

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА ЛЬОТНА АКАДЕМІЯ

Факультет авіаційного менеджменту
Кафедра аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху

ОЛІЙНИК Костянтин Михайлович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА У ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ
УМОВАХ**

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»

ОПП «Авіаційний транспорт»

Освітній ступінь - магістр

«Допустити до захисту»

Завідувач кафедри:

к.т.н., доцент _____ Н.І. Кушнірова

«_____» _____ 2024 р.

Науковий керівник:

д. геол. н., професор _____ Г.А. Калашник

«_____» _____ 2024 р.

Робота захищена:

«_____» _____ 2024 р.

з оцінкою _____

Голова ЕК _____

Кропивницький 2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2024	Виконав
2	Аналіз літературних джерел	15.09.2024	Виконав
3	Складання плану роботи	20.09.2024	Виконав
4	Робота над першим розділом	01.10.2024	Виконав
5	Робота над другим розділом	15.10.2024	Виконав
6	Робота над третім розділом	25.10.2024	Виконав
7	Апробація результатів дослідження на науковій конференції	28.10.2024	Виконав
8	Подача електронного варіанту роботи для перевірки на плагіат	01.11.2024	Виконав
9	Оформлення кваліфікаційної (магістерської) роботи	10.11.2024	Виконав
10	Отримання рецензії на кваліфікаційну (магістерську) роботу	15.11.2024	Виконав

Здобувач ВО _____
(підпис)

«01» вересня 2024 р.

Олійник К.М. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: Удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах

Автор кваліфікаційної роботи: Олійник Костянтин Михайлович

За спеціальністю: 272 Авіаційний транспорт

ОПП: Авіаційний транспорт

Освітній ступінь - магістр

Керівник кваліфікаційної роботи: д.геол.н., професор Калашник Г.А.

Рік захисту: 2024

Робота складається з вступу, трьох основних розділів, висновків та списку використаної літератури.

У вступі обґрунтовано актуальність даної теми, яка полягає в необхідності удосконалення системи моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА в дестабілізуючих умовах з вирішенням проблем з своєчасним отриманням інформації про стан об'єкту моніторингу для якнайшвидшого відновлення працездатності енергооб'єкту з одного боку, та забезпечення належного рівня безпеки та надійності процесу моніторингу на базі безпілотних літальних апаратів в дестабілізуючих умовах з іншого боку.

У першому розділі проаналізовано проблеми моніторингу повітряних ліній електропередач, наведено існуючі види огляду ліній електропередач, а також методи та технології їх проведення, проведено аналіз ринку безпілотних літальних апаратів, проаналізовано найбільш поширені типи ушкоджень ліній електропередач згідно статистичних даних.

У другому розділі проаналізовано існуючі методи моніторингу та діагностування стану для зниження ймовірності стійких ушкоджень ЛЕП; проведено аналіз безпілотних літальних апаратів та виконано обґрунтування вибору БПЛА для процесу моніторингу повітряних ліній електропередач. Обґрунтовано фактори впливу дестабілізуючих та складних умов середовища на

ефективну роботу БПЛА, проведено аналіз існуючих систем моніторингу та діагностики повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА. Наведено стандартний алгоритм плану аеромоніторингу енергетичних об'єктів за допомогою БПЛА та опис основних вимог до існуючих систем діагностики повітряних ліній електропередач.

У третьому розділі представлені нові підходи до удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах.

У висновку підведені підсумки дослідження, зроблені основні висновки і розроблені практичні рекомендації щодо впровадження запропонованих нових підходів щодо удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах з вирішенням проблем з визначення умов реалізації польоту БПЛА при дестабілізуючих впливах, використання штучного інтелекту для здатності БПЛА розпізнавати топографічні дані та інтегрувати дані про неспокійну атмосферу; планування маршруту моніторингу різних ділянок електромережі групою БПЛА різних типів із застосуванням датчиків міжоб'єктної навігації; автоматизації системи управління завдання поверхневого огляду ліній електропередач в складних умовах; використання аеромагнітної та аероелектромагнітної зйомок на базі БПЛА для ефективного моніторингу стану ліній електропередач.

Робота обсягом 93 сторінки печатного тексту, має 26 рисунків, 3 таблиці, та 61 найменування використаної літератури.

Ключові слова: БПЛА, моніторинг, методи діагностики, повітряні лінії електропередач, дестабілізуючі умови.

.

ANNOTATION

The topic of the qualification work: Improvement of the method of monitoring power lines using UAVs in destabilizing conditions.

Author of the qualification work: Oliynyk Kostyantyn Mykhailovych

Specialty: 272 "Aviation Transport"

Educational and professional program: "Aviation Transport"

Educational degree - master's degree

Master's work supervisor: Professor, Doctor of Geological Sciences, Kalashnyk G.A.

Year of defense: 2024

The work consists of an introduction, three main sections, a conclusion and a bibliography.

The introduction substantiates the relevance of this topic, which consists in the need to improve the system of monitoring overhead power lines with the help of UAVs in destabilizing conditions with the solution of problems with timely obtaining information about the state of the monitoring object for the fastest possible restoration of the energy object's operability, on the one hand, and ensuring proper the level of safety and reliability of the monitoring process based on unmanned aerial vehicles in destabilizing conditions on the other hand.

In the first chapter, the problems of monitoring overhead power lines are analyzed, the existing types of power line inspections are given, as well as the methods and technologies for conducting them, the unmanned aerial vehicle market is analyzed, and the most common types of damage to power lines are analyzed according to statistical data.

In the second chapter, the existing methods of monitoring and diagnosing the condition to reduce the probability of permanent damage to power are analyzed; the analysis of unmanned aerial vehicles was carried out and the justification of the choice of UAVs for the process of monitoring overhead power lines was performed. Factors

of influence of destabilizing and difficult environmental conditions on the effective operation of UAVs were substantiated, analysis of existing systems of monitoring and diagnostics of overhead power lines using UAVs was carried out. The standard algorithm of the air monitoring plan of energy facilities using UAVs and the description of the main requirements for the existing diagnostic systems of overhead power lines are presented. A description of the main requirements for the existing diagnostic systems of overhead power lines is given.

The third chapter presents new approaches to improving the methods of monitoring overhead power lines using UAVs in destabilizing conditions, the concept of a promising functionally stable information system for monitoring overhead power lines using UAVs, which is being developed, is given.

The conclusion summarizes the research, made the main conclusions and developed practical recommendations for the implementation of the proposed new approaches to improve the methods of monitoring overhead power lines using UAVs in destabilizing conditions with the solution of the problems of determining the conditions for the implementation of UAV flight under destabilizing influences, the use of artificial intelligence for the ability of UAVs recognize topographical data and integrate turbulent atmospheric data; planning the monitoring route of various sections of the power grid by a group of UAVs of various types using inter-object navigation sensors; automation of the management system for the task of surface inspection of power lines in difficult conditions; use of aeromagnetic and aeroelectromagnetic surveying based on a UAV for effective monitoring of the state of power lines.

The work is 93 pages of printed text, has 26 figures, 3 tables, and 61 titles of used literature.

Keywords: UAVs, monitoring, diagnostic methods, overhead power lines, destabilizing conditions.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ МОНИТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПАНІЯХ	14
1.1 Аналіз існуючих методів технічного обслуговування повітряних ліній електропередач	14
1.2 Аналіз головних причин потоків відмов повітряних ліній електропередач в Україні	19
2 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА	21
2.1 Аналіз існуючих методів моніторингу та діагностування стану для зниження ймовірності стійких ушкоджень ЛЕП	21
2.2 Аналіз безпілотних літальних апаратів та обґрунтування вибору БПЛА для процесу моніторингу повітряних ліній електропередач	27
2.3 Вплив дестабілізуючих та складних умов середовища на ефективну роботу БПЛА	34
2.4 Аналіз існуючих систем моніторингу та діагностики повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА	34
2.5 Стандартний алгоритм плану аеромоніторингу енергетичних об'єктів за допомогою БПЛА	44
3 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ МОНИТОРИНГУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА У ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ УМОВАХ	48
3.1 Нові підходи до удосконалення існуючих методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах	48
3.2 Удосконалення методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах	56

3.2.1 Удосконалення алгоритму визначення умов реалізації польоту БПЛА при дестабілізуючих впливах.....	56
3.2.2 Використання штучного інтелекту для здатності БПЛА розпізнавати топографічні дані та інтегрувати дані про неспокійну атмосферу.....	69
3.2.3 Планування маршруту моніторингу різних ділянок електромережі групою БПЛА різних типів із застосуванням датчиків міжоб'єктної навігації.....	73
3.2.4 Автоматизація системи управління завдання поверхневого огляду ліній електропередач в складних умовах.....	78
3.2.5 Використання аеромагнітної та аероелектромагнітної зйомок на базі БПЛА для моніторингу стану ліній електропередач.....	87
3.3 Розробка узагальненої схеми механізму удосконалень методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах.....	95
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	104

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АВР	автономний верховий огляд
БА	бортова апаратура
БІНС	безплатформна інерціальна навігаційна система
БП	безпека польотів
БПЛА	безпілотний літальний апарат
ВОЛС	волоконно-оптична лінія зв'язку
ГІС	Геоінформаційна система
ГНСС	Глобальні навігаційні супутникові системи
ЗО	залізобетонна опора
ІЧ	інфрачервоний
КН	корисне навантаження
КОС	квантово-оптична система
ЛЕП	лінія електропередач
НАС	навігаційна апаратура споживача
ПЗ	програмне забезпечення
ПЛ	повітряна лінія
ППС	пристрій прийому-передачі сигналу
ПС	повітряне судно
РП	розподільчий пристрій
РПП	радіоприймальний пристрій
GLONASS	Global Navigation Satellite System (Russia)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System (United States)

ВСТУП

Актуальність теми магістерської роботи обумовлена необхідністю удосконалення системи моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА в дестабілізуючих умовах з вирішенням проблем зі своєчасним отриманням інформації для запобігання аварійним відключенням та якнайшвидшого відновлення їх працездатності, у разі пошкодження, а також для забезпечення належного рівня безпеки та надійності процесу моніторингу ЛЕП на базі безпілотних літальних апаратів в дестабілізуючих умовах, що сприятиме енергетичній безпеці України.

Наразі проблема забезпечення енергетичної безпеки України є дуже актуальною. При цьому особливого значення набуває моніторингу стану систем передачі електроенергії від виробника до споживача після масових ракетних або інших (БПЛА) ворожих атак на енергетичну інфраструктуру. Такий моніторинг має бути спрямований на запобігання аварійним відключенням ліній електропередачі (ЛЕП), а також якнайшвидше відновлення їх працездатності, якщо таке відключення сталося. До найперспективніших сучасних методів діагностики стану ЛЕП належить моніторинг із використанням БПЛА.

Мета та завдання досліджень. Мета роботи полягає в удосконаленні методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Виконати аналіз проблем моніторингу та діагностики повітряних ліній електропередач в енергетичних компаніях.
2. Провести аналітичне дослідження існуючих методів та систем моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА.
3. Провести удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах.

Об'єкт дослідження – використання БПЛА для моніторингу повітряних ліній електропередач.

Предмет дослідження: методи моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах.

Методологічні та теоретичні основи дослідження.

Системний підхід (Р. Джонсон, Ф. Каст, В. Афанасьєва, А. Богданов, А. Берг, В. Афанасьєв, М. Сегров, Е. Мінько), теорія систем (С.Н. Павлов).

На початкових етапах дослідження були проаналізовані основні проблеми моніторингу об'єктів електроенергетичного сектору, проведено аналіз існуючих та перспективних рішень для моніторингу об'єктів електроенергетичних мереж за допомогою БПЛА. Здійснювалось ознайомлення з теоретичними і практичними напрацюваннями в області дослідження. Внаслідок чого визначалася проблема, шляхи її вирішення, мета дослідження і завдання для її досягнення, предмет і об'єкт, а також методи дослідження.

У дослідженні були застосовані наступні методи:

- аналіз проблем моніторингу та діагностики повітряних ліній електропередач в енергетичних компаніях;
- аналіз існуючих методів технічного обслуговування повітряних ліній електропередач;
- аналіз головних причин відмов повітряних ліній електропередач в Україні;
- аналітичне дослідження сучасного стану проблеми створення та впровадження систем моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА;
- аналіз існуючих методів моніторингу та діагностування стану для зниження ймовірності стійких ушкоджень ЛЕП;
- аналіз ринку безпілотних літальних апаратів та обґрунтування вибору БПЛА для процесу моніторингу повітряних ліній електропередач;
- аналітичне дослідження впливу дестабілізуючих та складних умов середовища на ефективну роботу БПЛА;

- аналіз погодних даних за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року для міста Кропивницький з метою урахування характеристик можливості ефективного використання БПЛА;
- методи моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах;
- методи автоматизації системи управління завдання поверхневого огляду ліній електропередач в складних умовах;
- методи аеромагнітної та аероелектромагнітної зйомки на базі БПЛА для моніторингу стану ліній електропередач;
- аналіз і обробка результатів дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів. В ході дослідження удосконалено методи моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах, які відрізняються від попередніх впровадженням автономного планування польоту, автономним збором даних, автономним моніторингом, автономною заміною акумулятора, інтелектуальною діагностикою даних; використанням штучного інтелекту для здатності БПЛА розпізнавати топографічні дані та інтегрувати дані про неспокійну атмосферу; плануванням маршруту моніторингу різних ділянок електромережі групою БПЛА різних типів із застосуванням датчиків міжоб'єктної навігації; автоматизованого моніторингу стану мереж ЛЕП за допомогою БПЛА з виконанням відеоаерофотозйомки досліджуваних об'єктів в оптичному та інфрачервоному діапазонах, епіполярного зображення, а також аеромагнітної та аероелектромагнітної зйомки.

Такі шляхи удосконалення, на відміну від існуючих рішень, можуть забезпечити швидке автономне визначення розташування всіх зафіксованих проблемних ділянок ЛЕП на значній відстані і дозволяють миттєво здійснювати дії по відновленню з високою пріоритетністю на місцях.

Практичне значення отриманих результатів. Удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах має важливе теоретичне та практичне значення. На

практиці запропонований у роботі механізм удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах. Удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах має важливе теоретичне та практичне значення. На практиці запропонований у роботі механізм удосконалення методів моніторингу ЛЕП за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах сприятиме запобіганню аварійним відключенням ЛЕП, а також якнайшвидшому оперативному забезпеченню відновлення їх працездатності, у разі їх пошкодження, що важливо для енергетичної безпеки України.

Апробація результатів досліджень. Результати досліджень, які були отримані в ході виконання кваліфікаційної роботи, доповідалися і отримали позитивну оцінку на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», яка відбулась 29-31 травня 2024 р. на базі Херсонської державної морської академії (м. Херсон-Одеса), на I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми науки та інноваційного розвитку в авіаційній галузі України», яка відбулась 15 травня 2023 р. в Льотної академії Національного авіаційного університету (м. Кропивницький); на V Міжнародній науково-практичній конференції «Авіація, промисловість, суспільство», яка відбулась 16 травня 2024 р. в Кременчуцькому льотному коледжі Харківського національного університету внутрішніх справ (м. Кременчук).

Публікації. Результати досліджень опубліковані в тезах науково-практичних конференцій:

1. **Олійник К.М.,** Калашник Г.А. Обґрунтування критеріїв вибору безпілотних літальних апаратів для процесу моніторингу повітряних ліній електропередач. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024):* матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (Херсон-Одеса, 29–31 травня 2024 р.). С.137-138.

2. **Oliynyk K.M.** Features of the organization of power line monitoring system used by UAV in destabilizing conditions. *Актуальні проблеми науки та інноваційного розвитку в авіаційній галузі України*: матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої Дню науки в Україні (м. Кропивницький, 15 травня 2024 року). С.171-173.

3. Kalashnyk G.A., **Oliynyk K.M.** Prospects of using UAV aeromagnetic surveying for monitoring the technical conditions of electrical lines. *Авіація, промисловість, суспільство*: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, (м. Кременчук, 16 травня 2024 року). С.53-56.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПАНІЯХ

1.1 Аналіз існуючих методів технічного обслуговування повітряних ліній електропередач

Одним із основних завдань енергетики є транспортування електроенергії від електростанції до споживачів. Передача електроенергії здійснюється за повітряними лініями електропередач (ЛЕП), що складаються з кабельних ліній та опор – споруд для утримання ліній. Надійність та ефективність передачі енергії визначається станом мереж електропостачання. Отримання актуальних даних про стан ЛЕП дозволяє вирішити багато проблем. Вчасно проведена діагностика дає можливість своєчасно виявляти наявність дефектів на повітряній лінії, а головне – забезпечує безперебійне електропостачання споживачам. Застосування безпілотного літального апарату при діагностиці ліній електропередач дозволить покращити якість верхових оглядів, а також скоротити витрати за рахунок зменшення кількості персоналу та вимушених відключень ліній електропередач.

Для використання безпілотного літального апарату потрібна інформаційна система, яка забезпечить організацію процесу проведення верхових оглядів. Інформаційна система дозволить подавати заявки на верховий огляд, створювати завдання для оператора безпілотного літального апарату, а також надасть можливість перегляду виконаних завдань для виявлення дефектів та інших несправностей енергетичних об'єктів.

Технічне обслуговування повітряних ліній електропередач включає проведення різноманітних заходів. Для виявлення несправностей, які становлять загрозу для нормальної експлуатації повітряної лінії, проводяться систематичні огляди електромонтерами та іншим технічним персоналом енергетичної компанії. Огляди бувають планові та позапланові. Планові огляди,

як правило, проводяться за графіком, затвердженим головним енергетиком підприємства. Періодичність оглядів повітряних ліній по всій довжині повинна проводитися не рідше одного разу на рік, але залежно від кліматичних умов, поточного технічного стану лінії та інших факторів, зокрема, навмисного пошкодження ЛЕП, можуть бути організовані додаткові огляди ліній [1]. До графіка оглядів включаються лінії електропередач, на які заплановані ремонтні роботи найближчим часом. Планові огляди повітряних ліній електропередач проводяться виявлення пошкоджень, які можуть бути причиною автоматичного відключення лінії електропередач. Під час періодичних оглядів також звертають особливу увагу на охоронну зону ЛЕП. Охоронна зона ліній електропередач - це зона, розташована по обидва боки ЛЕП, у вигляді ділянки землі, водного простору, що включає також повітряний простір над даною ділянкою. В охоронній зоні ЛЕП забороняється проводити земляні роботи, посадку дерев, поливати сільськогосподарські культури, допускати тривале перебування людей. Гілки дерев можуть діставати до дротів і викликати міжфазне замикання або падіння дроту на землю. Позапланові огляди ліній проводять у таких випадках:

- 1) після автоматичного відключення повітряних ліній;
- 2) пожежа у зоні проходження траси лінії електропередач;
- 3) після різних стихійних лих;
- 4) у разі підвищеної ймовірності утворення заледеніння на дротах.

Ліквідацію аварій ЛЕП здійснює спеціалізована бригада. Огляд ЛЕП проводиться поетапно і включає оцінку наступних аспектів [2]:

- 1) стан металевих та залізобетонних опор, фундаментів опор, їх заглиблення у ґрунт, а також відсутність пучення або просідання ґрунту поблизу опор;
- 2) цілісність ізолятора, проводів, надійність їх кріплення;
- 3) наявність нумерації опор, диспетчерських найменувань лінії електропередач відповідно до вимог нормативних документів, що діють на підприємстві;

- 4) відсутність сторонніх предметів на опорах та проводах повітряної лінії;
- 5) відсутність чагарників та аварійних дерев, які здатні пошкодити ЛЕП;
- 6) дотримання вимог, що висуваються до охоронної зони ЛЕП.

Після закінчення огляду лінії електропередач фахівець (інженер, технік або електромонтер) заповнює листок огляду, куди вносить усі виявлені під час огляду дефекти та несправності.

Існують різні методи діагностики повітряних ліній. До основних способів відносяться такі, як піші обходи, геодезичні виміри, аерофотозйомка та інші [3]. Більшість енергетичних компаній використовують у своїй роботі традиційні піші обходи. Ними займаються інженери, техніки та електромонтери. Огляди повітряної лінії із землі, не завжди дозволяють виявити усі пошкодження, тому, за потреби, проводяться верхові огляди повітряної лінії. Верхові огляди проводяться не рідше, ніж один раз на шість років. При цьому ретельно оглядають верхню частину опор, троси, кріплення та ступінь забруднення ізоляторів та арматуру. Верхові огляди проводяться за допомогою автовеж або із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Верховий огляд ЛЕП квадрокоптером використовується відносно недавно, але вже знайшов застосування у багатьох енергетичних компаніях світу, оскільки має низку переваг щодо огляду за допомогою вежі. Перевагами верхового огляду за допомогою квадрокоптеру є [4]:

- 1) скорочення кількості персоналу, який бере участь у огляді (роботу квадрокоптеру може здійснювати один фахівець);
- 2) скорочення тривалості обстеження (за наявності необхідної кількості елементів живлення проведення огляду квадрокоптером значно скорочує час обстеження);
- 3) не вимагає відключення обстежуваної лінії електропередач (при огляді з використанням вежі, потрібно відключення лінії електропередач для безпеки працівників, які виконують огляд);
- 4) формування фотоархіву у режимі високої чіткості;

5) робота у важкодоступних місцях: у місцях перетину з річками, ярами, важкопрохідними рельєфами місцевості;

6) виключення ризиків нещасних випадків персоналу.

Головним недоліком застосування квадрокоптера для верхового огляду ліній електропередач є юридичний аспект. Існують правила обліку безпілотних цивільних повітряних суден, які зобов'язують реєструвати БПЛА перед початком його використання [5]. Крім того, багато енергетичних об'єктів можуть перебувати в заборонених зонах для польотів на БПЛА. Для проведення верхового огляду в таких місцях необхідно отримувати додатковий дозвіл та повідомляти місцеву службу забезпечення польотів про план польоту.

Очікуваний економічний ефект використання квадрокоптера при верховому огляді ліній електропередач передбачається рахунок наступних факторів:

- 1) зменшення кількості одиниці персоналу під час проведення огляду;
- 2) виключення збитків при відключенні лінії та оповіщенні абонентів про відключення під час проведення огляду;
- 3) покращення якості огляду ЛЕП дозволить виявляти дефекти на ранній стадії та запобігати непередбаченому відключенню лінії електропередач.
- 4) зменшення вимушених відключень ліній електропередач

На сьогодні, згідно з [6, 7], основні проблеми, пов'язані з експлуатацією та контролем стану повітряних ліній електропередач різних класів напруги, умовно можна розділити на три види:

- відсутність системного підходу в організації обслуговування, контролю та оцінки стану, планування та виробництва ремонтів ЛЕП;
- відсутність чіткої системи підготовки та ведення повної та якісної бази даних з ремонтно-експлуатаційної та нормативно-технічної документації;
- недостатність рівня підготовки лінійного та інженерно-технічного персоналу електротромережних підприємств для вирішення фактичних завдань експлуатації ЛЕП.

У зв'язку з усіма вищепереліченими проблемами, очевидна необхідність не просто системи діагностики або розробки нових методів контролю стану ЛЕП, а комплексної системи, здатної на основі всієї отриманої інформації оперативно формувати необхідні рішення щодо відновлення пошкоджень, їх запобігання та подальшої експлуатації ЛЕП.

Вирішення існуючих проблем на основі автоматизованої системи оцінки стану повітряної ЛЕП, що складається із засобу забезпечення моніторингу та діагностики (представленого у вигляді мультикоптера зі знімними блоками) та математичної моделі (реалізованої у вигляді програмного комплексу), для визначення оптимальних рішень для подальшої експлуатації ЛЕП, у тому числі коригування циклів ремонтних робіт, підвищення ефективності експлуатації, а також для вирішення завдань технічного переозброєння та реконструкції ЛЕП. Більш того, математична модель, може дозволити не тільки створити базу даних на основі отриманих вимірювань, а й аналізувати отриману статистику та виявляти різні зв'язки та залежності. Також отримана інформація може бути використана в рамках вирішення задачі управління електромережевими активами та для підвищення точності оцінки стану ЛЕП. Проведення регулярного моніторингу енергетичних об'єктів за допомогою БПЛА дозволить забезпечити їх більш стабільну та ефективну роботу, а також заощадить фінансові витрати та час на здійснення пошуку та виявлення несправностей.

Модель мультикоптера конструктивно є мультикоптером зі знімними блоками: управління, діагностування, вимірювань і передачі та зберігання даних. Кожен блок виконує свої функції, але вимірювальний та діагностичний блоки можуть бути «додатковими» та в залежності від необхідності деталізації оцінки стану доукомплектовані необхідним обладнанням для проведення необхідних вимірювань або випробувань.

Математична модель використання БПЛА з метою оцінки стану ЛЕП виконується з урахуванням агрегованої інформації, отриманої з мультикоптера з допомогою методів штучного інтелекту з урахуванням системи підтримки прийняття рішень.

1.2 Аналіз головних причин відмов повітряних ліній електропередач в Україні

Аналіз головних причин відмов ЛЕП в Україні до початку російської агресії 22 лютого 2022 року згідно даних робіт [9, 10] показав, що вони переважно відбувались пропорційно загальній довжині відповідних типів ЛЕП в Україні. Найбільша довжина ЛЕП у 110 кВ і на неї приходилось 86 % відмов, 11 % відмов приходлось на ЛЕП 220 кВ та 3 % відмов на ЛЕП 330-750 кВ. Найбільша кількість аварійних відключень ЛЕП була викликана пошкодженням проводів та грозозахисних тросів і на неї припадало 56% загальної кількості відмов. Іншими причинами, що викликали відключення ЛЕП, були пошкодження пробою ізоляторів – 19 %, пошкодження опор – 15 % та інших елементів ЛЕП – 10 %.

Згідно з наявною статистикою, різке зростання аварійних відключень ЛЕП відбувалось у весняно-літній період через перекриття ізоляційних проміжків зеленими насадженнями. Велике число аварійних відключень ЛЕП відбувалось через руйнування гірлянд ізоляторів, розкрадання проводів та елементів опор ЛЕП, начепки на дроти ЛЕП та ін [10].

Після початку російської агресії 24 лютого 2022 року найбільш поширеною причиною відмов та потоків відмов ЛЕП є навмисні пошкодження проводів, пошкодження та руйнування опор та інших елементів ЛЕП внаслідок атак дронів, ракетних бомбових та інших типів уражень.

Таким чином всі відключення ЛЕП можна укрупнено розділити на такі основні групи:

- 1) відключення внаслідок навмисного руйнування об'єктів критичної інфраструктури російськими загарбниками
- 2) відключення з вини експлуатуючої організації (пробою ізоляторів, перегорання проводів та грозотросів, пошкодження опор, падіння деревини, неправильна робота пристроїв захисту та ін);
- 3) відключення з вини сторонніх організацій і третіх осіб (начерки, підсікання проводів, валка дерев та ін);

4) відключення через стихійні лиха (у результаті ожеледиці, сильного вітру, повені, пожежі, грози та ін.);

Завдання діагностування повітряних ЛЕП відіграють важливу роль для забезпечення надійної роботи енергосистеми. Представлені причини відмов ЛЕП дозволяють зробити висновок про види діагностування, які доцільно виконувати для оперативного відновлення пошкоджень.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

2.1 Аналіз існуючих методів моніторингу та діагностування стану для зниження ймовірності стійких ушкоджень ЛЕП

На основі виконаного нами у розділі 1 аналізу головних причин відмов ЛЕП та даних роботи [12] нами була виконана оцінка існуючих методів моніторингу та діагностування за найбільшими вузлами ЛЕП (для яких, згідно зі статистикою, найчастіше характерні відключення) та виявлені найбільш інформативні методи для визначення стану ЛЕП та її елементів. Результати представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Узагальнені типи діагностики для зниження ймовірності стійких ушкоджень ЛЕП

Тип відмов	Можливі типи діагностування
Пошкодження опори	Візуальний огляд; Лазерна дефектоскопія; Рентгеноскопія
Пошкодження грозотросу	Візуальний контроль
Пошкодження проводу	Тепловізійний контроль
Падіння дерева	Візуальний огляд траси ЛЕП
Пошкодження ізоляторів	Візуальний контроль; Тепловізійний контроль; Акустичний контроль; Ультрафіолетова дефектоскопія; Лазерна дефектоскопія; рентгеноскопія

З таблиці 2.1 видно, що як превентивні методи діагностування в деяких випадках доцільно використовувати спільно кілька різних методів діагностування. Це ускладнює завдання у разі проведення діагностики людиною як з погляду технічного забезпечення та кваліфікації персоналу, так і з погляду обробки та аналізу отриманих даних. Тому автоматизація в таких умовах необхідна не лише на рівні діагностування стану устаткування, а й лише на рівні аналізу результатів, отриманих під час використання цих методів, – підвищення точності оцінки стану ЛЕП і визначення кореляційних зв'язків і залежностей відключень від різних чинників.

Таким чином, в умовах, які склались в Україні, є доцільною розробка модульного автоматизованого пристрою комплексного діагностування повітряних ЛЕП та удосконалення існуючих методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у складних та дестабілізуючих умовах. Така потреба пояснюється необхідністю забезпечувати максимально автоматизовану оцінку стану ЛЕП на базі різних методів діагностування та вимірювань за мінімально можливою участі людини протягом тривалого періоду часу та за мінімально можливою вартості її впровадження.

На сьогоднішній день відомо кілька способів розміщення обладнання для діагностування (вимірювань) стану ЛЕП:

- стаціонарне – у вигляді систем моніторингу, яке встановлюється на самій ЛЕП та її елементах, як, наприклад, описаних у [13];
- портативне – у вигляді систем періодичного контролю, тобто за допомогою переносної діагностичної та вимірювальної апаратури.

Портативна реалізація у свою чергу може бути умовно поділена на два види: обстеження ЛЕП із землі та з повітря (аеродіагностика).

Сьогодні аеродіагностика реалізується або за допомогою пілотованих літальних апаратів (залучення малої авіації або багатоцільових гелікоптерів типу Мі-2, Мі-8 для високих класів напруги ЛЕП) або безпілотних літальних апаратів (БПЛА): моторних (літакового типу, вертолїтного типу, тощо).

Очевидно, що стаціонарне обладнання для оцінки стану ЛЕП з погляду експлуатації є найбільш надійним і має підвищений робочий ресурс порівняно з аеродіагностикою, але потребує суттєвих фінансових вкладень на закупівлю, монтаж та експлуатацію обладнання. Аеродіагностика на противагу стаціонарним системам дозволяє досліджувати протяжні ділянки ЛЕП за допомогою одного апарату, що суттєво знижує витрати на обслуговування та діагностику ЛЕП, а також дозволяє здійснювати методи профілактичного контролю ПЛ у важкодоступній місцевості.

Серед усіх видів аеродіагностичного обладнання пріоритетним напрямком є саме використання БПЛА, оскільки пілотовані апарати вимагають суттєвих вкладень порівняно з БПЛА як з точки зору оснащення самого обладнання необхідними додатковими системами, так і з точки зору підготовки персоналу [14].

Аеродіагностика застосовна для вирішення наступних завдань [15]:

- визначення технічного стану ПЛ, виявлення дефектів (рис. 2.1) [16];
- виявлення порушень правил та норм експлуатації ПЛ [17];
- виявлення порушень в охоронних зонах (рис. 2.2) [18].



Рисунок 2.1 - Визначення технічного стану повітряних ліній, виявлення дефектів за допомогою БПЛА (виявлення пошкодженого ізолятора)



Рисунок 2.2 - Виявлення порушення охоронної зони повітряних ліній за допомогою БПЛА

Маневреність БПЛА дозволяє зробити висновок про ефективність використання даного виду техніки для верхового огляду ПЛ. Енергетичні об'єкти, щодо яких виконується огляд із застосуванням БПЛА, можна умовно поділити на три групи:

- 1) детальні: окремі елементи опор, ізолятори, контактні з'єднання, фундаменти тощо.
- 2) групові: безпосередньо повітряні лінії електропередач;
- 3) загальні: охоронна зона ПЛ.

Користувачами БПЛА можуть бути як безпосередньо внутрішні служби організацій, які експлуатують ПЛ, так і сторонні організації, що надають послуги з діагностики об'єктів електромережевого господарства чи виконуючі інженерні пошуки. Крім того, БПЛА можуть застосовуватися в інтересах управляючих компаній та контролюючих органів. Причому йдеться не тільки про об'єкти енергетичних компаній, а й про відомчі електромережі.

Можливі варіанти застосування безпілотних авіаційних систем виглядають так:

- 1) інженерно-технічні працівники, ремонтні бригади можуть бути оснащені мультикоптерами для вирішення локальних завдань у ході чергових та позапланових оглядів, а також при виконанні АВР (автономний верховий

огляд (АВР), виявлення місць пошкоджень повітряних ліній (ПЛ) ЕП, у тому числі на важкодоступних ділянках (сильно перетнута, заболочена місцевість та ін..));

2) комплексна діагностика ПЛ виконується як із застосуванням БПЛА літакового, так і мультироторного типу;

3) разові роботи великого обсягу для завдань проектування, кадастру та інших аналогічних завдань, які виконуються за допомогою БПЛА літакового типу.

Для нестандартних завдань технічне оснащення та методи виконання робіт вибираються виходячи з економічної доцільності та технічної ефективності.

Оскільки БПЛА застосовуються в будь-яких умовах, можливе їх застосування для технічного контролю стану багатьох енергооб'єктів, у тому числі що знаходяться у віддалених районах [19].

Застосування БПЛА як способу контролю за технічним станом будівель, споруд електроенергетики дозволить значно знизити обсяг попередньої інформації для методики підготовки планово-попереджувальних ремонтів.

З метою візуального обстеження БПЛА можуть застосовуватися як при обстеженні наземних споруд, так і водних. Наприклад, нетрадиційні джерела електроенергії – вітрогенератори – можуть розміщуватися на водоймах, площа досягає кількох десятків гектар, а у висоту кожен вітрогенератор може сягати 219 метрів [20]. На сьогоднішній день огляд таких споруд проводиться із застосуванням водного транспорту, що спричиняє великі фінансові витрати, які можливо знизити з застосуванням БПЛА.

Сонячні панелі розміщуються на полях площею кілька сотень гектарів. Великі площі ускладнюють процес огляду та дефектації сонячних панелей [21], у тому числі підйомом пилу від руху транспорту та погіршенням поглинаючої здатності поверхонь сонячних панелей.

Сьогодні на БПЛА можна встановити наступне обладнання [22]: 1) фотообладнання; 2) відеообладнання; 3) тепловізор; 4) ультрафіолетову камеру; 5) GPS-навігатор.

Залежно від цілей та постановки завдання можна вибрати та оснастити БПЛА будь-якою кількістю обладнання, що дозволяє здійснювати контроль, моніторинг та діагностику багатьох об'єктів енергетичного сектору.

Найбільша ефективність діагностики ПЛ за допомогою БПЛА досягається при комплексному підході, коли отримані дані обробляються та аналізуються засобами геоінформаційного програмного забезпечення, а результуюча інформація використовується в системах управління підприємством. Дані аеродіагностики набувають найбільшої ефективності, будучи представленими в геоінформаційних системах та системах управління підприємством. Практично цінний результат дає технологія, що включає безпосередньо технічні засоби (БПЛА, оснащений певним аерознімальним обладнанням), методику виконання робіт, програмно-апаратні засоби обробки, зберігання та подання даних, метрологічне забезпечення, нормативну базу.

Універсальних систем, здатних охопити весь спектр завдань з діагностики ПЛ не існує. Однак правильний вибір технічного рішення є запорукою успішного вирішення завдань зі збору просторових даних про повітряні лінії електропередачі та їх технічний стан. Застосування БПЛА повинне проводитися з дотриманням технології виконання робіт для обраного аерометоду діагностики. Подібних методик поки немає. Найбільша ефективність аеродіагностики ПЛ за допомогою БПЛА досягається при комплексному підході, коли отримані дані обробляються і аналізуються засобами геоінформаційного програмного забезпечення, а результуюча інформація потім використовується у системах управління підприємством.

2.2 Аналіз безпілотних літальних апаратів та обґрунтування вибору БПЛА для процесу моніторингу повітряних ліній електропередач

Оперативний контроль стану ліній електропередачі, а також високовольтних підстанцій, які є невід'ємною частиною системи енергопостачання України, та усунення причин аварійних відключень за допомогою БПЛА виявляється досить ефективним. Ці рішення можуть бути використані для розробки удосконаленої методики моніторингу безпеки об'єктів енергетичної системи України. Для ефективного управління ризиками та підтримки працездатності ліній електропередач, а також високовольтних підстанцій протягом усього періоду експлуатації необхідний постійний моніторинг, технічне обслуговування та ремонт. Проте забезпечити все це не так просто, особливо за умов прицільних атак на об'єкти енергосистеми України.

Сьогодні на зміну традиційним способам моніторингу приходять безпілотні літальні апарати (БПЛА) [23-25]. Вони добре зарекомендували себе на світовому ринку геоінформаційних послуг. Застосування БПЛА для моніторингу магістральних ліній електропередач сприяє підвищенню економічної ефективності. Безпілотники дозволяють вирішити цілу низку завдань:

- 1) моніторинг та оцінка технічного стану ліній електропередач, виявлення пошкоджень;
- 2) обстеження навколишнього середовища навколо ліній електропередач, виявлення обводнених ділянок, корозійно-небезпечних середовищ;
- 3) виявлення сторонніх осіб у зонах, що охороняються;
- 4) контроль аварійних та позаштатних ситуацій, координація дій наземних груп;
- 5) контроль за виконанням будівельних та ремонтних робіт.

В даний час існує безліч різних видів БПЛА: літакового та вертолітного типу, важкі та легкі, що працюють на рідкому паливі та на електриці, великої та

малої дальності [23-25]. Вибір того чи іншої типу безпілотної залежить від характеристики об'єкта дослідження, потреби передачі даних у режимі реального часу і типу даних, визначених поставленим завданням.

БПЛА може розглядатися як самостійний засіб для вирішення багатьох завдань, пов'язаних не тільки з оглядом повітряних ліній ПЛ, але й будівель і споруд, що вимагають підйому на висоту. Одним з критеріїв при виборі БПЛА є встановлене на ньому обладнання, що визначає перелік завдань, що вирішуються в галузі електроенергетики: 1) повітряна діагностика електромережних об'єктів – повітряних ліній електропередач усіх типів, трансформаторних підстанцій, розподільчих пунктів та інших об'єктів; 2) аерообстеження інженерних споруд: технологічних корпусів електростанцій, гребель гідроелектростанцій, вітроенергетичних установок, сонячних станцій; 3) тепловізійне обстеження будівель та споруд.

У світі для моніторингу ЛЕП застосовують БПЛА літакового (рис. 2.3) та мультироторного (рис. 2.4) типів, що відрізняються конструкцією, принципом роботи та призначеннями [23].



Рисунок 2.3 - Основні БПЛА літакового типу, що використовуються для обстеження повітряних ЛЕП



Рисунок 2.4 - Основні БПЛА мультироторного типу, що використовуються для обстеження повітряних ЛЕП.

БПЛА літакового типу відомі також як БПЛА з жорстким крилом. Підйомна сила у них створюється аеродинамічний спосіб за рахунок напору повітря, що набігає на нерухоме крило. Літальні апарати такого типу, як правило, відрізняються великою тривалістю польоту, великою максимальною висотою польоту та високою швидкістю.

Існує безліч різноманітних підтипів БПЛА літакового типу, що різняться формою крила і фюзеляжу.

Як двигуни апаратів літакового типу використовуються тягучі або штовхаючі гвинти, а також імпелери (лопаткові машини, поміщені в циліндричний кожух) або реактивні двигуни. Для апаратів літакового типу зазвичай необхідна злітно-посадкова смуга (ЗПС) або стартові катапульти. Є також літакові БПЛА легкого класу, що запускаються «з руки». При посадці може застосовуватися ЗПС, парашут або спеціальні уловлювачі (троси, сітки, розтяжки).

Злети та посадки традиційних БПЛА літакового типу – процес досить трудомісткий та витратний, що вимагає спеціальних допоміжних засобів (ЗПС, пристроїв запуску та посадки), тому розробники нової техніки все частіше звертаються до нетрадиційних схем літакових БПЛА, що дозволяє створити безаеродромні безпілотні системи – це, перш за все, літальні апарати вертикального зльоту та посадки. На сьогоднішній день існує безліч різновидів таких апаратів. Частина з них – гібриди літаків та гелікоптерів.

Серед мультироторних (вертолітних) систем однією з наймасовіших є мультикоптер. До цієї групи належать БПЛА, що мають більше двох несучих гвинтів. Реактивні моменти врівноважуються за рахунок обертання гвинтів, що несуть, попарно в різні сторони або нахилу вектора тяги кожного гвинта в потрібному напрямку. Безпілотні мультикоптери, як правило, відносяться до класам міні- та мікро-БПЛА.

Коптери можуть працювати в режимі зависання та наближатися до об'єкта обстеження ближче, ніж літаки (деякі види зйомки в ручному режимі керування можуть бути виконані з відстані 5 м). Основне призначення

мультикоптерів – фото- та відеозйомка різних об'єктів, тому вони, як правило, оснащуються керованими підвісами для камер. Мультикоптери також використовуються як пристрої для оперативного моніторингу ЛЕП.

Головний недолік коптера - мала тривалість польоту, що становить не більше 1-1,5 годин. Горизонтальне переміщення коптера на швидкостях понад 15 км/год призводить до додаткових витрат енергії та суттєво зменшує тривалість польоту. Таким чином, радіус застосування коптерів знаходиться у межах 0 – 15 км. Ефективне використання можливе в радіусі не більше 1 км, оскільки необхідно мати достатній запас часу для зйомки об'єкта. Тому головним завданням для мультикоптерів (у тому числі і для інших БПЛА) є забезпечення автономної роботи комплексу моніторингу стану ЛЕП протягом тривалого часу з малим електроспоживанням, і в той же час з можливістю підзарядки його бортових акумуляторів без участі людини.

Недоліком є також сильний вплив метеорологічних умов на польоти БПЛА поблизу ЛЕП. За наявності вітру дроти та опори ЛЕП створюють турбулентні потоки, які є суттєвими для малорозмірних БПЛА. У поєднанні з електромагнітними перешкодами, які погіршують якість показань датчиків навігаційної системи БПЛА, такі потоки можуть призвести до втрати стійкості апарату в повітрі та його втрати.

Використання мультикоптера лише для закріплення вимірювального блоку на грозотросі частково вирішує проблему малого часу автономної роботи, оскільки суттєво скорочується час перебування БПЛА у повітрі. Також у цьому разі потенційно можливо уникнути негативного впливу турбулентностей за рахунок зльоту на великій відстані від ЛЕП та зниження на неї зверху. Проте останнє можливе лише в польових рівнинних умовах. У стиснених умовах, наприклад, на вузькій лісовій просіці БПЛА доведеться злітати в безпосередній близькості від дротів і дерев, верхівки яких також створюють турбулентні потоки. Крім того, необхідність періодичної посадки мультикоптера на землю вимагає постійної наявності людини в зоні її роботи для запобігання крадіжці або вандалізму щодо БПЛА.

Нараду з недоліками, БПЛА мультироторного типу має ряд переваг: 1) можливість «висіти» над об'єктом; 2) можливість вертикального зльоту для завдань з обмеженою злітно-посадковою площею; 3) можливість робити знімки фронтальних об'єктів.

Такі переваги дають мультироторним безпілотним літальним апаратам можливість виконувати складніші завдання, з моніторингу об'єктів, порівняно з БПЛА літакового типу. Використання БПЛА літакового типу для верхового оглядів ЛЕП буде неефективним, оскільки висока швидкість польоту не дозволить виконати чітку та якісну зйомку. Краще використовувати безпілотні літальні апарати мультироторного типу, які дозволяють зависати над об'єктом. Під час виконання верхового огляду за допомогою БПЛА можна використовувати різне навісне обладнання. Застосування фотокамери на БПЛА дасть можливість отримувати якісні знімки, на яких можна буде чітко розглянути недоліки повітряних ліній електропередач. Також, БПЛА можна застосувати для тепловізійного обстеження повітряних ліній електропередач, використавши як навісне обладнання тепловізор [26]. За допомогою такого пристрою можна буде виявляти багато неполадок, пов'язаних із зайвим виділенням тепла: злами та обриви проводів, перевантажені та дефектні вузли ліній електропередач та інші несправності в роботі.

Звідси випливає, що необхідно застосовувати БПЛА мультироторного типу з навісним обладнанням у вигляді фото- відеокамери або тепловізора. БПЛА пролітатиме вздовж ліній електропередач, а також з усіх боків опор, виконуючи фото- та відеозйомку. Оператор БПЛА зможе керувати навісною камерою під час польоту, повертаючи її у горизонтальній та вертикальній площинах, маючи можливість переглядати зроблені зображення.

При виборі безпілотного літального апарату для обстеження повітряних ліній електропередач необхідно враховувати такі фактори:

- 1) висота підйому;
- 2) можливість зависання над об'єктом;
- 3) високий рівень маневреності, керованості;

4) стійкість до мінімальних поривів вітру;

5) низький рівень тряски під час польоту, для забезпечення якісної роботи навісної апаратури.

На підставі зазначених факторів був зроблений вибір БПЛА мультироторного типу, представлених у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння характеристик БПЛА мультироторного типу

Параметри	DJI Mavic Pro 2 [27]	DJI Phantom 4 pro V2.0 [28]
Зовнішній вигляд		
Розміри за діагоналлю	354 мм	350 мм
Час польоту	27 хв.	30 хв.
Швидкість польоту	72 км/год	72 км/год
Максимальна висота польоту над землею	6000 м	6000 м
Максимальна дальність польоту	7 км	7 км
Гранична швидкість вітру, не більше м/с	8-10 м/с	10 м/с
Діапазон робочих температур	0°...+40°	0°...+40°
Ціна, грн	76800	66599
Акумулятор пульта управління	3950 мАч	6000 мАч
Системні вимоги програми на пульті управління	iOS 9.0 та вище, Android 4.4 та вище	iOS 9.0 та вище, Android 4.4 та вище

Порівняльна оцінка характеристик БПЛА мультироторного типу для вирішення завдань моніторингу повітряних ЛЕП проводилася за такими характеристиками:

1) льотно-технічні характеристики БПЛА: швидкість польоту, максимальна дальність польоту, максимальна тривалість польоту, максимальна висота польоту над землею,

2) характеристики БПЛА та силової установки: розміри за діагоналлю, тип двигуна та його характеристики (потужність, ресурс, витрата та запас палива), максимальні вага корисного навантаження та злітна маса;

3) метеорологічні умови застосування: гранична швидкість вітру; діапазон робочих температур; можливість застосування в небезпечних умовах різних явищ погоди;

4) експлуатаційні характеристики: склад комплексу, час розгортання комплексу, тип зльоту та посадки, злітно-посадкова дистанція;

5) додаткові відомості: орієнтовна ціна, можливі цільові навантаження, тип засобів зв'язку, системні вимоги програми на пульті управління, засоби та можливості обробки та передачі інформації.

Виходячи з даних таблиці, можна дійти висновку, що обидва квадрокоптера здатні вирішувати завдання, пов'язані з верховим оглядом ліній електропередач. Обидва варіанти однаково компактні, мають гарну маневреність, витримують невеликі пориви вітру та мають однаковий діапазон робочих температур. Час польоту на одному акумуляторі за заданими характеристиками трохи більше моделі Phantom 4 pro V2.0. Цей фактор не є значним, тому що передбачається використання в роботі кількох знімних акумуляторів. Найкраще виглядає модель Phantom 4 pro V2.0 щодо об'єму акумулятора для пульта управління, який не є знімним. Тому модель квадрокоптера DJI Phantom 4 pro V2.0 є найкращим варіантом.

Даний вид БПЛА (DJI Phantom 4 pro V2.0) може бути задіяний як додаткове обладнання наземних бригад і використовуватися для обстеження окремих важкодоступних опор та прольотів. Суть моніторингу ЛЕП із

застосуванням даного пристрою полягає у обльоті найближчої від оператора безпілотної опори ЛЕП із зависанням біля точок підвісу гірлянд ізоляторів та грозотросу. Використовуючи коптер, можна провести огляд найближчої опори без відключень ПЛ і залучення підйомника.

2.3 Вплив дестабілізуючих та складних умов середовища на ефективну роботу БПЛА

Вибраний нами тип БПЛА (DJI Phantom 4 pro V2.0) не може здійснювати роботу будь-якого дня через погодні обмеження: опади, вітер зі швидкістю вище 10 м/с, туман. Температура навколишнього середовища для роботи БПЛА знаходиться в межах від -30°C до $+40^{\circ}\text{C}$ [15]. Щоб оцінити кількість днів, коли БПЛА може працювати з урахуванням його характеристик, було проаналізовано погодні дані за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року, представлені сайтом <https://www.meteoblue.com> для Кропивницького [29] (рис. 2.5-2.7).

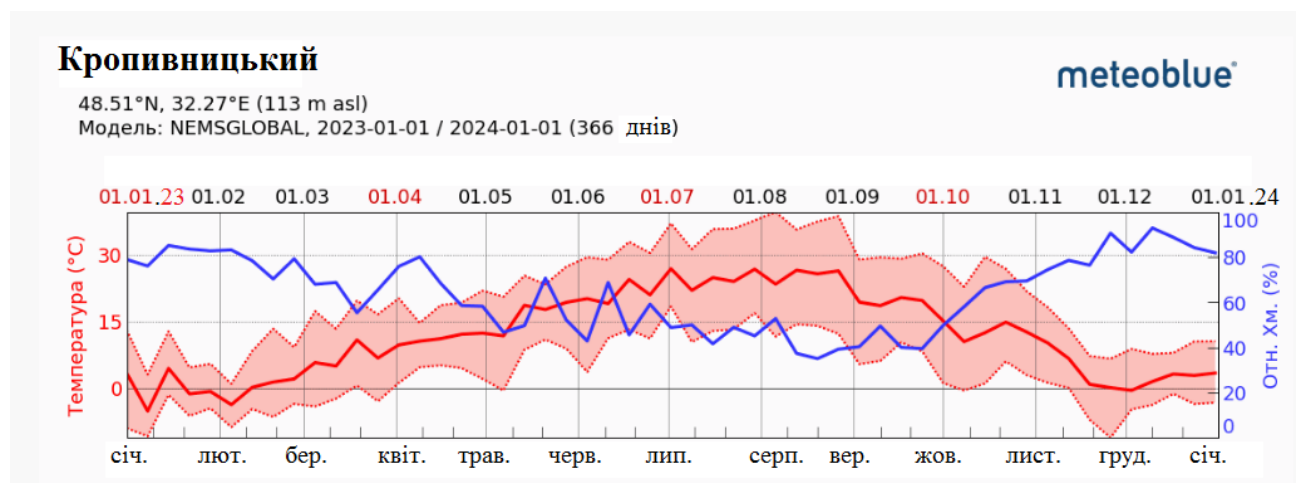


Рисунок 2.5 – Графіки коливання температури ($^{\circ}\text{C}$) та відносної вологості повітря (%) для міста Кропивницький за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року (дані сайту <https://www.meteoblue.com>)

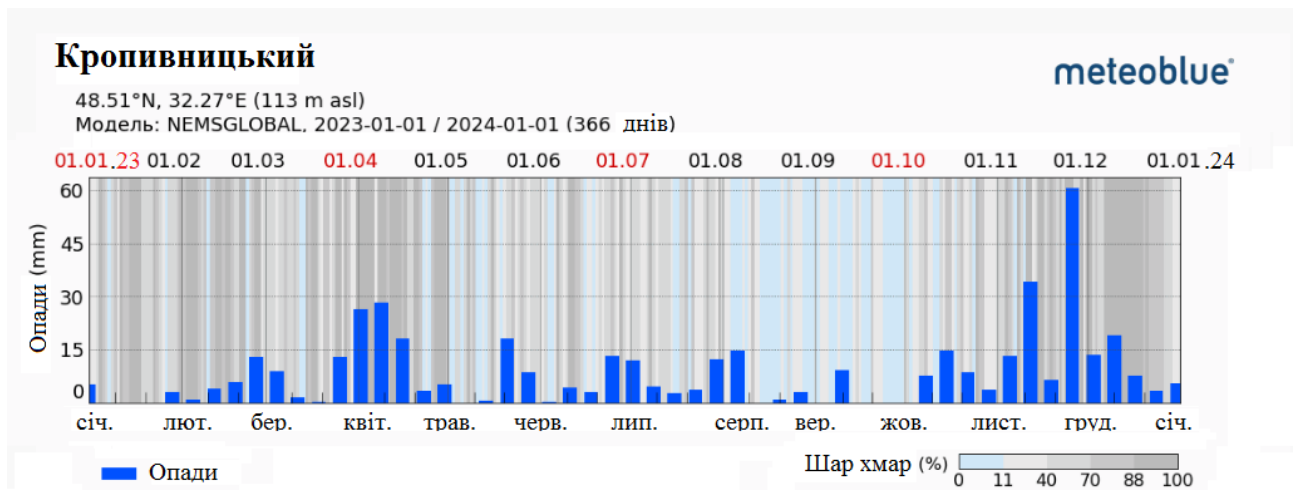


Рисунок 2.6 – Графіки коливання кількості опадів (мм) для міста Кропивницький за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року (дані сайту <https://www.meteobluе.com>)

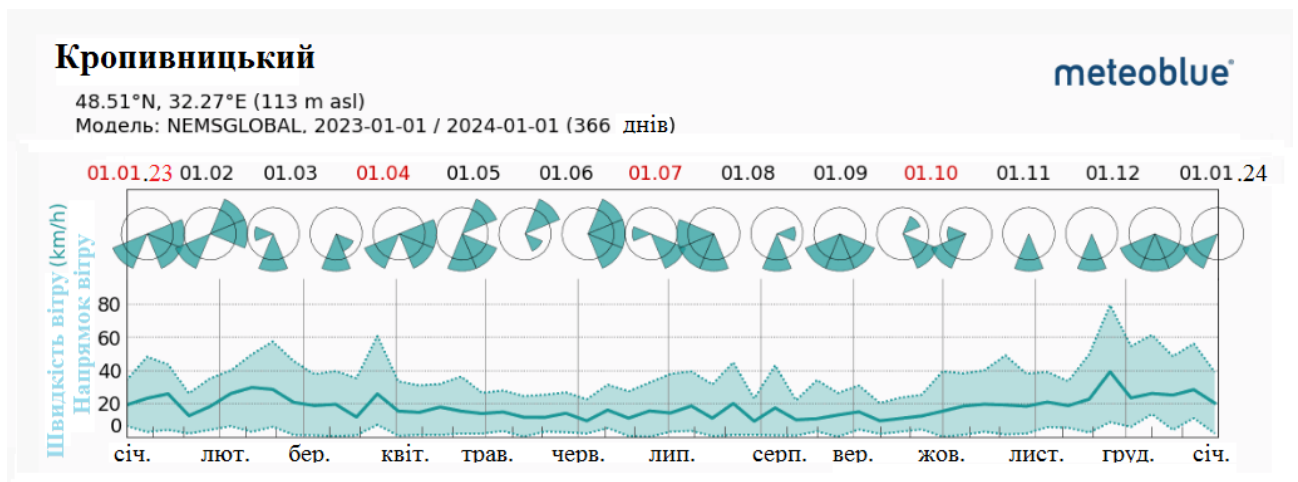


Рисунок 2.7 – Графіки коливання швидкості вітру (км/год), напрямку вітру для міста Кропивницький за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року (дані сайту <https://www.meteobluе.com>)

Діаграми архівних даних про погоду поділені на три графіки:

- 1) Температура повітря, у тому числі відносна вологість повітря,
- 2) кількість опадів, хмарність (сірий фон) і сонячні години (жовтий фон).
 (чим темніший сірий фон, тим щільніший шар хмар).

3) швидкість вітру та його напрям (у градусах 0° = північ, 90° = схід, 180° = південь, 270° = захід). В архівній метеограмі пурпурові точки представляли напрямок вітру, як це позначено на правій вісі.

В результаті обробки даних для міста Кропивницького Кіровоградської області було виявлено, що кількість днів з температурами, що виходять з діапазону $[-30; +40^{\circ}\text{C}]$ за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року становила 5 днів, а середня кількість днів, коли швидкість вітру перевищувала 10 м/с (~ 28 км/год), становила за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року 15 (без урахування короточасних поривів вітру). У середньому у місті Кропивницькому Кіровоградської області кількість днів на рік з опадами була за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року – 42 (без урахування хмарних днів із короточасними опадами).

З урахуванням вищесказаного можна дійти висновку, що кількість придатних для експлуатації БПЛА днів у році у межах міста Кропивницький Кіровоградської області становить 238, виходячи зі спрощень, що в один день зустрічається лише одна умова, що обмежує експлуатацію. Це показує, що кліматичні фактори практично не обмежують застосування обраного нами БПЛА для кліматичних умов міста Кропивницький Кіровоградської області.

Для огляду однієї опори необхідно виконати від чотирьох до шести знімків із різних ракурсів. Передбачається, що це триватиме близько чотирьох хвилин. Також дві хвилини знадобиться, щоб дійти наступної опори. Прийmemo середню відстань прольоту між опорами за п'ятдесят метрів і порахуємо середню довжину ліній електропередач, яку здатний оглядати оператор БПЛА за такою формулою:

$$S = \frac{60}{t_0 + t_1} \cdot T \cdot L,$$

де S – загальна довжина оглянутих ліній на день,

t_0 – час огляду однієї опори,

t_1 – час проходження до наступної опори,

T – кількість робочих годин на добу,

L – середня довжина прольоту між двома опорами.

Виходячи з наших даних, отримуємо, що в день ми можемо оглядати близько 4 км ліній електропередач. Враховуючи середню кількість сприятливих

для польоту днів у році (238), ми отримуємо, що за рік одним безпілотним літальним апаратам можливо оглядати близько 950 км ліній електропередач.

2.4 Аналіз існуючих систем моніторингу та діагностики повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА

Використання БПЛА дозволяє здійснювати моніторинг територій, де розташовуються електромережні об'єкти компанії, причому цей моніторинг може проводитись у світлий час доби. Персонал мережевих компаній отримує можливість ефективно та об'єктивно давати оцінку стану обладнання повітряних ЛЕП, опор тощо, прогнозувати вплив природних факторів на стан обладнання, визначати дефекти, відхилення від норм проводів та ізоляції, обстежити території для прокладання нових маршрутів ЛЕП. Такий моніторинг розвинутий у країнах Європи [30], Індії [31], Китаї [32], Бразилії [33] та інших країнах. При цьому здійснюється контроль стану ЛЕП шляхом її оптичної реєстрації, реєстрації за допомогою тепловізорів, а також реєстрації часткових розрядів, що мають місце в ізоляції.

Моніторинг ЛЕП за допомогою БПЛА є більш безпечним, тому що політ здійснюється на малих висотах та без екіпажу на борту. Крім того, існує ще низка переваг: можливість зйомки у складних метеоумовах, отримання повної та документованої інформації, тобто. ЛЕП обстежується на всій протяжності зйомка здійснюється з різних ракурсів, а отримані знімки мають високу роздільну здатність. Схему моніторингу ЛЕП представлено на рис. 2.8.

Суть запропонованого способу полягає у наступному. Моніторинг технічного стану елементів ПЛ виробляють дистанційно за допомогою безпілотного літального апарату, оснащеного пристроями для отримання як візуальної, так і апаратної інформації, пристроєм для передачі інформації на диспетчерський пункт, а ПЛ оснащується пристроями для передачі апаратної або візуальної інформації про свій стан на БПЛА.

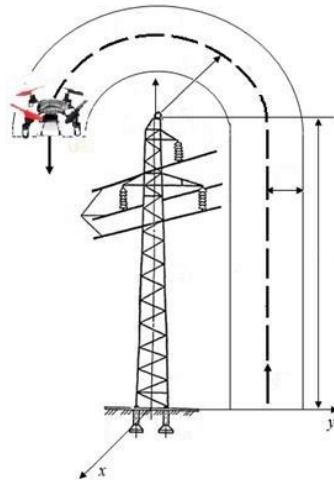


Рисунок 2.8 - Схема моніторингу ЛЕП за допомогою БПЛА мультироторного типу

В даний час існують такі *види робіт, які застосовуються для повітряних ЛЕ*:

- планова діагностика – обліт повітряних ліній; спостереження та фотографування, як на малих, так і на середніх висотах; проведення інспекції повітряних ліній та охоронної зони; виявлення існуючих дефектів та різних порушень; визначення просторових (3D) порушень габаритів просіки та проводів;

- аварійно-відновлювальні роботи – обліт повітряних ліній на середніх висотах за різних метеорологічних умов; при обльоті в нічний час доби застосовуються фотоспалахи або тепловізори;

- картографічні роботи – розробка цифрових топографічних та кадастрових планів; створення тривимірних моделей місцевості та ЛЕ; супровід робіт, пов'язаних з будівництвом та реконструкцією повітряних ЛЕ.

Слід зазначити, що *моніторинг і діагностика повинні відображати наступне*:

- дефекти опор;
- відсутність, відрив та деформацію елементів металевих опор;
- викришування бетону, а також деформацію залізобетонних опор (ЗО);
- відхилення опор від вертикалі;

- розворот, деформація траверсів на ЗО;
- відсутність натягу внутрішніх стяжок та тросових розтяжок;
- падіння та пошкодження опор;
- дефекти дроту, а також лінійної та зчіпної арматури;
- руйнування елементів скляних та порцелянових ізоляторів;
- відсутність гасників вібрації та вантажів; втрати працездатності несучого троса; усунення віброгасників уздовж проводів щодо наявного проектного положення;
- повна відсутність та неправильне розташування з'єднувачів проводів;
- злами та відриви променів дистанційних розпірок між проводами розщепленої фази;
- обрив проводів;
- дефекти на трасі;
- наявність рослинності, яка є вкрай небезпечною для експлуатації повітряних ЛЕ;
- падіння дерев на дроти та опори;
- наявність деревно-чагарникової рослинності на території охоронної зони;
- наявність різних будов та інших об'єктів, розташованих в охоронній зоні;
- перетин з природними та антропогенними об'єктами;
- небезпечні явища (наприклад, підтоплення).

Процес роботи безпілотних літальних апаратів. У процесі роботи БПЛА можна зрозуміти, з яких саме елементів складається моніторинг, виявлення несправностей та повернення обладнання до його нормального робочого стану у разі виникнення будь-якої несправності. Після того, як буде виявлено наявність окремої несправності, оперативно-виїзна бригада направляється на огляд лінії для того, щоб знайти проблемне місце [34].

Враховуючи, що повітряні ЛЕ є протяжними, а відстань між населеними пунктами, часто сягає кількох десятків кілометрів, то об'їзд подібної високовольтної ЛЕ може зайняти чимало годин.

Пересування спеціальної бригади може ускладнюватись як бездоріжжям, так і перебуванням повітряних ЛЕ на важкодоступних ділянках (наприклад, болото). У зв'язку з цим пошук місця ушкодження ЛЕ може займати значно більше часу.

Саме завдяки застосуванню спеціального обладнання для локалізації ушкодження час, необхідний для повернення повітряних ЛЕ в робочий стан, дещо скорочується. Скорочення часу досягається за допомогою його мінімізації на етапах, які досить тривалі. На рис. 2.9 вони виділено жовтим кольором.

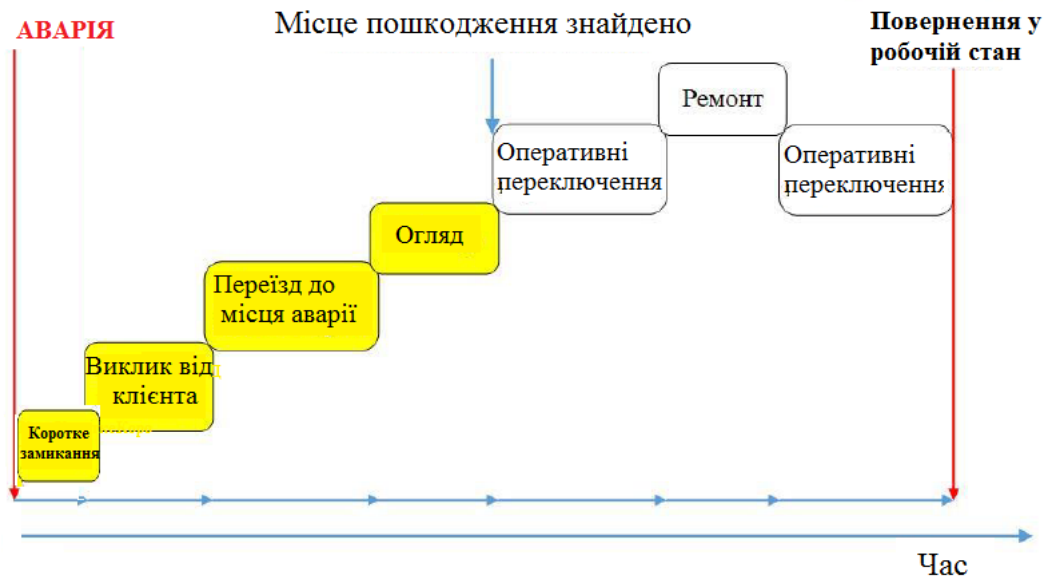


Рисунок 2.9 - Етапи відновлення працездатності ЛЕП після аварії, які можна прискорити за допомогою БПЛА

Спеціальне обладнання, яке дозволяє скоротити час локалізації ушкоджень включає:

1. Індикатори струму короткого замикання для ПЛ - основний та найефективніший метод виявлення та локалізації короткого замикання (КЗ);
2. БПЛА - новий допоміжний метод обстеження, який можна використовувати спільно з індикаторами короткого замикання (ІКЗ).

Індикатор короткого замикання (ІКЗ) - пристрій, що визначає шлях протікання струму короткого замикання та дозволяє швидко виконати локалізацію пошкодженої ділянки електричної мережі середньої або високої напруги (до 220 кВ включно).

Індикатори встановлюються на дроти ПЛ по одному на кожен фазу. ІКЗ можуть працювати в мережах з різною структурою: радіальна або кільцева мережі, а також у мережах з різними режимами роботи нейтралі, у тому числі ізольована нейтраль.

БПЛА являє собою новий допоміжний метод обстеження. Вимогами, що висуваються до показників, є:

- безпека та полегшення праці працюючих співробітників;
- висока точність одержуваних результатів і досить великий обсяг даних;
- можливість проводити обстеження на території важкопрохідних ділянок;
- суттєва економія витрат на виконання досліджуваних робіт.

Область застосування безпілотних літальних апаратів при обстеженні енергооб'єктів [35]:

1) Візуальний контроль БПЛА суттєво спрощують та прискорюють проведення технічного обстеження ЛЕ та електростанцій. Знімки, що здійснюються з повітря, надають можливість виявити переважну більшість дефектів, що виникають, включаючи: падіння та пошкодження опор; порушення цілісності опор та відхилення їх від вертикалі; обрив та провисання проводів ЛЕ; виявлення існуючих проблемних зон з навислими на дротах чагарниками або деревами, що на них обвалилися; наявність вкрай підозрілих об'єктів на території охоронюваної зони за вкрай невеликий часовий проміжок.

За результатами проведеної зйомки формується відповідний звіт, а також проводиться оцінка фактичного стану об'єктів, що досліджуються, а крім цього складається план робіт, спрямований на подальше обслуговування та ремонт. За тієї умови, що діагностика здійснюється на постійній основі, всі отримані дані підлягають завантаженню в геоінформаційну систему, що надає

можливість провести ретроспективний аналіз та з максимальною точністю визначити причинно-наслідковий зв'язок.

2) Тепловізійний контроль. Тепловізійне обстеження є одним з найбільш важливих і значущих елементів профілактичних робіт, що сприяє наданню гарантій у безвідмовній роботі об'єкта електроенергетики за допомогою виявлення несправностей ще на початковому етапі [36]. Провівши аналіз всіх отриманих даних, можна провести плановий ремонт, що дозволить запобігти виникненню у майбутньому великих аварій. Після моніторингу згадана вище інформація відображається у вигляді різних кольорів на дисплеї програмного забезпечення або спеціальних додатків. Тепловізійна зйомка сприяє ідентифікації ненадійних контактів та таких ділянок, які перегріваються в кожній ЛЕ дещо швидше, на відміну від обходу, що проводиться з візуальним оглядом. Крім цього, варто відзначити, що це унікальна можливість своєчасно виявляти джерела втрат енергії в мережі. Розглянутий спосіб є набагато безпечніше на відміну від фізичного огляду та пошуку пошкоджених елементів.

3) 3D моделювання об'єктів енергетики. Використання спеціального програмного забезпечення надає можливість перетворити дані, що отримуються з БПЛА на цифрові 3D-моделі ЛЕ, електростанцій та інших об'єктів електромережі, що використовуються для подальшого дослідження фахівцями та прийняття розумних та зважених рішень [37].

Вбудовані інструменти забезпечують унікальну можливість вимірювати лінійну довжину, площу та обсяг, а також проводити оцінку масштабу планованих робіт. Для формування звітів та суттєвого полегшення комунікації всередині команди передбачена можливість додавання анотації та коментарів, а також можливість редагувати різні мітки та виконувати інші необхідні дії, скоротити обсяг трудомісткого ручного перегляду фотоматеріалів, а крім того, підвищити практичну користь від результату, кількості та якості всієї отримуваної аналітичної інформації.

Для реалізації вищезазначеного, вся інформація в обов'язковому порядку має потрапити до геоінформаційної системи (ГІС). Ця система надає

можливість об'єднати всі результати проведених обстежень у єдиній базі даних із відображенням об'єктів, які було обстежено (з безпосередньою прив'язкою до місцевості).

До основних можливостей ГІС належать такі:

- аналіз обстежуваної території;
- оперативний доступ до результатів обстеження;
- оперативний доступ до фотографічних зображень усіх виявлених дефектів;
- оперативний доступ до 3D-моделей місцевості та ЛЕ.

Слід наголосити, що технологічний ланцюжок має наступну послідовність: БПЛА здійснює зйомку повітряної ЛЕ; зроблені знімки з координатами та телеметричними даними автопілота завантажуються у фотограмметричне ПЗ; у фотограмметричному ПЗ зображення ортотрансформуються та «зшиваються»; все завантажується в ГІС; у ГІС проводиться аналіз усіх отриманих даних.

За найбільш сприятливих умов на день з одного БПЛА можна зняти близько 200 км ЛЕ. Отже, ефективно вирішується проблема заміни важковитратних польових робіт на послідовність автоматизованих операцій, а крім цього з'являється унікальна можливість візуальної оцінки даних у тривимірному зображенні, і фахівці виходять всі матеріали в зручній формі.

Таким чином, існуючі сьогодні технічні засоби БПЛА та технології обробки геопросторових даних дозволяють вирішувати досить широке коло завдань при проектуванні та експлуатації ЛЕ та інших об'єктів електроенергетики. Використання БПЛА при моніторингу стану повітряних ЛЕ в рамках великої регіональної енергетичної компанії цілком може дати суттєву економію коштів. Застосування БПЛА є особливо ефективним при їх використанні у важкодоступних районах та при складному рельєфі місцевості.

Застосування БПЛА надає можливість підвищити оперативність моніторингу та одночасно зменшити терміни проведення обстежень та необхідних ремонтно-профілактичних робіт.

У безпосередній залежності від комплектації сенсорів на БПЛА та спеціалізованого ПЗ можливе одночасне отримання розширеного обсягу даних про реальний стан об'єктів електроенергетики та параметрів, а також ризиків у межах охоронних зон.

2.5 Стандартний алгоритм плану аеромоніторингу енергетичних об'єктів за допомогою БПЛА

Основною передумовою для застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та різних типів (вертольотного та літакового) як засіб проведення повітряного моніторингу енергетичних об'єктів є можливість інтеграції БПЛА з різного виду апаратурою корисного навантаження (КН), до яких відносяться:

- гіростабілізовані відеокамери, які мають можливість передачі зображення в онлайн-режимі і дозволяють отримувати інформацію оперативно, однак вони мають малу роздільну здатність для дешифрування великої кількості порушень і мають обмежений радіус застосування;

- фотоапарати, що дозволяють виконувати аерофотозйомку з високою роздільною здатністю (у кілька разів вище, ніж у відеокамер) та можуть бути використані для дешифрування більшості порушень та дефектів елементів енергетичних об'єктів (крім дефектів, які в принципі не можуть бути виявлені у видимій частині спектрального діапазону); така інформація записується безпосередньо на борту та може бути проаналізована тільки після посадки БПЛА;

- тепловізори, які дозволяють отримувати дані про температуру обстежуваних енергетичних об'єктів та можуть бути використані для виявлення місць підвищеного нагріву або перегріву, що свідчить про несправність енергетичного обладнання. Застосовувані на БПЛА тепловізори мають досить високі показники чутливості, але при цьому мають невисоку роздільну здатність матриць;

- ультрафіолетові камери, що дозволяють отримувати дані про наявність коронних розрядів або поверхневої розрядної активності, які свідчать про

забруднення ізоляторів або порушення цілісності, пошкодження грозозахисного троса тощо. Обстеження ультрафіолетовими камерами за допомогою БПЛА можуть бути ефективними у певних випадках [38].

Верховий огляд ЛЕП за допомогою БПЛА використовується відносно недавно, але даний спосіб вже знайшов застосування у багатьох енергетичних компаніях і розглядається як перспективний для підприємств інших секторів, оскільки має ряд переваг щодо інших способів огляду, наприклад, за допомогою вежі. Перевагами верхового огляду за допомогою БПЛА є: зменшення кількості обслуговуючого персоналу, що бере участь у огляді енергетичного об'єкта одного фахівця; зменшення термінів та тривалості обстеження за наявності достатньої кількості елементів живлення або можливості зарядки, проведення огляду об'єкта з допомогою БПЛА значно скорочує час обстеження; не потрібне оперативне відключення або перемикання лінії електропередачі, що обстежується, що необхідно при огляді з використанням вишки з метою забезпечення для безпеки співробітників, які виконують огляд; можливість формування фото- та відеоархіву з матеріалами високої якості; робота у важкодоступних місцях, у місцях перетину з річками, озерами, ярами, височинами, важкопрохідними рельєфами місцевості; мінімізація ризиків нещасних випадків та травматизму персоналу [39].

Фотознімки та відеофайли, виконані з використанням БПЛА, дозволяють виявляти практично всі можливі дефекти та порушення. Наприклад, такі дефекти опор, як падіння або пошкодження, відхилення, деформація, руйнування, розворот і загин траверс на залізобетонних опорах, деформація та руйнування поверхневого шару залізобетонних опор, порушення цілісності конструкції металевих опор. Також дефекти проводів, такі, як обрив проводів, руйнування та втрата елементів скляних та фарфорових ізоляторів, відсутність гасників вібрації та вантажів, втрата працездатності несучого тросика, зміщення віброгасників уздовж проводів щодо проектного положення, відсутність та неправильне розташування з'єднувачів проводів, злами, відриви променів дистанційних розпірок між проводами розщепленої фази [40].

Однак при виконанні цього дослідження виявлено головну проблему застосування БПЛА для виконання верхових оглядів енергетичних об'єктів АПК, у тому числі ліній електропередачі, який полягає у юридичних обмеженнях використання повітряного простору.

Затверджено правила обліку безпілотних цивільних повітряних суден, що зобов'язує реєструвати безпілотні літальні апарати перед початком їх експлуатації. Крім цього, багато енергетичних об'єктів можуть перебувати в заборонених зонах для польотів на БПЛА. Для проведення верхового огляду у таких місцях необхідно отримувати додатковий дозвіл та повідомляти місцеву службу забезпечення польотів про план польоту [5].

При експлуатації ліній електропередач відбувається знос елементів повітряних ліній, а також виникають дефекти і пошкодження на трасах повітряних ліній. Також внаслідок зростання деревно-чагарникової рослинності в межах охоронних зон ЛЕП можливе наближення на неприпустиму відстань до проводів повітряних ліній стовбурів та гілок дерев, що може призвести до технологічних порушень, урвищ, аварій.

Для своєчасного усунення та профілактики зазначених загроз та вживання превентивних заходів на повітряних лініях виконуються щорічні огляди повітряних ліній, діагностика елементів несучих конструкцій, а також систематичні моніторинги у пожежонебезпечний, грозовий періоди та в період льодоутворення в зимовий та перехідний періоди року [41].

При аварійних відключеннях повітряних ліній виконуються огляди повітряних ліній, при яких визначаються місце та обсяги пошкоджень, та час виявлення місця аварії є одним із вирішальних факторів. Заміна частини оглядів чергових та позачергових, у тому числі післяаварійних відключень ПЛ, на огляд із застосуванням безпілотних літальних апаратів дозволять скоротити час виявлення причин відключення ПЛ. При цьому визначається та оцінюється сукупність даних, отриманих від фото-, відео-, тепловізійної техніки, встановленої на БПЛА, через що моніторинг повітряних ліній засобами БПЛА є актуальним завданням.

Аеромоніторинг відповідно зі стандартним алгоритмом за планом виконання робіт, містить таку інформацію:

- мета та завдання виконання польотів;
- часові рамки виконання польотів;
- номер борту безпілотного повітряного судна;
- склад та комплектація апаратури корисного навантаження;
- необхідна висота та швидкість польоту, необхідна для отримання якісних фотоданих;
- маршрутизація руху безпілотного повітряного судна;
- контактні дані оператора безпілотного літального апарату.

Після аналізу повітряної та наземної обстановки в районі передбачуваного польоту відбувається погодження польоту та отримання відповідних дозволів.

Таким чином, внаслідок проведення аналізу було виявлено доцільність використання БПЛА певного типу для верхового огляду повітряних ЛЕП. Для виконання такого завдання повинен використовуватися квадрокоптер фірми DJI, модель Phantom 4 Pro, оскільки він має усі відповідні характеристики для виконання такої роботи. За його допомогою можна буде отримувати високоякісні знімки повітряних ЛЕП та опор. Також знімки матимуть прив'язку до земних координат, що дозволить контролювати виконання робіт. Також було проаналізовано погодні умови в місті Кропивницький Кіровоградської області щодо можливості виконання робіт БПЛА. Було з'ясовано, що в середньому, у 2023 році кількість днів, які дозволяли використовувати БПЛА становило 238. Економічний ефект використання БПЛА при верхових оглядах ліній електропередачі очікується за рахунок наступних чинників: зменшення кількості одиниць персоналу під час проведення огляду; виключення збитків при відключенні лінії та оповіщення абонентів про відключення під час проведення огляду; покращення якості огляду дозволить виявляти дефекти на ранній стадії та запобігати непередбаченому відключенню лінії електропередач.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА У ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ УМОВАХ

3.1 Нові підходи до удосконалення існуючих методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА

Завдання, що вирішуються за допомогою БПЛА для електроенергетики, такі: оцінка стану ПЛ; аерофотозйомка ЛЕП, опор та ліній електропередачі; вимірювання стріли провісу проводів; тепловізійний контроль елементів ЛЕП; контроль допустимої висоти дерев у зоні проходження високовольтних ліній за допомогою лазерного сканування; ідентифікація будівельних майданчиків; зйомка нових маршрутів ЛЕП, прилеглої території та створення цифрової моделі рельєфу; пошук та аналіз пошкоджень, аварій тощо. Дані завдання вирішуються за допомогою обладнання, що встановлюється на БПЛА (відеокамери, фотоапарати, тепловізори тощо).

Найпоширеніший метод виявлення несправностей ЛЕП заснований на візуальному огляді, який може проводитися за допомогою вертольота або повнопривідного автомобіля, на додаток до примітивних методів, заснованих на техніці розділення навантаження та ідентифікації несправностей [42], [43]. Візуальний огляд може мати кілька цілей, включаючи термографічне виявлення пошкоджень за допомогою інфрачервоних камер, візуальний огляд лінії за допомогою відеокамер і виявлення пошкоджень ізолятора за допомогою ультрафіолетових камер. Зокрема, ці методи пов'язані з ризиком безпеки для експлуатаційних бригад. Традиційні методи виявлення помилок розташування збоїв роботи ЛЕП часто не є економічно вигідним і не можуть забезпечити якість і надійність мережі з часом. Отже, існує тісний зв'язок між часом, необхідним для визначення несправностей, і стратегією технічного обслуговування, яка має вирішальне значення для вартості. Основними обмеженнями цих методів перевірки вважаються висока вартість технічного

обслуговування, довгострокове пошкодження високовольтного обладнання, ручний процес і трудомісткість.

БПЛА забезпечують безпечний спосіб наближення датчиків до ЛЕП та пов'язаних з ними компонентів, не зупиняючи обладнання під час перевірки, а також зменшують експлуатаційні витрати та ризики (рис. 3.1).

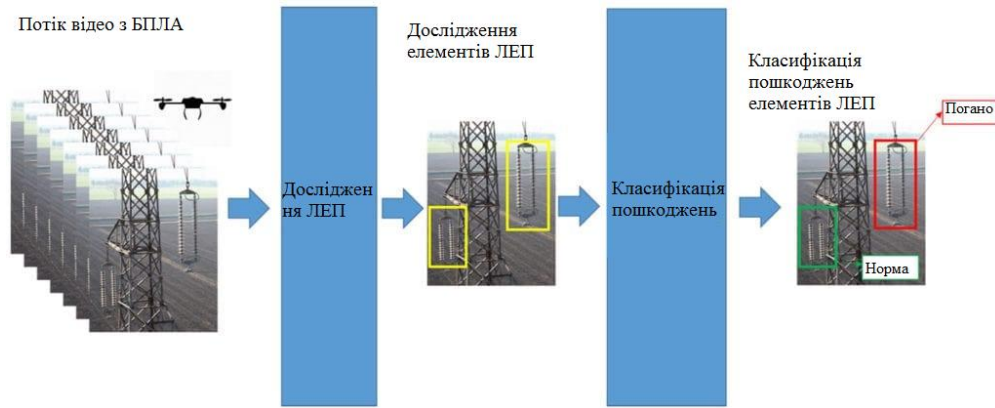


Рисунок 3.1 - Схема виявлення та класифікації пошкоджень об'єктів на ізоляторах ЛЕП за допомогою БПЛА [44]

Пошкодження ЛЕП мають більш високу температуру ніж інші частини веж, і їх можна виявити як *гарячі точки в теплових зображеннях*. Це використовують для покращення можливостей інспекційних систем ЛЕП на базі БПЛА, щоб визначити *гарячі точки* в технологічному проводі.

Розроблено *методи класифікації ізоляторів оптичного відеопотоку БПЛА та виявлення гарячих точок разом із лініями електропередач за комбінуваннями видимими та інфрачервоними зображеннями* [45] (рис. 3.2).

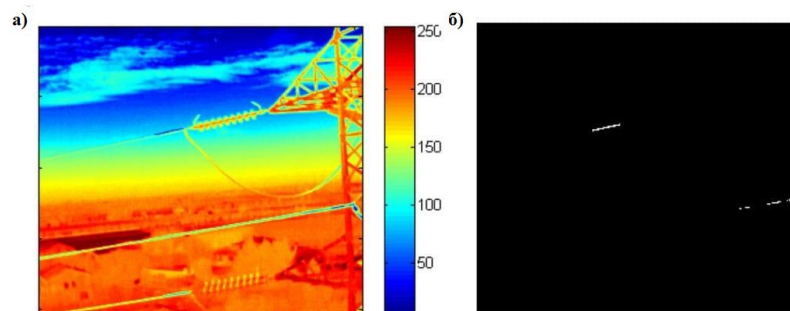


Рисунок 3.2 - а) кольорова карта ІЧ-зображення енергетичного об'єкту з аномальними ділянками, б) отримана гаряча точка в ЛЕП - після виявлення силових ліній на видимому зображенні порогове значення на основі гістограми на зареєстрованому ІЧ-зображенні дає очікувані помилки [45]

Для виділення очікуваних несправностей (тобто гарячих точок) або пошкоджених компонентів електричної інфраструктури (тобто пошкоджених ізоляторів) використовуються найсучасніші методи комп'ютерного зору. Інфрачервоне зображення, яке є інваріантним до великих масштабів і змін освітленості в реальному робочому середовищі, підтримує ідентифікацію несправностей в лініях електропередачі; тоді як нейронна мережа адаптована та навчена виявляти та класифікувати ізолятори з оптичного відеопотоку. Щоб перевірити температурні аномалії, необхідно виконати мультимодальну візуалізацію, об'єднавши інфрачервоні та візуальні дані, щоб виявити несправності та аномалії в енергетичному обладнанні. Для ізоляторів дослідники використовували рекурсивну конволюційну нейронну мережу, щоб виявити ізолятори на видимих зображеннях і класифікувати їх статус. Використання методу мультимодальних зображень і згорткових мереж може підвищити ефективність зйомки БПЛА електричної інфраструктури та може відкрити шлях до розробки нового корисного навантаження моніторингу (вбудованого в БПЛА), здатного забезпечити точне та швидке виявлення несправностей та аномалій в лініях електропередач та ізоляторах.

Підвищення ефективності моніторингу технічного стану елементів ПЛ може полягати в тому, щоб адаптувати ПЛ до використання БПЛА. Для цього на ПЛ встановлюються спеціальні апаратні засоби, що дозволяють за допомогою візуальних, радіотехнічних чи інших засобів передавати на БПЛА інформацію про технічний стан компонентів ПЛ. Це дозволить значно підвищити інформативність при використанні БПЛА і збільшить достовірність інформації, що отримується. Суть запропонованого способу полягає у наступному. Моніторинг технічного стану елементів ПЛ здійснюють дистанційно за допомогою БПЛА, оснащеного пристроями для отримання як візуальної, так і апаратної інформації, пристроєм для передачі інформації на диспетчерський пункт, а ПЛ оснащується пристроями для передачі апаратної або візуальної інформації про свій стан на БПЛА (рис. 3.3).

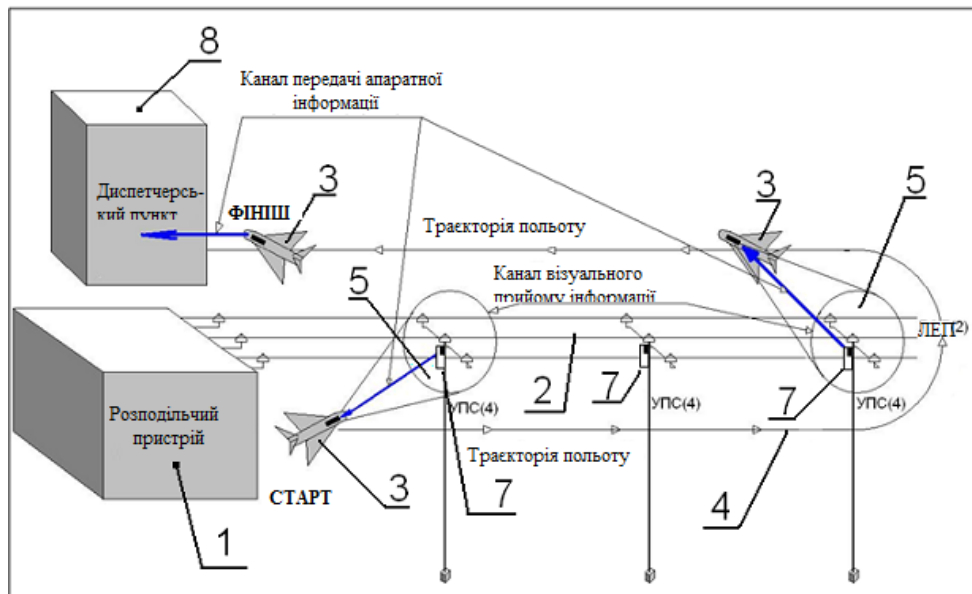


Рисунок 3.3 - Схема моніторингу ПЛ за допомогою БПЛА: 1 – розподільний пристрій (РП); 2 – повітряна лінія електропередачі (ПЛ); 3 –БПЛА; 4 – траєкторія польоту; 5 – область візуального прийому інформації; 6 – пристрій (прийому) передачі сигналу (ППС); 7 – пристрій формує для БПЛА апаратну інформацію; 8 – диспетчерський пункт.

Розподільний пристрій РП 1 живить ПЛ 2. Уздовж траси ПЛ 2 (у прямому та у зворотному напрямку) курсує БПЛА 3 по траєкторії польоту 4. У процесі свого польоту БПЛА 3 за допомогою встановленого на ньому спеціального обладнання (оптичного, тепловізорного, звукового та ін.) контролює канал візуального прийому інформації 6, що характеризує поточний технічний стан елементів (проводів, ізоляторів, траверс, стійок) ПЛ 2. Крім того, БПЛА 3 і кожна з опор ПЛ 2 оснащені ППС 6, що дозволяє організувати відповідний хвильовий канал (прийому) передачі апаратної інформації про поточний технічний стан елементів ПЛ 2. На підставі доставленої БПЛА 3 візуальної та апаратної інформації на диспетчерський пункт 8 останній формує відповідні команди з оперативного управління РП 2. Заропонований спосіб дозволяє оперативно і достовірно проводити моніторинг технічного стану елементів ПЛ, що дозволяє відмовитися у багатьох випадках від проведення традиційного візуального контролю та оперативно усувати всі технологічні дефекти та порушення в роботі ПЛ на заздалегідь відомих ділянках. Це сприяє суттєвому

підвищенню ефективності функціонування ПЛ та призводить до скорочення недовідпустки електроенергії споживачам [46].

Нові підходи – це автономна робота БПЛА в складних середовищах без зовнішніх вхідних даних від оператора. Це вимагає, щоб БПЛА інтегрував сприйняття, навчання, контроль у реальному часі, міркування, прийняття рішень і можливості планування [47], принаймні до певної міри. Цю сферу отримання даних за допомогою різних типів сенсорних технологій, можна згрупувати як: 1) методи, не засновані на візуальному зондуванні 2) методи на основі візуального зондування.

Методи, не засновані на візуальному зондуванні. Як правило, основним завданням планування шляху для автономного БПЛА є досягнення бажаного місця без втручання людини. БПЛА з GPS не може відразу визначити навколишнє середовище, а отримує лише висоту та відносне положення до відомих загальних параметрів. Це означає, що проблеми часто виникають, коли середовище змінюється швидко і непередбачувано.

Методи на основі візуального спостереження. Автоматичні методи на основі візуального спостереження привабливі тим, що вони мають перевагу в тому, що не потребують спеціального обладнання, оскільки потрібні лише камера та блок обробки зображення. В даний час існує багато досліджень систем візуального спостереження для БПЛА. Техніки візуального спостереження можна класифікувати на основі конфігурації датчика візуального спостереження на:

- 1) монокуляр (з використанням однієї камери),
- 2) стереоспостереження (з використанням двох камер).

Перевага стереозору полягає в тому, що його можна використовувати для вимірювання відстані тоді як монокулярний зір цього не може. Таким чином, коли зображення захоплено у тривимірному (3D) просторі будь-яка інформація про відстань у проекції зображення втрачається. Це пояснюється тим, що 3D-простір проектується на площину зображення, яка знаходиться у двовимірному

(2D) просторі. Однак, якщо використовуються дві камери, можна створити рішення за допомогою карти глибини, яка зберігає цю інформацію.

Продуктивність БПЛА для моніторингу повітряних ЛЕП може бути знижена через:

- 1) підходи, засновані на візуалізації,
- 2) недотримання обмежень щодо корисного навантаження;
- 3) використання неточної загальної системи управління, що впливає на рівень автономності.

Для інспекційних місій БПЛА спрямований на автономний політ поблизу ЛЕП за оптимальною траєкторією. Щоб отримати успішний огляд точок порушень на ЛЕП, враховується відстеження траєкторії на контрольованих траєкторіях кутів орієнтації та положення, похибки швидкості та перешкод. Контрольні підходи до вирішення задачі відстеження траєкторії при обстеженні енергосистеми: ліній електропередач (горизонтальна траєкторія), опор/ізоляторів (вертикальна траєкторія), від лінії електропередач до іншої ліній електропередач (перехідна та горизонтальна траєкторія), а також опори/ізолятори до ліній електропередач (вертикальна, перехідна та горизонтальна траєкторії), які становлять усі можливі рухи стеження під час перевірки систем живлення БПЛА.

В даний час використання БПЛА для виявлення несправностей ускладнюється низкою обмежень, які можна вирішити лише більш точним керуванням рухом і можливістю виконувати завдання автоматичного переходу. Відстеження стану ЛЕП за своєю суттю є повторюваним завданням. Це також завдання, яке поєднує точні дії (наприклад, розташування обладнання) і більш гнучкі рухи (наприклад, переміщення між опорами та лініями високої напруги). Це спонукає до розробки більш загальних алгоритмів для високопродуктивного відстеження з метою підвищення точності від випробування до випробування, використовуючи інформацію з попередніх виконань завдання.

Ми пропонуємо нові підходи до удосконалення методів моніторингу ліній електропередач для БПЛА, які включають [48]:

1) спільну обробку відео- і теплових відеопослідовностей, які визначають наявність ліній електропередач і їхнє точне геомісцезнаходження. Це дозволяє операторам своєчасно виявляти пошкодження, виконувати ремонтні роботи та роботи з технічного обслуговування, одночасно зменшуючи загрози безпеці.

2) комбінування оптичної інформації з інфрачервоного спектру (крім видимого) та додаткове навчання з інших наборів даних реального сценарію, що забезпечує ще більш точну лінію виявлення пошкоджень.

3) удосконалення методології для збору даних з БПЛА за допомогою ретельного планування польоту та навігації транспортного засобу, враховуючи оточення мережі електропередач і геолокаційне відображення опор для виконання місій за попередньо завантаженими маршрутами на наземній станції, що надзвичайно важливо коли вітрові коридори можуть ускладнювати польоти.

4) використання спеціальної архітектури безпілотної, яка об'єднує різні типи датчиків і мікрокомп'ютерну технологію для вдосконаленої обробки даних на місці та на борту.

5) використання БПЛА для моніторингу енергетичної інфраструктури з можливістю адаптації та розширюваних можливостей для ідентифікації різних електричних компонентів енергетичної мережі за модифікованою алгоритмічною схемою (тобто навчання глибокої нейронної моделі за допомогою різних даних та використання температурних профілів з тепловізійної камери).

6) створення порівняльних баз даних на основі реальних даних за різних рельєфів і умов навколишнього середовища, які створюються як у візуальному, так і в інфрачервоному спектрі, забезпечуючи унікальну колекцію зареєстрованих і повністю синхронізованих зображень, які можна використовувати для навчання та тестування алгоритмів машинного навчання та подальшого вдосконалення їх точності і ефективності (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 - Порівняння традиційних методів моніторингу ЛЕП за допомогою БПЛА з удосконаленнями методів шляхом впровадження інноваційних технологій.

БПЛА летить над електромережею на відносно близькій відстані (~15–20 м над землею), щоб лінії електропередач були добре видимі та розташовані якомога ближче до центру знятого зображення.

Швидкість БПЛА відносно низька, щоб забезпечити ефективну обробку відео по всьому маршруту без «порожніх» і необроблених сегментів електромережі, у той час як координати глобальної системи позиціонування (GPS) завантажуються в план польоту, щоб забезпечити плавну навігацію супроводжувача автомобіля.

Під час підготовки до огляду та польоту для збору даних наявні дані Геоінформаційної системи (ГІС) про ЛЕП та карти рельєфу завантажуються в наземну станцію БПЛА, щоб створити оптимальну траєкторію маршруту безпілота над цікавою територією на приблизній висоті 5 м над лініями електропередачі. Крім того, розроблений план польоту подається на погодження до Державіаслужби з дотриманням усіх норм і правил безпеки.

Проблеми застосування та впровадження цієї технології включають:

1) дії щодо залучення ліцензованого та навченого персоналу, який офіційно знає Авіаційні правила [5];

2) інтенсивне навчання з електробезпеки під час роботи з високовольтними електричними мережами,

3) належне калібрування та використання камери, датчиків для отримання якісних зображень.

Коли правила польотів будуть пом'якшені та дозволять безпілотникам охоплювати більші території та, це дозволить працювати в основному автономно, що призведе до польотів за межами прямої видимості під наглядом обмеженої кількості людей та на малих висотах над лініями електропередач.

Майбутнє вдосконалення включає зменшення часу обробки за допомогою розпаралелювання та оптимізації коду, термічну обробку зображень на основі температурних профілів, отриманих за допомогою правильно вибраних форматів необроблених зображень, і виявлення помилок на додаткових компонентах мереж електропередачі, крім ліній електропередач.

Обстеження електричної основи за допомогою БПЛА вимагає, щоб перевірка була повністю запрограмованою для перевірки в режимі реального часу, тому кілька зображень і даних обробляються для розпізнавання інших об'єктів, а теплова інфрачервона камера використовується у всьому цьому процесі для виявлення поганої електропровідності [49].

Системні та людські помилки можна контролювати, але вплив на БПЛА навколишнього середовища може відбуватися з кількох джерел. Це вимагає удосконалення методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах.

3.2 Удосконалення методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах

3.2.1 Удосконалення алгоритму визначення умов реалізації польоту БПЛА при дестабілізуючих впливах

БПЛА часто зачіпають такі перешкоди, як дерева, будівлі, лінії електропередач, повітряні кабелі зв'язку тощо. Ця ситуація впливає на

результати перевірки. Отже, для того, щоб вимоги до виявлення пошкоджень ЛЕП відповідали поточному складному середовищу, необхідно забезпечити, щоб БПЛА не тільки мав функцію контролю GPS автономної навігації по маршруту [50], але також мав можливість автоматичного відстеження польоту для моніторингу лінії електропередач. Завдяки безперервній ідентифікації та уникненню перешкод процес виявлення можна завершити швидко.

На сьогодні існує два підходи до навігації на основі методу зору для перевірки ліній електропередач: 1) на основі точок маршруту GPS; 2) на основі виявлення лінії електропередач.

Завдяки сучасним досягненням глибокого навчання технологія БПЛА є точною, надійною, швидкою та безпечною для перевірки ліній електропередач. Удосконалена система безперервно обробляє вхідні зображення, а потім видає команди для переміщення БПЛА. Зображення є основним джерелом/входом, а команди керування є виходом системи. У всіх цих сценаріях *моделі глибокого навчання* мають велике значення, оскільки вони потрібні для високої точності цих типів оцінки, і ця оцінка передається простому контролеру, щоб управляти БПЛА. Рисунок 3.5 демонструє цей механізм.

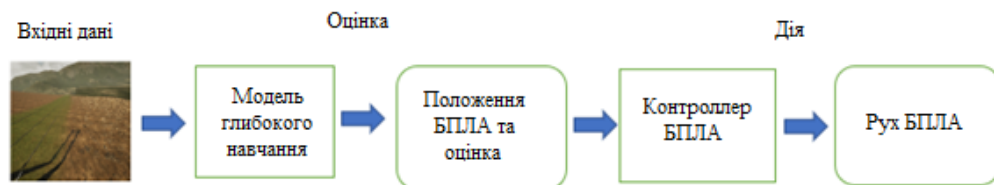


Рисунок 3.5 – Механізм методу візуалізації ліній електропередач з БПЛА як основним методом і зображеннями як основними джерелами даних і глибоким навчанням для аналізу даних

З аналізу фактичного розвитку поточної технології система автоматичного уникнення перешкод може завершити ідентифікацію перешкод у процесі польоту, а також може ефективно завершити вибір обльоту для маршруту, який можна використовувати для деяких складних і змінних ліній електропередач.

Коли БПЛА з нерухомим крилом використовується для інспекції коридору вздовж ЛЕП, планування його траєкторії обмежено завданнями інспекції та параметрами продуктивності БПЛА. Обмеження в плануванні шляху коридору в основному включають наступні аспекти.

1) Максимальна дальність. Нехай протягом усього процесу інспекції максимальна дальність БПЛА буде $S_{\max}$, що є сумою всіх вузлів треків, тоді загальна дальність треків маршруту повинна задовольняти умові:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} s_i \leq S_{\max},$$

2) Максимальний кут відхилення траєкторії. Відхилення траєкторії поточного сегмента траєкторії польоту БПЛА відносно попереднього сегмента траєкторії називається кутом відхилення траєкторії БПЛА. Оскільки на першу траєкторію впливає та обмежується швидкість маневрування та характеристики БПЛА, вимога щодо кута відхилення траєкторії повинна бути виконана. Максимальний розрахований кут відхилення траєкторії поточної траєкторії польоту БПЛА $-\Delta\varphi_{\max} \leq \varphi_i \leq \Delta\varphi_{\max}$, $\Delta\varphi_{\max}$ відносний сегмент до попереднього шляху визначається як:

$$\Delta\varphi_{\max} = \arcsin(L_{\min} / (2 \cdot r_{\min}))$$

Метод перевірки ЛЕП на основі БПЛА заощадить енергію, спростить доступ до ЛЕП, зменшить витрати за рахунок використання точних підходів до контролю та меншої залежності від дорогих датчиків, а також автоматизувати процес перевірки. Однак автоматизація процесу інспектування все ще не може досягти повної автоматизації, а продуктивність знижується через ємність батареї середнього дрона, що обмежує відстань їхнього польоту та тривалість місії. Це актуалізує питання про *продовження тривалості місії БПЛА*. У цьому контексті доступні два варіанти [48]:

1) збільшити ємність батареї за допомогою найсучасніших технологій матеріалів для батареї;

2) зарядити батарею від зовнішнього джерела, яке може бути дротовим або бездротовим.

Різноманітні *методи, використані в стратегіях автономної зарядки в застосуваннях БПЛА* попередніми дослідниками, показали, що пошук рішення для тривалої тривалості місії є складним завданням, особливо коли заряджати батарею від зовнішнього джерела. Основний конфлікт між точністю, ефективністю, надійністю та безпекою людини завжди присутній у таких проблемах. З цими методами потрібно знайти компроміс, щоб досягти рішення для стратегій автономної зарядки, які задовольняють обмеження.

Для місцевості з близькою віддаленістю та високою щільністю електропостачання вибирається підстанція з умовами для облаштування точки підзарядки БПЛА (так званого «гнізда»). У поєднанні з лазерною навігацією, візуальним розпізнаванням, точним позиціонуванням та іншими технологіями БПЛА може реалізувати точне приземлення, незалежну заміну батареї та швидку зарядку. Релейна витривалість між «гніздом» і автономним виявленням БПЛА може бути реалізована шляхом дистанційного керування, що вирішує проблему малої тривалості роботи БПЛА та забезпечує високу надійність роботи та обслуговування ліній електропередач у важливих зонах навантаження.

Розгортання гнізда для підзарядки БПЛА вимагатиме величезних економічних витрат і витрат на технічне обслуговування ліній з великим розподілом і великою відстанню. Таким чином, БПЛА з ручним керуванням в основному може використовуватися для налаштування мобільного зарядного пристрою для точного виявлення корпусу вежі, а БПЛА з нерухомим крилом може використовуватися для дистанційного виявлення каналу. Для планування маршруту інспекції лінії електропередач з БПЛА доцільно використовувати алгоритм оптимізації для виявлення оптимального шляху.

БПЛА повинен бути оснащений ультразвуковими датчиками дальності в чотирьох напрямках. У процесі моніторингу з БПЛА встановлюється *система виявлення БПЛА перешкод та їх об'їзду*. Вхідним і вихідним сигналами

системи є дані детектування датчика та сигнал коригування напрямку польоту БПЛА відповідно. Відповідно до інформації про виявлення перешкод ультразвуковими датчиками дальності в чотирьох напрямках, можна судити про те, чи БПЛА знаходиться в межах безпечної дальності, а потім видавати команду корекції, щоб скорегувати положення БПЛА в польоті, щоб безпечно уникнути перешкоди. Для уникнення перешкод БПЛА, необхідно спочатку встановити дистанцію попередження. Враховуючи розмах польоту БПЛА та затримку подачі команди управління, відстань попередження про перешкоду повинна бути встановлена розумно. Якщо під час перевірки відстань між БПЛА та перешкодою перевищує встановлену попереджувальну відстань, статус польоту БПЛА змінювати не потрібно.

Застосування БПЛА для виявлення пошкоджень ліній електропередач в основному використовує бездротовий пристрій дистанційного керування та програмний пристрій керування для керування невеликими беспілотними літаками. На борту є автопілот і програмне керування. На даний момент режим управління БПЛА можна розділити на два типи: самопрограмне автономне керування та радіодистанційне керування.

Традиційне ручне виявлення перешкод має високу трудомісткість, високий ризик для безпеки, низький рівень ідентифікації дефектів і точність, і легко піддається впливу погоди та місцевості, що далеко не відповідає потребам універсальної енергетичної конструкції Інтернету речей. Інтелектуальний моніторинг за допомогою БПЛА реалізує ефективний збір даних про стан роботи лінії електропередач і точну ідентифікацію дефектів за допомогою обладнання Інтернету речей (включаючи лідар, камеру, інфрачервоний термометр тощо), що ефективно підвищує рівень безпечної роботи лінії. Порівняно з традиційним ручним виявленням, ефективність інтелектуального виявлення БПЛА покращується не менше ніж в 3,2 рази, що певною мірою полегшує становище персоналу з експлуатації та обслуговування лінії. З безперервним розвитком нових технологій інтелектуальне виявлення

дефектів ЛЕП за допомогою БПЛА поступово замінить ручне виявлення як основний засіб експлуатації та обслуговування лінії.

Щоб адаптуватися до характеристик виявлення лінії електропередач, БПЛА повинен мати більше функцій. Багато пристроїв на передавальній вежі є основними об'єктами виявлення, які мають невеликий розмір і їх важко знайти. Крім того, через сильні електромагнітні перешкоди навколо лінії передачі БПЛА не можуть працювати близько до неї. Таким чином, цифрова камера, оснащена БПЛА, повинна мати кращу продуктивність фотографування та сильнішу здатність автоматичного виявлення масштабування, щоб своєчасно виявляти різні проблеми та дефекти лінії передачі та покращувати якість і технічний рівень їх виявлення за допомогою БПЛА. Це вимагає тривалого часу роботи БПЛА. Однак, через особливості режиму роботи БПЛА, вага батареї повинна бути гарантовано в певному діапазоні.

Тому, перш за все, необхідно активно досліджувати нові матеріали для акумуляторів з високою щільністю енергії, щоб покращити ємність батарей БПЛА; по-друге, підвищити надійність та ефективність управління роботою системи БПЛА, зменшити споживання та втрати енергії в системі БПЛА, щоб покращити та подовжити час польоту системи для забезпечення сталої потужності польоту, підвищення надійності БПЛА та тривалості польоту.

Політ у турбулентній атмосфері. Політ у турбулентній атмосфері (бовтанка) визначає коливальний характер траєкторії та кутові коливання БПЛА відносно центру мас. При попаданні БПЛА з низхідного потоку у висхідний можливе його різке підкидання вгору. Це призводить до різкого збільшення навантажень, що діють на конструкцію, і в певних випадках здатне призвести до руйнування БПЛА. При польоті БПЛА в режимі бовтанки окремі елементи конструкції піддаються знакозмінним навантаженням і при цьому деформуються. В результаті чого в матеріалі конструкції БПЛА з'являються деформації, а в елементах конструкції виникають мікротріщини, які з часом збільшуються і можуть призвести до руйнування конструкції (фізичне втомлення). Тобто при польотах у турбулентній атмосфері існує загроза

руйнування БПЛА, або часткового чи повного виходу з ладу внаслідок деформації. У цьому випадку виконання вимог щодо умов експлуатації БПЛА стають визначальними.

У неспокійному атмосферному повітрі на БПЛА діють різнонаправлені пориви вітру [48]. Порив вітру може змінити кути атаки, ковзання і швидкість потоку, що набігає, в результаті чого зміняться величини аеродинамічних сил і їх моментів, які в свою чергу викликають порушення рівноваги літака і зміна величини навантаження. Вертикальні повітряні потоки – висхідні та низхідні – мають найбільше значення з погляду безпеки польоту.

При попаданні БПЛА у висхідний потік (V_{1y}), існують дві небезпеки:

- 1) тримання перевантаження, більшого максимально допустимого, і руйнування БПЛА у повітрі;
- 2) вихід БПЛА на зривні кути атаки та звалювання.

У разі попадання у висхідний потік кут атаки (α), збільшується на ($\Delta\alpha V_1$), що провокує різке підвищення підйомної сили. Внаслідок значних розмірів і малої маси БПЛА піддається значному впливу поривів на вертикальне навантаження (n_y), бовтанки, що визначається за формулою:

$$n_{y_бовт} = 1 \pm \frac{C_y^\alpha V_{1y} \rho V}{q} \leq [n_y],$$

де C_y^α – значення підйомного коефіцієнта при заданому куті атаки (α),
 q – навантаження на крило; V_{1y} – швидкість пориву; ρ – щільність повітря.

При великому подовженні (20–30 одиниць) та малому навантаженні на крило (5–7 кг с/м²) навіть за невеликих вертикальних поривів $V_{1y} = 5–7$ м/с за даними [49] виникає значне вертикальне навантаження (n_y) (3–4 одиниці), що ставить обмеження на можливість експлуатації БПЛА (рис. 3.6).

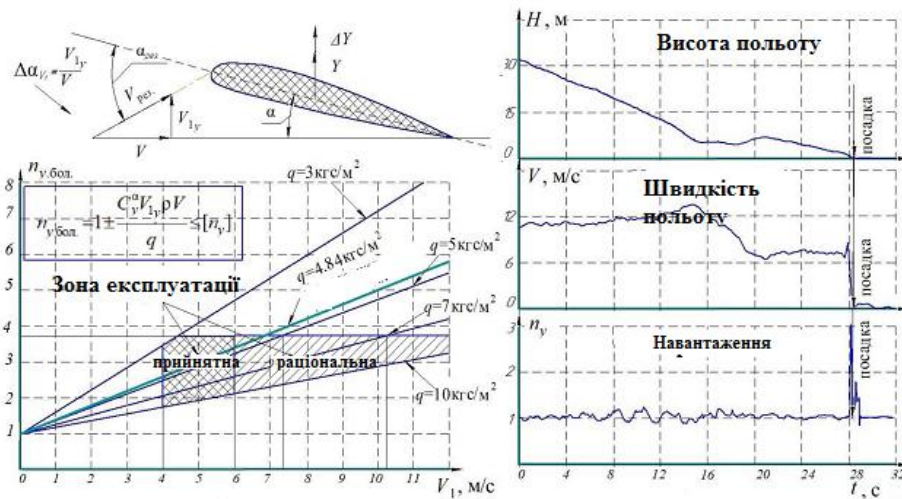


Рисунок 3.6 – Показники руху БПЛА у неспокійній атмосфері: а – залежність перевантаження від швидкості пориву вітру для різних значень навантаження на крило та зміни кута атаки при вертикальному пориві; б – залежності висоти польоту, швидкості польоту, навантажень реального зразка БПЛА від часу на фінішному етапі польоту (зниження, посадка) [49]

Планування тривалості польоту БПЛА у дестабілізуючих умовах. Для реалізації тривалих польотів БПЛА слід забезпечити низку умов. До них насамперед слід віднести аеродинамічну досконалість безпілотної ЛА та його енергоефективність. Очевидно, що основним критерієм виконання польоту виступає час T . Оскільки будь-який політ можна розділити на етапи, завдання реалізації тривалого польоту формується умовою забезпечення сумарного енергетичного балансу протягом виконання відповідних етапів.

Етап набору висоти (зліт) є особливо енерговитратним. Більшість (60–80%) енергії на його виконання має давати бортовий акумулятор. Варіанти реалізації зльоту БПЛА представлені на рис. 3.7 [49].

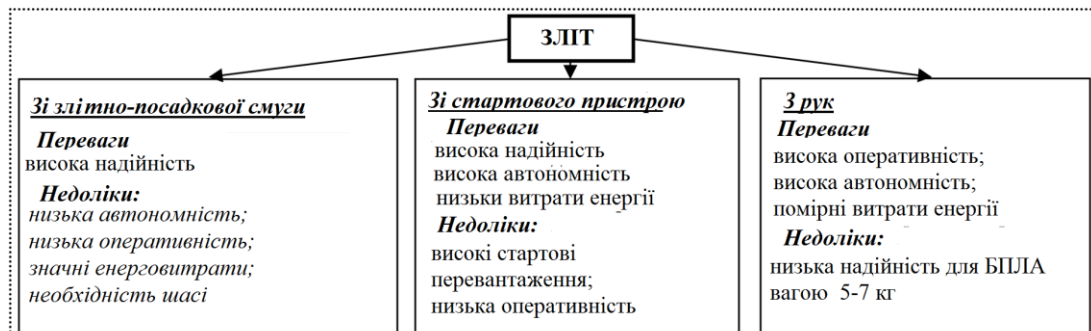


Рисунок 3.7 – Основні типи зльоту для БПЛА

При зльоті із ЗПС (злітно-посадкової смуги) важливо знати довжину розбігу, в результаті якого БПЛА повинен досягти швидкості відриву $V_{відр.}$, яка може бути визначена за такою формулою за даними [49]:

$$V_{відр.} = 14,4 \sqrt{\frac{m_0 / S}{C_{y_відр.}}},$$

де $V_{відр.}$ – швидкість відриву, m_0 – злітна маса; S – площа крила; $C_{y_відр.}$ – коефіцієнт підйомної сили при відриві, зазвичай $C_{y_відр.} \leq 0,83C_{y_{\max}}$

Довжина розбігу визначається як:

$$L_{розб.} \leq V_{відр.}^2 / 2a (a = g(0.95P_0 / G - 0.5f_{тертя} + 1/K_{відр.}))$$

де $L_{розб.}$ – довжина розбігу; $V_{відр.}$ – швидкість відриву; a – середнє прискорення під час розбігу БПЛА; G – маса БПЛА; $f_{тертя}$ – коефіцієнт тертя коліс шасі; $K_{відр.}$ – аеродинамічна якість БПЛА при відриві; g – сила прискорення вільного падіння.

При зльоті зі стартового пристрою літальний апарат (ЛА) після сходу з катапультного пристрою (з механічною, пневматичною, гідравлічною та іншими типами катапульт) повинен досягти швидкості сходу [49]:

$V_{сходу} = 1,2...1,3V_{звал.}$, де $V_{звал.}$ – швидкість звалювання, яка виключає зіткнення БПЛА з наземними об'єктами.

При зльоті з руки важливими параметрами є кут набору висоти, імпульс кидка, необхідна потужність силової установки, а також аеродинамічні характеристики БПЛА (умовою для нормального старту є $V_{сходу} > V_{звал.}$).

Енергетичні витрати етапу зльоту визначаються головним чином кутом набору висоти θ , швидкістю набору висоти $V_{наб.}$, необхідною потужністю силової установки $N_{наб.}$ та аеродинамічними характеристиками ЛА.

Швидкість набору висоти $V_{наб.}$ та необхідна потужність силової установки для набору висоти $N_{наб.}$ можуть бути визначені як [50]:

$$V_{наб.} = \sqrt{\frac{2G \cos \theta}{\rho \cdot S \cdot C_y}},$$

$$N_{наб.} = QV_{наб.} + GV_{наб.} \sin \theta$$

де $V_{наб.}$ – швидкість набору висоти; G – маса БПЛА; θ – кут набору висоти; ρ – щільність повітря, S – площа крила; C_y – коефіцієнт підйомної сили; $N_{наб.}$ – необхідна потужність силової установки для набору висоти; Q – сила опору, що діє на БПЛА.

Для заданої висоти набору H енерговитрати на зльот $E_{зльот}$ та час набору потрібної висоти $t_{наб.}$ можна визначити як [50]:

$$E_{зльот} = N_{наб.} \cdot t_{наб.} = \left(H \frac{Q}{\sin \theta} + G \right),$$

$$t_{наб.} = \frac{H}{V_{наб.} \cdot \sin \theta}$$

де $E_{зльот}$ – енерговитрати на зльот; H – задана висота набору; $N_{наб.}$ – необхідна потужність силової установки для набору заданої висоти; Q – сила опору, що діє на БПЛА; $t_{наб.}$ – час набору потрібної висоти; G – маса БПЛА; θ – кут набору висоти.

Для мінімізації енерговитрат, маси та перевантаження найбільш раціональним варіантом є зліт з рук (для БПЛА класу міні, зокрема, обраного нами як раціональний для верхового огляду повітряних ЛЕП квадрокоптер фірми DJI, модель Phantom 4 Pro) та зліт із ЗПС (для інших класів БПЛА).

Етап горизонтального польоту є основним режимом роботи БПЛА, під час якого енергія має забезпечити живленням БПЛА загалом. При цьому слід врахувати наявність у системі акумулятора відповідної ємності для компенсації

витрат енергії. На віражах існують значні витрати енергії, які також мають бути врахованими. Основні варіанти посадки БПЛА в залежності від експлуатаційних особливостей зазначені на рис. 3.8.



Рисунок 3.8 - Основні варіанти посадки БПЛА в залежності від експлуатаційних особливостей

Витрати енергії етапу посадки у більшості випадків є незначними та становлять не більше 5% від загального споживання. Енергія витрачається виключно на живлення систем, а політ реалізується за рахунок зниження і, витрат потенційної енергії ЛА. Для обрання типу посадки необхідно врахувати експлуатаційні особливості БПЛА, переваги та недоліки, а також їх вплив на ефективність використання конкретного ЛА.

Для посадки раціонально обрати: посадку на парашуті для БПЛА класу міні (5-7 кг); посадку на корпус для апаратів з низькими посадковими швидкостями (< 7 м/с) та низьким навантаженням на крило (< 10 кг с/м²); посадку на злітно-посадкову смугу для середніх та важких БПЛА.

Формування плану польоту БПЛА у дестабілізуючих умовах. При плануванні траєкторії польоту БПЛА (рис. 3.9) необхідно оцінити можливі витрати енергії для виконання тривалого польоту. Як наслідок, маса

акумулятора $m_{ак}$, який компенсуватиме витрати, стає визначальною при оцінці можливості реалізації конкретного польоту.

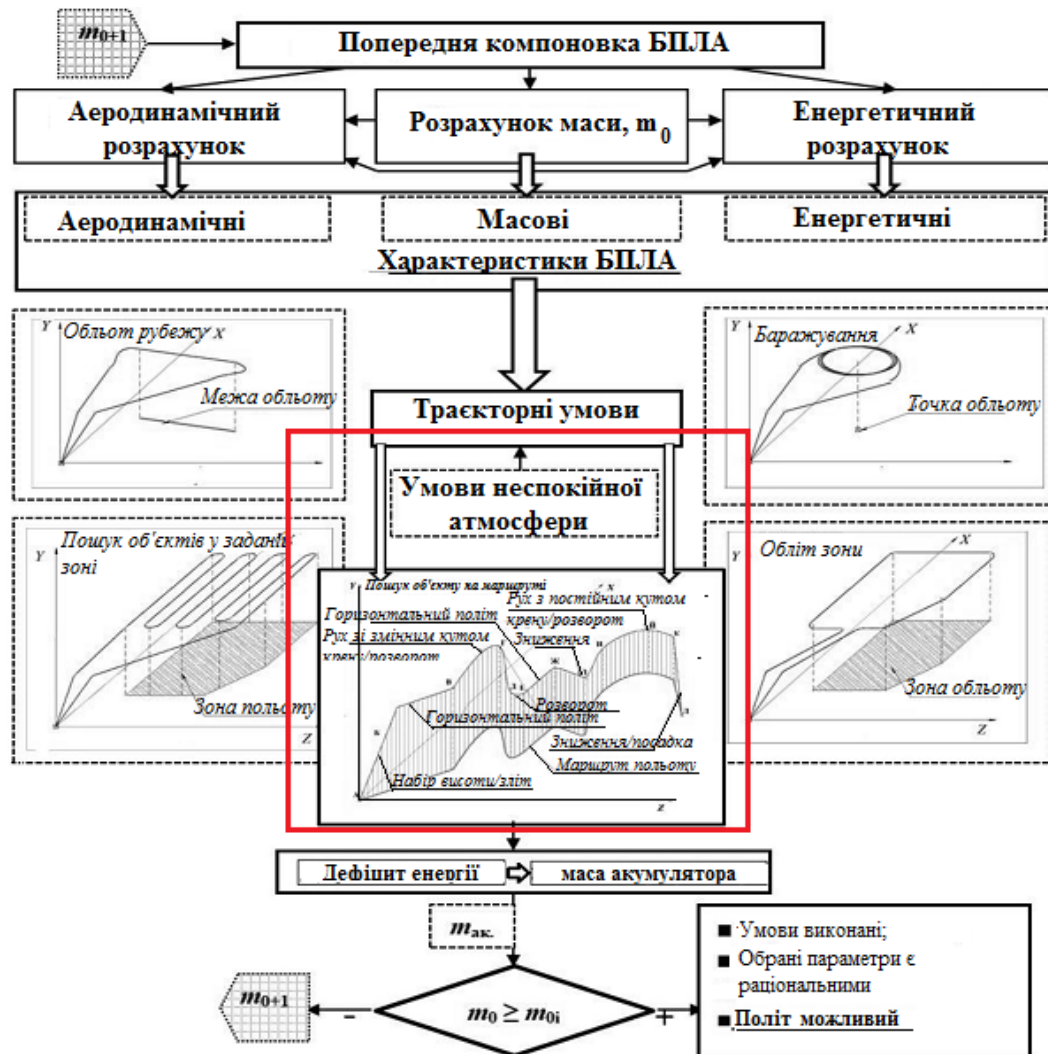


Рисунок 3.9 – Удосконалений алгоритм визначення умов реалізації польоту БПЛА у дестабілізуючих умовах (удосконалення відмічено червоним прямокутником)

Приклад визначення умов реалізації тривалого польоту показано на рис. 3.10. Якщо маса акумулятора перевищує відведену масу, отримуємо перевищення злітної маси (з розрахунку маси першому наближенні). У такому випадку слід виконати заходи щодо зменшення маси акумулятора (дефіциту енергії) шляхом підвищення аеродинамічної якості, зменшення енергоспоживання, спрощення траєкторії та ін.

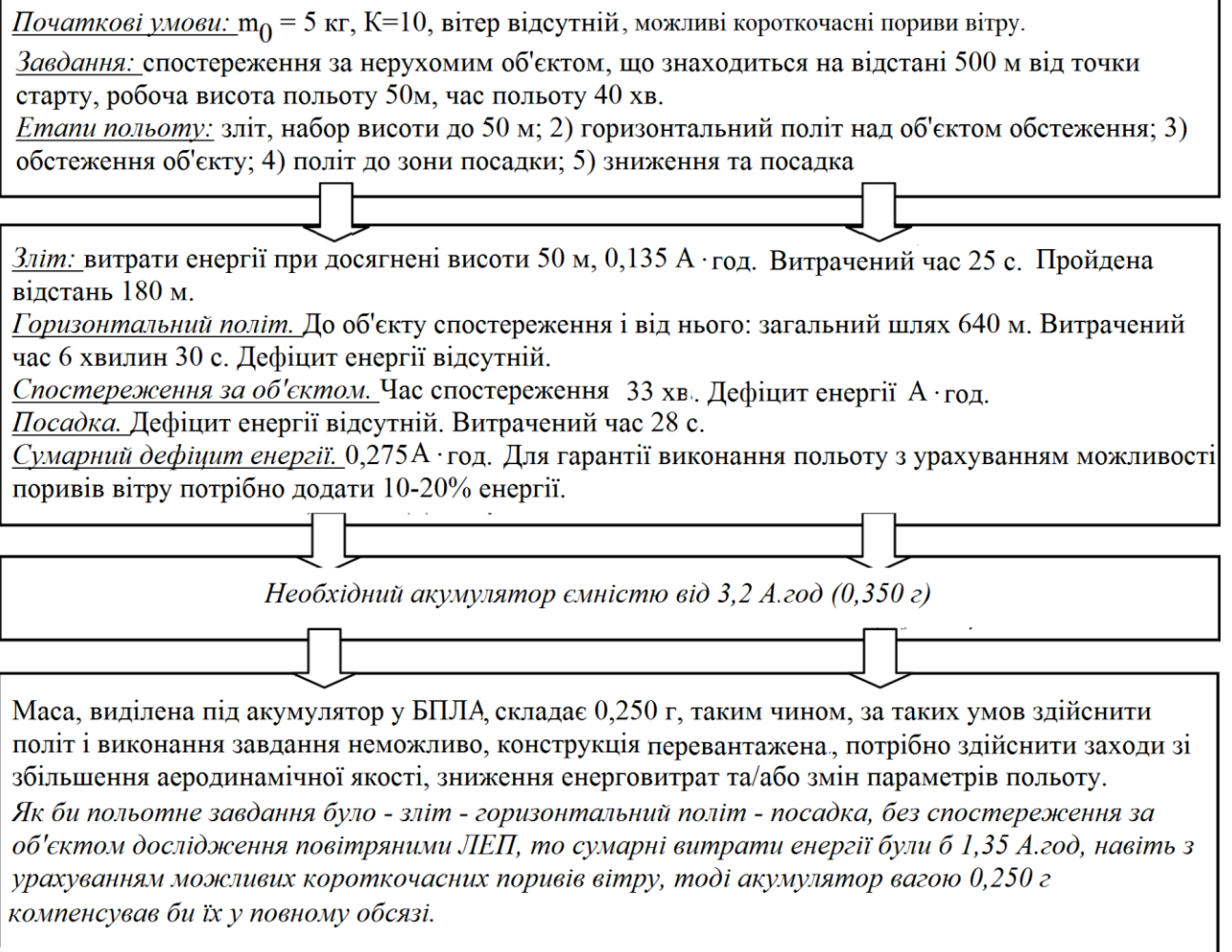


Рисунок 3.10 – Приклад формування плану польоту БПЛА у дестабілізуючих умовах: m_0 – злітна маса БПЛА; K – аеродинамічна якість БПЛА для відриву

Для раціонального виконання етапу зльоту та набору робочої висоти БПЛА повинен мати додаткове джерело живлення (акумулятор) з метою компенсації витрат енергії. Якщо час досягнення робочої висоти не нормований, то можна зменшити витрати енергії шляхом зменшення кута набору висоти та збільшенням потужності акумулятора. У такому разі період зльоту та набору робочої висоти може становити до 20 % від загального часу польоту, що знижує експлуатаційну ефективність БПЛА.

Таким чином, нами визначено фактори, що діють на ЛА у неспокійній, приземній атмосфері та їх вплив на експлуатаційні, а також конструктивні обмеження БПЛА. Запропоновано дискретну модель планування траєкторії маршруту БПЛА. Удосконалено узагальнений алгоритм визначення умов

реалізації тривалого польоту БПЛА, в якому враховуються масові, аеродинамічні, енергетичні характеристики; траєкторні, дестабілізуючі атмосферні експлуатаційні умови.

3.2.2 Використання штучного інтелекту для здатності БПЛА розпізнавати топографічні дані та інтегрувати дані про неспокійну атмосферу

Інтелектуальний БПЛА зі штучним інтелектом характеризується своєю здатністю розпізнавати топографічні дані, інтегрувати дані про навколишнє середовище (вітер, температура) та інтегрувати інформацію.

Штучний інтелект корисний для захисту БПЛА: безпілотники на основі ШІ, здатні виявляти певні несправності під час автоматичного пілотування. ШІ може програмувати автоматичне повернення на базу [51]. Безпілотники в поєднанні зі штучним інтелектом відіграватимуть вирішальну роль у різних програмах моніторингу в реальному часі.

Основною ідеєю методології гібридних мереж є визначення функцій належності за допомогою нечітких множин, де дефазифікація виконується за допомогою штучного машинного навчання. Така реалізація дозволяє використовувати переваги обох методів і допомагає позбутися «масштабу» вхідних даних і побудувати базу знань більш компактно та ефективно [52]. Оцінка технічного стану обладнання ПС 35-220 кВ здійснюється з використанням гібридного алгоритму навчання модуля нечіткого керування, структурна схема якого представлена на рис. 3.11.

Інтегральна оцінка підстанцій потребує окремого алгоритму модуля нечіткого управління для кожного типу обладнання. Оцінка технічного стану проводиться для наступних видів обладнання: 1) розподільні пристрої 110 кВ; 2) розподільні пристрої 35 кВ; 3) розподільні пристрої 10 кВ; 4) лінії електропередачі; 5) силові трансформатори; 6) релейний захист і протиаварійна автоматика.

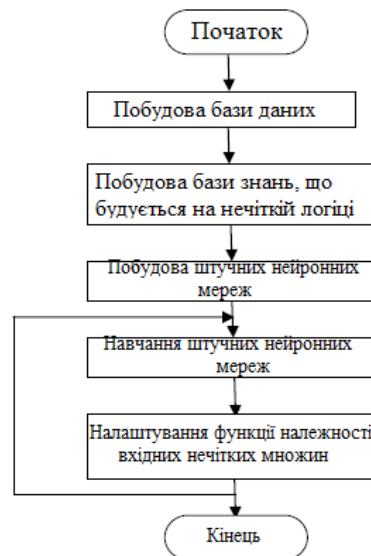


Рисунок 3.11 - Блок-схема гібридного алгоритму навчання модуля нечіткого керування

Примітно, що об'єкти розподільчих пристроїв об'єднані з окремих вузлів обладнання: шинних секцій, автоматичні вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму, трансформатори напруги, розрядники. Кожна одиниця складається з компонентів. Наприклад, силовий трансформатор складається з наступних компонентів: магнітна система, обмотки, трансформаторне масло, пристрій РПН, високовольний ввід, система охолодження, трансформаторний бак тощо. Таким чином, для енергетичного обладнання використовується алгоритм нечіткого модуля керування.

Оцінка технічного стану в три етапи: етап оцінки одиниць енергетичного обладнання (включаючи їх внутрішні елементи; етап оцінки комбінованих об'єктів; етап оцінки об'єктів підстанції в цілому).

Удосконаленням є *методи інтелектуального управління БПЛА в умовах збурень при наявності перешкод*. Постановка задачі планування маршруту БПЛА, що враховує вітрові потоки та наявність непрохідних перешкод [53] така:

Вхідні параметри завдання:

$D = \|d_{ij}\|$ – матриця відстаней між пунктами обльоту, яка враховує наявність перешкод та небажаних перельотів;

$V = \|v_{ij}\|$ – матриця вітрових швидкостей, що враховує силу та напрямок повітряних потоків між кожною парою точок маршруту, які допомагають або перешкоджають руху між відповідними пунктами.

Матриця V регулярно уточнюється під час переміщення на далекі відстані. Узагальнена матриця $C = \|c_{ij}\|$ оцінює додаткові часові витрати на переміщення між кожною парою пунктів.

Розв'язання задачі про призначення не відновлює оптимальний маршрут, тому розроблено алгоритм пошуку квазіоптимального маршруту [53].

Алгоритм.

1. Розв'язати задачу про призначення угорським методом для пунктів з множини P з урахуванням додаткових умов та небажаних перельотів. В результаті роботи методу одержують таблицю з зазначеними нулями, які відповідають призначеним пунктам.
2. Додати до маршруту черговий пункт відправлення P_k (на першому етапі це пункт P_1). Починаючи з рядка k , що відповідає пункту відправлення P_k , знайти зазначений нуль та відповідний номер l стовпця. Цей номер є номером пункту призначення з k -го пункту відправлення та одночасно з цим номером пункту відправлення на черговому кроці. Якщо призначено кінцевий пункт прибуття P_n , то перейти до п. 3); інакше перейти до п. 2).
3. Якщо відновлено весь маршрут (маршрут містить усі пункти з множини P) то перейти до п. 6); інакше перейти до п. 4).
4. Знайти пункт P_c , часові витрати на переміщення до якого з поточного пункту відправлення P_k мінімальні.

5. Виключити з множини P всі пункти, які вже містяться у маршруті. Пункт P_c стає вихідним пунктом відправлення для нового завдання. Перейти до п. 1).
6. Кінець.

Основною особливістю управління цілеспрямованою поведінкою автономних БПЛА є те, що після їх зльоту управлінські дії виробляються лише апаратурою бортового вирішувача проблем (БВП), якщо можливо, заздалегідь перед стартом розрахувати, як повинні змінюватися в часі основні параметри руху БПЛА (швидкість, кути, місцезнаходження тощо). У цьому випадку вся необхідна для прийняття рішень під час польоту інформація, наприклад, бортовим вирішувачем проблем, вводиться в пам'ять БВП, утворюючи модель представлення його знань.

У процесі польоту БПЛА регулярно в реальному часі автоматично здійснює збір даних, що характеризують його поточний стан, місце розташування в середовищі та фактори, що діють у ній. На підставі результатів порівняння, отриманих таким чином відомостей з необхідним згідно з заданою моделлю знань їх змістом, бортовий обчислювальний комплекс виробляє сигнали управління польотом БПЛА за відхиленням. Пристрій управління БПЛА здійснює, у разі потреби, самостійно або за командою з наземного комплексу зміну польотного завдання або повернення до точки старту.

Основними функціями наземної станції є: дистанційний контроль працездатності підсистем БПЛА, інформаційно-обчислювальна підтримка та автоматична корекція керування польотом БПЛА за допомогою систем радіокерування та відеоспостереження.

Маючи високопродуктивні обчислювальні засоби, наземна станція повинна здійснювати прийом, накопичення, автоматичну обробку і відображення інформації, що надходить від БПЛА у пакетному та потоковому режимах; передачу результатів її первинної обробки оператору та зацікавленому споживачеві.

При виникненні в період польоту БПЛА позаштатних ситуацій (несправності бортового обладнання, значні відхилення від заданих траєкторій

польоту, виявлення загроз, різке погіршення метеоумов) оператор приймає відповідні змісту керуючі рішення і реалізує їх за допомогою радіоканалів зв'язку з БПЛА. Такі ситуації утворюють випадковий потік "заявок", що надходять до оператора на управління БПЛА "обслуговування". Залежно від інтенсивності даного потоку заявок виникає необхідність у вирішенні задачі вибору оптимальної кількості операторів із застосуванням моделей теорії масового обслуговування. Розробка ефективного інтелектуального вирішувача завдань (ІВЗ) інтегрального безпілотного літального апарату (ІБПЛА), оснащеного маніпулятором, технічним зором та здатного вирішувати складні практичні завдання у важкодоступних та агресивних для людини наземних проблемних середовищах, є однією з актуальних проблем штучного інтелекту.

Характерною рисою ІБПЛА є автономність, тобто здатність до самостійного вирішення складних завдань як у нестабільному повітряному, так і в апріорі неописаному наземному середовищі без підтримки із зовнішнього центру управління польотами. Іншими словами, актуальною проблемою штучного інтелекту є розробка ІВЗ автоматичної системи управління цілеспрямованою поведінкою інтелектуального літаючого робота.

3.2.3 Планування маршруту моніторингу різних ділянок електромережі групою БПЛА різних типів із застосуванням датчиків міжоб'єктної навігації

Ще одним удосконаленням є підвищення точності та оперативності інспектування ділянки електромережі для виявлення несправності з використанням БПЛА. Це досягається шляхом використання уніфікованої обчислювальної та вимірювальної платформи на безпілотних БПЛА, що реалізують різні польотні схеми – мультикоптерну та літакову та спрощення взаємодії між ними. Причому підвищення оперативності виявлення несправності досягається шляхом одночасного інспектування різних ділянок мережі кількома різнотипними апаратами, а підвищення точності локалізації місця несправності шляхом використання датчиків міжоб'єктної навігації. В основу побудови алгоритму оцінки вектора стану безпілотного апарату

покладено результати об'єднання інформації про вимірювання та моделювання. Найбільш важливими результатами є удосконалення методу планування маршруту обльоту безпілотними апаратами різних ділянок електромережі, що дозволяє підвищити оперативність інспектування за рахунок подання задачі планування маршруту як класичної задачі комівояжера її багатоагентним варіантом і впровадження методу міжоб'єктного опису топології електромереж графами високої та низької інтенсивності, із залученням до інспектування різної кількості та типів БПЛА, що дозволяє отримати вигоду у точності інспектування ліній електропередач на та оперативності інспектування електромереж. Значимість одержаних результатів полягає у вирішенні задачі багатокритеріальної оптимізації планування маршруту польоту групи безпілотних літальних апаратів для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, що дозволить знизити витрати на моніторинг, одночасно підвищивши його оперативність та точність.

Для автоматизованого контролю пропонується універсальний майданчик, де проводяться всі вимірювання та розрахунки. БПЛА пропонується реалізовувати за двома різними схемами польоту - мультикоптерної та планерного типу [54]. Це дозволить ефективно перевіряти принципово різні ділянки електромереж. На великих ділянках мережі застосовний БПЛА літакового (планерного) типу завдяки перевазі в дальності польоту без підзарядки. Короткі ділянки мережі та ділянки зі складними розв'язками та перешкодами пропонується перевіряти за допомогою БПЛА-мультикоптерів через їх перевагу в маневреності. Використання групи БПЛА дозволяє одночасно обстежувати різні ділянки електромережі. Відповідно, можна знайти кількість БПЛА (або кілометрів лінії електропередач на БПЛА), яка дозволить найбільш ефективно виявляти несправності на даній території. Для підвищення точності локалізації пошкоджень навігаційні завдання вирішуються за допомогою візуально-інерціальної навігаційної системи (ВІНС) [54], а управління БПЛА здійснюється на основі автопілота [27]. Датчик гіроскопа відповідає за контроль позиції низького рівня та надсилання даних інерційного

датчика до навігаційного блоку високого рівня. Цей блок виконує локалізацію, планування, контроль високого рівня та інші функції навігації. Камера виводить зображення глибини для картографування та стереозображення у градаціях сірого для локалізації. Функціональна схема запропонованого БПЛА наведена на рис. 3.12.

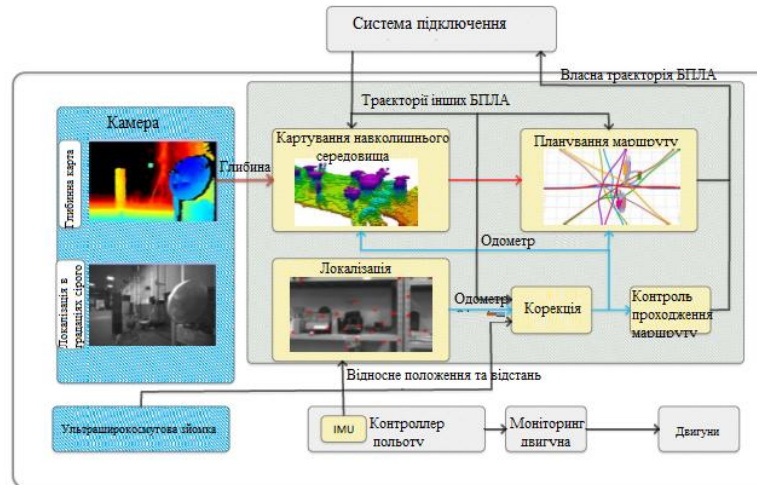


Рисунок 3.12 – Функціональна схема БПЛА з джерелами міжоб'єктної навігації

Традиційно навігаційна система БПЛА складається з супутникового навігаційного модуля, інерціальних вимірювальних систем (акселерометр, гіроскоп), барометра та магнітометра. В останні роки все частіше використовуються технології SLAM [54] (одночасна локалізація та відображення), які використовують стереокамери або сканер глибини та камеру для побудови моделі навколишнього середовища та визначення власного місцезнаходження.

Як додаткове джерело навігаційної інформації пропонується використовувати модулі трансивера UWB (Ultra Wideband) [54]. За допомогою цього набору модулів можливий обмін інформацією між БПЛА та визначення їх відносного розташування з високою точністю. Похибка визначення місцезнаходження значно менше, ніж в інших методах навігації, і не перевищує десятків сантиметрів.

Але цим методом можна визначити лише взаємне розташування. Проте відоме положення БПЛА відносно глобальної навігаційної системи та

інерціальних датчиків за допомогою фільтра Калмана дозволяє порівнювати інформацію та підвищувати її точність [54]. Уявімо оцінку положення БПЛА так:

$$x = \begin{bmatrix} p \\ s \end{bmatrix};$$

$$x' = Fx_{k-1} + B\mu_{k-1} + v;$$

де x' – прогнозований стан системи; p – положення БПЛА; s – швидкість; F – матриця переходу; B – матриця керування; μ_{k-1} – вектор моніторингу на попередньому моменті часу; v – шум процесу.

Матриця переходу F необхідна для відображення моделі руху до об'єкта. Припустимо, є модель що забезпечує положення та швидкість на неприскорений об'єкт. Тоді нове значення x і p протягом часу Δt розраховується як:

$$s' = s;$$

$$p' = p + s\Delta t.$$

Тоді матриця F матиме такий вигляд:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & \Delta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Від точності визначення власних координат БПЛА залежить точність локалізації несправності в системі електропостачання. Врахування отриманої інформації про місцезнаходження БПЛА відносно інших агентів у запропонованій системі міжоб'єктової навігації значно підвищує точність визначення координат [54]. Зі збільшенням кількості БПЛА в системі навігації зростає точність визначення їх координат. Це дозволяє більш точно локалізувати несправності в енергосистемі. Крім того, на ефективність перевірки впливає топологія самої енергетичної системи, ступінь зв'язності графіка, що описує енергосистему, співвідношення кількості коротких і довгих ділянок мережі та загальної довжини ліній електропередачі.

У сильно пов'язаній мережі збільшення кількості БПЛА, що використовуються для перевірки, різко скорочує час перевірки. Таким чином, використання другого БПЛА ефективно скорочує час перевірки вдвічі; чотири БПЛА зменшують його втричі, а вісім БПЛА – у 6 разів. Для мережі зі слабким зв'язком спостережувана динаміка така ж [54].

Наявність у навігаційній системі 10 і більше БПЛА дає можливість однаково ефективно проводити перевірку як сильно, так і слабо підключених електромереж. Збільшення кількості БПЛА визначатиметься лише економічною доцільністю та конфігурацією електромережі.

Експлуатаційна ефективність перевірки електромережі є максимальною, коли перевіряється мережа з низькою топологією. Збільшення кількості БПЛА, що використовуються для моніторингу, призводить до значного скорочення часу перевірки. Тільки топологія електромережі істотно впливає на цей показник при використанні 2-4 БПЛА. Подальше збільшення інспектування БПЛА не робить помітної різниці у співвідношенні коротких сегментів електромережі до загальної кількості всіх сегментів. Наявність у навігаційній системі понад 10 БПЛА дозволяє однаково ефективно обстежувати електромережі різної топології.

Таким чином, підхід міжоб'єктової навігації підвищує точність обстеження ліній електропередач в залежності від кількості БПЛА в зоні дії системи. Використання неоднорідної групи БПЛА дозволяє збільшити перевірку електромереж залежно від кількості використовуваних безпілотників та конфігурації самої енергосистеми. На ефективність огляду великий вплив має співвідношення крейсерських швидкостей різних типів дронів. Збільшення цього співвідношення призводить до більшого виграшу в часі перевірки, коли є велика кількість розширених ділянок енергосистеми. Ефективність перевірки електромережі коливається в широких межах залежно від співвідношення кількості коротких ділянок до загальної кількості ділянок енергосистеми та кількості БПЛА. Перевірка мережі з низькою топологією здійснюється найбільш ефективно.

Завдання підвищення ефективності та точності обстеження ліній електропередачі буде досягнуто за рахунок одночасного обстеження різних ділянок мережі декількома різними типами БПЛА. Застосування датчиків міжоб'єктової навігації БПЛА підвищує точність визначення положення БПЛА в просторі та, відповідно, підвищує точність локалізації місця несправності.

3.2.4 Автоматизація системи керування завдання поверхневого огляду ліній електропередач в складних умовах

БПЛА характеризуються різним рівнем автономності [55]:

1) *з ручним керуванням*: коли траєкторія БПЛА, керована дистанційним керуванням, у будь-який час є результатом команд, надісланих дистанційним пілотом у режимі реального часу. Людина-оператор безперервно керує системою БПЛА на борту, лише за своїми прямими спостереженнями. У цьому контексті БПЛА не проявляє жодної ініціативи та залежить від наказів оператора;

2) *з автоматичним керуванням*: політ здійснюється без втручання дистанційного пілота;

3) *автономний*: БПЛА виконує покладену на нього місію без втручання людини, у визначених рамках, одночасно адаптуючись до умов експлуатації та середовища.

Основною особливістю управління цілеспрямованою поведінкою автономних БПЛА є те, що після їх зльоту управлінські дії виробляються лише апаратурою бортового обчислювального комплексу (БОК), якщо можливо, заздалегідь перед стартом розрахувати, як повинні змінюватися в часі основні параметри руху БПЛА (швидкість, кути, місцезнаходження тощо). У цьому випадку вся необхідна для прийняття рішень під час польоту інформація, наприклад, бортовим вирішувачем проблем, вводиться в пам'ять БОК, утворюючи модель представлення його знань.

У процесі польоту БПЛА регулярно в реальному часі автоматично здійснює збір даних, що характеризують його поточний стан, місце

розташування в середовищі та фактори, що діють у ній. На підставі результатів порівняння, отриманих таким чином відомостей з необхідним згідно з заданою моделлю знань їх змістом, бортовий обчислювальний комплекс виробляє сигнали управління польотом БПЛА за відхиленням. Пристрій управління БПЛА здійснює, у разі потреби, самостійно або по команді з наземного комплексу зміну польотного завдання або повернення до точки старту.

Основними функціями наземної станції є: дистанційний контроль працездатності підсистем БПЛА, інформаційно-обчислювальна підтримка та автоматична корекція управління польотом БПЛА за допомогою систем радіокерування та відеоспостереження.

Маючи високопродуктивні обчислювальні засоби, наземна станція повинна здійснювати прийом, накопичення, автоматичну обробку і відображення інформації, що надходить від БПЛА в пакетному і потоковому режимах; передачу результатів її первинної обробки оператору та зацікавленому споживачеві.

При виникненні в період польоту БПЛА нештатних ситуацій (несправності бортового обладнання, значні відхилення від заданих траєкторій польоту, виявлення загроз, різке погіршення метеоумов) оператор приймає відповідні змісту керуючі рішення і реалізує їх за допомогою радіоканалів зв'язку з БПЛА. Такі ситуації утворюють випадковий потік "заявок", що надходять до оператора на управління БПЛА "обслуговування". В залежності від інтенсивності даного потоку заявок виникає у вирішенні завдання вибору оптимального числа операторів із застосуванням моделей теорії масового обслуговування.

Підходи до оптимізації розподілу функцій розглядаються з урахуванням часових обмежень виконання польотного завдання.

БПЛА, поведінка якого моделюється за допомогою кінцевого автомата, визначається за допомогою фіксованого числа станів та переходів між ними, а також способів взаємодії з іншими ланками. Досліджуючи моделі, можна

визначити допустимі значення основних параметрів та провести оптимізацію розподілу функцій управління за ланками системи.

Закладені в систему управління правила дозволяють БПЛА швидко реагувати на зміни динамічного середовища та успішно справлятися з поставленими цільовими завданнями. Поставлено оптимізаційні завдання, які з різних позицій визначають варіанти розподілу функцій управління та режимів роботи багатофункціонального комплексу, дозволяють вибрати оптимальне завантаження ланок та знизити витрати на їх побудову. Реальне рішення завдання оптимального розподілу є можливим тільки після конкретизації набору функцій управління місії, що виконується, і уточнення технічних характеристик конкретного БПЛА.

Для польоту БПЛА потрібен дозвіл. У всіх випадках певна кількість правил обумовлює їх керування. У деяких районах польоти заборонені, а в інших діють обмеження. Дотримання чинного законодавства, яке зазвичай вимагає схвалення платформи безпілотної, відповідної підготовки дистанційного пілота та дозволу на політ для кожної повітряної місії, є значними обмеженнями для розгортання цивільних безпілотної.

Завдяки вбудованій оптичній камері, тепловізійній камері та датчикам дрони дають змогу отримувати велику кількість даних і робити знімки з високою роздільною здатністю для створення картографій або 3D-моделей.

Візуальні та тепловізійні зображення дозволяють визначити точне місце розташування несправності, що робить польову роботу точнішою та меншою можливістю помилок. Тепловізор дозволяє легко виявляти дефекти на основі температурних аномалій між осередками та панелями. Поєднуючи теплові та візуальні дані, оператори БПЛА можуть визначити, чи є ці температурні аномалії результатом фізичних факторів, таких як тріщини або пил; або якщо це пов'язано з проблемами з'єднання, такими як інвертори або несправність проводки. Використання аерофотознімків сприяє покращенню виявлення несправностей і допомагає в процесі обслуговування.

Інформацію, зібрану БПЛА, можна зберігати та організовувати для обробки. Програмне забезпечення фотограмметрії реконструює теплові карти з отриманих зображень. Розміщення панелей також регулюється за допомогою наземних контрольних точок. Після реконструкції та коригування позиціонування отримані карти інтегруються в географічну інформаційну систему (ГІС), де групи технічного обслуговування можуть швидко знайти аномалії та виправити їх до того, як вони матимуть помітний вплив на виробництво.

Зберігання записів попередніх перевірок дуже допомагає у визначенні причин несправностей. Раннє виявлення несправних елементів допомагає запобігти неефективності виробництва енергії. Чим швидше можна виявити потенційні збої, тим краща відповідь і менша ймовірність серйозних збоїв системи.

Автоматичні автономні БПЛА, оснащені датчиками та камерами, можуть автоматично літати вздовж ліній електропередач для виконання онлайн-інспекцію для виявлення серйозних несправностей (наприклад, обвалені стовпи, зламані лінії електропередач, дерева, що лежать поперек і впритул до ліній електропередач) і зібрати дані для автономної ретельної перевірки для виявлення потенційних несправностей, які можуть призвести до відключень електроенергії, таких як зламані ізолятори, відсутність верхніх ковпаків, тріщини стовпи, стовпи, пошкоджені дятлом, тріснуті поперечини та пошкоджені гниллю поперечини. Ці потенційні несправності є дуже важливими джерелами інформації для постачальників електроенергії, щоб вони могли приймати рішення щодо необхідного ремонту або заміни перед будь-якими серйозними пошкодженнями, які можуть спричинити знеструмлення.

Нову автоматичну автономну систему перевірки ліній електропередач на основі візуалізації, яка використовує БПЛА можна використовувати як основний метод перевірки, оптичні зображення як основне джерело даних і глибоке навчання як основу аналізу даних [56].

Щоб полегшити впровадження автономної системи, ми вирішуємо три основні проблеми глибокого навчання під час візуалізації ліній електропередач [56]:

- 1) відсутність навчальних даних;
- 2) класовий дисбаланс;
- 3) виявлення компонентів малої потужності та несправностей.

Спочатку ми створюємо чотири набори даних середнього розміру для навчання моделям виявлення та класифікації компонентів. Далі ми пропонуємо серію ефективних методів розширення даних, щоб отримати більше навчальних даних і збалансувати незбалансовані класи. Нарешті, ми пропонуємо багатоетапний конвеєр виявлення та класифікації компонентів для виявлення компонентів малої потужності та несправностей (рис. 3.11). Алгоритм детально пояснює робочий процес конвеєра. Конвеєр дозволяє нам імітувати операцію «збільшення». під час перевірки, що дозволяє виявити дрібні несправності на компонентах лінії електропередачі, таких як тріщини на опорах і поперечинах, пошкодження дятлом на опорах і пошкодження гниллю на поперечинах.

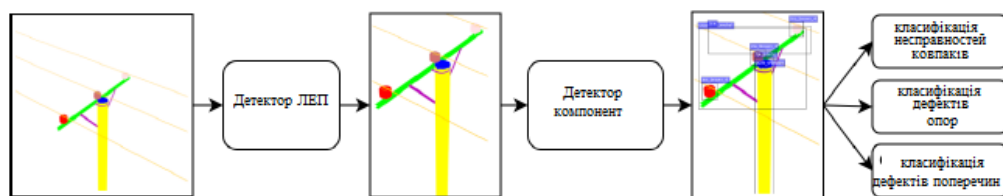


Рисунок 3.13 - Загальна структура багатоступінчастого конвеєра виявлення та класифікації пошкоджених компонентів ЛЕП.

Для виявлення компонентів малої потужності та невеликих несправностей ЛЕП, ми пропонуємо *метод багатоетапного конвеєру виявлення та класифікації компонентів*. Конвеєр складається з п'яти компонентів, з'єднаних, як показано на рис. 3.13. Конвеєр складається з п'яти компонентів: детектора ЛЕП, детектора компонентів, класифікатора несправностей ковпаків, дефектів опор, дефектів поперечин [54]. Конвеєр

працює наступним чином: спочатку детектор ЛЕП виявляє силові лінії з вхідних зображень. Потім виявлені опори обрізаються із вхідних зображень і використовуються як вхідні дані для детектора компонентів для виявлення силових компонентів, включаючи верхні ковпаки, стовпи, поперечини та ізолятори ЛЕП. Нарешті, виявлені верхні ковпаки, стовпи та поперечини обрізаються з вхідних зображень і пропускаються через відповідні класифікатори для виявлення дефектів.

Удосконаленням є *впровадження інтелектуальної системи перевірки на основі БПЛА*, включаючи автономне планування шляхів перевірки, алгоритми керування, мобільні схеми перевірки та інтелектуальну діагностику несправностей. На першому етапі базові дані, такі як широта, довгота, висота над рівнем моря та довжина поперечних плечей маршруту, отримуються з хмарної бази даних електромережі, а також розраховуються допустиме поперечне та вертикальне зміщення під час роботи інспекційного БПЛА та траєкторія оглядового польоту генерується незалежно відповідно до типу огляду. Після великої кількості польотних перевірок система перевірки, розроблена в цьому документі, значно покращує ефективність перевірки потужності, скорочує цикл перевірки, зменшує інвестиційні витрати на перевірку робочої сили та матеріальних ресурсів, а також успішно зливає алгоритм виявлення об'єктів у сфері обстеження високовольтних ліній електропередачі.

БПЛА зазвичай управляються пілотами (операторами), які також збирають відповідні аерофотознімки. Отримані дані можна використовувати для розробки автоматизованих функцій аналізу, таких як виявлення певних типів дефектів, виявлення пташиного гнізда тощо.

Однак існуюча система моніторингу ЛЕП з БПЛА все ще має *недоліки*, не може синхронізувати дефекти лінії в режимі реального часу, а також інші проблеми. Це в основному відображається в таких пунктах [57]:

- 1) ступінь автономності інспекційного польоту потрібно покращити, оскільки ефективність інспекції низька. В даний час основний інспекційний

БПЛА в основному використовує комбінацію перевірки людиною та машиною, тому потрібна інструкція по експлуатації БПЛА для інспекційної цільової зйомки, яка передбачає копіювання або спочатку ручне керування БПЛА для збору місцезнаходження фототочок, а потім повторну перевірку в польоті. Фотокопіювання вимагає ручної участі, низького ступеня автономності та низької ефективності перевірки;

2) проблеми зі стабільністю керування польотом: робота інспекційного польоту БПЛА у відповідь на складне навколишнє середовище перевірки має труднощі з досягненням високої точності та стабільного зависання, що серйозно впливає на точний збір даних, тому стабільність керування польотом була складною точкою для галузі застосування;

3) проблеми із заміною батареї БПЛА;

4) виявлення помилок даних моніторингу повітряних ЛЕП: інспекційний БПЛА має низьку точність інтелектуального розпізнавання та повільне створення звітів про інспекцію. Щоб вирішити вищевказані проблеми, необхідні інновації для забезпечення автономності польоті, автономного планування траєкторії, автономної заміни батареї та інтелектуального виявлення та системі перевірки якості роботи БПЛА.

Основні пропоновані удосконалення:

1) система наземної станції, яка автоматично генерує програму перевірки, включаючи точну перевірку, перевірку дуги та перевірку каналу, і БПЛА може працювати автономно відповідно до цього плану для досягнення кругового огляду високовольтних ліній;

2) система управління польотом і навігації забезпечує високу надійність і високу точність управління польотом для БПЛА, вирішуючи проблему поганої стабільності управління польотом для існуючих інспекційних автономних БПЛА;

3) використання механічного пристрою для автоматичної заміни батареї та передбаченої мобільної схеми перевірки для завершення переміщення

обладнання, поки БПЛА виконує своє завдання, що значно покращує ефективність перевірки;

4) виявлення об'єктів розгортається на хмарному сервері для підвищення точності виявлення пошкоджень [58] (рис. 3.14).

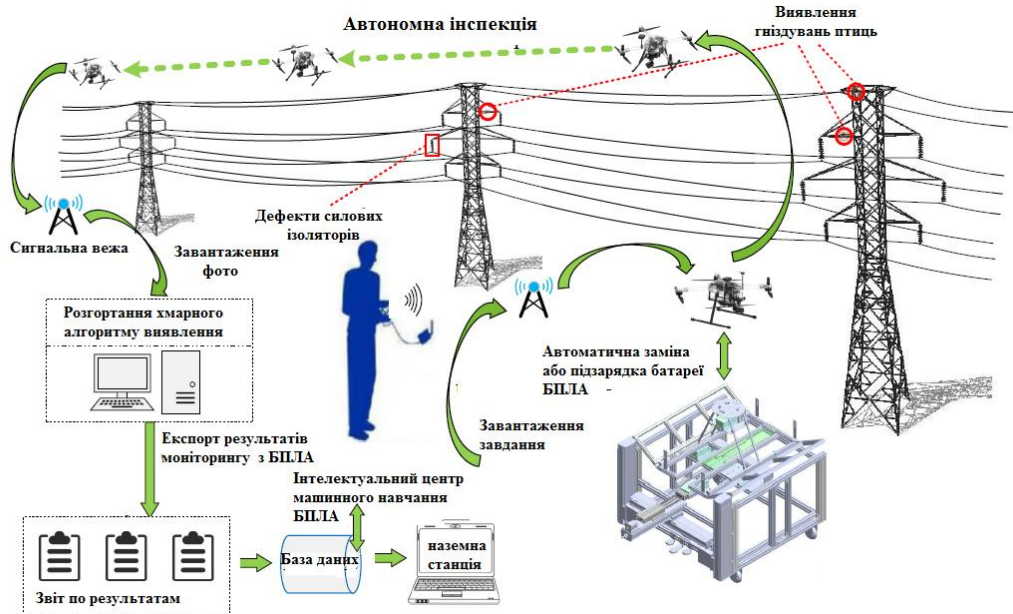


Рисунок 3.14 - Узагальнена структура удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА

По-перше, оператору потрібно запитати основні дані високовольтних опор від наземної станції та генерувати завдання перевірки для надсилання на БПЛА. Після завершення самоперевірки дрона, після отримання команди на пуск приступає до виконання експлуатаційного завдання та огляду електровежі. У процесі перевірки дроном фотографії об'єкта перевірки завантажуються на хмарний сервер у режимі реального часу. Після отримання фотографій перевірки хмарний сервер використовує комбінацію ручного та глибокого навчання для виявлення фотографій перевірки.

Ручне виявлення в основному призначене для виявлення деяких дефектів у лінії, тоді як інтелектуальне виявлення в основному для виявлення пташиних гнізд у високовольтних лініях, а звіт про перевірку створюється після завершення виявлення. Переглянувши звіт, співробітники можуть організувати обслуговуючий персонал для виконання технічного обслуговування. Після

того, як дрон виконає своє завдання, він повертається до гнізда інтелектуальної машини, яка автономно замінить батарею дрона, щоб підвищити ефективність перевірки та підготуватися до наступного завдання перевірки.

Автономне планування маршруту. Інспекційні БПЛА працюють автономно відповідно до плану польоту, запланованого наземною станцією. Використовуючи інспекційне обладнання, яке переносить БПЛА, точки, які вимагається проінспектувати на ЛЕП фотографуються, і перевірка високовольтної лінії виконується ефективно. Вимоги до перевірки ліній електропередач високої напруги за допомогою БПЛА наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Вимоги до перевірки ліній електропередач високої напруги [58].

	Об'єкт перевірки	Зміст перевірки
1	Опори високовольтних ліній	Виявлення деформації чи нахилу
2	Бази вежі	Виявлення ґрунтових умов поблизу основи вежі, наявності пташиного гнізда тощо.
3	Поперечини	Виявлення нахилу поперечин та інших відхилень
4	Ізолятори	Виявлення пошкоджень ізолятора та пошкодження сортувального кільця
5	Бовти	Виявлення того, чи наявні встановлені болти та гайки (вискочили чи впали тощо).
6	Громовідвід і заземлюючий пристрій	Виявлення того, чи істотно змінився розрядний проміжок між ними
7	Антивібраційний молоток	Виявлення зламу з'єднання антивібраційного молотка
8	Пристосування для точок закріплення провідного дроту	Випробування пристосувань малого розміру, таких як дротяні підвісні фіксуючі штифти
9	Дріт заземлення	Виявлення проводу заземлення на наявність ослаблених жил та інших дефектів
10	Пристосування для точок закріплення дроту заземлення	Виявлення фіксатора заземлення та інших об'єктів
11	Лінії електропередач	Виявлення обриву лінії електропередач, пошкодження сторонніми предметами тощо.
12	Канал	Перевірка завищених дерев та незаконних забудов у проїзді

Відповідно до цієї вимоги в цьому документі розроблено три схеми планування маршруту БПЛА для загальної перевірки ЛЕП, перевірки дуги та перевірки каналу. Відповідно до вимог перевірки № 1–10 у таблиці 3.1 кожна точка завдання планування шляху розраховується за базовими даними електричної вежі в базі даних. Базові дані вежі включають параметри: широта, довгота, висота, дирекційний кут і категорія вежі. Як показано на рис. 3.14, напрямок, перпендикулярний азимуту вежі, є азимутом розташування точки завдання.

Порівняно з існуючою системою моніторингу повітряних ліній ЛЕП, *переваги удосконаленої системи такі:*

1) Система наземної станції, яка об'єднує планування шляху інспекції, розподіл завдань, управління даними, інтелектуальну діагностику несправностей та іншу багатофункціональну систему, реалізуючи повністю автономну роботу процесу інспекції, покращуючи автономність інспекції та заощаджуючи кошти, пов'язані з навчанням професійної інспекції, необхідної для існуючої інспекції.

2) Систему керування польотом і комбінована навігаційна систему для досягнення високої надійності та високої точності керування польотом БПЛА, вирішує проблему поганої стабільності існуючого керування польотом БПЛА.

3) Мобільна інспекційна схема, що дозволяє автономну заміну батареї інспекційного БПЛА на борту інтелектуальної машини значно підвищує дальність та ефективність перевірки.

4) Методика виявлення об'єктів у поєднанні з ручним виявленням, забезпечує швидке створення детальних звітів про перевірку ЛЕП.

3.2.5 Перспективи використання аеромагнітної та аероелектромагнітної зйомок на базі БПЛА для моніторингу стану ліній електропередач

Безпілотники можуть бути обладнані апаратурою для ведення фото- та відеозйомки. БПЛА в режимі реального часу транслює отримані дані на пульт управління, а також записує їх на картку пам'яті. Літальний апарат здатний

самостійно летіти по заданому маршруту, проте оператор може будь-якої миті взяти управління на себе. Апарат пристосований для використання в різних регіонах, у широкому діапазоні температур та в таких складних погодних умовах, як дощ та обмежена видимість. Використання безпілотних літальних апаратів дозволяє підвищити економічність обстеження порівняно з традиційними способами та збільшити кількість вильотів, одночасно підвищивши якість моніторингу стану енергетичних об'єктів та надійність їх експлуатації.

Виконання вищевказаних завдань здійснюється завдяки використанню кількох видів аерозйомки.

Для планового моніторингу необхідно попередньо створити інформаційну базу, яка повинна включати оптичні зображення досліджуваних об'єктів та їх зображення в інфрачервоному діапазоні, отримані за допомогою тепловізорів для певних ділянок магістральних ліній електропередач. Для цих ділянок повинні бути заздалегідь побудовані карти рівнів напруженості електричного та магнітного полів, отриманих за допомогою розрахунків та вимірювань на певних відстанях над лініями електропередач, а також на певних відстанях над високовольтними підстанціями.

Передбачається, що БПЛА будуть із заданою періодичністю проводити аерофотозйомку досліджуваних об'єктів в оптичному та інфрачервоному діапазонах, а також вимірювати напруженість їх електричного та магнітного поля.

Передбачається, що позапланові облети будуть проводитись при аварійних ситуаціях на ЛЕП для визначення місця та характеру пошкоджень. Порівняння за допомогою розробленого програмного забезпечення даних, що реєструються при обльотах БПЛА, з даними інформаційної бази досліджуваного об'єкта дозволить приймати оперативні рішення щодо його поточного стану: усувати порушення, наявність яких може призвести до аварійних відмов, або знаходити місця аварій, якщо їх не вдалося уникнути .

Використання автоматизованої системи для порівняння найбільш значущих параметрів, що описують штатне функціонування досліджуваних об'єктів (ЛЕП та високовольтних підстанцій), дозволить також запобігти несанкціонованому відбору потужності з енергосистеми. Аналіз таких параметрів може бути використаний для оптимізації режимів роботи, так і структури самих досліджуваних енергетичних об'єктів.

Відеозйомка здійснюється за допомогою відеокамери, встановленої на безпілотний апарат. Вона застосовується для оперативного візуального обстеження території вздовж траси лінії електропередач. Фотозйомка має перевагу над звичайною відеозйомкою через вищу роздільну здатність.

Тепловізійна зйомка дозволяє вести спостереження в умовах обмеженої видимості та у темний час доби. Вона дає можливість виявити присутність сторонніх в зонах, що охороняються [59].

Поєднання різних видів зйомки дозволяє найповніше оцінити стан об'єкта. Інформаційна база повинна також включати карти розташування систем захисного заземлення високовольтних підстанцій, які мають ключове значення для забезпечення безпеки функціонування персоналу та обладнання. Причому такі карти повинні бути отримані в результаті вимірювань напруженості магнітного поля при протіканні струму по захисному заземленню. Отримані таким чином дані про розташування елементів системи захисного заземлення вводяться як вихідні програмне забезпечення, що дозволяє побудувати розподіл ліній рівного потенціалу і напруженості електричного поля на поверхні землі, визначити рівні крокових напруг і напруг дотику, а також повний опір системи заземлення. За даними картин роблять висновки про надійність існуючої системи захисного заземлення. При необхідності в рамках виконання моніторингу будуть надані рекомендації щодо конструкції та розташування електромагнітних екранів, використання яких дозволяє знизити рівні електромагнітних впливів [60].

Безпілотна аерофотозйомка ЛЕП при обльоті ліній дозволяє суттєво скоротити час на пошук пошкоджень ЛЕП при їхньому аварійному

відключенні. Так, традиційний обхід однієї високовольтної лінії довжиною 10 км, розташованої на важкодоступній ділянці, може затягнутися на якийсь час від декількох годин до декількох днів. Огляд з повітря дозволяє обстежити ту ж ЛЕП всього за півгодини при швидкості руху БПЛА 60-70 км/год навіть з урахуванням його запуску та прийому даних.

Завдання, що вирішуються за допомогою БПЛА для електроенергетики, такі: оцінка стану повітряних ліній ПЛ; аерофотозйомка ЛЕП, опор та ліній електропередачі; вимірювання стріли провісу проводів; тепловізійний контроль елементів ЛЕП; контроль допустимої висоти дерев у зоні проходження високовольтних ліній за допомогою лазерного сканування; ідентифікація будівельних майданчиків; зйомка нових маршрутів ЛЕП, прилеглої території та створення цифрової моделі рельєфу; пошук та аналіз пошкоджень, аварій тощо. Дані завдання вирішуються за допомогою обладнання, що встановлюється на БПЛА (відеокамери, фотоапарати, тепловізори тощо).

Підвищення ефективності моніторингу технічного стану елементів ПЛ може полягати в тому, щоб адаптувати ПЛ до використання БПЛА. Для цього на ПЛ встановлюються спеціальні апаратні засоби, що дозволяють за допомогою візуальних, радіотехнічних чи інших засобів передавати на БПЛА інформацію про технічний стан компонентів ПЛ. Це дозволить значно підвищити інформативність при використанні БПЛА і збільшить достовірність інформації, що отримується.

Відомі запатентовані технічні рішення, метою яких є забезпечення управління рухом БПЛА за допомогою виміру напруженості електричного (ЕП) або магнітного поля (МП) [61]. Ці рішення можуть бути використані для розробки методики моніторингу безпеки об'єктів енергетичної системи України.

Така методика передбачає створення паспортів – еталонів, що описують функціонування ЛЕП та високовольтних підстанцій у штатному режимі. Дані паспорта - зразки повинні включати оптичні зображення об'єктів, що

досліджуються, та їх зображення в інфрачервоному діапазоні, отримані за допомогою тепловізорів. До складу таких паспортів мають входити також карти рівнів напруженості електричного та магнітного полів, отриманих за допомогою розрахунків та вимірювань на певних відстанях над лініями ЛЕП, а також на певних відстанях над високовольтними підстанціями.

Передбачається, що БПЛА будуть із заданою періодичністю проводити аерофотозйомку досліджуваних об'єктів в оптичному та інфрачервоному діапазонах, а також вимірювати напруженість їх ЕП та МП.

Передбачається, що позапланові облети будуть проводитись при аварійних ситуаціях на ЛЕП для визначення місця та характеру пошкоджень. Порівняння за допомогою розробленого програмного забезпечення даних, що реєструються при обльотах БПЛА, з даними паспорта – еталона досліджуваного об'єкта дозволить приймати оперативні рішення щодо його поточного стану: усувати порушення, наявність яких може призвести до аварійних відмов, або знаходити місця аварій, якщо їх не вдалося уникнути.

Використання автоматизованої системи для порівняння найбільш значущих параметрів, що описують штатне функціонування досліджуваних об'єктів (ЛЕП та високовольтних підстанцій), дозволить також запобігти несанкціонованому відбору потужності з енергосистеми. Аналіз таких параметрів може бути використаний для оптимізації режимів роботи, так і структури самих досліджуваних енергетичних об'єктів.

Такі паспорти повинні також включати карти розташування систем захисного заземлення високовольтних підстанцій, що мають ключове значення для забезпечення безпеки функціонування персоналу та обладнання. Причому такі карти повинні бути отримані в результаті вимірювань напруженості МП при протіканні струму по захисному заземленню. Для цього отримання достовірної інформації про поточний стан системи захисного заземлення (СЗЗ) передбачається приєднувати до неї генератор струмів та вимірювати напруженість МП над поверхнею землі. Отримана таким чином карта відображатиме справжнє розташування елементів системи захисного

заземлення. Це дасть можливість оцінити ступінь надійності захисту об'єкта, що досліджується, системою захисного заземлення в різних аварійних режимах короткого замикання і, за необхідності, розробити рекомендації щодо відновленню ділянок СЗЗ, що вийшли з ладу, а також її доукомплектування та модернізації. Отримані таким чином дані про розташування елементів системи захисного заземлення вводяться як вихідні в розроблене програмне забезпечення, що дозволяє побудувати розподіл ліній рівного потенціалу і напруженості ЕП на поверхні землі, визначити рівні крокових напруг і напруг дотику, а також повний опір системи заземлення. За даними картин роблять висновки про надійність існуючої системи захисного заземлення. При необхідності в рамках виконання моніторингу будуть надані рекомендації щодо конструкції та розташування електромагнітних екранів, використання яких дозволяє знизити рівні електромагнітних впливів [61].

Для виконання функцій фото-, відео- та тепловізійної зйомки необхідно використовувати різні види корисного навантаження, що дозволить отримати різну інформацію про стан лінії електропередачі. Застосування корисного навантаження як фото- і відеокамер на БПЛА дає можливість отримувати високоякісні знімки, якими можна знайти різні дефекти повітряних ЛЕП.

В якості апаратури для фотозйомки нами обрано як оптимальну камеру Sony ILCE-6000 APS-C на двовісній гіростабілізованій платформі з роздільною здатністю 24.7 млн. пікселів. Дана камера дозволяє отримувати зображення відмінної якості з високою швидкістю 11 кадр/с, що дає можливість вибирати найкращі кадри з найкращою роздільною здатністю.

В якості апаратури для відеозйомки нами обрано як оптимальну камеру з гіростабілізацією Sony FCB-H11 з роздільною здатністю 1920 1080, яка передаватиме зображення на пульт оператора БПЛА в режимі реального часу. Використання камери з таким дозволом підвищить оперативність виявлення дефектів елементів ЛЕП.

Для тепловізійної зйомки нами обрано як оптимальну тепловізійну камеру Flir Vue Pro. За допомогою даної апаратури можливе виявлення таких дефектів, як:

- наявність слідів перекриття та оплавлення;
- пошкодження та наявність корозії проводів та тросів;
- неправильний монтаж з'єднань, наслідком чого став перегрів будь-яких частин ЛЕП.

Перешкодами вважаються всі об'єкти в коридорі ЛЕП, відстань яких до ЛЕП менша за безпечну відстань [59]. Як показано на рис.3.11, щоб виявити перешкоди всередині коридору лінії електропередач, ми спочатку використовуємо зображення БПЛА та наземні контрольні точки, щоб отримати зовнішню орієнтацію зображень. Потім епіпольярні зображення генеруються на основі параметрів відносної орієнтації стереозображень. Нарешті, перешкоди автоматично ідентифікуються та локалізуються шляхом обчислення просторової відстані між лінією електропередачі та хмарою точок на землі, отриманими з оптичних зображень (рис. 3.15).

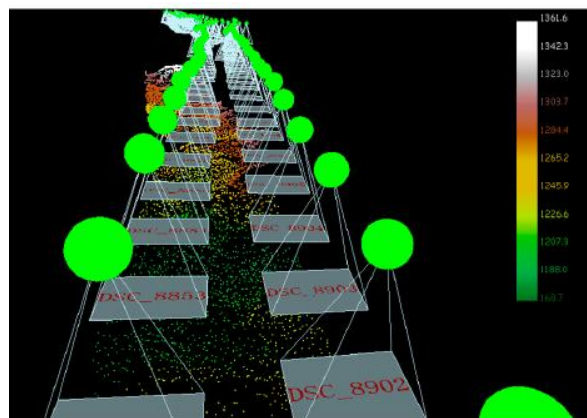


Рисунок 3.15 - Принципова схема розташування автоматичного виявлення перешкод у коридорах ліній електропередач. Зелені крапки представляють центри камер, а сірі прямокутники під зеленими крапками – зроблені зображення у світових координатах. Маленькі крапки внизу – це прогнозовані точки землі, де кольором позначаються різні висоти, позначені легендою праворуч на рисунку.

Процес складається з трьох етапів: виявлення особливостей лінії електропередач за допомогою оператора коефіцієнта сірого кольору, уточнення сегментів лінії електропередач на основі однакових умов лінії та виділення векторів лінії електропередач на основі попередніх знань.

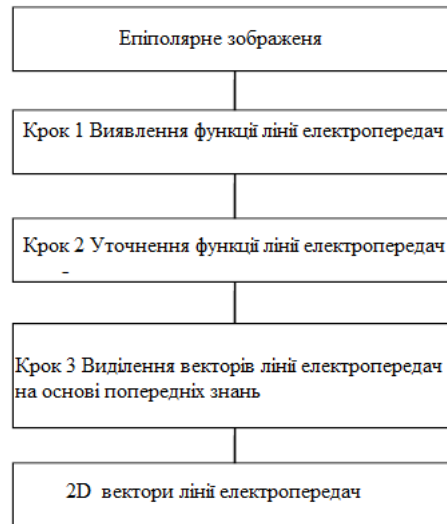


Рисунок 3.16 - Блок-схема двовимірного векторного моніторингу ЛЕП

В автоматичному методі перевірки ліній електропередач за допомогою епіпольярних зображень БПЛА зосередилися на вирішенні трьох завдань: автоматичне вимірювання ліній електропередач, автоматична 3D-реконструкція поверхні землі вздовж коридору лінії електропередач і автоматичне розпізнавання перешкод. Перешкоди можна виявити автоматично шляхом обчислення відстані між тривимірними векторами ліній електропередач і хмарами точок на землі. Удосконалення включають: 1) візуалізацію та дистанційне зондування для виявлення кабелю; 2) оцінки стану для визначення положення БПЛА відносно лінії електропередач; 3) відстеження кабелю з використанням даних LiDAR [48]; 4) моделювання та реальне середовище лінії електропередач для перевірки.

Під час огляду ЛЕП та приземлення було запропоновано як систему на основі візуалізації, так і систему на базі LiDAR для визначення положення ліній електропередач відносно БПЛА. Завдання виявлення ліній електропередач і опор вирішується за допомогою методів комп'ютерного зору. Поширеним

методом є використання перетворення Хафа для виявлення країв у зображенні та використання алгоритму кластеризації для визначення ліній ЕП [60]. Крім того, фільтр оцінки стану можна використовувати для зменшення збурень від тремтіння камери [61] або для оцінки руху краю на основі інформації.

Інновацією є системи безпілотників для автономного огляду та обслуговування електромережі. Таким чином, ми пропонуємо створення автономної структури для багатороторної платформи безпілотника для проведення автономних інспекційних місій.

3.3 Розробка узагальненої схеми механізму удосконалень методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах

Узагальнена схема механізму удосконалень методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах включає:

1) Основні етапи роботи системи моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА:

а) завчасне формування бази знань параметрів штатного функціонування всіх елементів повітряних ЛЕ; б) виявлення критичної зміни параметрів, що передують аварійній ситуації повітряної ЛЕП на певній ділянці; в) ідентифікація можливого пошкодження ЛЕП до початку аварійної ситуації; г) розробка рекомендацій, щодо усунення пошкодження елемента ЛЕП для усунення аварійної ситуації.

2) Недоліки існуючих методів методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА:

а) довготривалий цикл роботи з моніторингу ЛЕП; б) відсутність забезпечення оперативного парирування аварійної ситуації; в) відсутність швидких експертних рекомендацій щодо своєчасного усунення відмови ЛЕП; г) низький ступінь автономності інспекційного польоту БПЛА та низька ефективність перевірки ЛЕП; д) проблеми зі стабільністю керування польотом БПЛА у складних умовах навколишнього середовища; е) відсутність автономного планування траєкторії польоту БПЛА; ж) низька точність

інтелектуального розпізнавання пошукових об'єктів з БПЛА та повільне створення звітів про інспекцію; 3) проблеми із заміною акумулятора БПЛА під час моніторингу ЛЕП.

3) Удосконалення існуючих методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА в дестабілізуючих умовах шляхом впровадження:

а) автономного планування траєкторії польоту БПЛА; б) автономного збору даних щодо пошкоджень та дефектів; в) автономного моніторингу ЛЕП; г) інтелектуальної діагностики даних моніторингу ЛЕП з глибоким навчанням для аналізу даних; д) використання штучного інтелекту для здатності БПЛА розпізнавати топографічні дані та інтегрувати дані про неспокійну атмосферу; е) Планування маршруту моніторингу різних ділянок електромережі групою БПЛА різних типів із застосуванням датчиків міжоб'єктної навігації; ж) поєднання різних видів аерозйомки для моніторингу ЛЕП за допомогою БПЛА: оптичний та інфрачервоний діапазони, аеромагнітна, аероелектромагнітна зйомки.

4) Узагальнена структура удосконалень методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах (рис. 3.17).

Таким чином, нами удосконалено методи моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах, які відрізняються від попередніх впровадженням автономного планування польоту, автономним збором даних, автономним моніторингом, автономною заміною акумулятора, інтелектуальною діагностикою даних; використання штучного інтелекту для здатності БПЛА розпізнавати топографічні дані та інтегрувати дані про неспокійну атмосферу; планування маршруту моніторингу різних ділянок електромережі групою БПЛА різних типів із застосуванням датчиків міжоб'єктної навігації; автоматизованого моніторингу стану мереж ЛЕП за допомогою БПЛА з виконанням відеоаерофотозйомки досліджуваних об'єктів в оптичному та інфрачервоному діапазонах, епіполярного зображення, а також аеромагнітної та аероелектромагнітної зйомки.

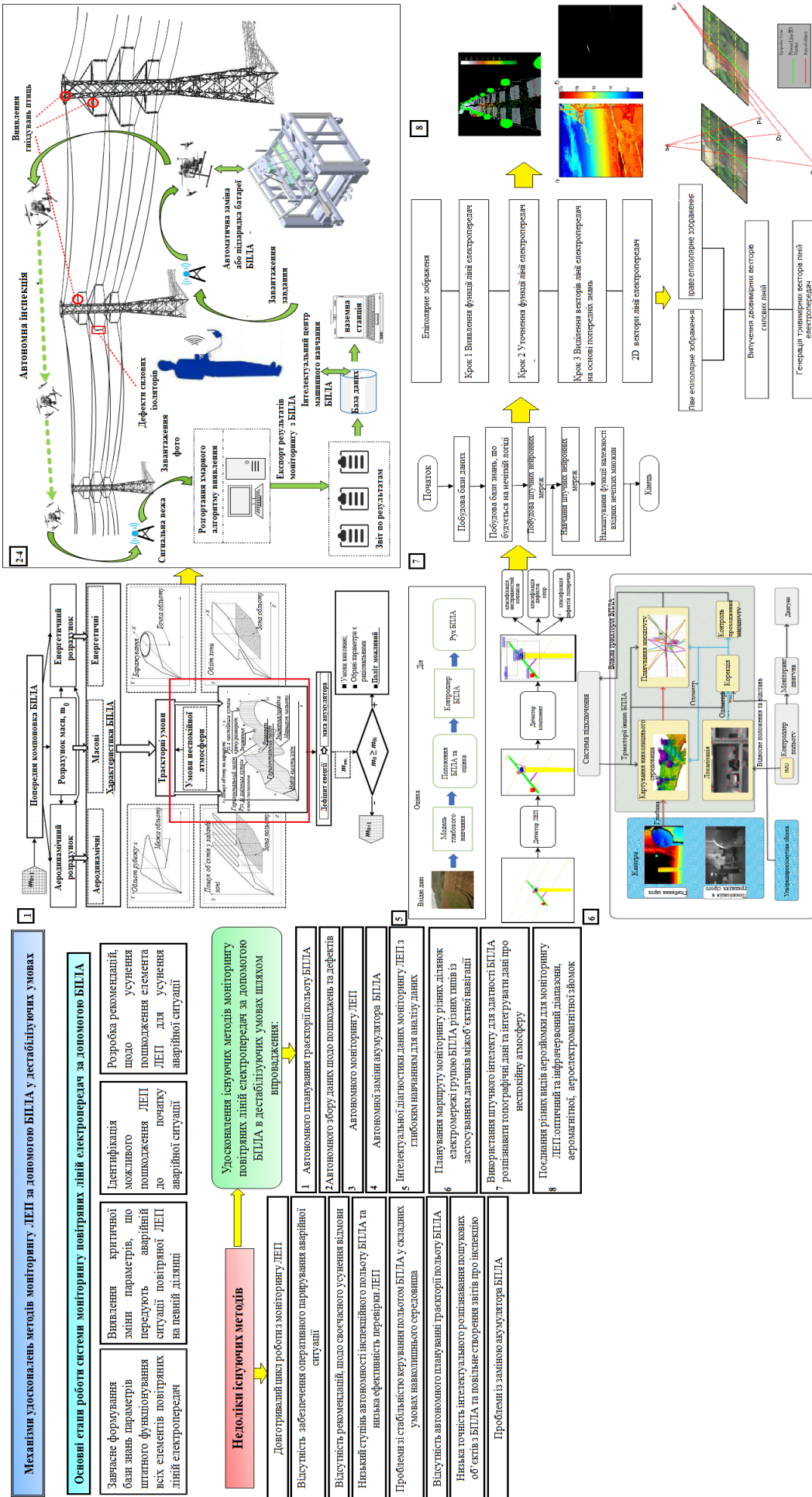


Рисунок 3.17 - Узагальнена схема механізму удосконалень методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у нестабільних умовах

Такі шляхи удосконалення, на відміну від існуючих рішень, можуть забезпечити швидке автономне визначення розташування всіх зафіксованих проблемних ділянок ЛЕП на значній відстані і дозволяють миттєво здійснювати дії по відновленню з високою пріоритетністю на місцях.

Удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах має важливе теоретичне та практичне значення. На практиці запропонований у роботі механізм удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах, може бути використаний у моніторингу, спрямованому на запобігання аварійним відключенням ліній електропередачі, а також якнайшвидшому оперативному забезпеченні відновлення їх працездатності, у разі їх пошкодження, що сприятиме енергетичній безпеці України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Дана кваліфікаційна робота - закінчена комплексна самостійна наукова робота, головною метою якої є удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах для вирішення проблем зі своєчасним отриманням інформації про стан об'єкту моніторингу для якнайшвидшого відновлення працездатності енергооб'єкту з одного боку, та забезпечення належного рівня безпеки та надійності процесу моніторингу на базі безпілотних літальних апаратів в дестабілізуючих умовах з іншого боку. Розроблена узагальнена схема механізму удосконалень методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах. Розробка може бути використана у моніторингу, спрямованому на запобігання аварійним відключенням ліній електропередачі, а також якнайшвидшому оперативному забезпеченні відновлення їх працездатності, у разі їх пошкодження, що сприятиме енергетичній безпеці України.

1. У магістерській роботі проведено аналіз проблем моніторингу повітряних ліній електропередач, наведено існуючі види огляду ліній електропередач, а також методи та технології їх проведення, проведено аналіз ринку безпілотних літальних апаратів, проаналізовано найбільш поширені типи ушкоджень ліній електропередач згідно статистичних даних.

Дослідження дозволило виявити основні проблеми, пов'язані з експлуатацією та контролем стану повітряних ліній електропередач різних класів напруги, а саме: 1) відсутність системного підходу в організації обслуговування, контролю та оцінки стану, планування та виробництва ремонтів ЛЕП; 2) відсутність чіткої системи підготовки та ведення повної та якісної бази даних з ремонтно-експлуатаційної та нормативно-технічної документації; 3) численні пошкодження енергетичних об'єктів внаслідок масованих цілеспрямованих ракетних обстрілів енергетичної інфраструктури України з боку РФ та обґрунтувати шляхи вирішення цих проблем, які пов'язані з запровадженням новітніх технологій для забезпечення ефективного

моніторингу ЛЕП та оперативного парировання аварійних ситуацій на основі створення автоматизованої системи моніторингу та оцінки стану повітряної ЛЕП, що складається із засобу забезпечення моніторингу та діагностики (представленого у вигляді БПЛА зі знімними блоками) та механізму визначення оптимальних рішень для подальшої експлуатації ЛЕП, а також вимагає удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах.

2. У магістерській роботі проведено аналітичне дослідження існуючих методів моніторингу та діагностування стану для зниження ймовірності стійких ушкоджень ЛЕП; проведено аналіз безпілотних літальних апаратів та виконано обґрунтування вибору БПЛА для процесу моніторингу повітряних ліній електропередач. Обґрунтовано фактори впливу дестабілізуючих та складних умов середовища на ефективну роботу БПЛА, проведено аналіз існуючих систем моніторингу та діагностики повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА. Наведено стандартний алгоритм плану аеромоніторингу енергетичних об'єктів за допомогою БПЛА та опис основних вимог до існуючих систем діагностики повітряних ліній електропередач.

На основі проведеного аналізу стало можливим зробити наступні висновки: 1) є доцільною розробка модульного автоматизованого пристрою комплексного діагностування повітряних ЛЕП за допомогою БПЛА; 2) необхідні дослідження, спрямовані на удосконалення існуючих методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у складних та дестабілізуючих умовах. Така потреба пояснюється необхідністю забезпечувати максимально автоматизовану оцінку стану ЛЕП на базі різних методів діагностування та вимірювань за мінімально можливої участі людини протягом тривалого періоду часу та за мінімально можливої вартості її впровадження.

3) Проведено аналіз архівних метеоданих за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року для міста Кропивницький з метою визначення кількості днів дестабілізуючих погодних умов на ефективну роботу БПЛА на рік. В результаті

було виявлено, що кількість днів з температурами, що виходять з діапазону $[-30; +40^{\circ}\text{C}]$ за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року становила 5 днів, а середня кількість днів, коли швидкість вітру перевищувала 10 м/с (~ 28 км/год), становила за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року 15 (без урахування короточасних поривів вітру). У середньому у місті Кропивницькому Кіровоградської області кількість днів на рік з опадами була за період з 01.01.2023 по 01.01.2024 року – 42 (без урахування хмарних днів із короточасними опадами). Це дозволило дійти висновку, що кількість придатних для експлуатації БПЛА днів у році у межах міста Кропивницький Кіровоградської області становить 238, виходячи зі спрощень, що в один день зустрічається лише одна умова, що обмежує експлуатацію. Це показує, що кліматичні фактори практично не обмежують застосування обраного нами БПЛА для кліматичних умов міста Кропивницький Кіровоградської області.

4. У магістерській роботі уточнено і конкретизовано результати останніх наукових досягнень в області систем моніторингу та діагностування стану ЛЕП для зниження ймовірності стійких ушкоджень. Аналіз дозволив виявити основні недоліки існуючих методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА, а саме: а) довготривалий цикл роботи з моніторингу ЛЕП; б) відсутність забезпечення оперативного парировання аварійної ситуації; в) відсутність швидких експертних рекомендацій щодо своєчасного усунення відмови ЛЕП; г) низький ступінь автономності інспекційного польоту БПЛА та низька ефективність перевірки ЛЕП; д) проблеми зі стабільністю керування польотом БПЛА у складних умовах навколишнього середовища; е) відсутність автономного планування траєкторії польоту БПЛА; ж) низька точність інтелектуального розпізнавання пошукових об'єктів з БПЛА та повільне створення звітів про інспекцію; з) проблеми із заміною акумулятора БПЛА під час моніторингу ЛЕП.

Дослідження дозволило обґрунтувати нові підходи до удосконалення методів існуючих методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА в дестабілізуючих умовах шляхом впровадження:

а) автономного планування траєкторії польоту БПЛА; б) автономного збору даних щодо пошкоджень та дефектів; в) автономного моніторингу ЛЕП; г) інтелектуальної діагностики даних моніторингу ЛЕП з глибоким навчанням для аналізу даних; д) використання штучного інтелекту для здатності БПЛА розпізнавати топографічні дані та інтегрувати дані про неспокійну атмосферу; е) Планування маршруту моніторингу різних ділянок електромережі групою БПЛА різних типів із застосуванням датчиків міжоб'єктної навігації; ж) поєднання різних видів аерозйомки для моніторингу ЛЕП за допомогою БПЛА: оптичний та інфрачервоний діапазони, епіполярне зображення, аеромагнітна, аероелектромагнітна зйомки.

Логічною кульмінацією сучасної системи моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА в дестабілізуючих умовах стало створення узагальненої схеми механізму удосконалень методів моніторингу ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах. Вирішенню цього актуального науково-прикладного завдання і була присвячена магістерська робота.

Комплекс методів, використаних в магістерському дослідженні, дозволив:

1. Виконати аналіз проблем моніторингу та діагностики повітряних ліній електропередач в енергетичних компаніях.
2. Провести аналітичне дослідження існуючих методів та систем моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА.
3. Провести удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах.

Таким чином, мета наукового дослідження магістерської роботи, яка полягає в удосконаленні методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах, досягнута, всі поставлені завдання вирішені в повному обсязі.

Удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах має важливе теоретичне та практичне значення. На практиці запропонований у роботі механізм

удосконалення методів моніторингу повітряних ліній електропередач за допомогою БПЛА у дестабілізуючих умовах, може бути використаний у моніторингу, спрямованому на запобігання аварійним відключенням ліній електропередачі, а також якнайшвидшому оперативному забезпеченні відновлення їх працездатності, у разі їх пошкодження, що сприятиме енергетичній безпеці України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Sokol E. I., Rezinkina M. M., Gryb O. G., Vasilchenko V. I., Zuev A. A., Bortnikov A. V., Sosina E. V. A Method of Complex Automated Monitoring of Ukrainian Power Energy System Objects to Increase Its Operation Safety. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp. 65-70.
2. Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system. *7th European Workshop on Structural Health Monitoring* July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France. P. 663 – 670.
3. Dehghanian P., Aslan S., and Dehghanian P. Maintaining electric system safety through an enhanced network resilience. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 5, pp. 4927-4937, Sep. 2018.
4. Matikainen L., Lehtomäki M., Ahokas E., Hyypä J., Karjalainen M., Jaakkola A., Kukko A., and Heinonen T. Remote sensing methods for power line corridor surveys. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 119, pp. 10-31, Sep. 2016.
5. EASA, EU wide rules on drones published, 2019, <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/press-releases/eu-wide-rules-drones-published>.
6. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines. *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015)*. P. 1542 – 1545.
7. Adabo G. J. Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system. *AUVSI's Unmanned Systems 2013*. Washington (USA). 2013.
8. Imad J., Nader M., Jameela Al-J., Dharma A., Sheng Z. Communication and Networking of UAV-Based Systems: Classification and Associated Architectures. *Journal of Network and Computer Applications*. 2018. Vol. 3. P. 52–55.

9. Бржезицький В.О., Крисенко Д.С., Ткаченко М.П., Яновський В.П. Розрахунок перенапруг на непошкоджених фазах при однофазних коротких замиканнях в мережах 110 – 750 кВ. *Технічна електродинаміка*. 2010. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки» Ч. 3. С. 17 – 20.

10. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Резонансні перенапруги у несинусоїдному режимі магістральної електричної мережі. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. №2. С. 69 – 73.

11. Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Пляшко Р.В. Дослідження впливу параметрів ЛЕП НВН на аномальні перенапруги. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. №3(37). С. 52 – 58.

12. Шполянський О.Г. Вплив зближених ЛЕП на перенапруги в паузі однофазного автоматичного повторного включення. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. №164. С. 12 – 13.

13. Равлик О.М., Стецик В.Я. Моделювання комутаційних процесів ліній надвисокої напруги 750 кВ. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2016. №840. С.102 – 107.

14. Лиховид Ю.Г., Тугай І.Ю. Моделювання режимів роботи компенсованих ліній електропередач. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. №1 (6). С. 10 – 12.

15. Кучанський В.В. Резонансні перенапруги у несинусоїдальних режимах ліній електропередач надвисокої напруги. *Електроніка та зв'язок*. 2017. №4. С. 25– 29.

16. Кузнецов В.Г., Нікішин Д.А., Тугай Р.Ю. Моделювання несиметричних режимів роботи лінії електропередачі. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. №1 (6). С. 13 – 16

17. Друзь В.О., Мороз О.М., Череміс М.М. Моделі математичного моделювання процесів енергетичних мереж Smart Grid. *Вісник Харківського*

національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. №186. С. 7 – 11

18. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) Національний стандарт України. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності

19. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Smart grid як пріоритети розвитку електроенергетики України та Європи. Матеріали V Міжнародної конференції [«Інтелектуальні енергетичні системи – 2017»] (Київ, 05 – 09 червня 2017 р.) НТУУ «КПІ». 2017.

20. Кульбовський І.І., Голуб Г.М. Аналіз нормативно-технічної бази впровадження інтелектуальних енергетичних систем на основі технологій SMART GRID. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. №3. С.50 – 57.

21. Eschmann C., Kuo C.-M., Kuo C.-H., Boller C. Unmanned Aircraft Systems for Remote Building Inspection and Monitoring. *6th European Workshop on Structural Health Monitoring*. 2019. Th.2. B. P. 213–217.

22. Deng C., Wang S., Huang Z., Tan Z., Liu J. Unmanned Aerial Vehicles for Power Line Inspection: A Cooperative Way in Platforms and Communications. *Journal of Communications*. 2014. Vol. 9, no. 9. P. 687–692.

23. Nguyen V. N., Jenssen R., and Roverso D. Intelligent monitoring and inspection of power line components powered by UAVs and deep learning. *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 11-21, Mar. 2019.

24. Qin X., Wu G., Lei J., Fan F., Ye X., and Mei Q. A novel method of autonomous inspection for transmission line based on cable inspection robot LiDAR data. *Sensors*, vol. 18, no. 2, Feb. 2018, Art. no. 596.

25. Nguyen V. N., Jenssen R., and Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 99, pp. 107-120, Jul. 2018.

26. Kalos P.S.; Pantawane P.D.; Rajiv B.H. Improved Detection of Fault Diagnosis in High Voltage Transmission Lines Using Thermal Imaging Based Convolutional Neural Network Module. *Solid State Technol.* 2020, 63, 6.

27. DJI Mavic 2 pro [Електронний ресурс]: Основні характеристики квадрокоптера DJI Mavic 3 pro URL: <https://ukroptica.com.ua/kvadrokoopter-dji-mavic-3-pro>

28. DJI Phantom 4 pro V2.0 [Електронний ресурс]: Основні характеристики квадрокоптера DJI Phantom 4 pro V2.0 URL: <https://dronestore.com.ua/shop/dji-phantom-4-pro-v2-0/>

29. Сайт <https://www.meteoblue.com> [Електронний ресурс] (дата звернення 01.08.2024 р.)

30. Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system. *7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*, July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France. pp. 663-670.

31. Iversen N., Schofield O.B., Cousin L., Ayoub N., Vom Boegel G., Ebeid E. Design, integration and implementation of an intelligent and self-recharging drone system for autonomous power line inspection, in: *2021 IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2021.

32. Zhaowei M., Tianjiang H., Lincheng S., Weiwei K., Boxin Z., and Kaidi Y. An iterative learning controller for quadrotor UAV path following at a constant altitude, in *Proc. 34th Chin. Control Conf. (CCC)*, Jul. 2015, pp. 4406-4411.

33. Geraldo J. Adabo. Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system. *AUVSI Unmanned Systems*. vol.1. 12-15 August 2013, Washington, DC, USA. pp. 1556-1563.

34. Qin X., Wu G., Lei J., Fan F., and Ye X. Detecting inspection objects of power line from cable inspection robot LiDAR data. *Sensors*, vol. 18, no. 4, Apr. 2018, Art. no. 1284.

35. Giernacki W. Iterative learning method for inight auto-tuning of UAV controllers based on basic sensory information. *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 4, p. 648, Feb. 2019.
36. Li H. Thermal Fault Detection and Diagnosis of Electrical Equipment Based on the Infrared Image Segmentation Algorithm. *Adv.Multimed.* 2021, 9295771.
37. Pastucha E., Puniach E., Ścisłowicz A., Ćwiakała, P. Niewiem W., Wiącek P. 3D reconstruction of power lines using UAV images to monitor corridor clearance, *Remote Sens.* 12 (22) (2020) 3698.
38. Ramesh K.N., Murthy A.S., Senthilnath J., Omkar S. Automatic detection of powerlines in UAV remote sensed images, in: *2015 International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems*, CATCON, 2015, pp. 17–21.
39. Dmitriev S.A. Khalyasmaa A.I. Power equipment technical state assessment principles. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 492. P. 531–535. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.492.531
40. Foudeh H. A., Luk P., and Whidborne J. F. Quadrotor system design for a 3 DOF platform based on iterative learning control. in *Proc. Workshop Res., Educ. Develop. Unmanned Aerial Syst. (RED UAS)*, Nov. 2019, pp. 53-59.
41. Foudeh H. A., Luk P., and Whidborne J. Application of norm optimal iterative learning control to quadrotor unmanned aerial vehicle for monitoring overhead power system. *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3223, Jun. 2020.
42. Allahverdy D., Fakharian A., and Menhaj M. B. Back-stepping integral sliding mode control with iterative learning control algorithm for quadrotor UAV. *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 2539_2547, Nov. 2019.
43. Barman S. D., Reza A. W., Kumar N., Karim M. E., and Munir A. B. Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications. *Renew. Sustain.Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1525-1552, Nov. 2015.

44. Zhao N., Zhang S., Yu F. R., Chen Y., Nallanathan A., and M. Leung V. C. Exploiting interference for energy harvesting: A survey, research issues, and challenges. *IEEE Access*, vol. 5, pp. 10403-10421, 2017.
45. Sa P. Corke Close-quarters quadrotor flying for a pole inspection with position based visual servoing and high-speed vision, in: *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS*, 2014, pp. 623–631.
46. Mirallis F., Hamelin P., Lambert G., Lavoie S., Pouliot N., Montfrond M., Montambault S. LineDrone technology: landing an unmanned aerial vehicle on a power line, in: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, 2018, pp. 6545–6552.
47. Chang W., Yang G., Yu J., Liang Z., Cheng L., Zhou C. Development of a power line inspection robot with hybrid operation modes, in: *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2017, pp. 973–978.
48. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines . Proceedings of the *2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics*, 2015. pp. 1542-1545. doi: 10.2991/ameii-15.2015.285.
49. Hamelin P., Mirallis F., Lambert G., Lavoie S., Pouliot N., Montfrond M., Montambault S. Discrete-time control of LineDrone: An assisted tracking and landing UAV for live power line inspection and maintenance, in: *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS*, 2019, pp. 292–298.
50. Iversen N., Kramberger A., Schofield O.B., Ebeid E. Novel power line grasping mechanism with integrated energy harvester for UAV applications, in: *2021 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSRR*, 2021.
51. Jalil B.; Pascali M.A.; Leone G.R.; Martinelli M.; Moroni D.; Salvetti O.; Berton A. Visible and Infrared Imaging Based Inspection of Power Installation. *Pattern Recognit. Image Anal.* 2019, 29, 35–41.

52. An, D.; Zhang, Q.; Chao, J.; Li, T.; Qiao, F.; Deng, Y.; Bian, Z.; Xu, J. DUFormer: A Novel Architecture for Power Line Segmentation of Aerial Images. 2023, arXiv:2304.05821.

53. Lin, Y.; Zhang, W.; Zhang, H.; Bai, D.; Li, J.; Xu, R. An Intelligent Infrared Image Fault Diagnosis for Electrical Equipment. In *Proceedings of the 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Chengdu, China, 4–7 June 2020; pp. 1829–1833.

54. Tymochko O., Fustii V., Kolesnyk G., Olizarenko S., Kalashnyk G., Kulish R., Tymoschuk O., Galinskji D. Inter-Object Navigation of Unmanned Aerial Vehicles to Increase the Efficiency and Accuracy of Inspection of Power Lines. *Problemele Energeticii Regionale*. 1(57). 2023. P.28-38.

55. Balakrishnan, G.K.; Yaw, C.T.; Koh, S.P.; Abedin, T.; Raj, A.A.; Tiong, S.K.; Chen, C.P. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations. *Energies* 2022, 15, 6000.

56. Yong Zhang, Xiuxiao Yuan Wenzhuo Li and Shiyu Chen. Automatic Power Line Inspection Using UAV Images. *Remote Sens.* 2017, 9, pp. 1-19. 824; doi:10.3390/rs9080824.

57. Shams, F.; Omar, M.; Usman, M.; Khan, S.; Larkin, S.; Raw, B. Thermal Imaging of Utility Power Lines: A Review. In *Proceedings of the 2022 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 27–28 October 2022; pp. 1–4.

58. Ziran Li, Yanwen Zhang, Hao Wu, Satoshi Suzuki, Akio Namiki and Wei Wang. Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines. *Remote Sens.* 2023, 15, 865. Pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/rs15030865>

59. Hao J.;Wulin H.; Jing C.; Xinyu L.; Xiren M.; Shengbin Z. Detection of bird nests on power line patrol using single shot detector. In *Proceedings of the 2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, Hangzhou, China, 22–24 November 2019; pp. 3409–3414.

60. Xu, C.; Li, Q.; Zhou, Q.; Zhang, S.; Yu, D.; Ma, Y. Power Line-Guided Automatic Electric Transmission Line Inspection System. *IEEE Instrum. Meas. Mag.* 2022, 71, 1–18.

61. Martinez C.; Sampedro, C.; Chauhan, A.; Collumeau, J.F.; Campoy, P. The Power Line Inspection Software (PoLIS): A versatile system for automating power line inspection. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2018, 71, 293–314.