. 1225-1230). IEEE.
35. Rakesh, R., Arumugam, R., Rajathi, M., Sanjay, S., & Gopinath, M. (2022). A MOTHER-CHILD AERIAL DYNAMIC CHARGING STATION FOR SURVEY DRONES. *International Journal of Early Childhood Special Education*, 14(3).
36. Elkunchwar, N., Chandrasekaran, S., Iyer, V., & Fuller, S. B. (2021, September). Toward battery-free flight: Duty cycled recharging of small drones. In 2021

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 5234-5241). IEEE.
37. Shao, X. X., Gong, Y. J., Zhan, Z. H., & Zhang, J. (2021). Bipartite cooperative coevolution for energy-aware coverage path planning of UAVs. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 3(1), 29-42.
 38. Zhu, Z., Chu, Z., & Li, X. (2022). Unmanned aerial vehicle technology in IoE. In *Intelligent Sensing and Communications for Internet of Everything* (pp. 137-184). Elsevier Inc.
 39. ElSayed, M., & Mohamed, M. (2022). The impact of airspace discretization on the energy consumption of autonomous unmanned aerial vehicles (drones). *Energies*, 15(14), 5074.
 40. Alotaibi, A., Chatwin, C., & Birch, P. (2023). Ubiquitous Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review.
 41. Wang, J., Yang, K., Wu, B., & Wang, J. (2024). Cooperative Path Planning for Persistent Surveillance in Large-Scale Environment with UAV-UGV System. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*.
 42. Hartuv, E., Agmon, N., & Kraus, S. (2020, September). Spare drone optimization for persistent task performance with multiple homes. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 389-397). IEEE.
 43. Zhang, Y., Zhao, Y., Zhao, Z., & Tang, W. (2022, December). A hierarchical optimal path planning algorithm for collaborative air-ground inspection. In *International Conference on Smart Transportation and City Engineering (STCE 2022)* (Vol. 12460, pp. 903-908). SPIE.
 44. Yang, Y., Zhang, X., Zhou, J., Li, B., & Qin, K. (2022). Global energy consumption optimization for UAV swarm topology shaping. *Energies*, 15(7), 2416.
 45. Elechi, P., Orike, S., & Wonodi, C. O. (2023). Performance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Improved Aerial Surveillance. *Journal of Advancement in Communication System*, 6(2).
 46. Liu, B., Ni, W., Liu, R. P., Guo, Y. J., & Zhu, H. (2024). Privacy-Preserving Routing and Charging Scheduling for Cellular-Connected Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*.
 47. Ghazzai, H., Kadri, A., Ghorbel, M. B., Menouar, H., & Massoud, Y. (2018). A generic spatiotemporal UAV scheduling framework for multi-event applications. *IEEE Access*, 7, 215-229.
 48. Hassija, V., Saxena, V., & Chamola, V. (2020). Scheduling drone charging for multi-drone network based on consensus time-stamp and game theory. *Computer Communications*, 149, 51-61.
 49. Zeng, Z., & Gao, Y. (2023, December). AoI-Sensitive Relay-Assisted Data Collection via Multi-UAV in the Large-Scale Disaster Area. In *2023 IEEE 29th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)* (pp. 2159-2168). IEEE.

50. Abas, H. A., & Nasir, N. Drone Patrolling Applications, Challenges, and its Future: A Review. Challenges, and its Future: A Review.
51. Gong, Y., Zhang, Z., & Chang, S. (2023). Single-transmitter-controlled multiple-channel constant current outputs for in-flight wireless charging of drones. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(4), 3606-3616.
52. Long, T., Ozger, M., Cetinkaya, O., & Akan, O. B. (2018). Energy neutral internet of drones. *IEEE Communications Magazine*, 56(1), 22-28.
53. Priandana, K., Lubis, R. A. P., Hardhienata, M. K. D., & Atman, M. W. S. (2023, October). Minimizing The Global Waiting Time of Swarm UAV Network for Efficient Battery Charging in Persistent Monitoring Scenario. In 2023 International Conference on Informatics Engineering, Science & Technology (INCITEST) (pp. 1-8). IEEE.
54. E. Arribas, V. Cholvi and V. Mancuso, "Optimizing UAV Resupply Scheduling for Heterogeneous and Persistent Aerial Service" in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 39, no. 4, pp. 2639-2653, Aug. 2023, doi: 10.1109/TRO.2023.3263077.
55. Pang, S., He, X., Hsu, C. H., Rong, C., Zhu, H., & Zhang, P. (2023). Joint Trajectory and Energy Consumption Optimization Based on UAV Wireless Charging in Cloud Computing System. *IEEE Transactions on Cloud Computing*.
56. Duan, C., Feng, J., & Chang, H. (2021). Meteorology-aware path planning for the UAV based on the improved intelligent water drops algorithm. *IEEE Access*, 9, 49844-49856.
57. Chen, K., & Zhang, Z. (2023). Rotating-coordinate-based mutual inductance estimation for drone in-flight wireless charging systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(9), 11685-11693.
58. Song, B. D., Kim, J., Kim, J., Park, H., Morrison, J. R., & Shim, D. H. (2014). Persistent UAV service: An improved scheduling formulation and prototypes of system components. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74(1), 221-232.
59. Hageman, K., & Jacobsen, R. H. (2024). On the Scheduling of Spatio-Temporal Charging Windows for Autonomous Drone Fleets. *IEEE Access*.
60. Amir, M., Zaheeruddin, Haque, A., Bakhsh, F.I., Kurukuru, V.S.B., Sedighizadeh, M.: Intelligent energy management scheme-based coordinated control for reducing peak load in grid-connected photovoltaic-powered electric vehicle charging stations. *IET Gener. Transm. Distrib.* 18, 1205–1222 (2024). <https://doi.org/10.1049/gtd2.12772>.
61. Cheikh-Mohamad, S.; Sechilariu, M.; Locment, F.; Krim, Y. PV-Powered Electric Vehicle Charging Stations: Preliminary Requirements and Feasibility Conditions. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1770. <https://doi.org/10.3390/app11041770>.
62. Alrubaie, A.J.; Salem, M.; Yahya, K.; Mohamed, M.; Kamarol, M. A Comprehensive Review of Electric Vehicle Charging Stations with Solar Photovoltaic System

- Considering Market, Technical Requirements, Network Implications, and Future Challenges. *Sustainability* 2023, 15, 8122. <https://doi.org/10.3390/su15108122>.
63. Fakour, H., Imani, M., Lo, S.L. et al. Evaluation of solar photovoltaic carport canopy with electric vehicle charging potential. *Sci Rep* 13, 2136 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29223-6>.
 64. Mohamed, Khalid & WOLDE, Henok & Alarefi, Salma. (2020). Optimal Space Utilisation for Solar Powered EV Charging Station. 562-567. 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236538.
 65. H. K. Singh and N. Kumar, "Solar PV Array Powered ON Board Electric Vehicle Charging with Charging Current Protection Scheme," 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEDES49360.2020.9379820.
 66. F. Sun et al., "Prediction-Based EV-PV Coordination Strategy for Charging Stations Using Reinforcement Learning," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 60, no. 1, pp. 910-919, Jan.-Feb. 2024, doi: 10.1109/TIA.2023.3326433.
 67. Y. Li et al., "Multi-Agent Graph Reinforcement Learning Method for Electric Vehicle on-Route Charging Guidance in Coupled Transportation Electrification," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 15, no. 2, pp. 1180-1193, April 2024, doi: 10.1109/TSTE.2023.3330842.
 68. M. Sharif and H. Seker, "Smart EV Charging With Context-Awareness: Enhancing Resource Utilization via Deep Reinforcement Learning," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 7009-7027, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3351360.
 69. Jose, Jeffy Marin, and V. I. Cherian. "Analysis on solar PV based hybrid power solution for remote telecom towers." *International journal of advance research in Engineering Science and Technology* 2.11 (2013): 61-66.
 70. D. Chandran, M. Joshi and V. Agarwal, "Solar PV based retrofit solution for cell phone towers powered by diesel generators," 2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Austin, TX, USA, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/INTLEC.2016.7749099.
 71. Janardhan, Kavali, et al. "Performance Investigation of Solar Photovoltaic System for Mobile Communication Tower Power Feeding Application." *International Journal of Electrical & Electronics Research* 10.04 (2022): 921-925.
 72. Gerard Jansen, Zahir Dehouche, Richard Bonser, Harry Corrigan, Validation of autonomous renewable energy hybrid wind/photovoltaic/RHFC prototype for the cell tower industry using MATLAB/Simulink, *Materials Today: Proceedings*, Volume 10, Part 3, 2019, Pages 408-418, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.004>.
 73. Bahgaat, Naglaa & Salam, Nariman & Roshdy, Monika & Sakr, Sandy. (2020). Design of Solar System for LTE Networks. *International Journal of Environmental Sustainability and Green Technologies*. 11. 1-15. 10.4018/IJESGT.2020070101.

74. Design and task management of a mobile solar station for charging flying drones
Essam Ali, Mohamed Fanni, Abdelfatah M. Mohamed E3S Web Conf. 167 05004
(2020) DOI: 10.1051/e3sconf/202016705004.
75. Chittoor, Prithvi & Bharatiraja, C.. (2023). Wireless Electrification System for Photovoltaic Powered Autonomous Drone Charging. IEEE Transactions on Transportation Electrification. PP. 1-1. 10.1109/TTE.2023.3305022.
76. Prithvi Krishna Chittoor, C. Bharatiraja, Building integrated photovoltaic powered wireless drone charging system, Solar Energy, Volume 252, 2023, Pages 163-175, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.056>.
77. D. Raveendhra, M. Mahdi, R. Hakim, R. Dhaouadi, S. Mukhopadhyay and N. Qaddoumi, "Wireless Charging of an Autonomous Drone," 2020 6th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 7-12, doi: 10.1109/EPECS48981.2020.9304971.
78. Sen, A. (2023). Efficient Charging and Power Management System for Drone Fleets: Revolutionizing Aerial Operations. Innovative Research Thoughts, 9(5), 21-32.
79. A. Savkin, H. Huang "A method for optimized deployment of a network of surveillance aerial drones", IEEE systems journal, vol.. 13, no.. 4, pp. 4474-4477, Dec. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2019.2910080.
80. B. Bethke, J. P. How, J. Vian, "Group health management of UAV teams with applications to persistent surveillance," 2008 American Control Conference, pp. 3145–3150, June 2008, doi: 10.1109/acc.2008.4586976.
81. P. H. Washington, M. Schwager, "Reduced state value iteration for multi-drone persistent surveillance with charging constraints," 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2021, pp. 6390–6397, 2021, doi: 10.1109/IROS51168.2021.9636160.
82. P. Maini, K. Yu, P. B. Sujit, and P. Tokekar, "Persistent monitoring with refueling on a terrain using a team of aerial and ground robots," 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 8493–8498, 2018, doi: 10.1109/IROS.2018.8593508.
83. N. Karbach, N. Bobrowski, T. Hoffmann, "Observing volcanoes with drones: studies of volcanic plume chemistry with ultralight sensor systems," Scientific Reports, vol.12, 17890, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-21935-5.
84. P. Royo, À. Asenjo, J. Trujillo, E. Çetin, C. Barrado, "Enhancing drones for law enforcement and capacity monitoring at open large events," Drones, vol. 6, 359, 2022, doi: 10.3390/drones6110359.
85. N. Al-Thani, A. Albuainain, F. Alnaimi, N. Zorba, "Drones for Sheep Livestock Monitoring," 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), pp.672-676, 2020, doi: 10.1109/melecon48756.2020.9140588.

86. B. Bethke, J. How, J., J. Vian, "Multi-UAV Persistent Surveillance with Communication Constraints and Health Mangement," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, pp.1-23, Aug. 2009. doi:10.2514/6.2009-5654.
87. N. Michel, P. Wei, Z. Kong, A. Kumar Sinha, X. Lin, "Modeling and validation of electric multirotor unmanned aerial vehicle system energy dynamics," eTransportation vol. 12, 100173, 2022.
88. C.G Saracin, I. Dragos, A.I. Chirila, "Powering aerial surveillance drones," 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), pp.237-240, March 2017, doi:10.1109/atee.2017.7905185.
89. Соболев, В. В., Рудніченко, С. В., Лось, А. М., & Велігорський, О. А. (2021). Огляд основних параметрів системи електроспоживання сучасних безпілотних літальних апаратів вертикального зльоту та посадки.
90. Gong, H., Huang, B., Jia, B., & Dai, H. (2023). Modelling Power Consumptions for Multi-rotor UAVs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*.
91. Zhang, J., Campbell, J. F., Sweeney II, D. C., & Hupman, A. C. (2021). Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102668.
92. Bukola Peter Adedeji, A Novel Method for Estimating Parameters of Battery Electric Vehicles, *Intelligent Systems with Applications*, Volume 15, 2022, 200089, ISSN 2667-3053, <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200089>.
93. Yücenurşen A, Samancı A. Battery selection criteria for electric vehicles: techno-economic analysis. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*. June 2023;12(2):65-74. doi:10.18245/ijaet.1216888.
94. Gang Zhao, Xiaolin Wang, Michael Negnevitsky, Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management, *iScience*, Volume 25, Issue 2, 2022, 103744, ISSN 2589-0042, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>.
95. Devendra Vashist, Anshul Tyagi, Diwakar Bhandari, Ankit Mittal, Manav Rachna, TECHNIQUES OF BATTERY SELECTION FOR USAGE IN ELECTRIC VEHICLES, *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, Volume 10, Issue 11 November 2022, ISSN: 2320-2882.
96. Bayraktar, Murat & Nuran, Mustafa. (2022). Multi-Criteria Decision Making using TOPSIS Method for Battery Type Selection in Hybrid Propulsion System. *Transactions on Maritime Science*. 11. 10.7225/toms.v11.n01.w02.
97. Zhao, H.; Guo, S.; Zhao, H. Comprehensive Performance Assessment on Various Battery Energy Storage Systems. *Energies* 2018, 11, 2841. <https://doi.org/10.3390/en11102841>.
98. Bruce Dunn et al. ,Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices.Science334,928-935(2011).DOI:10.1126/science.1212741.

99. Soloveichik GL. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annu Rev Chem Biomol Eng.* 2011;2:503-27. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116. PMID: 22432629.
100. Murugaperumal Krishnamoorthy, Ajay D. Vimal Raj Periyannayagam, Ch. Santhan Kumar, B. Praveen Kumar, Suresh Srinivasan & P. Kathiravan (2022) Optimal Sizing, Selection, and Techno-Economic Analysis of Battery Storage for PV/BG-based Hybrid Rural Electrification System, *IETE Journal of Research*, 68:6, 4061-4076, DOI: 10.1080/03772063.2020.1787239.
101. Anton V. Vykhotsev, Darren Jang, Qianpu Wang, William Rosehart, Hamidreza Zareipour, A review of modelling approaches to characterize lithium-ion battery energy storage systems in techno-economic analyses of power systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 166, 2022, 112584, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112584>.
102. Abraham Alem Kebede, Thierry Coosemans, Maarten Messagie, Towfik Jemal, Henok Ayele Behabtu, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar, Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application, *Journal of Energy Storage*, Volume 40, 2021, 102748, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748>.
103. Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Agustín, Techno-economic analysis of grid-connected battery storage, *Energy Conversion and Management*, Volume 91, 2015, Pages 394-404, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.038>.
104. Medikovskiy M. O., Shunevich O. B. Research on the effectiveness of methods for assessing the importance coefficients // *VISNIK*. – 2011. – S. 2011176.
105. R. Klein, N. A. Chaturvedi, J. Christensen, J. Ahmed, R. Findeisen and A. Kojic, "Optimal charging strategies in lithium-ion battery," *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 382-387, doi: 10.1109/ACC.2011.5991497.
106. T. S. Mundra and A. Kumar, "An Innovative Battery Charger for Safe Charging of NiMH/NiCd Batteries," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 3, pp. 1044-1052, Aug. 2007, doi: 10.1109/TCE.2007.4341584.
107. Liu C, Gao Y, Liu L. Toward safe and rapid battery charging: Design optimal fast charging strategies thorough a physics-based model considering lithium plating. *Int J Energy Res.* 2021; 45: 2303–2320. <https://doi.org/10.1002/er.5924>.
108. K. Zaghib, M. Dontigny, A. Guerfi, P. Charest, I. Rodrigues, A. Mauger, C.M. Julien, Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications, *Journal of Power Sources*, Volume 196, Issue 8, 2011, Pages 3949-3954, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.093>.
109. Anna Tomaszewska, Zhengyu Chu, Xuning Feng, Simon O'Kane, Xinhua Liu, Jingyi Chen, Chenzhen Ji, Elizabeth Endler, Ruihe Li, Lishuo Liu, Yalun Li, Siqi Zheng, Sebastian Vetterlein, Ming Gao, Jiuyu Du, Michael Parkes, Minggao Ouyang,

- Monica Marinescu, Gregory Offer, Billy Wu, Lithium-ion battery fast charging: A review, *eTransportation*, Volume 1, 2019, 100011, ISSN 2590-1168, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>.
110. Kailong Liu, Kang Li, Zhile Yang, Cheng Zhang, Jing Deng, An advanced Lithium-ion battery optimal charging strategy based on a coupled thermoelectric model, *Electrochimica Acta*, Volume 225, 2017, Pages 330-344, ISSN 0013-4686, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.12.129>.
 111. A. Al-Haj Hussein and I. Batarseh, "A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 3, pp. 830-838, March 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2106527.
 112. Liang Zhang, Tian Gao, Guowei Cai, Koh Leong Hai, Research on electric vehicle charging safety warning model based on back propagation neural network optimized by improved gray wolf algorithm, *Journal of Energy Storage*, Volume 49, 2022, 104092, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104092>.
 113. A method of measuring the self-discharge of a lithium battery - Знання - Shenzhen Manly Battery Co., Ltd. Akumulator UPS, robotyzovana batareia, postachalnyky soniachnykh batarei, vyrobnyky, fabryka - MANLY. URL: <https://ua.manly-battery.com/info/lithium-battery-self-discharge-measurement-met-64926637.html> (accessed: 28.01.2024).
 114. BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries. Онлайн. Battery University. [б. д.]. Access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>. [date of application 06.04.2024].
 115. BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries. Онлайн. Battery University. [б. д.]. Access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>. [date of application 06.04.2024].
 116. BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries. Онлайн. Battery University. [б. д.]. Access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>. [ate of application 06.04.2024].
 117. D. Joshi, D. Deb, S.M. Mueeen, "Comprehensive review on electric propulsion system of Unmanned Aerial Vehicles," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, pp. 1–20, May 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100173.
 118. А. Лось, О. Велігорський Методика вибору технології акумуляторних батарей для автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів Стаття Технічні науки та технології, 2024, №2 (36), 227-241. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2\(36\)-227-241](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2(36)-227-241).
 119. Li, Niansi & Liu, Xiaoyong & Yu, Bendong & Li, Liang & Xu, Jianqiang & Tan, Qiong. (2020). Study on the environmental adaptability of lithium-ion battery powered UAV under extreme temperature conditions. *Energy*. 219. 119481. 10.1016/j.energy.2020.119481.

120. Wang S, Wu T, Xie H, Li C, Zhang J, Jiang L, Wang Q. Effects of Current and Ambient Temperature on Thermal Response of Lithium Ion Battery. *Batteries*. 2022; 8(11):203. <https://doi.org/10.3390/batteries8110203>.
121. Seon Jin Kim, Gino J. Lim, Jaeyoung Cho, Drone flight scheduling under uncertainty on battery duration and air temperature, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 117, 2018, Pages 291-302, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.005>.
122. Wei, K., Wu, J., Ma, W. and Li, H. (2019), State of charge prediction for UAVs based on support vector machine. *The Journal of Engineering*, 2019: 9133-9136. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.9201>.
123. Chen S, Wei X, Zhang G, Wang X, Zhu J, Feng X, Dai H, Ouyang M. All-temperature area battery application mechanism, performance, and strategies. *Innovation (Camb)*. 2023 Jun 21;4(4):100465. doi: 10.1016/j.xinn.2023.100465. PMID: 37448741; PMCID: PMC10336268.
124. Sitong Zhang, Yibing Li, Qianhui Dong, Autonomous navigation of UAV in multi-obstacle environments based on a Deep Reinforcement Learning approach, *Applied Soft Computing*, Volume 115, 2022, 108194, ISSN 1568-4946.
125. Linear Regression- MATLAB & Simulink. MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink. url: https://www.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/linear-regression.html (date of access: 24.04.2024).
126. Support for Mavic 2 - DJI. RL: <https://www.dji.com/global/support/product/mavic-2> (date of access: 28.11.2024).

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача

1. Лось А., Рудніченко С., Соболев В., Велігорський О. Огляд основних параметрів системи електроспоживання сучасних безпілотних літальних апаратів вертикального зльоту та посадки стаття Технічні науки та технології, 2021, №1 (23), 239–248. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1\(23\)-239-248](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1(23)-239-248). (Особистий внесок – кількісно визначено розподіл електроспоживання між основними складовими елементами дрона).
2. Veligorskyi, O., Los, A., Chakirov, R. Persistent Continuous Surveillance of Remote Local Objects by Multicopter UAVs Конф. CPE-POWERENG 2023 - 17th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, 2023, 1-6. <https://doi.org/10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227404>. (Особистий внесок – виконано розрахунки та аналіз отриманих результатів).
3. А. Лось, О. Велігорський, А. Роженков, Є. Хоменко Оцінка впливу зміни температури зовнішнього середовища на розряд акумуляторної батареї БПЛА Стаття Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 2023, 17(3), 31-36. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.17.2023.04>. (Особистий внесок – розроблено математичну модель прогнозування впливу температури та атмосферного тиску на енергоспоживання дронів).
4. А. Лось, О. Велігорський Методика вибору технології акумуляторних батарей для автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів Стаття Технічні науки та технології, 2024, №2 (36), 227-241. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2\(36\)-227-241](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2(36)-227-241). (Особистий внесок – вперше розроблено універсальну методику вибору акумуляторних батарей для дронів на основі багатокритеріального аналізу. Розроблено узагальнену концепцію автономної системи безперервного спостереження за допомогою дронів).

5. А. Лось, О. Велігорський Оцінка комбінованого електроживлення систем безперервного спостереження на базі дронів Стаття Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2024, №4, 37–46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-37-46>. (Особистий внесок – вперше створено модель електрозабезпечення для системи безперервного спостереження з оптимізацією основної та допоміжної систем енергоживлення на основі моделювання часових, енергетичних і просторових характеристик).
6. А. Лось, О. Велігорський Energy and operational analysis of continuous surveillance systems based on multicopter UAVs Стаття Вісник ХПІ, 2024, №3 (21), 39–51. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.03.06>. (Особистий внесок – вперше розроблено метод оцінки, який на відміну від існуючих враховує модель замкнутого контуру спостереження, та дозволяє визначити мінімально необхідну кількість дронів та максимально досяжну дальність спостереження. Запропонований метод оцінки вдосконалено на основі експериментальних даних.).

Продовж. дод. А

5.4 Апробація результатів дисертації

1. II науково-технічна конференція Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 28.09.2023, “Методика оцінки системи електроспоживання БпЛА мультироторного типу безперервного моніторингу”.

2. XII Міжнародна науково-практична конференція Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів, 27.10.2023, “Визначення периметру спостереження для систем безперервного моніторингу з використанням БпЛА”.

3. V Міжнародна науково-практична конференція Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та шляхи вирішення в умовах воєнного стану, 20.10.2023, “Використання сонячних панелей в системах безперервного моніторингу за допомогою БпЛА”

4. Науково-практична конференція в Академії СБУ, 16.10.2023, “Напрямки фізичного захисту об’єктів критичної інфраструктури”

5. 2023 IEEE 17th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG) ,14.06.2023, “Persistent Continuous Surveillance of Remote Local Objects by Multicopter UAVs”

6. Всеукраїнській науково-практична конференція Проблеми оперативного та логістичного забезпечення складових сектору безпеки і оборони України, 09.02.2021, “Проблеми, пов’язані із застосуванням дистанційної передачі енергії для БпЛА”.

ДОДАТОК Б

5.5 Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «РЕАКТИВНІ ДРОНИ»

49000, м. Дніпро, вулиця Січеславська Набережна будинок 1-А, квартира 10, ЄДРПОУ - 44032540

Р/р UA583005280000026001000009035 в АТ «ОТП БАНК»

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи
**ЛОСЯ Андрія Миколайовича на тему: "Автономні системи
електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі
безпілотних літальних апаратів", представленої на здобуття ступеня
доктора філософії зі спеціальності 141 – “Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка”**

Підтверджується, що результати дисертаційної роботи, спрямованої на підвищення енергетичної автономності систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на основі БпЛА, були впроваджені у виробничо-проектну діяльність ТОВ “Реактивні Дрони”.

Розроблена методика визначення енергетичних характеристик систем з урахуванням режимів роботи БпЛА була адаптована до застосування у окремих проєктах ТОВ “Реактивні Дрони”. Зазначена методика дозволила врахувати як динамічне навантаження від енергоспоживання зарядної станції БпЛА, так і фактори зовнішнього середовища, що впливають на енергоефективність системи.

На основі зазначених підходів реалізовано інженерні рішення, які забезпечують стабільне функціонування безпілотних систем в складі спостережних комплексів. Впровадження сприяло оптимізації енергопостачання в умовах тривалих завдань без участі обслуговуючого персоналу.

Директор ТОВ “Реактивні Дрони”



О.М. Колесник

ДОДАТОК В

5.6 Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ААА ІНТЕЛЕДЖЕНС»

49000, м. Дніпро, вулиця Старокодацька, будинок 58, ЄДРПОУ-45381284

Р/р UA203395002600501454881000001 в АТ «ТАСКОМБАНК»

Вих. №001-080425 від 08.04.2025

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи
**ЛОСЯ Андрія Миколайовича на тему: "Автономні системи
електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі
безпілотних літальних апаратів", представленої на здобуття ступеня
доктора філософії зі спеціальності 141 – “Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка”**

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи, присвяченої забезпеченню енергетичної автономності систем електроживлення для комплексів безперервного спостереження з використанням БпЛА, були впроваджені у діяльність ТОВ «ААА Інтеледженс».

Під час розробки автономної енергосистеми були використані рекомендації щодо підбору акумуляторів, зарядних станцій, а також особливостей підключення до електромережі й використання сонячних панелей. Це дозволило забезпечити продуктивну роботу БпЛА та ефективне енергозабезпечення системи.

Застосування запропонованих у дисертації підходів дало змогу підвищити стабільність роботи обладнання, зменшити експлуатаційні витрати та зробити систему менш залежною від зовнішніх умов.

Директор ТОВ «ААА Інтеледженс»
О.В. Реброва



ДОДАТОК Г

Результати експериментальних досліджень

№	Координати		Час польоту			SOC				Швидкість вітру		Азимут польоту/вітру			Vv (м/с)	Vh (м/с)	ДАТА (час зльоту)
	початк. точка (xd;yd)	кінцева точка (xd;yd)	початк. точка (хв;с)	кінц. точка (хв;с)	заг. (с)	початк. точка	кінцева точка	Витр.	Спост. на 60 с	початк. точка (м/с)	кінцева точка (м/с)	початк. точка	кінц. точка	політ			
1	(0;10)	(1000;500)	(0;25)	(03;10)	165	0,93	0,8	0,13	0,04	4,3	12,2	94	84	91	3,03	6,06	19.04.23 (7:38)
2	(1000;500)	(0;10)	(04;10)	(07;04)	174	0,76	0,66	0,1		12,1	7,25	83	86	259	2,87	5,74	
3	(0;10)	(2000;500)	(07;04)	(10;05)	181	0,66	0,52	0,14	0,04	7,2	12,24	86	82	91	2,76	11,04	
4	(2000;500)	(0;10)	(11;05)	(14;14)	189	0,48	0,25	0,23		10,6	3,6	91	70	259	2,64	10,58	
5	(0;10)	(1000;500)	(0;22)	(03;05)	163	0,94	0,83	0,11	0,04	0,63	5,18	132	61	90	3,06	6,13	21.04.23 (12:08)
6	(1000;500)	(0;10)	(04;10)	(06;56)	166	0,79	0,72	0,07		5,9	3,39	61	12	259	3,01	6,02	
7	(0;10)	(2000;500)	(06;56)	(09;48)	172	0,72	0,58	0,14	0,04	3,39	3	12	36	90	2,9	11,62	
8	(2000;500)	(0;10)	(11;00)	(13;49)	169	0,53	0,44	0,09		3,96	5,4	60	24	259	2,95	11,83	
9	(0;10)	(3000;500)	(0;25)	(3;55)	210	0,93	0,72	0,21	0,04	3,74	3,26	260	16	90	2,38	14,28	21.04.23 (12:43)
10	(3000;500)	(0;10)	(4;55)	(8;20)	205	0,68	0,55	0,13		4,08	3,03	10	316	270	2,43	14,63	
11	(0;10)	(4000;500)	(0;20)	(5;00)	280	0,99	0,74	0,25	0,04	5,45	5,87	12	28	85	1,78	14,28	21.04.23 (1:07)
12	(4000;500)	(0;10)	(6;00)	(10;45)	285	0,7	0,47	0,23		6,14	2,76	0	23	268	1,75	14,03	
13	(0;10)	(4500;500)	(0;23)	(5;25)	303	0,93	0,67	0,26	0,04	2,93	5,86	54	29	88	1,65	14,85	21.04.23 (1:28)
14	(4500;500)	(0;10)	(6;25)	(12;27)	362	0,63	0,34	0,29		4,93	4	17	342	271	1,38	12,43	
15	(0;10)	(1000;400)	(0;16)	(02;28)	132	0,9	0,81	0,09	0,03	6,53	9,6	0	13	90	3,03	7,57	21.04.23 (1:51)
16	(1000;400)	(0;10)	(03;37)	(06;05)	148	0,77	0,7	0,07		6,76	6,05	9	355	274	2,7	6,75	
17	(0;10)	(2000;400)	(06;05)	(08;23)	138	0,7	0,57	0,13	0,04	11,34	6,5	355	26	90	2,89	14,49	
18	(2000;400)	(0;10)	(09;23)	(12;00)	157	0,53	0,41	0,12		5,81	3,34	29	27	274	2,54	12,73	
19	(0;10)	(3000;400)	(0;23)	(4;02)	219	0,94	0,79	0,15	0,04	5,52	8,21	50	51	83	1,82	13,69	21.04.23 (3:14)
20	(3000;400)	(0;10)	(05;02)	(09;48)	286	0,75	0,52	0,23		8,45	-	57	-	263	1,39	10,48	
21	(0;10)	(4000;400)	(0;19)	(4;48)	269	0,98	0,81	0,17	0,03	10,68	9,58	49	38	82	1,48	14,86	21.04.23 (3:29)
22	(4000;400)	(0;10)	(5;48)	(12;05)	377	0,78	0,32	0,46		8,4	9,73	44	34	263	1,06	10,61	
23	(0;10)	(4500;400)	(0;20)	(5;31)	311	0,97	0,77	0,2	0,03	4,67	7,94	20	52	79	1,28	14,46	21.04.23 (4:37)
24	(4500;400)	(0;10)	(6;31)	(13;18)	407	0,74	0,39	0,35		8,38	2,75	51	80	260	0,98	11,05	

№	Координати		Час польоту			SOC				Швидкість вітру		Азимут польоту/вітру			Vv (м/с)	Vh (м/с)	ДАТА (час зльоту)
	початк. точка (xd;yd)	кінцева точка (xd;yd)	початк. точка (хв;с)	кінц. точка (хв;с)	заг. (с)	початк. точка	кінцева точка	Витр.	Спост. на 60 с	початк. точка (м/с)	кінцева точка (м/с)	початк. точка	кінц. точка	політ			
25	(0;10)	(1000;300)	(0;20)	(2;08)	108	0,82	0,74	0,08	0,03	2,39	8,34	19	42	77	2,77	9,25	21.04.23 (5:34)
26	(1000;300)	(0;10)	(3;08)	(5;05)	117	0,71	0,64	0,07		8,12	5,5	43	358	267	2,56	8,54	
27	(0;10)	(2000;300)	(5;05)	(7;15)	130	0,64	0,54	0,1	0,04	5,5	7,6	358	21	87	2,3	15,38	
28	(2000;300)	(0;10)	(8;15)	(10;57)	162	0,5	0,39	0,11		7,23	-	41	-	271	1,85	12,34	
29	(0;10)	(3000;300)	(0;23)	(3;45)	202	0,99	0,82	0,17	0,04	4,49	5,79	341	351	89	1,48	14,85	22.04.23 (3:14)
30	(3000;300)	(0;10)	(4;45)	(8;18)	213	0,78	0,64	0,14		6,23	-	13	-	269	1,4	14,08	
31	(0;10)	(4000;300)	(0;16)	(4;53)	277	0,98	0,74	0,24	0,04	10,62	5,27	342	17	84	1,08	14,44	22.04.23 (3:29)
32	(4000;300)	(0;10)	(5;53)	(10;48)	295	0,7	0,46	0,24		5,77	-	36	-	266	1,01	13,55	
33	(0;10)	(4500;300)	(0;11)	(5;23)	312	1	0,75	0,25	0,03	1,79	4,22	346	355	91	0,96	14,42	22.04.23 (3:45)
34	(4500;300)	(0;10)	(6;23)	(11;35)	312	0,72	0,48	0,24		5,12	2,4	345	353	268	0,96	14,42	
35	(0;10)	(1000;200)	(0;18)	(1;36)	78	0,62	0,54	0,08	0,04	8,14	7,44	311	328	77	2,56	12,82	22.04.23 (4:02)
36	(1000;200)	(0;10)	(2;36)	(4;00)	84	0,5	0,44	0,06		7,78	10,13	333	348	267	2,38	11,9	
37	(0;10)	(2000;200)	(4;00)	(6;23)	143	0,44	0,33	0,11	0,04	10,13	9,71	348	351	87	1,39	6,99	
38	(2000;200)	(0;10)	(7;23)	(9;56)	153	0,29	0,16	0,13		9,55	-	352	-	271	1,3	6,53	
39	(0;10)	(3000;200)	(0;18)	(3;49)	211	0,93	0,76	0,17	0,04	3,39	5,06	333	161	110	0,94	14,21	25.04.23 (3:25)
40	(3000;200)	(0;10)	(4;49)	8;23)	214	0,72	0,56	0,16		5,76	-	152	-	294	0,93	14,01	
41	(0;10)	(4000;200)	(0;16)	(4;50)	274	0,92	0,73	0,19	0,04	6,88	5,28	12	22	84	0,72	14,59	22.04.23 (4:15)
42	(4000;200)	(0;10)	(5;50)	(10;33)	283	0,69	0,46	0,23		5,88	-	28	-	266	0,7	14,13	
43	(0;10)	(4500;200)	(0;16)	(5;26)	310	0,95	0,71	0,24	0,04	5,07	7,1	7	341	91	0,64	14,51	22.04.23 (4:32)
44	(4500;200)	(0;10)	(6;26)	(11;47)	321	0,67	0,41	0,26		7,34	-	345	-	268	0,62	14,01	
45	(0;10)	(1000;100)	(0;18)	(1;32)	74	0,74	0,68	0,06	0,04	4,62	8,54	21	10	77	1,35	13,51	22.04.23 (4:49)
46	(1000;100)	(0;10)	(2;32)	(3;52)	80	0,64	0,58	0,06		6,39	7,35	38	2	267	1,25	12,5	
47	(0;10)	(2000;100)	(3;52)	(6;15)	163	0,58	0,47	0,11	0,04	7,35	5,58	2	41	87	0,61	12,26	
48	(2000;100)	(0;10)	(7;15)	(9;48)	153	0,43	0,3	0,13		6,43	3,31	48	33	271	0,65	13,07	
49	(0;10)	(3000;100)	(0;18)	(3;48)	210	0,95	0,81	0,14	0,04	7,46	4,13	146	158	110	0,47	14,28	25.04.23 (3:36)
50	(3000;100)	(0;10)	(4;48)	(8;29)	221	0,77	0,59	0,18		5,78	3,94	152	100	289	0,45	13,57	
51	(0;10)	(4000;100)	(0;17)	(4;55)	318	0,73	0,55	0,18	0,04	1,23	5,14	63	57	84	0,31	12,57	22.04.23 (5:17)
52	(4000;100)	(0;10)	(5;55)	(10;46)	291	0,51	0,27	0,24		5,18	1,98	50	324	266	0,34	13,74	

№	Координати		Час польоту			SOC				Швидкість вітру		Азимут польоту/вітру			Vv (м/с)	Vh (м/с)	ДАТА (час зльоту)
	початк. точка (x;d;y;d)	кінцева точка (x;d;y;d)	початк. точка (хв;с)	кінц. точка (хв;с)	заг. (с)	початк. точка	кінцева точка	Витр.	Спост. на 60 с	початк. точка (м/с)	кінцева точка (м/с)	початк. точка	кінц. точка	політ			
53	(0;10)	(4500;100)	(0;14)	(5;24)	310	0,84	0,58	0,26	0,04	7,84	4,77	2	14	105	0,32	14,51	22.04.23 (5:44)
54	(4500;100)	(0;10)	(6;24)	(11;33)	309	0,54	0,29	0,25		3,99	4,14	47	19	287	0,32	14,56	
55	(0;10)	(1000;500)	(0;18)	(3;05)	193	0,8	0,69	0,11	0,04	2,85	4,29	45	12	77	2,59	5,18	22.04.23 (6:10)
56	(1000;500)	(0;10)	(4;05)	(6;57)	172	0,65	0,58	0,07		4,69	4,08	21	14	267	2,9	5,81	
57	(0;10)	(2000;500)	(6;57)	(10;32)	215	0,58	0,43	0,15	0,04	4,08	4,04	14	36	87	2,32	9,3	
58	(2000;500)	(0;10)	(11;32)	(15;03)	211	0,39	0,29	0,1		3,99	-	51	-	271	2,36	9,47	
59	(0;10)	(1000;500)	(0;12)	(4;03)	231	0,82	0,66	0,16	0,04	2,42	2,05	199	37	77	2,16	4,32	22.04.23 (6:34)
60	(1000;500)	(0;10)	(5;03)	(8;53)	230	0,62	0,52	0,1		2,46	0,38	27	256	267	2,17	4,34	
61	(0;10)	(1000;500)	(0;18)	(3;12)	174	0,93	0,82	0,11	0,03	4,11	4,23	73	162	108	2,87	5,74	25.04.23 (3:49)
62	(1000;500)	(0;10)	(4;12)	(6;59)	167	0,79	0,71	0,08		3,72	2,71	179	99	286	2,99	5,98	
63	(0;10)	(2000;500)	(6;59)	(9;45)	166	0,71	0,58	0,13	0,02	2,71	2,12	99	179	108	3,01	12,04	
64	(2000;500)	(0;10)	(10;45)	(13;41)	176	0,54	0,44	0,1		4,34	-	156	-	286	2,84	11,36	
65	(0;10)	(1000;400)	(0;18)	(2;28)	130	0,92	0,83	0,09	0,04	6,14	5,19	182	195	108	3,07	7,69	25.04.23 (4:06)
66	(1000;400)	(0;10)	(3;28)	(5;48)	140	0,79	0,74	0,05		6,53	3,66	208	180	286	2,85	7,14	
67	(0;10)	(2000;400)	(5;48)	(8;13)	145	0,73	0,6	0,13	0,04	3,66	7,47	180	207	108	2,75	13,79	
68	(2000;400)	(0;10)	(9;13)	(11;53)	160	0,56	0,45	0,11		7,47	6,03	207	59	286	2,5	12,5	
61	(0;10)	(1000;300)	(0;22)	(2;10)	108	0,77	0,69	0,08	0,04	2,39	5,3	106	150	108	2,77	9,25	25.04.23 (4:21)
62	(1000;300)	(0;10)	(3;10)	(4;53)	103	0,65	0,6	0,05		6,17	1,25	147	12	286	2,91	9,7	
63	(0;10)	(2000;300)	(4;53)	(7;11)	138	0,6	0,48	0,12	0,04	1,25	4,67	12	153	108	2,17	14,49	
64	(2000;300)	(0;10)	(8;11)	(10;47)	156	0,44	0,32	0,12		5,78	-	157	-	286	1,92	12,82	
65	(0;10)	(1000;200)	(0;22)	(1;32)	70	0,67	0,61	0,06	0,04	0,54	2,81	171	218	108	2,85	14,28	25.04.23 (4:34)
66	(1000;200)	(0;10)	(2;32)	(3;45)	73	0,57	0,52	0,05		2,71	0,62	209	285	286	2,73	13,69	
67	(0;10)	(2000;200)	(3;45)	(6;14)	149	0,52	0,4	0,12	0,05	0,62	3,03	285	285	108	1,34	13,42	
68	(2000;200)	(0;10)	(7;14)	(9;38)	144	0,35	0,23	0,12		3,14	2,99	193	101	286	1,38	13,88	
65	(0;10)	(1000;100)	(0;21)	(1;29)	68	0,83	0,78	0,05	0,04	1,46	2,49	12	48	108	1,47	14,7	25.04.23 (4:47)
66	(1000;100)	(0;10)	(2;29)	(3;44)	75	0,74	0,69	0,05		2,92	1,29	131	344	286	1,33	13,33	
67	(0;10)	(2000;100)	(3;49)	(6;15)	146	0,68	0,58	0,1	0,04	1,29	2,78	344	152	108	0,68	13,69	
68	(2000;100)	(0;10)	(7;15)	(9;37)	142	0,54	0,43	0,11		3,25	2,27	132	156	286	0,7	14,08	

№	Координати		Час польоту			SOC				Швидкість вітру		Азимут польоту/вітру			Vv (м/с)	Vh (м/с)	ДАТА (час зльоту)
	початк. точка (xd;yd)	кінцева точка (xd;yd)	початк. точка (хв;с)	кінц. точка (хв;с)	заг. (с)	початк. точка	кінцева точка	Витр.	Спост. на 60 с	початк. точка (м/с)	кінцева точка (м/с)	початк. точка	кінц. точка	політ			
Політ за сценарієм 1																	
69	(0;0)	(0;500)	(0;02)	(02;50)	168	0,93	0,81	0,12	0,04	5,26	9,44	299	313	112	2,97		01.03.23 (4:40)
70	(0;0)	(0;500)	(0;03)	(02;50)	167	0,87	0,76	0,11	0,04	5,51	8,47	311	336	105	2,99	-	01.03.23 (4:13)
71	(0;500)	(1141;500)	(2;50)	(06;54)	244	0,76	0,6	0,16		8,47	8,61	336	313	105	-	4,67	
72	(1141;500)	(147;500)	(06;54)	(10;28)	214	0,6	0,48	0,12		8,61	8,64	313	335	112	-	5,33	
73	(147;500)	(147;33)	(10;28)	(13;06)	158	0,48	0,41	0,07		8,64	9,48	335	340	112	2,95	-	