Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет автоматики та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
«_____» _____ 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

«Технічне діагностування електроустановок на базі безпілотних літальних апаратів»

Виконав здобувач вищої освіти
VI курсу, групи ЕЕ-20М
ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____ Ігор ТОКАРЬ
«____» _____ 2021 р.

Керівник проекту
к.т.н., доц.
_____Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ
«_____» _____ 2021 р.

Рецензент
к.т.н., доц.
_____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *автоматики та енергетики*

Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

Галузь знань *14 Електрична інженерія*

Спеціальність *141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма *Електротехнічні системи електроспоживання*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ *Петро ПЛЄШКОВ*
«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Токаря Ігоря Миколайовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Технічне діагностування електроустановок на базі безпілотних літальних апаратів.*
Technical diagnostics of electrical installations based on unmanned aerial vehicles»

2. Керівник роботи *Козловський Олександр Антонович, к.т.н., доц.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту *2.12.2021 р.*

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи *Метою роботи є зниження технологічних порушень у роботі повітряних ліній електропередавання з неізольованими проводами, що знаходяться тривалий час в експлуатації, на базі вдосконалення їх систем технічного діагностування.*

Завдання*: 1. Провести аналіз складу та технічного стану основного обладнання ОЕС України. 2. Проаналізувати підходи до технічного обслуговування розосереджених електроустановок, що знаходяться тривалий час в експлуатації. 3. Визначити шляхи підвищення експлуатаційної надійності ПЛ з неізольованими проводами. 5. Розробити систему технічного діагностування розосередженої електроустановки. 6. Розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці при технічному обслуговуванні повітряних ліній з неізольованими проводами. 7. Провести економічну оцінку запропонованих технічних рішень.*

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економічна частина	*к.е.н., доц. Журило І. В.*		
Охорона праці	*к.т.н., доц. Савеленко І. В.*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ. Обґрунтування актуальності дослідження.*	*2.09 – 7.09*	
	Предмет, об'єкт, методи дослідження		
2	*Розділ 1. Передумови застосування БПЛА для*	*8.09 – 21.09*	
	технічного діагностування електроустановок		
3	*Розділ 2. Експлуатаційна надійність електроустановок*	*22.09 – 2.10*	
4	*Розділ 3. Розробка системи технічного діагностування*	*4.10 – 22.10*	
	повітряних ліній		
5	*Розділ 4. Охорона праці*	*25.10 – 8.11*	
6	*Розділ 5. Економічна ефективність застосування*	*9.11 – 23.11*	
	системи технічного діагностування повітряних ліній		
7	*Формулювання загальних висновків*	*24.11*	
	Оформлення списку використаних джерел	*25.11 – 26.11*	
	Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді	*29.11 – 30.11*	
	слайдів		

Дата видачі завдання

«____» _____2021 р.

Підпис керівника

_____ _____

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«____» _____2021 р.

Підпис здобувача

_____ _____

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 120 с.; 37 рис.; 11 табл.; 66 джерел

Токарь І.М. Технічне діагностування електроустановок на базі безпілотних літальних апаратів.

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2021.

Метою кваліфікаційної роботи є зниження технологічних порушень у роботі повітряних ліній електропередавання з неізольованими проводами, що знаходяться тривалий час в експлуатації, на базі вдосконалення їх систем технічного діагностування.

У роботі проведено критичний аналіз складу та технічного стану основного обладнання ОЕС України, запропоновано основні шляхи підвищення надійності повітряних ліній зі значним терміном експлуатації, розроблено класифікацію ушкоджень їх конструктивних елементів. Визначено, згідно критерію залишкової ентропії, найбільш інформативні параметри діагностування повітряних ліній. Розроблено функціональну та структурну схеми системи технічного діагностування повітряних ліній та методику вибору безпілотних літальних апаратів. Проведено аналіз найбільш небезпечних та шкідливих факторів при експлуатації повітряних ліній та розроблено організаційні та технічні заходи, що забезпечують електробезпеку робіт.

Проведено оцінку економічного ефекту від впровадження системи технічного діагностування повітряних ліній.

ЕЛЕКТРОУСТАНОВКА, ПОВІТРЯНА ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ, SAIDI, ЕКСПЛУАТАЦІЙНЕ УШКОДЖЕННЯ, СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ, БЕЗПІЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ.

THE SUMMARY

Qualifying work: 120 pages, 37 figures, 11 tables, 66 sources.

Tokar I. M. Technical diagnostics of electrical installations based on unmanned aerial vehicles.

Specialty 141 «Electric power engineering, Electrical engineering and Electromechanics», educational and professional program «Electrotechnical systems of power consumption». – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2021. "

The purpose of the qualifying work is to reduce technological disturbances in the operation of overhead power lines with bare wires that have been in operation for a long time on the basis of improving their technical diagnostics system.

The work carried out a critical analysis of the composition and technical condition of the main equipment of the IPS of Ukraine, proposed the main ways to increase the reliability of overhead power lines with a significant service life, and developed a classification of damage to their structural elements. The most informative parameters of diagnostics of overhead power lines were determined according to the criterion of residual entropy. The functional and structural diagrams of the system for technical diagnostics of overhead power lines and the methodology for the selection of unmanned aerial vehicles have been developed. The analysis of the most dangerous and harmful factors during the operation of overhead power lines was carried out and organizational and technical measures were developed to ensure the electrical safety of jobs.

An assessment of the economic effect from the introduction of a system for technical diagnostics of overhead lines has been carried out.

ELECTRICAL INSTALLATION, OWERHEAD POWER LINE, SAIDI, EXPLOITATION DAMAGE, TECHNICAL DIAGNOSTIC SYSTEM, UNMANNED AIRCRAFT.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 8

ВСТУП 9

1. ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК 12

1.1. Аналіз складу та технічного стану основного обладнання ОЕС України 12

1.1.1. Генеруючі потужності 12

1.1.2. Трансформаторні підстанції 15

1.1.3. Повітряні лінії транспортування електроенергії 17

1.2. Надійність електропостачання 21

1.3. Підходи до технічного обслуговування розосереджених електроустановок, що знаходяться тривалий час в експлуатації 24

1.4. Постановка загального завдання дослідження та методика його виконання 26

1.5. Висновки до 1-ого розділу 30

2. ЕКСПЛУАТАЦІЙНА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК 31

2.1. Види експлуатаційних ушкоджень електрообладнання 31

2.2. Ушкодження конструктивних елементів ПЛ з неізольованими проводами 34

2.2.1. Несправності залізобетонних, металевих опор і фундаментів 34

2.2.2. Несправності проводів, грозозахисних тросів 40

2.2.3. Ушкодження ізоляторів та ізолювальних підвісок 42

2.2.4. Дефекти арматури ПЛ 44

2.2.5. Несправності заземлювальних пристроїв 47

2.2.6. Порушення та несправності на трасах ПЛ 49

2.3. Шляхи підвищення експлуатаційної надійності ПЛ 51

2.4. Висновки до 2-ого розділу 55

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 56

3.1. Дистанційні методи технічного діагностування ПЛ 56

3.2. Розробка функціональної схеми СТД ПЛ 60

3.3. Вибір параметрів діагностування 62

3.4. Розробка структурної схеми СТД ПЛ 69

3.5. Порядок проведення діагностування ПЛ 71

3.6. Вибір обладнання СТД ПЛ 75

3.7 Програмне забезпечення СТД ПЛ 85

3.7. Висновки до 3-ого розділу 89

4. ОХОРОНА ПРАЦІ 90

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при проведенні робіт з технічного обслуговування повітряних ліній 90

4.2. Заходи безпеки, щодо усунення небезпечних та шкідливих факторів 92

4.3. Розрахунок заземлювального пристрою опори повітряної лінії 110 кВ . 95

4.4. Блискавкозахист повітряних ліній 100

4.5. Висновки до 4-ого розділу 103

5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 104

5.1. Визначення величини капітальних вкладень 105

5.2. Визначення поточних витрат 106

5.3. Розрахунок показників економічної ефективності 111

5.3. Висновки до 5-ого розділу 111

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 112

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 114

ДОДАТОК А. ЗВІТ ПОДІБНОСТІ 120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ОЕС – об’єднана енергосистема;

ПЛ – повітряна лінія електропередавання;

ПЛЗ – повітряна лінія із захищеними проводами;

ПЛІ – повітряна лінія з ізольованими проводами;

ПС – підстанція;

АЕС – атомна електростанція;

ТЕС – теплова електростанція;

ГЕС – гідроелектростанція;

СЕС – сонячна електростанція;

ЕУ – електроустановка;

АСТД – автоматизована система технічного діагностування;

ВН – висока напруга;

НН – низька напруга;

РУ – розподільна установка;

ТОР – система технічного обслуговування та ремонту;

ПЗР – планово-запобіжний ремонт;

КРУ – комплектна розподільна установка;

КРУЗ – комплектна розподільна установка зовнішньої установки;

НСК – наземна станція керування.

ШІ – штучний інтелект

ВСТУП

Актуальність теми. Електрична енергія є основою сучасної техногенної цивілізації. Вона використовується, без виключення, в усіх галузях господарської діяльності людини. Тому повноцінне функціонування та прогрес сучасного суспільства не можливий без надійного забезпечення його електричною енергією.

Основне електроенергетичне обладнання ОЕС України працює в безперервному режимі при цьому має значний знос, а отже потребує все більших обсягів і кількості технічних ремонтів. Внаслідок недостатнього рівня фінансування інвестиційних програм електроенергетичної галузі воно вчасно не оновлюється і продовжує старіти. Ситуація також ускладнюється зміною клімату, що призвела до збільшення частоти стихійних метеорологічних явищ, і як наслідок, до збільшення механічних навантажень на найбільш протяжну ланку енергосистеми – повітряні лінії. Тому якщо не вжити термінових заходів з організації якісного технічного обслуговування електроенергетичного обладнання, що базуються на нових підходах кількість аварій та технологічних відмов у його роботі буде лише збільшуватися. Підтвердженням цього твердження є зростаючий тренд індексу SAIDI. Крім істотного зносу електроустановок, ще однією важливою особливістю енергетичної інфраструктури України є її розташування на території значної площі.

Отже, перед операторами системи розподілу постає необхідність вирішення двох складних взаємовиключних задач: потреба впровадження систем технічного обслуговування електроустановок за фактичним станом з метою подовження їх строку служби та зменшення витрат на їх технічне обслуговування внаслідок дефіциту коштів. Одним із можливих шлях вирішення цієї проблеми є створення систем діагностування технічного стану електроустановок на базі малогабаритних безпілотних літальних апаратів, в першу чергу для розосереджених електроустановок – повітряних ліній середньої та високої напруги.

Тому вирішення задачі підвищення експлуатаційної надійності електроустановок є актуальним.

Мета – зниження технологічних порушень у роботі повітряних ліній електропередавання з неізольованими проводами, що знаходяться тривалий час в експлуатації, на базі вдосконалення їх систем технічного діагностування.

Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні основні завдання:

- провести аналіз складу та технічного стану основного обладнання ОЕС України;

- проаналізувати підходи до технічного обслуговування розосереджених електроустановок, що знаходяться тривалий час в експлуатації;

- визначити шляхи підвищення експлуатаційної надійності ПЛ з неізольованими проводами;

- розробити систему технічного діагностування розосередженої електроустановки;

- розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці при технічному обслуговуванні повітряних ліній з неізольованими проводами;

- провести економічну оцінку запропонованих технічних рішень.

Об'єкт дослідження – процеси контролю та діагностування електроустановок.

Предмет дослідження – показники та характеристики *системи технічного діагностування* електротехнічного обладнання на основі безпілотних літальних апаратів.

Методи досліджень. У основу роботи покладено системний підхід до проведення теоретичних досліджень, що базуються на використанні теорії математичної статистики, теорії електричних кіл, економічного аналізу. Були використані прикладні програми Mathcad, Microsoft Excel та Microsoft Word.

Наукова цінність отриманих результатів роботи полягає в наступному:

- отримала подальший розвиток математична модель діагностування повітряної лінії, що полягає в аналізі причинно-наслідкових зав'язків між параметрами та дефектами повітряної лінії і дозволяє провести вибір параметрів діагностування її конструктивних елементів;

- отримала подальший розвиток методика вибору безпілотних літальних апаратів для систем технічного діагностування повітряних ліній.

Практична цінність отриманих результатів роботи для електроенергетичної галузі полягає в розробці системи технічного діагностування повітряних ліній електропередавання на базі безпілотних літальних апаратів. Ефективність отриманих результатів запропонованих науково-технічних рішень підтверджено розрахунком очікуваного економічного ефекту за весь строк служби системи.

РОЗДІЛ 1. ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

На сьогодні ОЕС України є однією з найбільших в Європі. До її складу входять 6 регіональних електроенергетичних систем та 33 оператори систем розподілу [1]. Особливістю її електрообладнання є те, що воно працює у безперервному режимі тривалий час. На його надійність та економічність робити також має великий вплив зміна клімату. Оскільки, такі електроустановки як повітряні лінії є розосередженими і зазнають більшого впливу від кліматичних навантажень ніж на який вони були розраховані при проектуванні. Тому в першу чергу необхідно:

- провести аналіз складу та технічного стану основного обладнання електротехнічних установок з метою визначення таких, технічне діагностування яких за допомогою БПЛА є найбільш доцільним;

- оцінити показники надійності електропостачання споживачів електричної енергії;

- розробити методику виконання загального завдання дослідження.

1.1. Аналіз складу та технічного стану основного обладнання ОЕС України

1.1.1. Генеруючі потужності

Об’єднана енергетична система (ОЄС) України являє собою комплекс електротехнічних та теплових установок, що об’єднані спільним режимом виробництва, передавання та розподілу електричної та теплової енергії з централізованим оперативно-технологічним керуванням цього режиму [1].

Електротехнічна установка – це комплекс взаємопов'язаних машин, апаратів, ліній та допоміжного обладнання, що призначені для виробництва, передавання та розподілу електроенергії, а також для перетворення її в інші види енергії [2].

До головних завданнями ОЕС України є такі:

- генерація електроенергії;
- здійснення централізованого електропостачання внутрішніх споживачів;
- забезпечення експорту/імпорту електроенергії.

До складу ОЕС України входять електрогенеруючі потужності, системи передавання та розподілу електричної енергії.

Сумарна встановлена потужність електрогенеруючих потужностей ОЕС України станом на 31.07.2021 року (без врахування тимчасово окупованих територій) складає 55,6 ГВт, у тому числі обладнання відновлювальної енергетики – 7,49 ГВт. Слід відмітити, що за 2019 р. встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики зросла на 3 ГВт, а за 2020 р. – на 2 ГВт [1], що призвело до зростання дефіциту маневрових потужностей [5]. Відсотковий склад встановлених потужностей за типом електростанцій представлений на рис. 1.1, 1.2.

Отже, основні генеруючі потужності ОЕС України зосереджені на теплових електростанціях (50,29%). Станом на 31.12.2020 р. 12-ть теплових електростанцій (ТЕС) налічували 68 вугільних блоків сумарною встановленою потужністю 16,96 ГВт та 7 газомазутних блоків сумарною потужністю 4,6 ГВт і 3-ри турбогенератора. ТЕС з енергоблоками потужністю 150 МВт були введені в експлуатацію в 1959-1964 рр., 200 МВт – у 1960-1975 рр., 300 МВт – у 1963-1988 рр. і 800 МВт – у 1967-1977 роках [5].

Станом на 1 січня 2020 р. обладнання всіх теплових електростанцій (75 енергоблоків, 21,53 ГВт) було фізично зношене та морально застарілим, а в 70 енергоблоків вичерпано також граничний термін експлуатації, в той же час 68 енергоблоків (17 ГВт або 78,6 %) експлуатуються понад парковий термін експлуатації. Тому було проведено реконструкцію близько 20% енергоблоків, проте питання приведення екологічних характеристик енергоблоків до сучасних вимог залишилися не вирішеними [3].

В Україні працює 4-ри атомні електростанції (АЕС) на яких знаходиться в експлуатації 15-ть енергоблоків, з них 13-ть – потужністю по 1 ГВт і 2-ва – потужністю 415 та 420 МВт, відповідно. Більшість (11 шт.) енергоблоків АЕС вже відпрацювали свій проектний 30-річний ресурс, проте після технічного обґрунтування термін їх експлуатації був подовжений на 10-20 років [1, 4].

Основою гідроенергетики України є Дніпровський та Дністровський каскади гідроелектростанцій (ГЕС). До їх складу входять 8-м ГЕС із загальним числом гідроагрегатів – 103 шт. та 3-ри гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС) на яких встановлено 11 гідроагрегатів одиничною потужністю 33-324 МВт. На сьогодні, ПрАТ «Укргідроенерго» реалізує масштабну програму реконструкції 71 гідроагрегату обох каскадів ГЕС, метою якої є збільшення строку служби обладнання, підвищення коефіцієнту корисної дії, усунення можливих негативних наслідків для екології басейну річок, а також збільшення діапазону регулювання.

На електростанціях, що працюють на відновлювальних джерелах енергії (ВДЕ) встановлене сучасне технологічне обладнання. Найбільшими за встановленою потужністю з них є сонячні електростанції (СЕС) такі як «Покровська СЕС» (240 МВт), «Солар Фарм-1» (200 МВт) та вітрова електростанція (ВЕС) «Мирненська ВЕС» (71,4 МВт станом на 1.09.2019 р.).

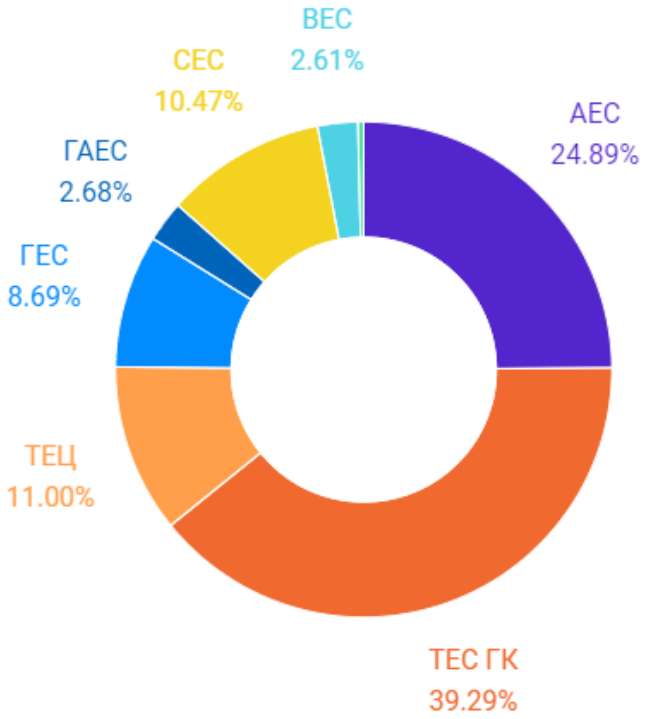


Рисунок 1.1 – Відсотковий склад встановленої потужності електрогенеруючого обладнання електростанцій ОЕС України [4]

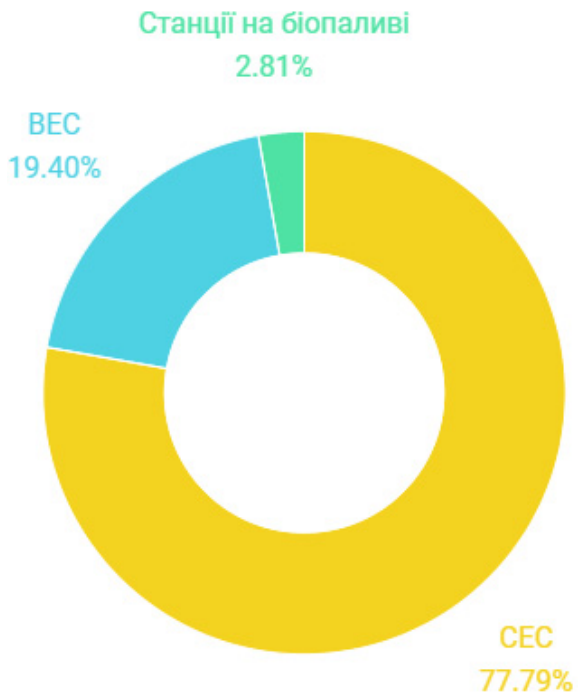


Рисунок 1.2 – Відсотковий розподіл встановленої потужності обладнання електростанцій відновлювальної енергетики ОЕС України [4]

У 2020 р. Встановлена потужність ВЕС та СЕС протягом року збільшилася на 1,9 ГВт (+41% у порівнянні з 2019 р.) [4]. Вибуховий ріст встановленої потужності електростанцій на ВДЕ загострив проблему дефіциту маневрових потужностей. Внаслідок специфічної структури генеруючих потужностей в ОЕС України в якості маневрових використовуються енергоблоки ТЕС, які при цьому працюють в непроектних, напівпікових і пікових режимах роботи, що зменшує їх строк служби [5].

1.1.2. Трансформаторні підстанції

Станом на 1 січня 2021 року система передачі електричної енергії ОЕС України налічує 107 підстанцій напругою 110-750 кВ зі встановленою сумарною потужністю трансформаторів і автотрансформаторів 83172,5 МВА. Кількісний склад ПС за рівнем напруги наступний: 750 кВ – 9 шт., 500-400 кВ – 2 шт., 330 кВ – 78 шт., 220 – 14 шт., 110 кВ – 4 шт [1].

Кількісна характеристика та терміни експлуатації автотрансформаторів та трансформаторів підстанцій НЕК «Укренерго» системи передачі станом на 1.01.2021 р. представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Терміни експлуатації автотрансформаторів та трансформаторів системи передачі [1]

Назва обладнання	Потужність, МВ·А	Кільк. одиниць	Терміни експлуатації, рр.			
			до 25	25-30	30-40	більше 40
Автотрансформатори	**78450**	**359**	**76**	**49**	**156**	**78**
750 кВ	19485	**57**	43,86%	1,75%	36,84%	17,54%
500 кВ	2254	**13**	46,15%	23,08%	30,77%	-
400 кВ	798	**6**	50,0%	-	-	50,0%
330 кВ	44655	**217**	17,97%	17,05%	47,0%	17,97%
220 кВ	11258	**66**	4,55%	12,12%	43,94%	39,39%
Трансформатори силові	**4722,5**	**106**	**24**	**12**	**26**	**44**
220 кВ	2041,5	**27**	14,81%	7,41%	37,04%	40,74%
154 кВ	710	**13**	15,38%	30,77%	23,08%	30,77%
110 кВ	1694,5	**42**	40,48%	9,52%	16,67%	33,33%
35 кВ	276,5	**24**	4,17%	8,33%	25,0%	62,50%

Аналіз табл. 1.1 показує, що найменш зношеними є автотрансформаторами напруги 750 кВ – 25 шт. з терміном експлуатації до 25-ти років. У той же час 65% (141 шт.) автотрансформаторів напругою 330 кВ експлуатується більше 30-ти років, вони фактично вичерпали свій ресурс і потребують заміни. Серед силових трансформаторів найбільш зношеними є трансформатори з ВН 220 кВ – 77,7% (23 шт.) з терміном експлуатації більше 30 років та з вищою напругою 35 кВ – 87,5% (21 шт.). На ПС НЕК Укренерго найбільше встановлено трансформаторів з ВН 110 кВ (42 шт.) і 40,5% з них знаходиться в експлуатації менше 25 років.

Отже, значна частина (83,3%) цих трансформаторних потужностей знаходиться в експлуатації більше 30 років, тобто за межами проектного періоду. Зазвичай такі трансформатори мають підвищені втрати неробочого ходу на 15-25% відносно паспортних, внаслідок природного старіння та ремонтів магнітопроводу [6, 7]. Тобто, таке обладнання має знижену надійність роботи та потребує високих операційних витрат на обслуговування і ремонт, тому потребує негайної заміни.

З цією метою було розроблено комплексну програму реконструкції трансформаторних підстанцій НЕК «Укренерго» від яких отримують живлення адміністративні центри та великі промислові підприємства. Оновлення першої частини електротехнічних установок планується провести до 31.12. 2022 р., а іншої – до 31.12.2023 р. Графік модернізації ПС розроблено з урахуванням можливості безперебійної роботи ОЕС України [1] .

У системі розподілу електроенергії знаходиться в експлуатації наступна кількість підстанцій за класами напруги [3]:

110 (150) кВ – 1495 шт.;

35 кВ – 6633 шт.;

6 (10) – 204860 шт., в т.ч. і РУ.

Наявність в експлуатації значної кількості (від 50% і вище для системи передачі) трансформаторів зі строком служби більше 25-ти років свідчить про недостатні темпи модернізації існуючих ПС та будівництво нових.

1.1.3. Повітряні лінії транспортування електроенергії

Довжина повітряних ліній за ланцюгами системи передачі електричної енергії України складає 23,6 тис. км [1]. Поділ за термінами експлуатації та основні технічні характеристики повітряних ліній системи передачі ОЕС України станом на 1.01.2021 р. подано в табл. 1.2. та рис. 1.3.

Таблиця 1.2 – Довжина та терміни експлуатації ПЛ системи передачі [1]*

Клас напруги, кВ	Всього, км		У т. ч. знаходяться в експлуатації (років) (за ланцюгами)			
	по трасі	за ланцюгами	до 25	25-30	30-40	більше 40
800	98,540	98,540	-	-	-	98,540
750	4403,171	4403,171	692,650	-	1905,370	1805,151
500	375,340	375,340	38,680	-	159,600	177,060
400	338,950	338,950	-	-	-	338,950
330	13013,326	13617,139	1236,325	460,660	2062,286	9857,868
220	3044,270	4025,735	228,398	-	265,517	3531,820
110	458,288	568,900	66,430	5,420	42,380	454,670
35	129,717	131,327	36,134	2,460	12,530	80,203
Всього	21861,602	23559,102	2298,617	468,540	4447,683	16344,262

* За виключенням ПЛ неконтрольованої території Донбаської ЕЕС і Кримської ЕЕС

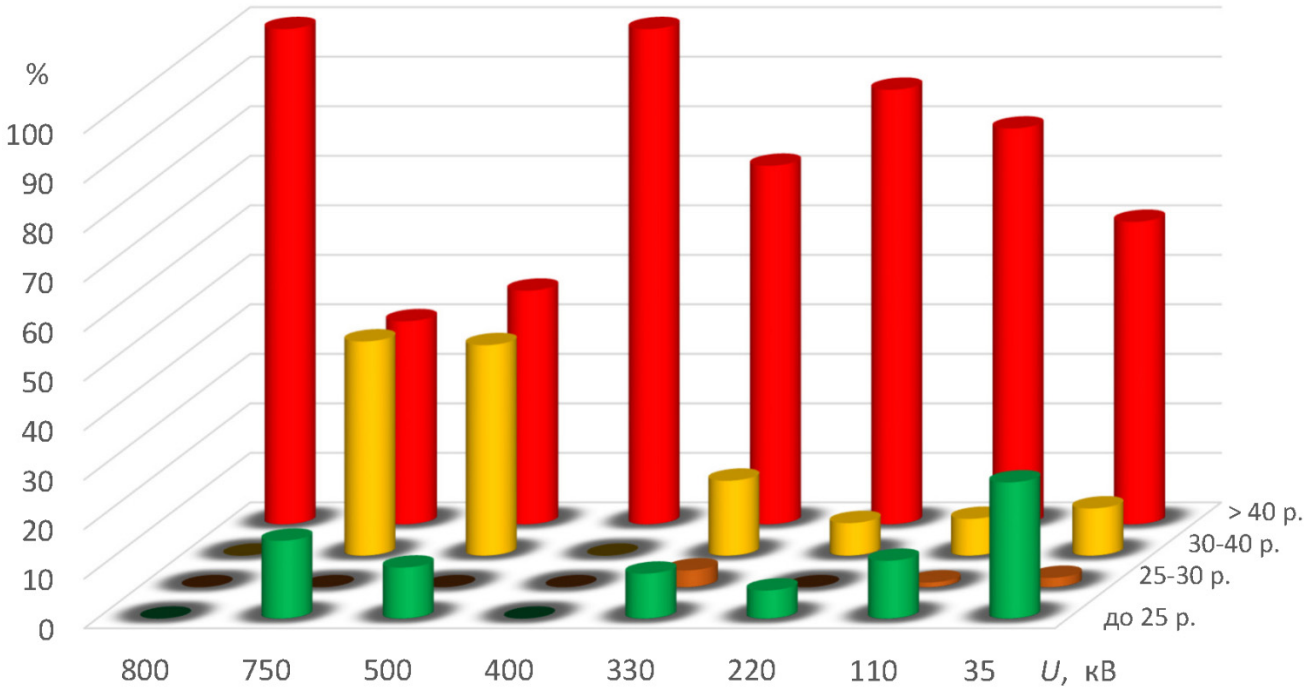


Рисунок 1.3 – Терміни експлуатації ПЛ системи передачі за класами напруги

До складу системи розподілу електричної енергії входить 747,3 тис. км повітряних ліній напругою 0,4-150 кВ і 72,4 тис. км кабельних ліній напругою 0,4-150 кВ та 204860 шт. трансформаторних підстанцій напругою 6-150 кВ і розподільних установок 6 (10) кВ. Довжини ПЛ системи розподілу представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Довжина повітряних ліній системи розподілу [3]*

Параметр	Напруга, кВ					Всього
	220	110(150)	35	6(10)	0,4	
Довжина ПЛ , км	81	35079	60858	267034	384245	747297
Питома вага у загальні кількості, %	0,011	4,69	8,14	35,73	51,42	100%

* Без врахування ПЛ Кримської ЕЕС та неконтрольованої території Донбаської ЕЕС

Аналіз табл. 1.2 та рис. 1.2 показує, що системі передачі НЕК Укренерго знаходиться в експлуатації 16644,3 км повітряних ліній з терміном служби більше 40 р., а це близько 70% від довжини всіх ліній, а 100% ПЛ напругою 220 кВ мають термін експлуатації більше 50 років і тому потребують негайної заміни [1].

В останні роки через низький рівень фінансування знизилася кількість профілактичних та планових ремонтів ПЛ, тому ймовірність виникнення аварійних ситуацій значно зросла [1, 8, 9].

Ускладнює ситуацію ще і той факт, що внаслідок зміни клімату зношені ПЛ піддаються впливу підвищених кліматичних навантажень у холодну пору року, зокрема, вітрових та ожеледно-вітрових. Внаслідок посилення механічних навантажень від штормового вітру, ожеледі, вібрації та галопування проводів і грозозахисних тросів значно збільшилась кількість ушкоджень елементів ПЛ та прискорилось їх зношення. Тому виникла потреба капітального переоснащення та реконструкції як ПЛ, що знаходяться в південних та північних районах України (Південна, Дніпровська та Північна ЕЕС) і зазнають найбільших природних ризиків, так і всіх інших ПЛ ОЕС України в цілому.

Суттєво відстають темпи заміни грозозахисних тросів та залізобетонних опор від необхідних рівнів. Так НЕК «Укренерго» 2020 р. провело роботи із заміни грозозахисних тросів у обсязі 165,5 т, при потребі в їх заміні станом на 1.01.2021 р. близько 1000 т. Із заміною з/б опор ситуація ще гріша – у 2020 р. було замінено 82 шт. з/б опор, при необхідних 1650 шт. станом 1.01.2021 р [1].

У сукупності, розглянуті фактори призводять до того, що старіння ПЛ усіх класів напруги відбувається швидше ніж проводиться їх відновлення [1, 11]. Тому має місце зростання довжини зношених ліній, наприклад, у порівнянні з 2019 р. за 2020 р. ріст склав 0,8%. Дана негативна тенденція вказує на недостатні темпи оновлення ПЛ та будівництво нових ПЛ, що в результаті призводить до зниження надійності їх функціонування та підвищення експлуатаційних витрат на підтримку їх працездатності з кожним роком.

Основними шляхами підвищення надійності функціонування ПЛ з терміном експлуатації більше 40-ка років є впровадження наступних організаційно-технічних заходів:

- регулярне проведення контролю технічного стану (технічного діагностування) конструктивних елементів ПЛ;

- контроль та підтримання ширини просік охоронних зон ПЛ відповідно до вимог [10];

- контроль та знищення легкозаймистої рослинності та очерету в охоронних зонах повітряних ліній;

- контроль за підпалами стерні на землях сільськогосподарського призначення з метою запобігання забруднення ізоляції;

- оновлення обладнання повітряних ліній: заміна фарфорових ізоляторів; заміна з/б опор; заміна зношених металевих опор та грозозахисних тросів та проводів;

- зменшення ступенів трансформації електроенергії та зміна конфігурації розподільних електромереж;

- підвищення ступеня автоматизації електромереж.

1.2. Надійність електропостачання

Побічною оцінкою технічного стану розподільних мереж ОЕС України є показники надійності (безперервності) електропостачання. Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) від 12.06.2018 №374 для операторів системи розподілу (ОСР) були визначені наступні основні показники [12]:

- SAIDI – індекс середньої тривалості довгих перерв у електропостачанні в системі;
- SAIFI – індекс середньої частоти довгих перерв в електропостачанні в системі;
- ENS – розрахунковий обсяг недоданої електроенергії;
- MAIFI – індекс середньої частоти коротких перерв в електропостачанні в системі

та порядок збору, обробки і надання НКРЕКП з метою моніторингу і аналізу цих показників.

Динаміку зміни показників SAIDI та ENS за останні 10-ть років подано на рис. 1.4.

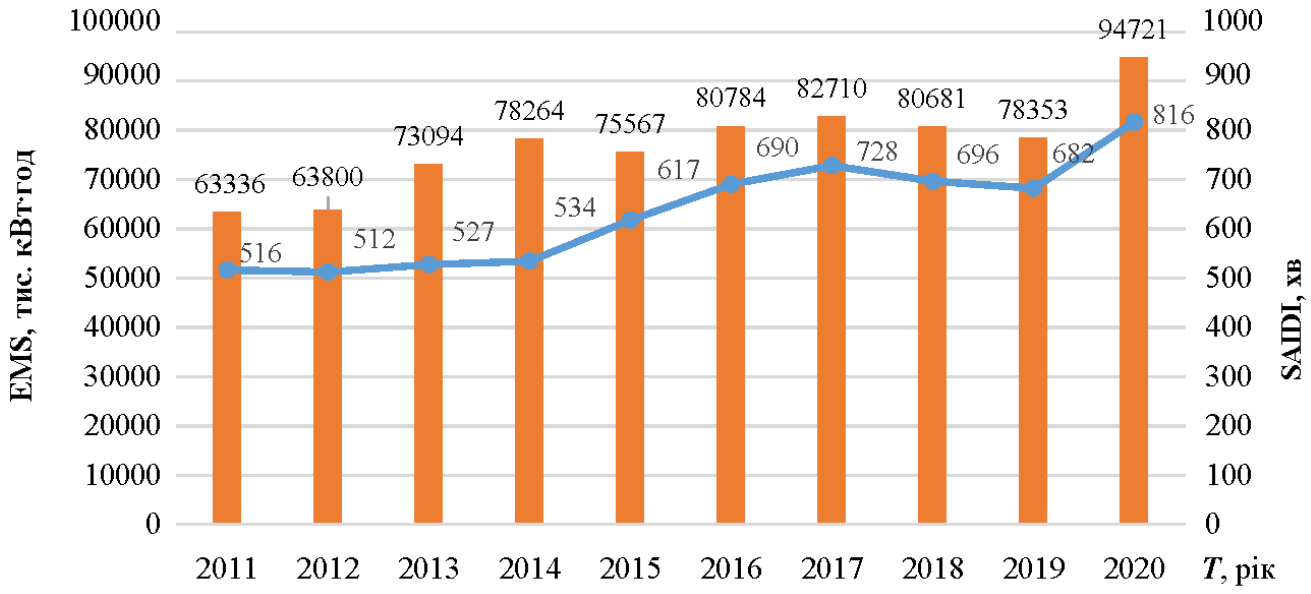


Рисунок 1.4 – Показники SAIDI та ENS по Україні

З 2013 р. почав формуватися зростаючий тренд показника SAIDI і до 2021 р. цей показник зріс на 289 хв. Відносно 2019 р. у 2020 р. ріст індексу SAIDI склав 134 хв або 19,6% це пов'язано в першу чергу зі зміною процедури надання даних ОСР Регулятору з метою підвищення їх достовірності та здійснення заходів контролю і постійного моніторингу за дотриманням показників надійності. У порівнянні з 2019 р. індекси SAIDI в 2020 р. з вини компаній (планові відключення без попереджень і відключення пов'язані з технологічними порушеннями процесу електропостачання) зросли в 21-го ліцензіата. Найбільший ріст SAIDI зафіксовано в ПрАТ Рівнеобленерго – у 2,5 рази, ДП Регіональні електричні мережі – у 2,49 рази [1].

У порівнянні з країнами європейського союзу індекс SAIDI по Україні є значно вищим (див. рис. 1.5). Це пов'язано тим, що в ЄС здійснюється як моніторинг цих показників, так і їх регулювання. Тому НКРЕП створила

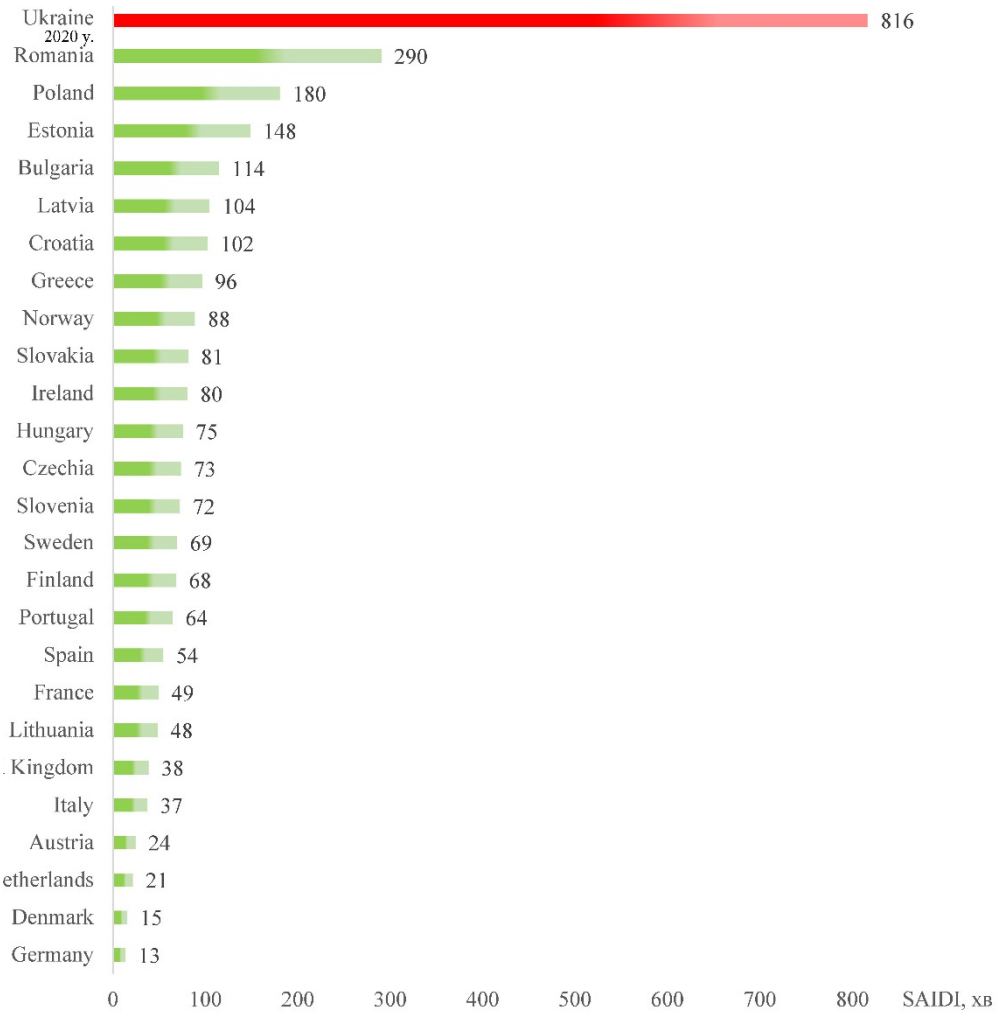


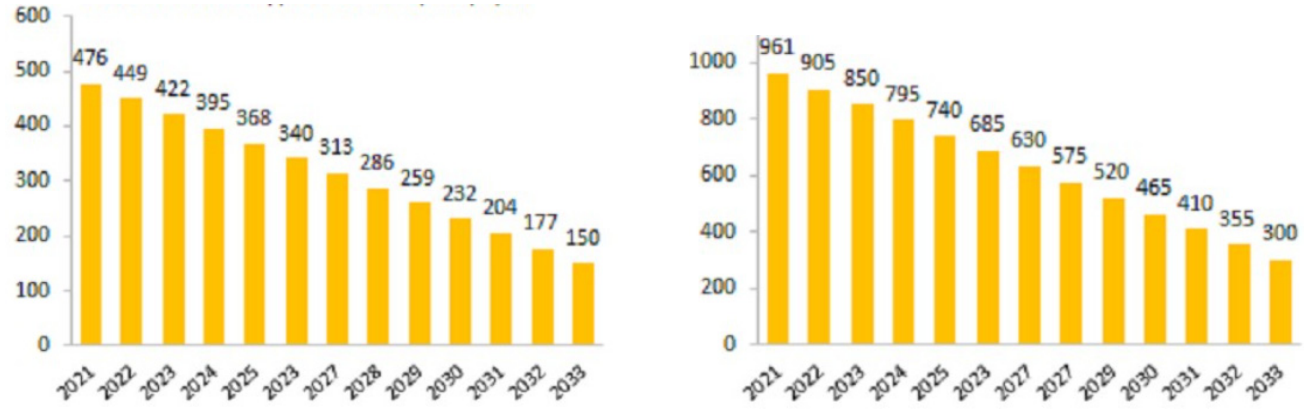
Рисунок 1.5 – Індекс SAIDI країн Євросоюзу (2016) [13] та України (2020) [1]

нормативну базу регулювання індексу SAIDI для операторів системи розподілу, що переходять на стимулююче регулювання (або RAB-регулювання) [14, 15].

Головна мета RAB-регулювання – це забезпечення мотивації ОСР до підвищення надійності електропостачання шляхом коригування доходу компаній на основі даних про виконання ними завдань щодо досягнення встановлених щорічних значень показників. Для операторів систем розподілу, що перейшли на стимулююче регулювання в 2021 р. термін досягнення цільових значень показників SAIDI 150 хв для міської місцевості та 300 хв для сільської місцевості – 2033 рік (рис. 1.6). Цільовий індекс SAIDI розраховується для кожного ОСР з врахуванням фактичних його значень за останні 3-ри роки.

Вважається, що надійність електропостачання повинна бути покращена за рахунок виконання наступних організаційно-технічних заходів: оновлення обладнання електричних мереж, зміни конфігурації електромереж, зменшення кількості ступенів трансформації напруги, впровадження сучасних систем технічного діагностування електроустановок.

Таким чином, незважаючи на високу зношеність електроустановок ОЕС України зростаючий тренд індексу SAIDI свідчить про тенденцію до ще більшого погіршення технічного стану розподільних електричних мереж. Значна різниця між індексами SAIDI Європейських країн та України також вказує на значно нижчий рівень обслуговування та експлуатації електроустановок, а прийнята концепція поступової заміни обладнання електромереж є неефективною.



а) *б*)

Рисунок 1.6 – Середньозважені цільові показники індексу SAIDI по Україні [1]:
а) для міської місцевості; б) для сільської місцевості

1.3. Підходи до технічного обслуговування розосереджених електроустановок, що знаходяться тривалий час в експлуатації

Проведений аналіз технічного стану основного обладнання ОЕС України виявив, що електроенергетичне обладнання працює в безперервному режимі, при цьому, має істотний знос і продовжує старіти, а отже, вимагає все більших обсягів та кількості технічних ремонтів. Недостатній рівень фінансування інвестиційних програм електроенергетичної галузі не дає змоги вчасно проводити технічне оновлення навіть основного обладнання. Тому якщо не вжити термінових заходів з організації його якісного технічного контролю, що базується на нових підходах, внаслідок можливих аварій та технологічних відмов у роботі збитки ОСР можуть бути більшими ніж прибутки.

На сьогодні найбільш розповсюдженими є наступні підходи до побудови системи технічного обслуговування і ремонту (ТОР): планово-запобіжний ремонт і ремонт за фактичним станом.

Метою будь-якої системи ТОР є керування технічним станом обладнання впродовж його терміну служби до моменту виведення з експлуатації в працездатному стані.

Система планово-запобіжних ремонтів (ПЗР) – це комплекс організаційно-технічних заходів, що передбачає періодичне проведення, за попередньо складеними графіками, профілактичних оглядів обладнання, його поточний, середній та капітальний ремонти. Тобто, роботи з обслуговування обладнання проводяться після напрацювання ним чітко визначеного часу. Застосування цієї системи технічної експлуатації обладнання дозволяє запобігти прогресуючому зносу обладнання, знизити ймовірність його випадкового виходу з ладу та здійснення попередньої підготовки до ремонтних робіт, а отже високу якість їх виконання. До основних недоліків системи ПЗР належать: недовикористання ресурсу елементів електроустановок, що призводить до завищення сумарної трудомісткості ремонтних робіт; виконання обов'язкових видів та періодичності робіт, що досить часто бувають передчасними або запізнілими, оскільки базуються

на даних, що не відображають фактичного технічного стану конкретного обладнання; необхідність в утриманні значного штату ремонтного персоналу. Таким чином, існуюча система ПЗР у сучасних умовах є не ефективною.

В основу формування сучасної стратегії прийняття рішень і управління ресурсом електроустановок повинен бути покладений аналіз та керування ризиками можливих технологічних відмов. Світовий досвід показує, що ефективна експлуатація, зношеного електрообладнання можлива лише на основі розвинених систем моніторингу та діагностування їх технічного стану, розробки нових параметрів діагностування та вдосконалення методів аналізу отриманої інформації, що підвищує точність оцінки технічного стану обладнання [16, 17].

Система ремонтів за фактичним станом (РФС) – це комплекс організаційно-технічних заходів, що передбачає проведення з плаваючою періодичністю профілактичних і ремонтних робіт електроустановок на основі інформації отриманої під час їх технічного діагностування в режимі реального часу. За даної системи, підтримання працездатності електрообладнання досягається шляхом прогнозування його майбутніх станів на основі отриманої діагностичної інформації та проведенню завчасного технічного обслуговування. Тобто, використовується принцип запобіганню відмов, при якому забезпечується максимально можливе напрацювання обладнання за мінімальних експлуатаційних витрат [16, 18].

Основними перевагами системи РФС є наступні: є достовірна інформація про поточний технічний стан обладнання; виключається зайві необґрунтовані втручання експлуатаційного персоналу в роботу обладнання; обґрунтовано визначаються необхідні терміни і об’єми ремонтних і налагоджувальний робіт; подовження міжремонтного періоду та строку служби обладнання. Також з’являються такі можливості як контроль якості виконання робіт експлуатаційним персоналом, планування термінів придбання запасних частин, скорочення потреби в запасних частинах.

Крім значного зносу електроустановок, ще однією важливою особливістю енергетичної інфраструктури України є їх розосередженість на значній території. Наприклад, лише в системі розподілу електроенергії ОЕС знаходиться в

експлуатації 364 тис. км ПЛ напругою 6-150 кВ [3]. Для створення такої кількості локальних систем моніторингу стану електрообладнання (повітряних ліній, трансформаторних ПС) необхідно вирішити ряд складних організаційних, технічних та економічних задач. Тому в електропостачальних компаніях системи діагностування реального часу впроваджені лише на найбільш важливому та високовартісному електрообладнанні підстанцій – силових трансформаторах високої потужності, елегазових вимикачах 750 кВ і т.п. Оскільки технологічне порушення в роботі такого обладнання призводить до аварій в енергосистемі з широкомасштабними наслідками. У той же час найбільш розповсюджені електроустановки (повітряні лінії) експлуатуються фактично без систем технічного діагностування за традиційною системою ПЗР.

Отже, перед ОСР та НЕК Укренерго постає дві задачі, що суперечать одна одній: необхідність впровадження систем технічного обслуговування електроустановок за фактичним станом з метою подовження їх строку служби та зменшення витрат на технічне обслуговування електроустановок внаслідок дефіциту коштів.

Одним із можливих розв’язків цих задач є створення дистанційних систем технічного діагностування на базі БПЛА, в першу чергу, для повітряних ліній середньої та високої напруги.

1.4 Постановка загального завдання дослідження та методика його виконання

Магістерська робота спрямована на вирішення загального завдання досліджень, що полягає в удосконаленні *дистанційної системи технічного оперативного діагностування* на базі безпілотних літальних апаратів розосереджених за територією електроустановок, що забезпечить підвищення їх експлуатаційної надійності, продовження ресурсу роботи та зниження ремонтних витрат і ризику збитків.

Для реалізації поставленого завдання досліджень необхідно вирішити наступні часткові задачі:

1) провести аналіз складу та технічного стану основного електрообладнання ОЕС України;

2) провести аналіз показників надійності (безперервності) електропостачання операторів системи розподілу;

3) проаналізувати існуючі системи технічного обслуговування електроустановок;

4) проаналізувати види експлуатаційних ушкоджень обладнання електроустановок, що можуть бути визначені дистанційно;

5) розробити методологію експлуатаційної надійності;

6) обґрунтувати структуру дистанційної системи технічного оперативного діагностування;

7) розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці при діагностуванні основного обладнання ОЕС;

8) визначити економічний ефект від впровадження запропонованих рішень.

Вирішення поставлених часткових задач дослідження було розбито на п’ять етапів.

Кожен з виділених етапів має свої методи досліджень. Розглянемо кожний етап розв’язання задачі удосконаленні дистанційної системи технічного оперативного діагностування на базі безпілотних літальних апаратів.

Порядок вирішення часткових задач дослідження складає зміст загальної методики проведення досліджень, що подана на рис. 1.7 у вигляді блок-схеми.

У відповідності до структури досліджень, на першому етапі проводиться аналітичний огляд питання про склад та технічний стан основного обладнання ОЕС України та аналіз показників надійності (безперервності) електропостачання, що можуть забезпечити оператори системи розподілу, а також обґрунтування найбільш доцільного підходу до технічного обслуговування електроустановок, що знаходяться тривалий час в експлуатації. На даному етапі будуть використані теоретичні методи досліджень: метод систематизації, метод наукового узагальнення, метод аналізу та математичної статистики. Застосування цих методів дасть змогу визначити склад та оцінити технічний стан електроустановок, що знаходяться в експлуатації. На основі проведеного аналізу обґрунтувати та вибрати підхід до технічного обслуговування розосереджених електроустановок, що знаходяться тривалий час в експлуатації.

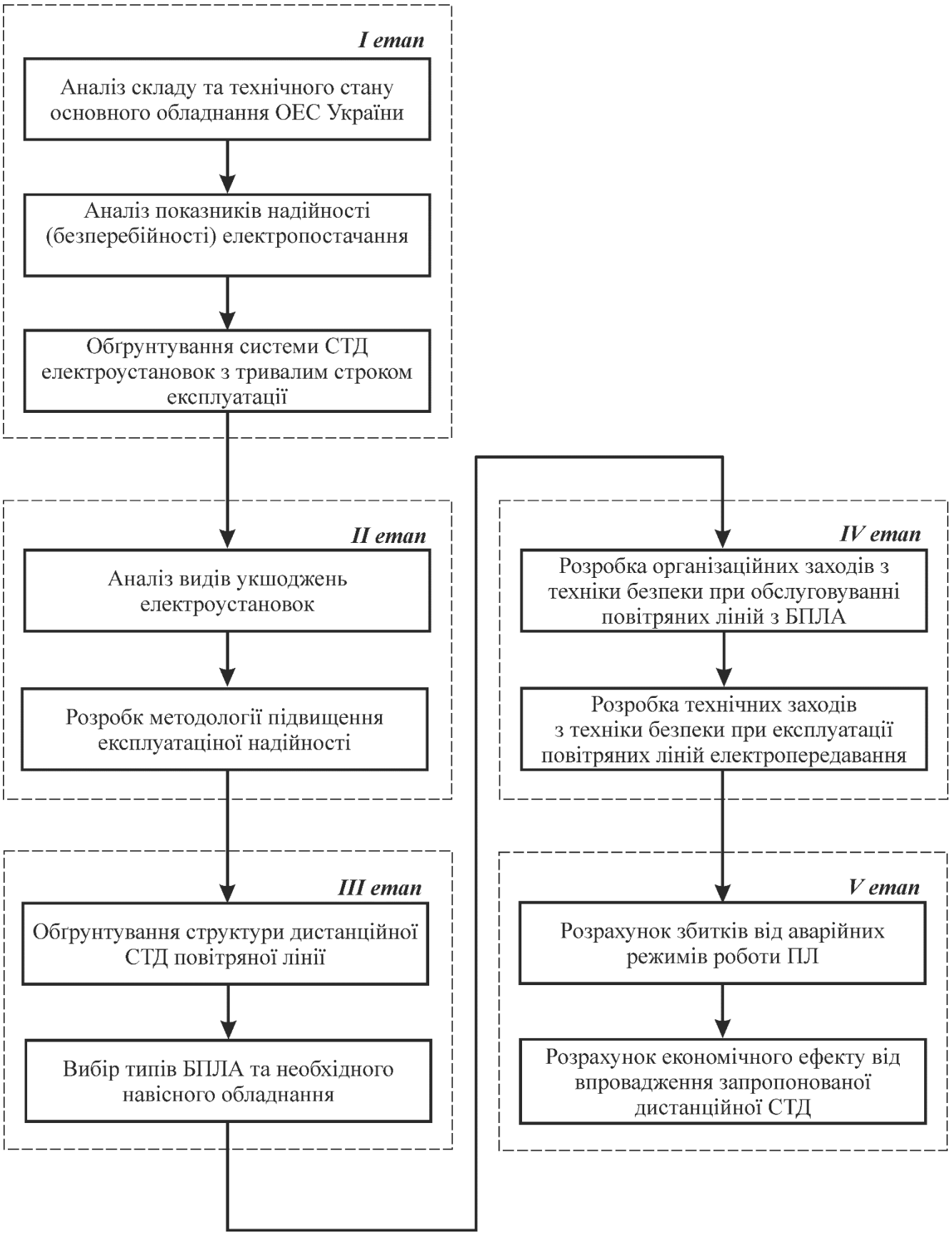


Рисунок 1.7 – Етапи розв’язання задачі удосконаленні дистанційної системи технічного оперативного діагностування на базі БПЛА

На другому етапі дослідження, на основі визначених типів електроустановок обслуговування яких за системою планово-запобіжних ремонтів є неефективним, проводиться аналіз надійності їх обладнання, що проявляється під час їх експлуатації та видів технологічних порушень, що можуть бути визначені дистанційно, неруйнівними методами. Для вирішення цього завдання повинні бути використані методи теоретичних досліджень систематизації, аналізу та методи теорії ймовірності.

На третьому етапі проводиться обґрунтування структури СТД повітряної лінії та її математичної моделі. Виконується дослідження розробленої математичної моделі. На основі встановлених видів технологічних порушень проводиться вибір типу БПЛА та необхідного навісного обладнання для проведення неруйнівного контролю. На даному етапі досліджень використовуються методи теоретичних досліджень – систематизації, аналізу та теорії матриць.

На четвертому етапі з виконується розробка організаційних заходів з охорони праці під час діагностування повітряних ліній електропередавання середньої і високої напруги з використанням безпілотних літальних апаратів. Також розроблюються технічні заходи з охорони праці при експлуатації повітряних ліній електропередавання. Для вирішення задач цього етапу застосовуються методи аналізу та теорії електричних кіл.

На п’ятому етапі проводиться розрахунок очікуваного економічного ефекту внаслідок впровадження дистанційної системи технічного діагностування повітряної лінії та визначення її техніко-економічних показників. Для вирішення зазначених завдань необхідно застосовувати методи економічного аналізу.

1.5 Висновки до 1-ого розділу

1. Проведено аналіз сучасного стану та складу основного обладнання ОЕС України. Встановлено, що в системі передачі НЕК Укренерго 83,3% трансформаторних потужностей знаходиться в експлуатації понад проектний період (більше 30-ти років) та 70% повітряних ліній напругою 35-800 кВ понад 40-к років. Недостатні темпи оновлення обладнання електроустановок, що його старіння відбувається швидше ніж проводиться.

2. Виявлено, що індекс SAIDI має зростаючий тренд, що свідчить про тенденцію до подальшого погіршення технічного стану розподільних електричних мереж. Значна різниця між індексами SAIDI Європейських країн та України вказує на значно нижчий рівень обслуговування та експлуатації електроустановок, а прийнята концепція поступової заміни обладнання електромереж є неефективною.

3. Встановлено, що для електроустановок зі значним строком служби найбільш доцільною є система ремонтів за фактичним станом на базі дистанційних системи технічного діагностування.

4. Визначено основні етапи розв’язання завдання розробки дистанційної системи технічного діагностування повітряних ліній зі значним строком експлуатації, що забезпечить впровадження систем їх технічного обслуговування за фактичним станом з метою подовження їх строку служби та зменшення витрат на технічне обслуговування.

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЛУАТАЦІЙНА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

У процесі експлуатації надійність електроустановок постійно знижується внаслідок природного зносу та старіння їх обладнання, а також випадкового впливу на них небезпечних і стихійних метеорологічних явищ. Ці фактори призводить до того, що під час експлуатації відбуваються зміни технічного стану конструктивних елементів електроустановок: відхилення технічних параметрів від номінальних, поява технологічних порушень у роботі, що зумовлені різними дефектами та ушкодженнями [17, 19]. Більшості відомих дефектів електрообладнання можливо запобігти шляхом їх своєчасного виявлення та ліквідації, тобто правильно розробленої системи ТОР. Тому для розробки систем технічного діагностування необхідно провести аналіз експлуатаційних ушкоджень основного електрообладнання ОЕС України, що можуть бути діагностуванні за допомогою безконтактних методів контролю.

2.1 Види експлуатаційних ушкоджень електрообладнання

Усім видам ушкоджень електроустановок при експлуатації передує ряд певних причин. Їх прийнято ділити на суб’єктивні та об’єктивні [20].

Суб’єктивні – це причини відмов електрообладнання, що викликані внаслідок дії з таких чинників, як помилки при проектуванні, монтажу, неправильному його підключенні та експлуатації. Тобто ця група об’єднує конструкційні, виробничі та експлуатаційні причини.

Конструкційні причини відмов зумовлені помилками при проектуванні обладнання електроустановок: використанням застарілих стандартів та порушення вимог чинних; використанням конструктивних елементів електрообладнання із заниженими надійністю та ступенем захисту від дії навколишнього середовища [17, 20].

Виробничі причини відмов зумовлені порушеннями технологічних процесів виготовлення електрообладнання, використанням неякісної сировини та матеріалів, низьким рівнем контролю якості готових виробів та ін.

Експлуатаційні причини відмов є наслідком тривалої роботи електрообладнання в аварійних режимах, низької якості електроенергії, низької кваліфікації обслуговуючого персоналу, низького рівня технічного обслуговування.

Об'єктивні причини поділяються на внутрішні та зовнішні [20].

Внутрішні – це причини відмов електрообладнання, що викликані внаслідок природного старіння та зносу його конструктивних елементів.

Зовнішні – це причини відмов електрообладнання, що викликані дією на внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Серед дестабілізуючих факторів навколишнього середовища розрізняють кліматичні та біологічні (флора та фауна) та ін. Найбільший вплив на електрообладнання чинять кліматичні фактори, що можуть бути як природніми, при розміщенні його просто неба (зовнішні електроустановки, наприклад, шафи типу КРУЗ), так і штучними при розміщенні його в спеціалізованих приміщеннях (наприклад, шафи КРУ). Головними природніми кліматичним впливами на електроустановки є граничні плюсові та мінусові температури, вітер, ожеледь, одночасна дія вітру та ожеледі, забрудненість повітря, вологість та водність повітря. Біологічні фактори чинять істотний вплив на певні види електроустановок, наприклад, заростання трас повітряних ліній деревами призводить до міжфразних замикань та обривів їх проводів, птахи досить часто призводять перекриття лінійної ізоляції, заростання територій підстанцій травою та чагарниками може сприяти швидкому розповсюдженню пожежі по всій території підстанції.

Розглянуті причини ушкоджень і досвід експлуатації електроустановок [10, 17, 20-23] дозволяють провести наступну класифікацію дефектів обладнання електроустановок за причинами виникнення:

- технологічні – дефекти, що викликані природним зносом та старінням обладнання внаслідок його роботи;

- наднормативні – дефекти, що викликані наднормативними навантаженнями;

- проектні – дефекти, що викликані помилками при проектуванні;

- виробничі – дефекти, що викликані помилками допущеними при виробництві обладнання;

- недбалісні – це дефекти, що виникли внаслідок помилкових дій персоналу при обслуговуванні електроустановок.

Запропонована класифікація груп експлуатаційних ушкоджень елктростснаовок (рис. 2.1), відмов є основою для аналізу дефектів конкретних класів електроустановок, що можуть бути визначені дистанційно.



Рисунок 2.1 – Класифікація груп
експлуатаційних ушкоджень електроустановок

2.2 Ушкодження конструктивних елементів ПЛ з неізольованими проводами

Повітряні лінії експлуатуються в досить складних умовах – вони знаходяться на відкритому повітрі, а отже весь час зазнають кліматичних ризиків [25], при цьому по їх проводах протікає електричний струм, а їх ізоляція знаходиться під високою електричною напругою. Також існує певний ризик внаслідок ненавмисного / навмисного втручання в їх роботу сторонніх осіб.

Дефекти (несправності) повітряних ліній щодо їх місця розміщення доцільно, що можливо визначити дистанційно, засобами БПЛА доцільно класифікувати так (рис. 2.2):

- несправності опор і фундаментів;
- несправності проводів та грозозахисних тросів;
- несправності лінійної арматури;
- заземлювальних пристроїв;
- дефекти ізоляторів;
- порушення та несправності трас ПЛ.

2.2.1. Несправності залізобетонних, металевих опор і фундаментів

У результаті дії на опори повітряних ліній впродовж всього часу експлуатації постійних, короткочасних і аварійних навантажень у них викає ряд характерних дефектів та поломок [10, 22, 24, 26-28]:

– тріщини, локальні викришування, оголення арматури фундаментів, приставок і залізобетонних опор;

– ушкодження або руйнування гідрозахисту фундаментів;

– недостатнє заглиблення фундаментів опор, стояків залізобетонних опор;

– осідання (спучування) землі навколо фундаменту, осідання (видавлювання) фундаменту;

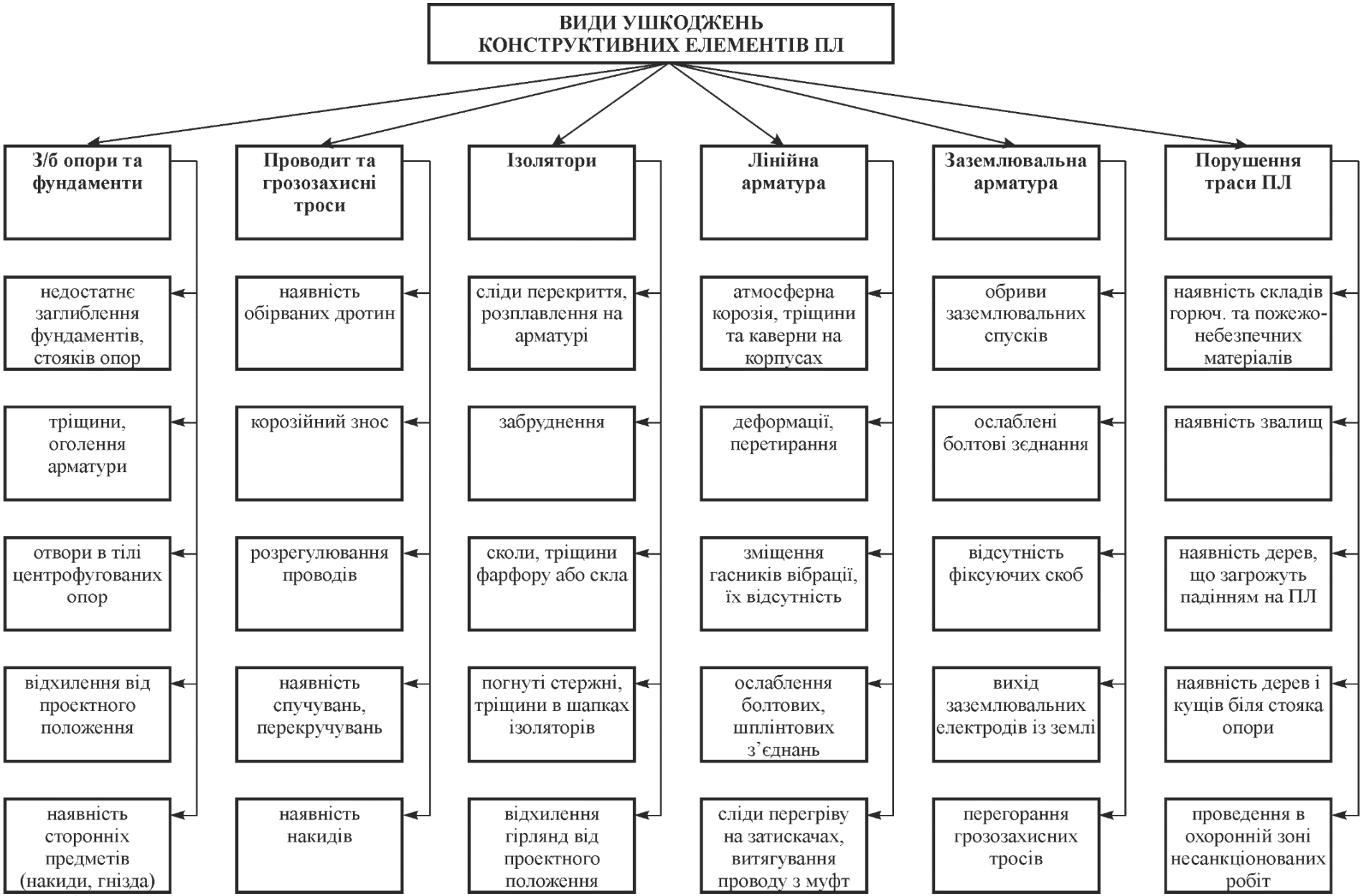


Рис. 2.2 – Класифікація дефектів та ушкоджень ПЛ

– приварювання анкерних болтів до п'яти опори;

– відсутність гайок на анкерних болтах;

– відсутність металевих драбин для піднімання на фундаменти перехідних опор через ріки, ставки;

– відсутність або несправний стан захисту фундаментів від льодоходу;

– відсутність спеціальних позначок, номерів, табличок і вказівників на опорах;

– відхилення опор від номінального положення вище допустимих норм, деформація окремих частин опори, перекоси стояків і підніжок відносно опор з відтяжками;

– відсутність деяких конструктивних елементів опор;

– корозія елементів опор, ушкодження клепаних і болтових з'єднань;

– деформація елементів опор та дефекти зварних швів;

– відсутність кріпильних елементів (болтів, гайок), неякісне кріплення елементів опор;

– послаблення та пошкодження: відтяжок опор і їх кріплень, внутрішніх зав’язків залізобетонних опор, талрепів;

– наявність на опорах гнізд птахів та інших сторонніх предметів.

При експлуатації залізобетонні фундаменти ушкоджуються як від дії значних механічних навантажень, так і від дії навколишнього середовища. Найчастіше в них ушкоджується наземна частина. У результаті дії різнонаправлених механічних навантажень, ударів на фундамент у ньому виникають тріщини. Ці тріщини під дією перепадів температури, вітру, вологи збільшуються і призводять до сколів і оголення арматури (рис. 2.3).

Розмивання безпосередньо фундаменту або його захисту від льодоходу талими, дощовими, ґрунтовими водами призводить до втрати співвісності зі стояком опори, внаслідок чого він може бути зруйнований значним згинаючим моментом. Також причиною механічних ушкоджень може бути інтенсивний ріст яру поблизу електроопори.

Якщо ПЛ проходить поблизу хімічних заводів досить швидко руйнуються анкерні болти (рис. 2.4) та верхня частина металевих підножників. Також інтенсивній корозії піддаються металеві частини фундаментів, якщо ПЛ знаходиться близько до електрифікованих залізничних доріг.

До найбільш характерних дефектів залізобетонних опор, що з'являються під час їх експлуатації слід віднести: вивітрювання бетону, поперечні та повздовжні тріщини (рис. 2.5), сколи бетону, отвори викривлення та відхилення стояків вище допустимих норм.

Однією з причин появи тріщин є відхилення стояків опор вище допустимих норм. При цьому різко зростають механічні навантаження на нижню частину стояка, що сприяє посиленому утворенню тріщин. Тому для стояків вільностоячих ценрофугованих ПЛ 35-150 кВ допускається викривлення до 10 см, а для віброваних стояків ПЛ 6-20 кВ відхилення вершини від вертикального положення – до 50 см [10].



Рисунок 2.3 – Ушкодження фундаменту металевої з оголенням арматури опори



Рисунок 2.4 – Руйнування анкерного болта

Небезпека тріщин полягає у високій ймовірності їх розкриття. У місцях глибоких тріщин все механічне навантаження на стояк сприймаються лише арматурою, що призводить до значного зменшення його механічної міцності. Швидкість і глибина розкриття тріщин залежать від багатьох факторів: характеру механічних навантажень, діаметра арматури, сили зчеплення арматури і бетону [26]. Для центрифугованих стояків опор ПЛ 35-150 кВ допускається ширина розкриття поперечних тріщин по всій поверхні до 0,6 мм, якщо наявні дві повздовжні тріщини в одному перерізі на довжину 3 м – до 0,3 мм. Стояки опор з повністю напруженою арматурою не повинні мати тріщин зовсім. Для віброваних стояків опор ПЛ 6-20 кВ допускається дещо більша ширина розтріскування бетону – до 0,5 мм довжиною понад 1 м [10].

Наявність тріщин у бетоні стояків опор призводить до корозії арматури, а з часом – до викришування бетону та появи отворів (рис. 2.5). Площа наскрізних отворів у центрофугованих стояках не повинна перевищувати 25 см^2 [10].

До механічних ушкоджень електроопор також призводять наїзди на них транспортними засобами та сількогосподарськими машинами, наприклад, при обробітку ґрунту посівних площ.

Найбільш розповсюдженими дефектами металевих конструктивних елементів таких як траверси, тросостійки, шарнірні з’єднання залізобетонних опор є корозія. Металеві деталі кріплення гірлянд ізоляторів інтенсивно зношуються при галопуванні проводів та при їх обривах.



Рисунок 2.5 – Тріщина на полій центрифугованій опорі [28]



Рисунок 2.6 – Отвір у тілі центрифугованої опори

Основний дефект металевих опор ПЛ під час експлуатації – це корозія внаслідок атмосферних впливів. Найбільших руйнувань зазнають горизонтально розташовані конструктивні елементи опор і місця їх з'єднання, тобто такі місця де атмосферна волога може затримуватися на довгий час (рис. 2.7) [26, 28]. Особливо швидко ржавіють опори ПЛ, що проходять поблизу хімкомбінатів, на полях інтенсивного сільського господарства, по узбережжях морів.

До ушкоджень збірних металевих опор також призводять ослаблені гвинтові та клепані з'єднання. Перекіс гвинтів призводить до зниження міцності з'єднання. Тому всі гвинтові з'єднання елементів опори повинні бути затягнутими з нормованим зусиллям. На кожному гвинті повинна бути встановлені пружинна шайба або контргайка.

Тривала корозія металевої опори ПЛ призводить до зменшення перерізу її конструктивних елементів, зниження її несучої здатності як наслідок – до руйнування, під час дії наднормативних вітрових або ожеледно-вітрових навантажень (рис. 2.8).





Рисунок 2.7 – Корозія на елементах електроопори



Рисунок 2.8 – Руйнування металевої опори ПЛ 110 кВ ожеледно-паморозевими відкладеннями

2.2.2. Несправності проводів, грозозахисних тросів

Під час експлуатації ПЛ у проводах та грозозахисних тросах виникають наступні несправності [10, 22, 26, 27]:

– наявність обірваних (ті, що лопнули) або перегорілих дротин, слідів перекриття або оплавлення дротин верхнього повиву проводу;

– корозійний знос проводів і тросів;

– розрегулювання проводів однієї (у т.ч. розщепленої) або всіх фаз;

– зміна нормованих значень стріл провисання, відстаней від проводів ПЛ до землі або між фазами;

– наявність спучувань, перекручувань дротин проводу;

– пошкодження проводів і тросів біля затискачів, гасників вібрації, дистанційних розпірок і під захисними муфтами в роликових підвісках;

– утворення тріщин у корпусах з'єднувачів проводу;

– послаблення кріплень (в'язок) проводу до штирових ізоляторів, проковзування проводу у в'язці;

– наявність накидів на провід.

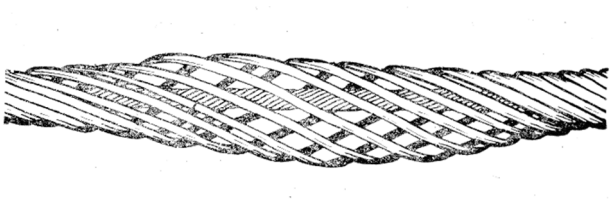
Перераховані вище дефекти проводів та тросів ПЛ за причиною, що їх викликає можливо розділити на три групи: корозійні, електродугові та механічні.

Корозійні дефекти виникають внаслідок самовільного руйнування металів дротин проводу в результаті їх хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Зазвичай, корозія проводу починається із зовні проводу і поступово просувається в середину. Алюмінієві дротини особливо чутливі до дії різноманітних лугів. У справному багатоповиному проводі стальне осердя надійно захищене від корозійних процесів, однак при його ушкодженні алюмінієві дротини відходять від нього (рис. 2.8, *а*) і створюють шлях для проникнення до осердя вологи та хімічно активних і абразивних часток. У таких місцях виникають первинні осередки ушкоджень проводу, які швидко призводять

до втрати його механічної міцності. Особливо інтенсивно корозійні дефекти розвиваються поблизу хімічних виробництв і поблизу морів.

Електродугові дефекти виникають при замиканні фазних проводів між собою чи на землю. Рівень ушкодження проводу залежить від величини струму дуги при КЗ та часу її горіння. Дія електричної дуги може призводити до опіків, оплавлення чи перепалу окремих дротин зовнішніх повивів проводу, їх сплавляння і у найбільш тяжких випадках – до перепалу проводу. У місцях опіків і оплавлень провід стає більш шорстким (рис. 2.9, *б*), на ньому можуть утворюватися патьоки із алюмінію. Внаслідок дії високої температури на провід змінюється структура його алюмінієвих дротин – вони стають крихкими. У результаті під дією механічних навантажень відбувається їх обрив.

Механічні ушкодження проводів виникають при їх вібрації та при дії на них наднормативних механічних навантажень, наприклад, при ожеледоутворенні, зачіпанні проводу крупногабаритним автотранспортом і т.п.



а)



в)



б)



г)

Рисунок 2.9 – Дефекти проводу ПЛ:
а) спучування; б) опіки електродугою; г) перелом дротин; в) обрив

Ушкодження проводу від вібрації частіше за все відбувається біля або безпосередньо в підтримуючому затискачі (рис. 2.8, *в*) і проявляється у вигляді перелому частини дротин верхнього повиву. Такі ушкодження досить часто можуть бути прихованими у бандажній стрічці, що намотана на провід. Найбільше ушкоджень від вібрації зазнають алюмінієві та сталеалюмінієві проводи малих перерізів (до 95 мм^2), що складаються з семи дротин повітряних ліній, які необладнані гасниками вібрацій [23].

Надрозрахункові механічні навантаження, що виникають під час ожеледно-вітрових аварій (рис. 2.8, *г*), злому ізоляторів, при зачіпанні проводу підйомними механізмами під час проведення будівельних розвантажувально/навантажувальних робіт призводять до розтягування або обривів проводів ПЛ призводять У випадку зачівання проводу підйоминими механіхмами, автотранспортом на ньому залишаються глибокі вм’ятини, подряпини а місце обриву має вигляд зрізу [26].

2.2.3. Ушкодження ізоляторів та ізолювальних підвісок

Дефекти ізоляторів поділяються на електричні та механічні [10, 22, 26, 28]:

– сліди перекриття гірлянд та окремих ізоляторів (ушкодження глазурі ізоляторів, руйнування фарфору, скла, сліди розплавлення на арматурі ізоляторів та на арматурі гірлянд);

– забруднення ізоляторів;

– механічне пошкодження фарфору або скла ізоляторів у вигляді сколів тарілки ізолятора, тріщин;

– наявність погнутих стержнів ізолятора, виповзання стержнів із шапки ізолятора, тріщин у чавунній шапці ізолятора;

– відхилення гірлянд ізоляторів від проектного положення більш допустимого значення.

Електричні дефекти ізоляторів – це перекриття їх електричною дугою та електропробій. Перекриття ізолятора відбувається по поверхні або ж вздовж

поверхневого шару повітря. У номінальному режимі роботи ПЛ ізолятори в підвісці працюють під напругою, що в декілька разів менша сухо розрядної та в 1,2-1,5 рази менша вологорозрядної тому їх пробій не відбувається [26]. Однак у процесі експлуатації на ПЛ можуть виникати перенапруги, рівні яких значно перевищують номінальні, наприклад, комутаційні, від ударів блискавки. Якщо поверхня ізоляторів чиста то в більшості випадків їх перекриття блискавкою не викликає значних ушкоджень. На їх глазурі залишаються сліди перекриття у вигляді незначних оплавлень та зміни кольору. За умови цілісності глазурі такі ізолятори можуть залишатися в роботі. Якщо в гірлянді знаходиться нульовий фарфоровий ізолятор, то при грозових перекриттях виникає ушкодження з руйнуванням його фарфорової частини (рис. 2.9), а в деяких випадках – з розривом його шапки і розчепленням гірлянди.

Поверхневе перекриття ізоляторів електродугою може бути викликане забрудненням ізоляторів або накидом. Суттєві забруднення ізоляторів відбуваються на ПЛ, що проходять поблизу хімкомбінатів, теплових електростанцій, металургійних підприємств, узбережжя моря, степних солончакових районів, полів з інтенсивним використання мінеральних добрив. Сухе забруднення ізолятора практично не знижує його розрядник характеристик. Проте при зволоженні забрудненої поверхні під час туманів, паморозі, роси може утворюватися «болото» з доброю електропровідністю. Якщо його провідність виявиться вище критичної то відбудеться часткове або повне перекриття гірлянди ізоляторів робочою напругою. Якщо забруднення ізоляторів містять розчинні у воді речовини, то вони змиваються природним чином під час злив.

До електричного пробою фарфорового ізолятора також може приводити і його тепловий пробій. Який може виникнути в нормальному режимі роботи за умови його сильного нагріву на сонці. Механізм теплового пробою полягає в наступному. При підключенні ПЛ до електромережі в її ізоляторах починає протікати струм провідності певної величини, що викликає їх нагрів. При цьому тепло, що виділяється, підвищує струм і цей процес повторюється. Якщо тепло

відводиться в об’єм ізолятора швидше ніж воно виділиться від протікання струму провідності, пробій не відбувається в противному випадку відбувається електричний пробій з руйнуванням фарфорової частини ізолятора [28].

Якщо ізолятори не мають заводських дефектів то їх механічні ушкодження (рис. 2.10) відбуваються досить рідко при виникненні навантажень, що суттєво перевищують проектні, наприклад, при галопуванні проводів під час стихійного ожеледоутворення у поєднанні з вітром. До механічних ушкоджень також може призводити перекіс гірлянд ізоляторів, частковий вихід стовпчика з гнізда, випадіння шплінтів (замків), навмисні удари палками, камінням, прострілі з вогнепальної зброї безвідповідальними особами.

2.2.4. Дефекти арматури ПЛ

Зазвичай, кількість аварійних відключень ПЛ від ушкодження лінійної арматури незначна, проте вони відбуваються під час складних метеорологічних явищ і призводять до тяжких аварій [29].

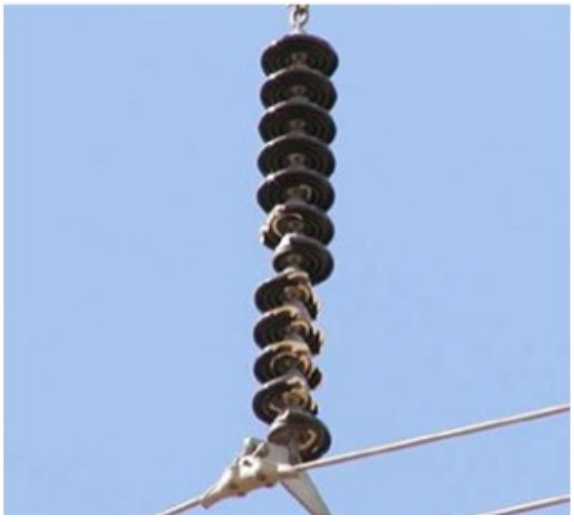


Рисунок 2.10 – Ушкодження гірлянди ізоляторів лінійною дугою



Рисунок 2.11 – Крихкий злом композитного ізолятора [28]

Найбільш розповсюдженими дефектами лінійної арматури є наступні [10, 22, 26, 28]:

- атмосферна корозія;

- тріщини, каверни на корпусах затискачів, штирів, гаків;

- перетирання або деформація окремих елементів арматури (рис. 2.12);

- зміщення, деформації гасників вібрації від місця встановлення або їх відсутність;

- відсутність болтів, шайб, гайок, шплінтів, ослаблені гвинтові та шплінтові з’єднання;

- сліди перегрівання контакту затискача (з'єднувача), витягування проводу із затискача або з'єднувача, наближення петель до елементів опор, значна деформація петель;

- пошкодження захисних рогів і кілець, координуючих проміжків;

- розгинання штирів і гаків кріплень штирових ізоляторів;

- руйнування захисних муфт на проводі (тросі) у роликових підвісках на переходах ПЛ через водойми.

Однією з основних причин ушкодження деталей лінійної арматури є корозія. Інтенсивне окислення сталі та чавуну починається після повного спрацювання їх захисного покриття із цинку. Строк служби цинкового покриття лінійної арматури складає до 18-20 років, а в зонах підвищеним вмістом забруднень у повітрі та ґрунті – до 8 років [26]. Для його подовження були розроблені спеціальні мастила, що можуть застосовуватися захисту для лінійної арматури в районах зі складними умовами роботи.

Ушкодження цинкового захисного покриття арматури також відбувається при перекритті ізоляторів електричною дугою. При цьому на металевих деталях утворюються оплавлення металу, що можуть викликати посилену корозію.

Зломи та руйнування арматури виникають внаслідок явища втоми металу, що відбуваються внаслідок відсутності шарнірності у її з’єднаннях (рис. 2.13).



Рисунок 2.12 – Механічний знос вузла КГП [29]



Рисунок 2.13 – Розрив скоби СК-12.1 [29]

Ушкодження контактних затискачів відбувається внаслідок зростання їх перехідного опору, який викликає з часом їх значний перегрів. Температура затискача зростає до такої межі, що може відбуватися руйнування як самого затискача, так і обрив проводу в місці виходу із нього. При екстремальних ожеледно-вітрових навантаженнях з таких контактних затискачів можуть бути вирвані проводи, що з’єднуються.

Особливістю таких дефектів затискачів є те, що вони довгий час можуть не проявляються на недовантажених ПЛ у мережах з низькими значеннями струмів КЗ. Однак, при рості струмового навантаження і величини струмів КЗ перехідний опір таких контактних затискачів починає різко зростати, що призводить до їх ушкоджень.

На територіях зі значною вітровою діяльністю, де виникають часті галопування та вібрації проводів фіксується значний знос арматури в місцях її спряження з іншими конструктивними елементами у вигляді стирання

2.2.5. Несправності заземлювальних пристроїв

Заземлювальний пристрій ПЛ представляє собою сукупність всіх заземлювачів, що знаходяться в ґрунті, провідників, що з’єднують заземлюванні стояки опор, грозозахисних тросів і одиничних стрижневих блискавковідводів, трубчастих розрядників і іскрових проміжків. Основне призначення системи заземлення лінії – відведення в землю імпульсних струмів блискавки та забезпечення заданого рівня грозостійкості повітряної лінії [23].

При експлуатації виникають наступні типи дефектів заземлювальних пристроїв ПЛ [10, 22, 23, 26]:

– обриви заземлювальних спусків;

– ослаблені болтові з'єднання заземлювача з арматурою залізобетонного стояків опори;

– ослаблені болтові з'єднання грозозахисного тросу з заземлювальними спусками або тілом стояка опори;

– відсутність скоб, що фіксують заземлювальні спуски до опори;

– вихід заземлювачів вище поверхні землі;

– перегорання грозозахисних тросів;

– дефекти трубчастих розрядників на електроопорах:

а) зміна нормованої ширини зовнішнього іскрового проміжку;

б) погане закріплення рогів;

в) забруднення та ін. ушкодження лакового покриття;

г) тріщини та прогари на стінках;

д) зміщення розрядника від проектного положення;

е) відсутність або несправність покажчиків спрацювання;

з) наявність розплавлень на електродах іскрового проміжку розрядника.

На ПЛ тросові блискавковідводи виконують з оцинкованих тросів перерізом 35-95 мм^2, тому основним їх дефектом є корозія. У мережах зі значними струмами

КЗ, іноді, має місце перегорання тросу [23, 30]. У районах з інтенсивним ожеледоутворенням на ПЛ напругою 110-330 кВ відбувається значне провисання обледенілих тросів і наступним доторкання до фазних проводів. У результаті в місцях контакту відбуваються опіки, оплавлення і в найбільш тяжких випадках перепал грозозахисного тросу. Прямі удари блискавки у грозозахисний трос спричиняють ушкодження його окремих дротин (рис. 2.14).

Під час кожного спрацювання трубчастого розрядника відбувається зменшення товщини його стінок, що в решті решт призводить до їх прогорання. Забруднення розрядників, значне зволоження їх трубок призводить до перекриття по поверхні розрядника, появи тріщин або розриву газогенеруючих трубок, їх виривання з посадочного місця. Досить часто розрядники виходять з ладу при забрудненні їх трубок з середини комахами, павутинням, дрібним сміттям з дерев. Під час експлуатації розрядників може змінюватися нормована відстань між електродами зовнішнього іскрового проміжку внаслідок відхилення їх кінців із-за електродинамічної дії струму електричної дуги, накиду на ПЛ, ослаблення гвинтового кріплення заземлюючого провідника. Спрацювання трубчатих розрядників супроводжується вихлопом розжарених газів з великою швидкістю, що створює на них значні механічне навантаження, тому погано закріплені розрядники можуть бути зірвані з опори ПЛ.



Рисунок 2.14 – Ушкодження грозо-захисного тросу
при прямому попаданні блискавки

2.2.6. Порушення та несправності на трасах ПЛ

Надійність електропостачання та безпека споживачів електричної енергії в значній мірі залежать від стану трас повітряних ліній, тому до них ПУЕ [2] та Правила охорони електричних мереж [31] висувають ряд вимог. Невиконання яких викликає наступні порушення і несправності на трасах ПЛ [2, 10, 22, 23, 31]:

– наявність у охоронній зоні ПЛ горючих, пожежонебезпечних матеріалів;

– наявність вогню, звалищ будь-якого типу в тому числі і хімікатів;

– наявність на межах траси окремих дерев, що загрожують падінням на проводи ПЛ або розростанням у бік ПЛ на недопустимі відстані;

– недостатня ширина просік вздовж траси ПЛ;

– наявність під проводами ПЛ дерев і кущів висотою 4 м і більше, очерету та порослі;

– наявність дерев і кущів безпосередньо біля стояка опори;

– проведення на трасі несанкціонованих робіт (в т. ч. вантажно-розвантажувальних, будівельно-монтажних, вибухових, іригаційних і поливних, видобутку корисних копалин, посадки та вирубування дерев і кущів і т. п.);

– наявність загонів для худоби, пасовищ, шпалер виноградників;

– виконання в межах охоронних зон ПЛ будь-яких дій, які порушують нормальну роботу повітряних ліній та сприяють можливості їх ушкодження або сприяють накопиченню великої кількості людей;

– відсутність або пошкоджений стан захистів основи опор від льодоходів;

– відсутність або несправний стан сигнальних і дорожніх знаків, загороджувальних вогнів на перехідних опорах, відбійних тумб, габаритних воріт на перетині залізниць.

З метою нормального функціонування, забезпечення доступу електротехнічного персоналу до електромереж, уздовж повітряних ліній встановлюються охоронні зони у вигляді земельних ділянок, що обмежені уявними вертикальними площинами на певній відстані (у залежності від класу напруги ПЛ) з обох сторін від крайніх проводів. Ширина просік також залежить від висоти дерев, що знаходяться біля ПЛ.

До найбільш розповсюджених ушкоджень трас ПЛ відносяться: захаращення горючими матеріалами, заростання кущами і деревами, проведення робіт під ПЛ з порушенням правил. Накопичення легкозаймистих матеріалів у захисні зоні ПЛ таких як скирти соломи, сіна, штабелі торфу, лісоматеріалів, паливно-мастильних матеріалів у випадку виникнення пожежі призведе до ушкодження фундаментів та стояків опор, забруднення сажею лінійної ізоляції. Невчасне розчищення траси ПЛ від кущів, у заболоченій місцевості очерету та дерев, що ростуть на краю просіки крім підвищеної пожежної небезпеки також призводить до падіння віття дерев на проводи ПЛ під час ожеледі, сильного вітру та збільшення втрат електричної енергії на коронування в нормальному режимі роботи. Проведення будь-яких несанкціонованих будівельних робіт у охоронній зоні повітряної лінії досить часто закінчується обривом проводів та наїздом на електроопори.

Облаштування у охоронних зонах повітряних ліній спортивних і майданчиків для ігор, ринків, зупинок громадського транспорту, автозаправних станцій, стоянок громадського та індивідуального транспорту призводить до накопичення значної кількості людей сприяють можливості їх пошкодження або призводять до нещасних випадків з людьми [22]. Доторкання людиною до незаземлених металевих предметів, що знаходяться під проводами ПЛ високої та надвисокої напруги є небезпечним і проявляється в проходженні розрядів по її тілу. Межі небезпечної зони впливу електричного поля на людину обмежуються значенням напруженості 5 кВ/м і для ПЛ, наприклад, номінальною напругою 500 кВ складають 20 м від осі лінії. Однак, протяжні предмети, такі як забори з металевої сітки, дроти загонів для худоби, дротини шпалер виноградників при певній довжині можуть бути небезпечними при їх доторканні для людей та тварин, навіть за межами вказаної зони.

Розглянуті ушкодження конструктивних елементів та трас повітряних ліній дозволяють визначити шляхи підвищення експлуатаційної їх надійності.

2.3 Шляхи підвищення експлуатаційної надійності ПЛ

Надійність повітряної лінії – це її властивість зберігати на певному інтервалі часу значення всіх параметрів, що характеризують її здатність передавати електроенергію в заданих режимах роботи, в тому числі і при технічному обслуговуванні [32]. Розрізняють ідеальну, базову і експлуатаційну надійність.

Ідеальна – це максимально можлива надійність, що досягається шляхом створення досконалої конструкції повітряної лінії при абсолютно точному врахуванні всіх умов при її спорудженні та експлуатації.

Базова – це надійність, що фактично досягається при проектуванні і спорудженні повітряної лінії. Вона визначається за допомогою проведення теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень як окремих конструктивних елементів, так і ПЛ у цілому.

Експлуатаційна – це дійсна надійність ПЛ у процесі її експлуатації (фіксована для певного моменту часу), яка обумовлена якістю проектування і виготовлення та умовами її експлуатації, технічного обслуговування і ремонту. Експлуатаційна надійність завжди менша за базову, внаслідок практичної неможливості врахування всіх експлуатаційних факторів під час виконання проектних робіт. Найвищий рівень експлуатаційної надійності може бути досягнений при максимальному наближенні базової надійності до ідеальної під час проектування повітряної лінії.

Експлуатація чинить найбільший вплив на надійність ПЛ, яка забезпечується шляхом [10, 17]:

- дотримання умов і режимів експлуатації;

- проведення регулярного технічного обслуговування шляхом проведення планових та позачергових оглядів і профілактичних перевірок;

- систематичного діагностування стану ПЛ, виявлення їх дефектів, ушкоджень з метою запобігання їх аварійних відключень;

- проведення ремонтів і аварійно-відновлювальних робіт.

Головна причина зниження надійності повітряних ліній у процесі їх експлуатації – це старіння та знос їх конструктивних елементів. Знос є причиною зміни їх параметрів, поломки, зниження механічної та електричної міцності і т. п. Старіння призводить до зміни фізико-механічних властивостей матеріалів, що призводить до несправностей або відмови ПЛ.

У процесі експлуатації після відмов повітряні лінії ремонтуються, тобто відновлюються, тому основним показником, що кількісно характеризує їх експлуатаційну надійність є параметр потоку відмов $\omega(t)$.

Параметр потоку відмов $\omega(t)$ – це математичне очікування кількості відмов елементів ПЛ, що відбулося за одиницю часу, за умови, що елементи відновлюються, тобто кількість елементів впродовж строку експлуатації не змінюється $N_0 = const$. Аналіз причин відмов ПЛ показує, що потік відмов ω доцільно розглядати як суму двох складових: перша $\omega_1(t)$ зумовлена природнім старінням та зносом конструктивних елементів ПЛ, а друга ω_2 – випадковими зовнішніми чинниками [33]:

$$\omega = \omega_1(t) + \omega_2 . \qquad (2.1)$$

У варазі (2.1) параметр $\omega_1(t)$ представляє собою відношення кількості елементів, що відмовили $\Delta n(t)$ за певний проміжок часу, до кількості елементів N_0, що знаходились у роботі впродовж проміжку часу Δt [34]

$$\omega_1(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_0 \cdot \Delta t} .$$

Параметр ω має досить складну залежність від строку експлуатації t обладнання, яка дозволяє дослідити типові періоди життєвого циклу ПЛ. На рис. 2.15 представлено зміну потоку відмов у часі для ПЛ на металевих опорах. Весь інтервал часу приведеного графіка можливо розбити на три ділянки: припрацювання, нормальної роботи та старіння.

На інтервалі часу від початку експлуатації до $t_1 = 4$ роки функція ω спадає з максимального значення до мінімального, а далі до 12 року зростає. Це пов'язано із тим, що при спорудженні ПЛ були використані конструктивні елементи з прихованими дефектами, які після прийняття ПЛ в експлуатацію почали виходити з ладу. Відрізок часу тривалістю 8 років між точками $t_1 = 4$ роки і $t_1 = 12$ років у даному випадку – це період припрацювання.

Другий період життєвого циклу ПЛ складає 13 років, знаходиться між 13-м і 25-м роками експлуатації і характеризується практично постійним значенням параметру потоку відмов ω. Це так званий період нормальної роботи лінії.

З моменту часу $t_3 = 25$ років відбуваються незворотні фізико-хімічні процеси матеріалів з яких виготовлені конструктивні елементи ПЛ, тобто вони старіють. Внаслідок цього функція $\omega(t)$ потоку відмов монотонно збільшується до моменту проведення капітального ремонту або реконструкції ПЛ.

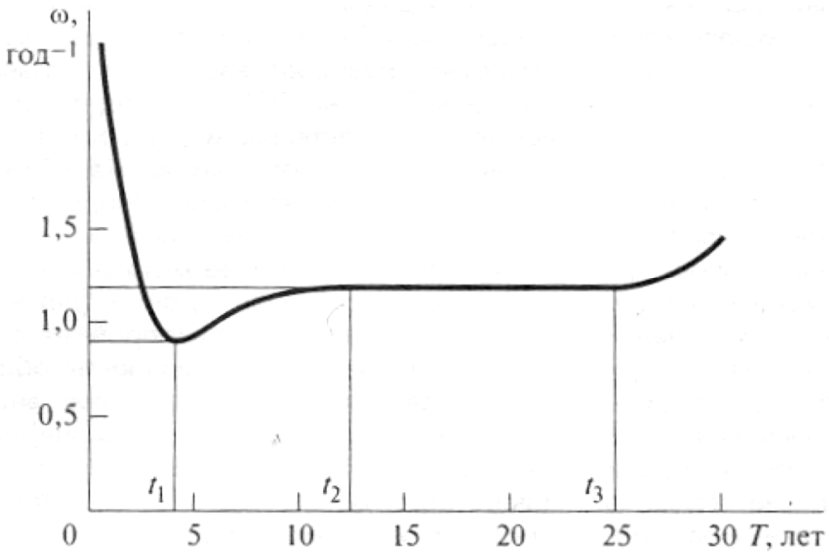


Рисунок 2.15 – Залежність $\omega = f(t)$ для ПЛ на металевих опорах [33]

Отже, з аналізу рівняння (2.1) слідує, що підвищити експлуатаційну надійність ПЛ можливо шляхом зменшення обох його складових. Першу складову $\omega_1(t)$ можливо зменшити за рахунок застосування більш якісних конструктивних елементів ПЛ або елементів, що мають збільшену довговічність (наприклад, збільшений гамма-відсотковий строк служби і т.п.) та підвищенням якості і ефективності технічного обслуговування ПЛ (вчасна заміна дефектних елементів, проведення успішних плавок ожеледі і т.п.). Друга складова ω_2 може бути зменшена шляхом збільшення початкової механічної міцності конструктивних елементів ПЛ, підвищення якості будівництва ПЛ у цілому та посиленням контролю за дотриманням правил охорони електричних мереж населенням та організаціями.

Підвищення експлуатаційної надійності ПЛ шляхом механічного посилення та заміни на більш досконалі їх конструктивних елементів передбачає проведення реконструкції ПЛ, що призведе до відключень споживачів електроенергії на час ремонтних робіт, а також необхідності залучення значних людських та матеріальних ресурсів і при обмежених фінансових можливостях енергопостачальних компаній є неприйнятним. Тому більш доцільним є запровадження організаційно-технічних заходів направлених на підвищення ефективності технічного обслуговування та контролю порушень охоронних зон повітряних ліній. Технічно реалізувати вказані заходи можливо шляхом впровадження в електричних мережах систем технічного діагностування повітряних ліній.

2.4 Висновки

1. Розроблено класифікацію груп експлуатаційних ушкоджень електроустановок на основі причин, що їх викликають. Що є осново для проведення аналізу дефектів конструктивних елементів конкретних класів електроустановок, що можуть бути визначені дистанційно.

2. Встановлено, що всі дефекти конструктивних елементів ПЛ, що виникли під час їх експлуатації, можуть бути виявлені та зафіксовані за допомогою відповідних безконтактних методів діагностування, за умови використання в процесі діагностування безпілотних літальних апаратів.

3. Встановлено, що найбільш доцільним шляхом підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній є впровадження в електричних мережах систем їх технічного діагностування.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Система технічного діагностування представляє собою сукупність засобів і повітряної лінії та виконавців, вона є підготовленою до діагностування та здійснює його за правилами, що встановлені нормативною документацією.

Проектування СТД ПЛ на базі БПЛА включає вирішення наступних взаємопов’язаних задач: вибір методів дистанційного контролю, аналіз і вибір параметрів діагностування обґрунтування її функціональної та структурної схем, розробку алгоритму роботи та вибір технічних та програмних засобів її технічної реалізації.

3.1 Дистанційні методи технічного діагностування ПЛ

Для дистанційного контролю поточного стану конструктивних елементів ПЛ можуть бути використані як фізичні методи, що базуються на використанні різних фізичних явищ, які притаманні конкретному стану обладнання (робочому чи не робочому), так і параметричні методи, що базуються на контролі відхилення поточних параметрів обладнання від нормованих.

Проведений у розділі 2 детальний аналіз дефектів і несправностей конструктивних елементів та трас ПЛ показав, що для визначення їх за допомогою БПЛА найбільш доцільним є застосування оптично-візуального [28, 35-37], теплового [28, 36, 38] та спектрально-акустичного методів [11, 39, 40] оптичної УФ-дефектоскопії [11, 41, 42].

Оптично-візуальний метод контролю базується на отриманні первинної інформації про стан обладнання при візуальному огляді ПЛ або при застосуванні спеціальних оптичних приладів для цього [36]. За допомогою цього методу можливо виявити більшість зовнішніх дефектів ПЛ, що знижують її механічну міцність: корозію, тріщини, сколи, оголення арматури стояків опор, сторонні предмети, забруднення, обірвані дротини, спучування та розрегулювання проводів

(тросів), сліди перекриттів електричною дугою, обриви заземлювальних спусків, відсутність конструктивних та кріпильних елементів ПЛ і їх зміщення з проектних місць, ослаблення болтових з'єднань і т. п. Даний метод є найбільш доступним і простим методом виявлення поверхневих деталей.

Оптично-візуальний контроль ПЛ проводиться у видимій частині спектра електромагнітних хвиль з довжиною хвилі від 400 до 750 нм. Застосування оптичних приладів дозволяє розрізняти дрібні дефекти, за умови, що вони мають достатній контраст з фоном. При використанні сучасних оптичних приладів (цифрових фотокамер або відеокамер) контрастність зображення можливо виправити в певних межах за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Головними перевагами цього методу є простота, висока швидкість отримання результату та низька вартість реалізації.

Тепловий метод полягає в аналізі теплового (інфрачервоного) випромінювання елементів ПЛ – проводів, контактних з'єднань та ізоляторів. Проводи та контактні з'єднання нагріваються внаслідок дії Джоулевих втрат, а ізолятори – діелектричних втрат. Сукупність цих нагрітих елементів формує теплове поле повітряної лінії, частина енергії якого відводиться в навколишнє середовище шляхом конвективного теплообміну, а частина, що залишилась викликає зміну теплового стану конструктивних елементів ПЛ та випромінюється в навколишнє середовище поверхнею електрообладнання як інфрачервоне випромінювання [38]. Справному стану ПЛ відповідає певна картина теплового випромінювання. Зміна цього теплового зображення (термограми) ПЛ свідчить про зміну режиму роботи елементів ПЛ або зміну їх технічного стану – виникнення дефектів. Використання термограм також дозволяє з певною точністю визначити температуру контактних з'єднань струмопровідних частин ПЛ і порівнявши їх нормованими значеннями прийти до висновку щодо їх поточного технічного стану.

Спектрально-акустичний метод виявлення дефектів ізоляції полягає в фіксації акустичних шумів від коронного розряду. У даному методі у якості джерела акустичних коливань розглядається коронний розряд, а не механічне джерело [11, 39, 40]. Такий підхід був прийнятий у зв'язку з тим, що на ПЛ

встановлюється значна кількість типів обладнання для кожного з яких практично не можливо отримати базу еталонних звукових полів [11].

Експериментально було встановлено, що електричне поле зовнішнього коронного розряду та розподіл і закономірності руху об’ємного заряду у зовнішній зоні мають певні особливості [39, 40]. Так, у момент спалаху корони у зовнішній зоні відсутні об’ємні заряди, а напруженість електричного поля розподілена за гіперболічним законом. Цей закон зберігається і після згасання коронного розряду, відмінним є те, що напруженість на поверхні проводу ПЛ змінюється від початкової, спочатку зменшуючись на певну величину, а потім змінює свій знак до моменту нового спалаху корони. Після згасання коронного розряду хвиля об’ємного розряду є повністю сформованою, а її хвіст відривається від поверхні проводу. Після набуття напруженості нульового значення, хвіст хвилі зупиняється, а фронт – продовжує віддалятися від проводу.

Для поля зовнішньої зони характерним є те, що напруженість електрополя на поверхні проводу і прилеглій до нього зоні змінює знак раніше, ніж потенціал проводу внаслідок наявності в ній об’ємного заряду, що утворюється в процесі коронування проводу ПЛ .Наслідком цього процесу є більш раннє запалювання корони в другий напівперіод.

Таким чином, у коронному розряді джерелом акустичних коливань є фронт пересування іонів, розширення повітря внаслідок стримерних пробоїв і коливання (збільшення/зменшення) об’єму повітря внаслідок протікання хімічних реакцій , що відбуваються при горінні коронного розряду [11].

Реєстрацію звукових коливань коронного розряду можливо проводити на відстані до декількох десятків метрів.

Технічне діагностування засобами інфрачервоної термометрії проводиться на двох ділянках електромагнітного спектру короткохвильовому (2-6 мкм) та довгохвильовому (8-12 мкм), оскільки у межах дих ділянок у атмосферному повітрі втрачається найменше інфрачервоного випромінювання.

Метод оптичної УФ-дефектоскопії полягає у перетворенні електромагнітного випромінювання, що виникає при появі поверхневих часткових розрядів і корони в УФ-діапазоні спектра у видиме зображення [41]. Метод дозволяє виявити дефекти на початковій та середній стадії розвитку, що супроводжуються електророзрядними процесами в опорній та підвісній ізоляції ПЛ [42]. Основні принципи методу базуються на теоретичних і експериментальних дослідженнях у направлені на виявлення таких дефектів лінійної ізоляції ПЛ: поверхневих забруднень, сколів, тріщин, оплавлення, перетирання.

Поява поверхневих та горіння коронних розрядів у значній мірі залежать від параметрів навколишнього середовища таких як температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск [42]. Наприклад, при зміні температури навколишнього повітря від -20 ºС до +40 ºС пробивна напруга повітря зменшується на 20%. При наближенні відносної вологості повітря до 100% і конденсації вологи на поверхні ізоляторів відбувається різкий ріст їх питомої поверхневої провідності і формування множини пар катод-анод особливо на несправних ізоляторах. Під час туману, мряки пошук нульових ізоляторів за допомогою методу оптичної УФ-дефектоскопії значно спрощується – коронні розряди будуть спостерігатися лише на справних ізоляторах.

Головна перевага даного методу полягає в можливості точного визначення місця розташування коронного розряду на ізоляторі на значній дистанції. Даний метод діагностики лінійної ізоляції на сьогодні є пріоритетним, оскільки виявлення дефектів іншими методами функціонального діагностування, без відключення ПЛ є ускладненим та менш ефективним [42, 43]. Проведення УФ-дефектоскопії ізоляції, на відміну теплового методу не залежить від струмового навантаження ПЛ, а необхідною умовою її проведення є наявність робочої напруги.

Для технічної реалізації вибраних методів діагностування конструктивних елементів ПЛ необхідно провести вибір параметрів, що описують стан системи «Повітряна лінія». Ці діагностичні параметри повинні мати достатню інформативність, щоб за скінченої кількості діагнозів процес розпізнавання стану конструктивних елементів міг бути здійсненим [44].

3.2 Розробка функціональної схеми СТД ПЛ

Повітряні лінії – це ланка енергосистеми, що працює у безперервному режимі роботи і виводиться в ремонт лише після аварій або для реконструкції. Тому побудова СТД ПЛ на основі тестового діагностування є складною задачею, технічна реалізація якої має високу вартість. З урахуванням розглянутих методів і параметрів технічного діагностування для в основі СТД ПЛ повинен лежати функціональний підхід діагностики.

Будемо вважати, що алгоритм діагностування, що необхідно реалізувати в у даній системі заданий і має множину елементарних перевірок $T \subseteq \Pi$. У зв'язку з тим, що внутрішні параметри ПЛ безперервно змінюються (наприклад, струм навантаження, номінальна напруга) тоді під елементарною перевіркою π_i будемо розуміти процедуру зняття з ПЛ відгука (реакції) R^i_j на дію робочого збурення, що має фіксоване значення впродовж певного проміжку часу. Отже, елементарна перевірка може бути проведена лише під час знаходження ПЛ в усталеному режимі роботи відносно вибраного внутрішнього чинника.

Функціональна схема СТД ПЛ подана на рис. 3.1. Характерною її особливістю є відсутність джерела тестових сигналів, тобто повітряна лінія працює за своїм призначенням, при цьому на неї діють внутрішні робочі чинники α_j та зовнішні від навколишнього середовища β_j.

У блоці керування БК зберігається алгоритм роботи системи технічного діагностування. За його командами здійснюється планові та позапланові перевірки об'єкту діагностування (ОД) – повітряної лінії. Згідно календарного плану подається команда на запуск БПЛА з вимірювальним перетворювачем типу *n*. Після досягнення БПЛА маршруту обльоту ПЛ з її елементів за допомогою вимірювальних перетворювачів ВП1…ВП*n*, що встановлюються на БПЛА знімаються сигнали R^*_j відповідей на чинники α_j та β_j. Отримані сигнали передаються за допомогою пристрою зв'язку ПЗ по радіоканалу до блоку логіки БЛ. Особливістю пристрою зв'язку є те, що він складається з передавача Tr та приймача Re які рознесені в просторі на значну відстань (до декількох десятків км.)

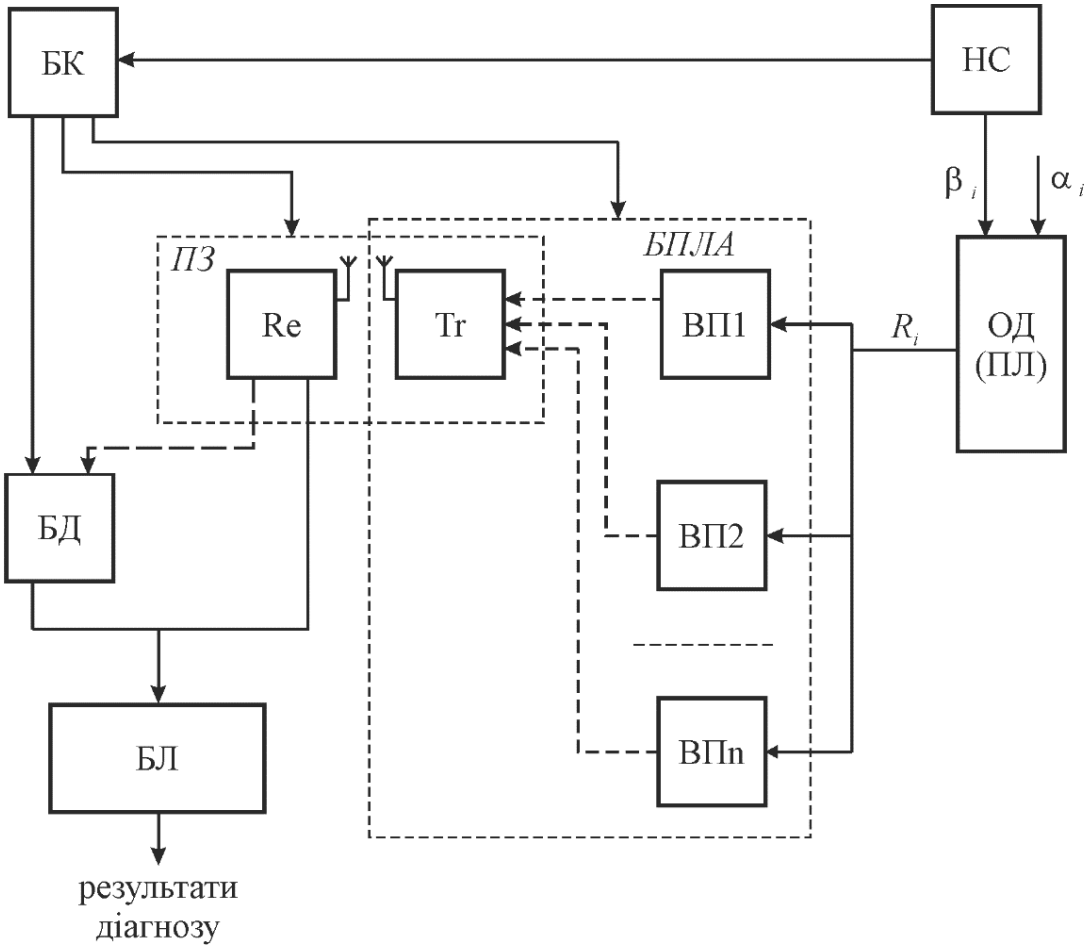


Рисунок 3.1 – Функціональна схема СТД ПЛ

Основне призначення блоку логіки – це порівняння фактичних значень результатів R^{i*}_j одиничних перевірок з можливими результатами $\{R_j\}$, $\{R^i_j\}$, що зберігаються у базі даних БД та формування результатів діагнозу. Якщо СТД розв'язує здачу, що до правильності функціонування ПЛ, у БД достатньо зберігати лише множину $\{R_j\}$ результатів елементарних перевірок. У блоці БД зберігаються еталонні значення станів $\{R^{i,k}_j\}$ k–елементів ПЛ і, за необхідності, відомості про виявлені дефекти під час минулих перевірок цих елементів (пунктирна лінія між блоками Re та БД). Дана інформація може бути використана для вирішування прогностичних задач.

На БК також постійно поступають сигнали від блоку «Навколишнє середовище» НС y_i, які необхідні для визначення моменту проведення позапланових перевірок ПЛ, наприклад, після різкої зміни погодних умов і т.п.

3.3 Вибір параметрів діагностування

Технічний стан ПЛ характеризується значною кількістю параметрів. Чим більше їх контролюється в процесі експлуатації тим точніший і достовірніший можливо отримати діагноз, тим більшою буде повнота його обсягу. Однак, велика кількість параметрів діагностування призводить до значного підвищення вартості СТД ПЛ та зниження її надійності в цілому. Тому для функціонування СДТ ПЛ у оптимальному режимі для кожного конкретного випадку необхідно розв'язати задачу вибору мінімально достатньої кількості параметрів діагностування. Для її розв'язку широко використовуються діагностичні моделі.

Множину діагностичних параметрів ПЛ доцільно розділити на кілька підмножин за джерелом походження дефектів, а саме: контур заземлення, опора, провід, ізолятор, лінійна арматура та за методом їх визначення: растрове зображення дефекту, *IR*- *UF*-діагностування.

Зазвичай технічне обслуговування ПЛ включає в себе планові обходи та огляди, що проводиться періодично через певні проміжки часу. Тому ПЛ слід розглядати як дискретний об'єкт діагностування, тобто такий у якого оператор $A(\ )$ перетворює сукупність вхідних сигналів $\boldsymbol{X}$, що набувають значень зі скінчених множин у сукупність вихідних величин $\boldsymbol{Y}$, що набувають значень з таких же множин [35]:

$$\boldsymbol{Y} = A\left(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Z}\right), \tag{3.1}$$

де $\boldsymbol{Z}$ – внутрішні параметри ПЛ.

Відповідно до моделі (3.1) та функціональної схеми СТД ПЛ кожному вхідному сигналу x_j із множини вхідних сигналів $\boldsymbol{X}$ $\left(x_j \in \boldsymbol{X}\right)$ можливо співвіднести елементарну перевірку π_j із множини всіх допустимих елементарних перевірок $\boldsymbol{\Pi}$ $\left(\pi_j \in \Pi\right)$. Значення чинників α_j та β_j у кожній елементарній перевірці π_j визначаються складом вхідних змінних і динамічним рядом їх значень $\left\{X_j\right\}$, а також початковим значенням $\boldsymbol{Z}_{\text{поч}}$ внутрішніх змінних. Тоді сукупність

діагностичних параметрів ПЛ $\boldsymbol{Y}$ після елементарної перевірки π_j буде характеризуватися складом γ_j контрольних точок, що співвіднесені компонентам вектора $\boldsymbol{Z}$ і результатом R_j^i елементарної перевірки, що залежить від технічного стану ПЛ. Таким чином, результат R_j^i виявиться послідовністю $\left|\gamma_j\right|$-мірних векторів і буде функцією чинників α_j та β_j [45]:

$$R_j^i = A\left(\alpha_j, \beta_j; \gamma_j\right)$$

або в термінах елементарних перевірок для справного елемента ПЛ

$$R_j = A\left(\pi_j\right) \tag{3.2}$$

і для несправного елемента ПЛ

$$R_j^i = A\left(\pi_j\right). \tag{3.3}$$

Вирази (3.2), (3.3) визначають математичну модель діагностування ПЛ у явному вигляді та придатні для формального опису даної задачі в загальній постановці. Однак для вирішення практичної задачі діагностування реальної повітряної лінії необхідно конкретизувати вид оператора $A(\ )$.

Найбільш простою формою запису оператора $A(\ )$ для випадку явної моделі є таблична форма. У такій таблиці (табл. 3.1) кожній i-й відмові (несправності) конструктивного елемента ПЛ відповідає несправний стан s_i із множини $\boldsymbol{S}$ $\left(s_j \in \boldsymbol{S}\right)$, і навпаки для справного стану s_0. Стан s_j визначається за допомогою j-ї елементарної перевірки (параметру) π_j з множини $\boldsymbol{\Pi}$ $\left(\pi_j \in \Pi\right)$. Таким чином, таблиця представляє собою набір стовпців – станів s_j та рядків – елементарних перевірок (параметрів) π_j елемента ПЛ на перетинах отримуються результати перевірок R_j^i.

Таблиця 3.1. Таблиця можливих станів ПЛ

π	S				
	s_0	…	s_i	…	$s_{\|S\|}$
π_1	R_1		R_j^i		$R_1^{\|S\|}$
…					
π_j	R_j		R_j^i		$R_j^{\|S\|}$
…					
$\pi_{\|П\|}$	$R_{\|П\|}$		$R_{\|П\|}^i$		$R_{\|П\|}^{\|S\|}$

Існує ряд методик визначення мінімальної кількості параметрів діагностування, наприклад, за критерієм забезпечення необхідної безвідмовності, за інформативним критерієм та ін. [35, 36, 44-47, 59] сенс яких полягає у виборі параметрів діагностування на основі аналізу причинно-наслідкових зав'язків між параметрами та дефектами. Метод вибору параметрів діагностування за критерієм заданої безвідмовності для ПЛ, що знаходяться в експлуатації, використати складно, оскільки відсутні дані про поточні значення надійності їх конструктивних елементів. Тому розглянемо та проведемо вибір параметрів діагностування за інформативним критерієм.

Згідно цього методу проводиться на аналіз таблиці можливих станів ПЛ (табл. 3.1). Контроль кожного параметра діагностування може мати два результати «1» – коли параметр лежить у допустимих межах та «0» – коли значення параметру виходить за ці межі. При цьому вважається, що ці події мають однакову ймовірність щоб відбутися.

Величина інформативності параметру діагностування визначається за величиною зменшення ентропії повітряної лінії. Середню кількість інформації про технічний стан повітряної лінії під час проведення перевірки можливо визначити як [46, 60]:

$$I\left(\pi_{|П|}\right) = H_0 - H\left(\pi_{|П|}\right),$$

де $H_0 = -\sum_{i=1}^{n} P_{\pi_j} log_2 P_{\pi_j}$ – початкова невизначеність відомостей про стан ПЛ до проведення діагностування;

P_{π_j} – ймовірність стану ПЛ при π_j перевірці;

$H\left(\pi_{|\Pi|}\right)$ – невизначеність, що залишається після контролю набору параметрів $\pi_{|\Pi|}$.

Процедура вибору параметрів діагностування за допомогою інформативного критерію на основі таблиці можливих станів ПЛ проводиться наступним чином [46, 60]:

- розраховується залишкова ентропія ПЛ після проведення кожної елементарної перевірки π_j:

$$H\left(A/\pi_j\right) = \frac{m_1}{N} log_2 m_1 + \frac{m_0}{N} log_2 m_0, \tag{3.4}$$

де N – кількість дефектів елементів, що підлягають контролю;

m_1 – кількість «1» у кожному рядку таблиці;

m_0 – кількість «0» у кожному рядку таблиці;

- за значенням ентропії вибирається найбільш інформативний параметр;

- розраховується залишкова ентропія ПЛ за умови діагностування комбінації вибраного на першому кроці параметра зі всіма іншими параметрами

$$H\left(A/\pi_j,\pi_i\right) = \frac{m_{11}}{N} log_2 m_{11} + \frac{m_{01}}{N} log_2 m_{01} + \frac{m_{10}}{N} log_2 m_{10} + \frac{m_{00}}{N} log_2 m_{00}, \tag{3.5}$$

де N – кількість дефектів елементів, що підлягають контролю;

m_{11} – кількість «1» рядка j, що припадають на m_1 «1» рядка i таблиці можливих станів ПЛ;

m_{01} – кількість «0» рядка j, що припадають на m_1 «1» рядка i;

m_{10} – кількість «1» рядка j, що припадають на m_0 «0» рядка i;

m_{00} – кількість «0» рядка j, що припадають на m_0 «0» рядка i.

За результатами розрахунків вибирається комбінація параметрів з мінімальною залишковою невизначеністю.

Вибір третього параметру діагностування здійснюється шляхом формування трійок з вже вибраних параметрів та комбінації тих, що залишилися. Тоді залишкова невизначеність визначається з виразу

$$H\left(A/\pi_j,\pi_i,\pi_k\right)=\frac{m_{111}}{N}log_2 m_{111}+\frac{m_{011}}{N}log_2 m_{011}+\frac{m_{101}}{N}log_2 m_{101}+$$
$$+\frac{m_{110}}{N}log_2 m_{110}+\frac{m_{100}}{N}log_2 m_{100}+\frac{m_{010}}{N}log_2 m_{010}+\frac{m_{001}}{N}log_2 m_{001}+\frac{m_{000}}{N}log_2 m_{000}. \quad (3.6)$$

Процес вибору параметрів діагностування завершується коли ентропія стає рівною 0.

Розглянемо вибір параметрів діагностування одного прогону повітряної лінії, що містить залізобетонну електроопору з лінійною арматурою, проводи та грозозахисний трос на основі дистанційних методів технічного діагностування розглянутих у п. 3.1. Попередньо намічаємо наступні параметри: π_1 – температура (тепловий метод); π_2 – акустичні коливання (спектрально-акустичний метод); π_3 – розрядна активність (метод оптичної *UF*-дефектоскопії); π_4 – дефект лінійної арматури; π_5 – дефект проводу (грозозахисного тросу); π_6 – дефект опори (тріщини, викришування і т. п.); π_7 – дефект ізолятора (значні ушкодження ізоляторів); π_8 – ширина траси ПЛ (оптично-візуальний метод).

До уваги приймаються лише стани ділянки ПЛ з дефектами та ушкодженнями її елементів, що потребують термінового усунення загальною кількістю $N=10$ з наступного переліку: s_1 – перегрів проводу; s_2 – перегрів контактних з'єднань; s_3 – ушкодження ізоляції (візуально не діагностоване); s_4 – ушкодження ізоляції (візуально діагностоване); s_5 – обрив проводу (грозозахисного тросу); s_6 – ушкодження дротин проводу (грозозахисного тросу); s_7 – механічне руйнування лінійної арматури; s_8 – тріщини в стояку електроопори, викришування бетону; s_9 – накид на провід (грозозахисний трос); s_{10} – порушення траси ПЛ.

На основі вибраних дефектів (станів) ПЛ та параметрів діагностування складаємо таблицю можливих її станів (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Таблиця можливих станів ділянки ПЛ

Параметр контролю	Несправність										
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	$H(A/\Pi)$, біт
π_1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	**2,322**
π_2	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	2,600
π_3	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	**2,351**
π_4	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2,853
π_5	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	2,600
π_6	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2,853
π_7	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2,853
π_8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	2,600
$\pi_1 - \pi_2$	01	01	00	00	11	01	11	11	11	11	1,836
$\pi_1 - \pi_3$	01	01	00	00	11	00	11	11	10	11	**1,475**
$\pi_1 - \pi_4$	01	01	01	01	11	01	10	11	11	11	1,961
$\pi_1 - \pi_5$	01	01	01	01	10	00	11	11	11	11	1,600
$\pi_1 - \pi_6$	01	01	01	01	11	01	11	10	11	11	1,961
$\pi_1 - \pi_7$	01	01	01	00	11	01	11	11	11	11	1,961
$\pi_1 - \pi_8$	01	01	01	01	11	01	11	11	10	10	1,636
$\pi_1 - \pi_3 - \pi_2$	011	011	000	000	111	001	111	111	101	111	**0,400**
$\pi_1 - \pi_3 - \pi_4$	011	011	001	001	111	001	110	111	101	111	0,875
$\pi_1 - \pi_3 - \pi_5$	011	011	001	001	110	000	111	111	101	111	**0,400**
$\pi_1 - \pi_3 - \pi_6$	011	011	001	001	111	001	111	110	101	111	1,150
$\pi_1 - \pi_3 - \pi_7$	011	011	001	000	111	001	111	111	101	111	1,200
$\pi_1 - \pi_3 - \pi_8$	011	011	001	010	111	001	111	111	101	111	1,200

Ймовірності відмови кожного елемента ділянки ПЛ приймаємо рівною $P(s_i) = 1/N = 1/10$. Тоді вихідна невизначеність ділянки повітряної лінії складе $H(\pi_j) = log_2 N = log_2 10 = 3{,}322$ біти.

Використовуючи вирази (3.4)-(3.6) знайдемо значення залишкової ентропії ПЛ $H(A/\text{П})$ після проведення кожної елементарної перевірки π_j $(\pi_j,\pi_i;\ \pi_j,\pi_i,\pi_k)$. Результати заносимо у відповідний стовпець табл. 3.4.

Аналіз табл. 3.2 показує, що з першого набору параметрів найбільш інформативним є π_1 із залишковою ентропією $H(A/\pi_j)=2{,}322$, наступним за інформативністю є параметр π_3 для нього умовна невизначеність складає $H(A/\pi_j,\pi_i)=1{,}475$. Дві комбінації з трьох параметрів $(\pi_1-\pi_3-\pi_2)$ та $(\pi_1-\pi_3-\pi_5)$ мають однакову залишкову ентропію $H(A/\pi_j,\pi_i,\pi_k)=0{,}400$, тому одна із них повинна бути вибрана за іншим критерієм.

Не зважаючи на ряд переваг, метод акустичного визначення коронного розряду на ПЛ досить нова технологія, яка знайшла лише дослідне впровадження в промисловості. У той же час, параметр діагностування π_5 відноситься до оптично-візуального методу, який реалізується за допомогою технологій машинного зору. Дана технологія стрімко розвивається, її технічні рішення присутні на ринку та можуть буди впроваджені до системи технічного діагностування ПЛ. Ще однією вагомою перевагою цієї технології є висока універсальність, оскільки в якості первинного вимірювального перетворювача використовується одна і таж цифрова камера (фото-, відео), проте дефекти можуть ідентифіковані різні, завдяки масштабуванню модулів програмного забезпечення.

Подальший пошук комбінацій з більшою кількістю параметрів діагностування, наприклад, четвірок не доцільний. Так як будуть перебиратися параметри діагностування, що відносяться до оптично-візуального методу, що в кінцевому підсумку вплине лише на кількість програмних модулів ПЗ камери.

Отже, у якості параметрів діагностування приймаємо температуру проводу та контактних з’єднань, розрядну активність і растрові зображення видимих дефектів конструктивних елементів, у якості перспективного – акустичні коливання.

3.4 Розробка структурної схеми СТД ПЛ

Розроблена функціональна схема є основою для розробки структурної схеми системи технічного діагностування повітряної лінії. При її розробці в умовах впровадження пристроїв автоматизації розподільних мереж, апаратно та програмно сумісних із комплексом технічних засобів платформи Smart Grid необхідно враховувати наступні технічні вимоги:

- видача результатів діагнозів про стан конструктивних елементів ПЛ;
- сумісність з існуючими інформаційними системами енергокомпаній;
- максимальна інтеграція існуючих загальнопромислових технічних засобів, інтерфейсів і програмного забезпечення;
- простота налагодження, завадозахищенність та надійність;
- можливість оновлення програмного забезпечення;
- робота в складних погодних умовах.

Розроблену структурну схему СТД ПЛ подано на рис. 3.2. Вона складається з двох основних частин мобільної – БПЛА та стаціонарної – сервера баз даних (СБД) і автоматизованого робочого місця (АРМ) у службі ліній енергопостачальної компанії.

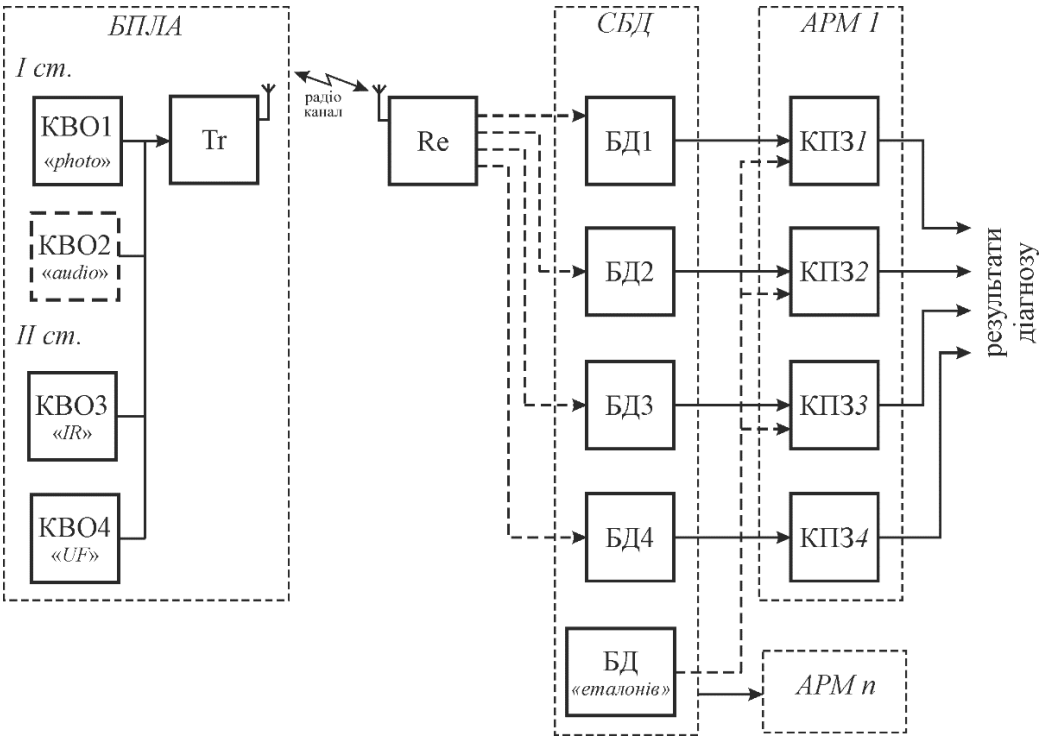


Рисунок 3.2 – Структурна схема СТД ПЛ

На БПЛА в залежності від поставленої задачі діагностування може встановлюватися один з 4-х комплектів вимірювального обладнання (КВО):

– цифровий фотоапарат або цифрова відеокамера;

– мікрофон;

– тепловізор (IR);

– ультрафіолетова камера для візуалізації коронних розрядів.

Діагностування може здійснюватися в два етапи: на першому проводиться попереднє виявлення дефектів за допомогою цифрової фото- відеокамери та мікрофону, а на другому – уточняється та оцінюється рівень небезпеки конкретного дефекту для ПЛ у цілому.

Отримана вимірювальна інформація від КВО передається по надвисокочастотному радіоканалу зв’язку за допомогою радіопередавача Tr до приймача Re і з нього направляється до сервера баз даних (СБД).

СБД відповідає за цілісність і збереження інформації, неперервне її передавання, на ньому для кожного КВО створюється власна база даних БД1-БД4 та база даних еталонних значень справних станів і дефектів елементів ПЛ – БД «еталонів». Остання база може вміщувати кілька підбаз з еталонними значеннями стадій розвитку дефектів для кожного методу діагностування.

Організація СБД таким чином дозволяє формувати стійкі динамічні ряди даних дефектів елементів ПЛ, які можуть бути використані при вирішенні прогностичних задач розвитку цих дефектів.

До СБД по локальній мережі (LAN) оператора системи розподілу електричної енергії підключаються автоматизовані робочі місця (АРМ). На цих робочих станціях встановлюються комплекти спеціалізованого програмного забезпечення (КПЗ1-КПЗ4) відповідні КВО1-КВО4, за допомогою яких проводиться обробка поточних даних про дефекти елементів ПЛ та їх динамічних рядів. У результаті інженер отримує інформацію про наявні дефекти конструктивних елементів ПЛ і, за необхідності, прогноз про їх можливий розвиток.

3.5 Порядок проведення діагностування ПЛ

Порядок проведення діагностування ПЛ за допомогою СТД на базі БПЛА розробляється з урахуванням того, що для неї попередньо був розроблений ортофоплан і 3D-модель місцевості та складається з наступних етапів:

- розробка та затвердження польотного завдання;
- узгодження польоту БПЛА;
- підготовка БПЛА до проведення діагностичних робіт на ПЛ;
- виконання діагностичних робіт на ПЛ

Перед кожним вильотом БПЛА оновлюється (розробляється) польотне завдання діагностування конкретної ПЛ, що містить наступну інформацію [48]:

- вид діагностування ПЛ та необхідний для цього комплект вимірювального обладнання;
- потрібні швидкість та висота переміщення БПЛА;
- тривалість діагностування ПЛ;
- маршрут руху БПЛА та його довжина;
- ідентифікаційні дані БПЛА.

Розроблене і затверджене завдання передається на узгодження керівнику служби ліній компанії. Якщо обстеження ПЛ виконується БПЛА масою до 20 кг, на максимальній висоті польоту не вище 120 м над рівнем землі, за межами заборонених зон, на швидкості до 160 км/год у межах прямої видимості (VLOS) і не ближче 5 км від зовнішніх кордонів злітно-посадкових смуг аеродромів узгодження польоту з Державною авіаційною службою України [49] не потрібне. В усіх інших випадках експлуатанту БПЛА необхідно подати заявку на проведення польоту до Державіаслужби України та отримати дозвіл на використання повітряного простору.

Підготовка БПЛА до проведення діагностичних робіт на ПЛ включає в себе такі етапи:

- транспортування БПЛА до місця пуску;
- вибір точки старту;
- розгортання БПЛА та КВО.

Транспортування БПЛА та ВКО до ПЛ здійснюється автотранспортним засобом у спеціальних боксах у частково розібраному вигляді зі знятими джерелами живлення.

Точка старту БПЛА вибирається максимально близько до ПЛ, за можливості на підвищенні таким чином, щоб під час зльоту та посадки БПЛА йому нічого не заважало, а під час польоту він знаходився в межах прямої радіовидимості. Розмір стартового майданчика повинен відповідати керівництву використання конкретного дрона. На вибраній точці старту визначається напрям та швидкість вітру, вибирається місце установки (за необхідності) неземної станції керування.

Розгортання БПЛА та КВО проводиться на попередньо вибраному майданчику. Спочатку проводиться часткове збирання БПЛА (наприклад, установка крил і т. п.) згідно керівництва використання. Потім проводиться технічна перевірка стану БПЛА, яка полягає в виявленні тріщин і сколів на корпусі та гвинтах, люфтів у двигунах, перевірці надійності кріплення тяг, фіксаторів кришок відсіків. Також перевіряється рівень заряду акумуляторної батареї, відсутність її механічних ушкоджень та здуття. Якщо перераховані дефекти на БПЛА відсутні, то встановлюється комплект навісного вимірювального обладнання та акумулятор. Далі до наземної станції керування (НСК) підключаються антени та джерело живлення. Після включення НСК вмикається БПЛА шляхом підключення силового роз’єму акумулятора. Після проходження процедури самодіагностики бортовим комп’ютером БПЛА завантажити в нього польотне завдання.

Для БПЛА з нерухомим крилом проводяться наступні передпольотні перевірки [48]:

- відповідності положення відхиляючих поверхонь при зміні положення БПЛА в просторі;

- нейтральності положення елевонів;

- плавності переміщення керуючих поверхонь у всього діапазоні переміщення;

- реакції КВО, що встановлене на борту на команди з НСК.

Перед запуском БПЛА обов’язково повинні бути перевірені всі попередні налаштування обладнання КВО:

- наявність якісного зображення в режимі роботи on-line відеокамери;
- установка фокусу фотокамери у положення «нескінченність»;
- наявність установки необхідного об’єктиву для фотокамери;
- коректність роботи гіростабілізованого підвісу камер.

Після проведення всіх перевірок віддається команда на запуск БПЛА і починається виконання польотного завдання. БПЛА набирає задані висоту та швидкість і система керування переводить його в автоматичний режим польоту. На висоті 100 м проводиться перевірка БПЛА на коректність виконання команд НСК. Точки польотного завдання БПЛА проходить послідовно починаючи з першої (рис. 3.2). У будь-який момент часу БПЛА може бути переведеним у режим ручного керування, в якому оператор задає необхідні курс, висоту та швидкість.

За допомогою фото- відеокамер проводиться у першу чергу пошук механічних ушкоджень конструктивних елементів ПЛ та порушень на її трасі. Фотозйомка (відеозйомка) починається відразу після виходу БПЛА на 1-шу точку польотного завдання. Відеозйомка елементів ПЛ в режимі реального часу дозволяє підвищити оперативність виявлення дефектів, однак on-line передавання сигналу має обмеження за відстанню.

IR-діагностування проводиться у вечірній, ранковий час або похмуру погоду без опадів і вітру, при цьому ПЛ повинна бути завантажена струмом близьким до номінального, а краще – після аварійного режиму роботи. Під час тепловізійного діагностування перевіряються на нагрів проводи, їх контактні з’єднання, арматура та при відсутності *UF*-камери, підвісна та натяжна лінійна ізоляція. При проведенні оцінки теплового стану за допомогою тепловізора необхідно враховувати те, що він може визначати температуру дуже тонкого шару [38] з високою точністю, проте має невисоку просторову роздільну здатність. У результаті малі ділянки локальних перегрівів та внутрішні дефекти можуть бути пропущеними.

Перевірка ізоляторів ПЛ за допомогою тепловізора має певні обмеження пов'язані у першу чергу з тим, що «нульові» ізолятори можуть мати як вищу так і нижчу температуру ніж справні ізолятори. Крім того, градієнт температури між «нульовим» і справним ізолятором складає лише 0,1-0,4 ºС [28].

UF-інспекція ізоляторів може проводиться у як у денний так і нічний час доби за різних погодних умов (дощ, сніг), при температурі навколишнього повітря від -15 до 40 ºС та відносній вологості 80-90%. Обов'язковою умовою при проведенні діагностування ізоляторів за допомогою *UF*-дефектоскопа є наявність робочої напруги на ПЛ. У залежності від розташування гірлянд ізоляторів огляд проводиться з відстані 5-50 м. Мінімальна відстань вибирається виходячи з правил техніки безпеки та сторонніх джерел світла. Огляд кожної гірлянди ізоляторів проводиться поелементно з двох точок спостереження (бажане їх розташування через 180º), так як поверхнево-часткові розряди можуть знаходитися із протилежної сторони до точки спостереження.

По завершенні польотного завдання або розряджанні акумулятора до заданого рівня проводиться повернення БПЛА до місця старту та посадка. Якщо польотне завдання виконане повністю проводиться технічний огляд БПЛА та обладнання аналогічний передпусковому, часткове розбирання та пакування його частин у транспортні бокси.

Порядок проведення позапланового обстеження ПЛ за допомогою БПЛА аналогічна порядку проведення планового обстеження.

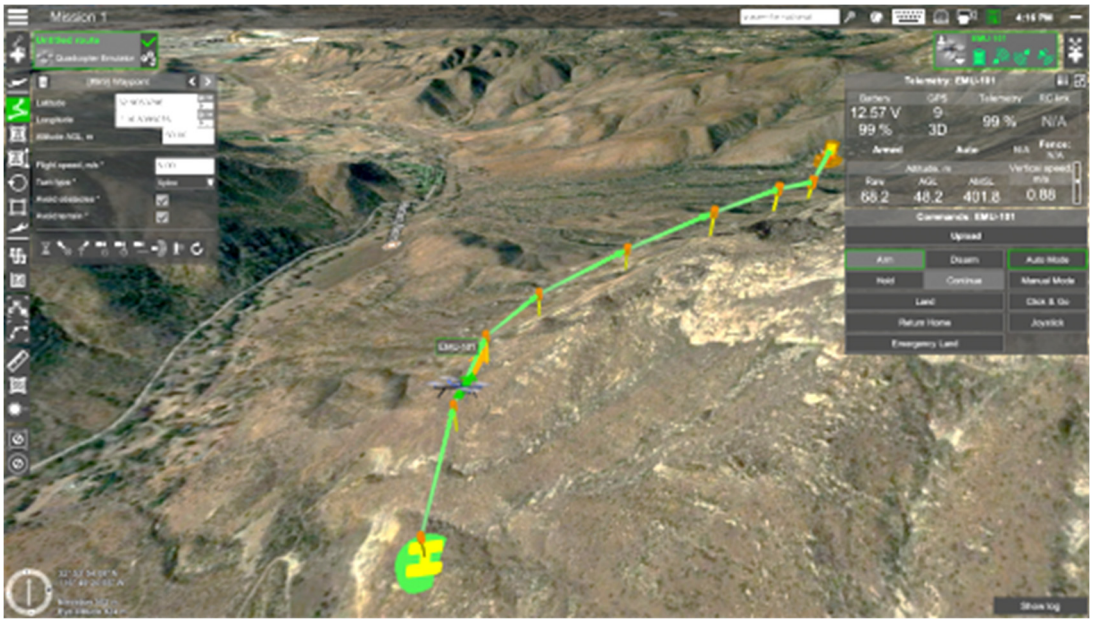


Рисунок 3.3 – Схема польотного завдання мультикоптера [50]

3.6 Вибір обладнання СТД ПЛ

За конструктивним виконанням найбільшого поширення набули 4-ри типи БПЛА: одноротрні, мультироторні, з нерухомим крилом і гібридні.

Одноротрні дрони – це безпілотні гелікоптери, конструктивна схема яких подібна на повнорозмірних голікоптерів, тобто вони мають один ведучий гвинт великого розміру та малий гвинт на хвості для контролю курсу (рис. 3.3, *а*). Такі БПЛА характеризуються високою ефективністю – мають більшу тривалість польоту ніж мультироторні. Головними їх недоліками є складна конструкція та висока вартість.

Мультироторні дрони – це літальні апарати, що представляють собою літальні платформи на яких встановлюється від 3 до 12 ведучих гвинтів, що обертаються діагонально протилежних напрямах (рис. 3.3, *б*) [51]. На відміну від одноротрних літальних апаратів у них відсутній автомат перекосу, їх маневрування здійснюється шляхом зміни швидкості ґвинтів, що приводяться в рух за допомогою безколекторних електродвигунів. Із-за цих конструктивних



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.3 – Основні види ПБЛА
а) одноротрні; б) мультироторні; в) з нерухомим крилом; д) гібридні

особливостей їх повна маса лежить в межах 1-7 кг, а час польоту складає до 1-ї години. Запасу енергії акумулятора дозволяє відлітати на відстань до 30 км. Мультироторні літальні апарати як одноротрні можуть зависати на одному місці. Внаслідок таких конструктивних особливостей для розв'язання промислових дача мультироторні БПЛА застосовуються як апарати «ближнього радіусу дії».

БПЛА з нерухомим крилом – це літальні апарати, що літають завдяки підйомній силі, що створюється аеродинамічною формою нерухомого жорстокого крила, як у звичайних пілотованих літаків (рис. 3.3, *в*) [52]. Апарати цього типу відрізняються великими швидкістю, тривалістю (до 4 год, до 200 км) та висотою польоту (до 5000 м) [53]. Головний недолік літальних апаратів даного – це складний і трудомісткий процес зльоту та посадки. Для здійснення посадки необхідна злітна смуга або катапульта, а для посадки частіше за все використовується посадковий парашут.

Гібридні БПЛА – це літальні апарати, що поєднують в своїй конструкції переваги мультироторних та з нерухомим крилом (рис. 3.4, *г*). Такі БПЛА можуть вертикально злітати та сідати, при цьому мають значну дальність польоту зазвичай використовуються для вирішення логістичних задач.

Досвід використання БПЛА для вирішення задач діагностування на ПЛ показав, що найбільш придатними є два їх типи мультироторні та з нерухомим крилом [48, 51-53].

БПЛА з нерухомим крилом є найбільш ефективними при вирішенні глобальних задач обстеження ПЛ:

- аерофотозйомка траси ПЛ для побудови її ортофоплану та 3D-моделі;
- визначення відстаней між електроопорами, стріли провисання кожного прогону ПЛ;
- попереднє виявлення значних дефектів конструктивних елементів ПЛ;
- пошук обривів проводів, грозозахисних тросів, накидів;
- пошук несправностей траси ПЛ;
- пошук несанкціонованої діяльності на території траси ПЛ;
- визначення найкращих під'їзних шляхів до ПЛ.

Корисним навантаженням БПЛА з нерухомим крилом є фото(відео) камери високої роздільної здатності.

На території України використовуються БПЛА як власного виробництва (компанії Навгеотех, ABRIS DG, DroneUA, MegaDrone, Matrix UAV, Dronee та ін.) так і іноземного (США (Delair Tech), Китай (SZ DJI Technology Co., Ltd.), Франція (Parrot SA), Швейцарія (Leica) та ін.). У таблиці 3.3, як приклад, наведені основні технічні характеристики розповсюджених універсальних БПЛА з нерухомим крилом. Аналіз цих характеристик показує, що дрони комплектуються цифровими камерами з ідентичними параметрами, а відрізняються лише характеристики засобів доставки обладнання до місця проведення діагностування. Між дальністю польоту і вагою БПЛА прослідковується прямо пропорційна залежність – чим більша вага, тим більші дальність та тривалість польоту.

Таким чином, вибір конкретного БЛПА буде полягати у виборі таких характеристик як тривалість польоту, дальність польоту на одному заряді акумулятора, діапазон швидкостей, дальність зв’язку, погодні умови (максимально допустимі швидкості вітра при зльоті та посадці). Також важливими є продумана модульна конструкція, що дозволяє його за необхідності модернізувати та наявність сервісного обслуговування.

Для вирішення локальних задач діагностування ПЛ найбільш ефективними виявилися мультироторні БПЛА, головною перевагою яких є можливість зависати на одному місці для проведення *UF*-, *IR*-діагностування ПЛ [48, 51-53].

За допомогою таких дронів успішно вирішуються наступні задачі:

- детальні огляди лінійної арматури, стояків електроопор ПЛ за допомогою цифрової камери;

- *IR*-діагностування проводів та контактних з’єднань;

- *UF*-діагностування ізоляторів.

Огляди за допомогою цифрової камери, що працює у фото- та відеорежимах дозволяють візуально виявити такі дефекти:

- тріщини, сколи, локальні викришування бетону залізобетонних стояків електроопор;

Таблиця 3.3 – Основні технічні характеристики БПЛА з нерухомим крилом

Параметр	Марка дрону та фірма виробник		
	Delair Tech UX11 (ф. Навгеотех)	FLIRT Flirt Arrow (ф. ABRIS DG)	PD1900 (ф. DroneUA)
Розмах крил, м	1,1	1,8	1,9
Маса, кг	1,4	4,8	3
Час розгортання, хв	5	8	10
Робоча висота польоту, м	0-2000	-	-
Максимальна висота польоту, м	2500	3000	-
Дальність польоту на одній зарядці акумулятора, км	до 60	до 150	до 75
Тривалість польоту, хв	59	до 150	до 120
Камера:			
клас	професійна, PPK	професійна, GNSS L1/L2 PPK	професійна
максимальна роздільна здатність (GSD)	1 см/п	0,5 см/п	1 см/п
роздільна здатність	21,4 Мп	20,4 Мп	20,4 МПік
кут зору об'єктиву	38º гор. /32º верт	-	-
Дальність дистанційного керування і зв'язку з оператором	3G/4G – необмежена	до 30 км	до 10 км
Погодні умови	вітер до 45 км/год, помірний дощ	вітер до 12 м/с	вітер до 30 м/с
Фото			

- порушення лакофарбового та цинкового покриттів;
- відсутність кріпильних елементів (болтів, гайок, шплінтів);
- деформації конструктивних елементів опор ПЛ;
- наявність обірваних, перепалених, дротин проводів та грозозахисних тросів;
- сліди перекриття ізоляторів;
- тріщини, каверни на корпусах затискачів, штирів, гаків їх деформації.
- корозію металевих деталей та опор.

Аналогічно до БПЛА з нерухомим крилом, мультироторні дрони також складаються з літаючої платформи, гіростабілізованого підвісу та корисного навантаження. Літаючі платформи відрізняються між собою кількістю роторів (від 4-х до 8-ми шт.), ємністю акумуляторів, тобто часом знаходження в повітрі, каналами зв'язку (якість та спосіб передавання сигналів), режимами роботи бортових сенсорів, можливостями установки навісного обладнання.

Середня тривалість знаходження в повітрі сучасних промислових дронів коливається в межах 30-40 хв, на ці показники суттєво впливають погодні умови, режими польоту та маса корисного навісного обладнання. Тому для виконання діагностичних робіт необхідно як мінімум два комплекти акумуляторів та зарядна станція.

У якості корисного навантаження використовуються цифрові фото (відео) камери, мікрохвильові радари, а також гібридні рішення, наприклад: камера із зумом, камера із ширококутним об'єктивом, лазерний далекомір; камера із зумом, лазерним далекоміром і тепловізійною камерою зібрані в одному корпусі. Зазвичай виробники пропонують корисне навантаження обладнане підвісом, що дозволяє швидко замінювати та переключатися на виконання дроном завдання іншого типу.

Зазвичай фірми виробники розробляють спеціалізовані рішення (у межах однієї лінійки) для вирішення певного класу задач у тому числі і для задач електроенергетики, зокрема обстеження ПЛ. Основні технічні характеристики таких найбільш розповсюджених мультироторних БПЛА представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні технічні характеристики мультироторних БПЛА

Параметр	Марка дрону та фірма виробник		
	Matrice 300 RTK (ф. DJI, Китай) [56]	Matrice 210 RTK (ф. DJI, Китай)	GDU – SAGA (ф. Sonel, Польща)
Габаритні розміри (Д × Ш × В), м	0,81 × 0,67 × 0,43	0,88 × 0,89 × 0,4	0,75 × 0,56 × 0,225
Польотна маса, кг	9	6,14	3,4
Маса корисного навантаження, кг	2,7	1,45	1,0
Максимальна швидкість, м/с	23 (режим S)	22,5	15,0
Максимальна висота польоту, м	7000	3000	3500
Точність позиціонування RTK	1 см + 1 мд (гориз. площина)	1 см + 1 мд (гориз. площина)	-
Система позиціонування	6 напрямів	2 напрями	2 напрями
Дальність передавання сигналу, км	15	8	
Тривалість польоту, хв	до 30 з повним завантаженням	24	39 (без вітру)
Камера:	Zenmuse H20	Zenmuse Z30	
оптичний зум	23x	30x	30x
матриця	CMOS, 1/1.7", 20 Мп	CMOS, 1/2.8", число ефективних пікселів: 2.13 Мп	CMOS, 1/2.3", число ефективних пікселів: 12,4 Мп
цифровий зум	8,7	6x	
діафрагма	F1,6 – F11	F1.6 – F4.7	
вага, кг	0,678	0,549	0,72
Погодні умови:	вітер до 15 м/с	вітер до 12 м/с	
Діапазон робочих температур	-20º…+45º С	-10º…+45º С	-10º…+50º С
Фото			

Компанія DJI для серії дронів Matrice 300 розробила стабілізована мультисенсорну камеру Zenmuse H20 призначену інспекції ПЛ у віддалених районах [56]. Вона обладнана трьома сенсорами: камерою з матрицею CMOS 1/1,7”, 20 Мп з 23 кратним гібридним зумом і камерою з широкоформатним об’єктивом з матрицею CMOS 1/2,3”, 12 Мп, що може швидко перемикатися між цими режимами роботи та отримати збільшений кут огляду (див. табл. 3.4). Дана функція дозволяє швидко наближати зображення для детального спостереження об’єкта на шик форматному зображенні. Третім сенсором камери є лазерний далекомір, який надає інформацію про відстань до об’єкта, що дозволяє виконувати позиціонування більш швидко, а отже підвищити ефективність роботи. Діапазон вимірювання лазерного далекоміра лежить у межах 3-1200 м з точністю ±(0,2 м + відстань × 0,15%).

Камера Zenmuse H20 дозволяє проводити запис у режимі реального часу: камера з зумом – відео з роздільною здатністю 3840 × 2160 зі швидкістю 30 кадрів/с або – 1920 × 1080 зі швидкістю 30 кадрів/с; камера з ширококутним об’єктивом – відео з роздільною здатністю 1920 × 1080 зі швидкістю 30 кадрів/с.

Камера із зумом підтримує режим нічної зйомки. Всі отримані матеріали мають мітки GPS, часу та дати.

Запис відеоматеріалів здійснюється на карти пам’яті типу microSD (макс. об’єм: 128 Гбайт) за файловимим системами FAT32 та exFAT32.



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд камери Zenmuse H20 з підвісом

За останні роки на світовому ринку приладів неруйнівного контролю з'явилося багато пропозицій інспекційних моноспектральних камер. Однак, дефектоскопи останнього покоління є комбінованими, тобто вони поєднують в собі камери вимого діапазону, інфрачервоного (двоспектральні) та *UF*-діапазону (триспектральні) [55-58]. Такі рішення представлені як у звичайному виконанні та і у вигляді модулів БПЛА [55, 57, 58].

Найбільш досконалим для автономного діагностування ПЛ електропередачі за допомогою БПЛА є діагностичний модуль CoroCAM 8 (ф. CSIR-UVIRCO, ЮАР) (рис. 3.6). Даний дефектоскоп дозволяє ефективно збирати дані про стан обладнання ПЛ, які неможливо отримати за допомогою інших засобів [60]. У модулі поєднано три камери, що дає змогу проводити як теплове *IR*- так і *UF*-інспектування обладнання напругою вище 3,3 кВ. *UF*-канал модуля має високу чутливість $2{,}05\times10^{-18}$ Вт/см^2 (див табл. 3.5) і не чутливий до сонячного випромінювання. Для підвищення точності наведення модуль обладнаний лазерним цілевказівником та далекоміром. Зразки зображень коронування ізолятора ПЛ 110 кВ та його термограма подані на рис. 3.8.

HDMI вихід модуля підключається через систему зв'язку БПЛА до апаратури передавання/запису зображення, також є можливість запису відеофайлів у форматі mp4 (стиснення за алгоритмом H.264) або радіометричного знімку. Дистанційне керування модулем може бути реалізоване безпровідного Ethernet-з'єднання.

Модуль кріпиться до БПЛА за допомогою карданного підвісу Gremsy T3. Вага системи модуль – карданний підвіс складає 2,65 кг, що дозоляє його легко транспортувати дроном промислового класу, наприклад, DJI Matrice 600 (рис. 3.6).

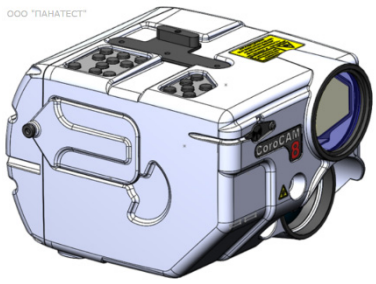


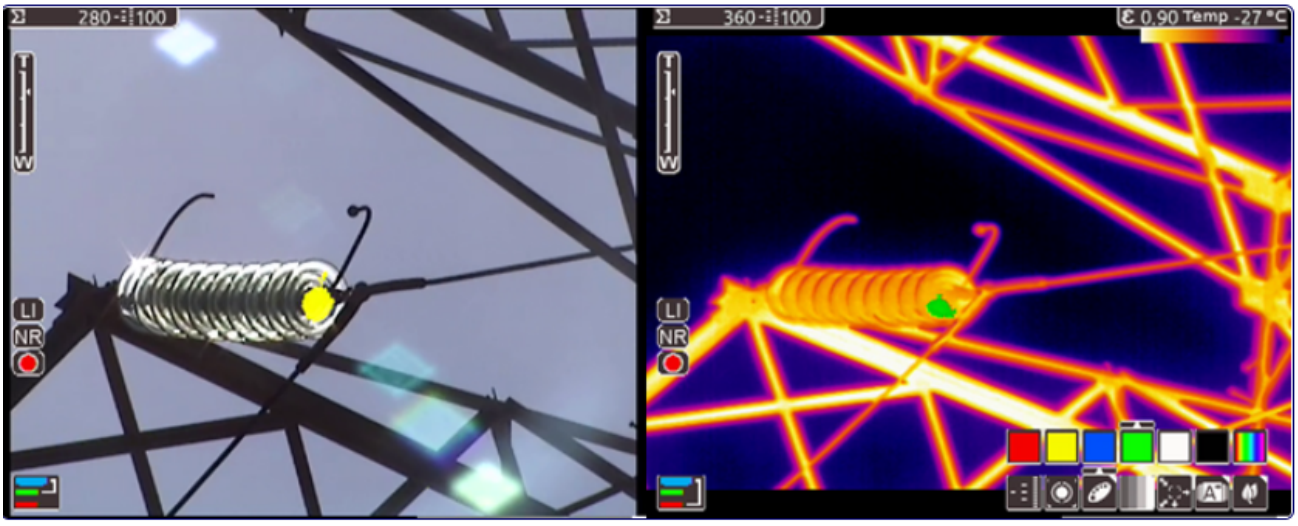
Рисунок 3.6 – Модуль БПЛА CoroCam 8



Рисунок 3.7 – Політ БПЛА з CoroCam8

Таблиця 3.5 – Основні технічні характеристики модуля БПЛА CoroCAM 8 [60]

№ п/п	Параметр	Значення
	Масштабування	
1	Оптичний канал	28× оптичне, 12× цифрове
2	*UF*-канал	1× оптичне, 8× цифрове
3	*IR*-канал	1× оптичне, 4× цифрове
	Поле огляду	
4	при 1× масштабуванні:	16°
5	при 2× масштабуванні:	8°
6	при 4× масштабуванні:	4°
7	при 5× масштабуванні:	2°
	Чутливість	
8	*UF*-канал	2,05 × 10^{-18} Вт/см^2
9	*IR*-канал	<50 мК при f1,0 (от -25°С до +135°С) <62,5 мК при f1,25 (зі штатним об'єктивом)
10	оптичний канал	1,7 лк (f1,6, ICR вимк.), нормальне 0,3 лк (f1,6, ICR увімк.), слабке освітлення
	Роздільна здатність	
11	*UF*-канал	640 × 480 пікселів
12	*IR*-канал	640 × 512 пікселів
12	візуальний канал	768 × 576 пікселів
13	Дистанційне керування	через порт USB / Ethernet
14	Ввід/вивід даних	USB, HDMI, Ethernet, складений відеосигнал
15	Маса	2,5 кг
16	Температурний діапазон роботи	-15º…+55º С



а) *б*)

Рисунок 3.8 – Знімки отримані за допомогою модуля БПЛА CoroCam 8 [57]

а) *UF*-зображення накладене на зображення видимого діапазону;

б) *UF*-зображення накладене на *IR*-зображення

На основі розглянутих технічних характеристик можливо БПЛА та їх корисного навантаження можливо запропонувати наступну методику вибору БПЛА для вирішення задач діагностування ПЛ:

1) тип БПЛА: з нерухомим крилом, мультироторний чи гібридний;

2) клас БПЛА. За масою розрізняють 4-ри класи БПЛА, промислові потрапляють у 1-3 класи. Для задач діагностування ПЛ достатньо БПЛА 1-го класу, маса яких знаходиться в діапазоні від 0,25 до 20 кг;

3) маса корисного навантаження. БПЛА не повинен бути перевантаженим;

4) наявність необхідного діагностичного обладнання від виробника БПЛА та можливість інтеграції на нього обладнання сторонніх виробників;

5) тривалість польоту. Автономність БПЛА визначає кількість вильотів та замін акумуляторних батарей для проведення діагностування ПЛ. Мультироторні БПЛА зазвичай мають меншу тривалість польоту ніж зі нерухомим крилом;

6) дальність передачі сигналу. Дальність передавання телеметричних сигналів визначає максимальну відстань від НСК до БПЛА і для віддалених ПЛ може бути критичним параметром;

8) швидкість польоту. Цей параметр визначає продуктивність роботи БПЛА;

9) спосіб запуску та посадки. Зазвичай БПЛА з нерухомим крилом запускаються з катапульти, посадку здійснюють за допомогою парашуту, а мультироторні злітають та сідають з невеликих майданчиків з твердим покриттям;

10) умови експлуатації. Погодні умови (сила вітру, температура та водність повітря) значно впливають на польотні характеристики БПЛА, а навіть незначні опади та низька хмарність можуть вплинути на якість діагностичних даних;

11) безпека. Сучасний БПЛА повинен мати дублювання систем, щоб забезпечити стабільність польоту навіть при виникненні непередбачених обставин;

12) вартість є сенс враховувати за умови, що на ринку представлені БПЛА з ідентичними характеристиками.

Отже, система діагностування ПЛ на базі БПЛА складається наступного обладнання:

1) мультироторний БПЛА Matrice 300 RTK;

2) стабілізовану мультисенсорну камеру Zenmuse H20;

3) НСК DJI Smart Controller Enterprise;

4) зарядної станції DJI BS60 Intelligent Battery Station;

5) модуль БПЛА CoroCam 8 з карданним підвісом Gremsy T3;

6) сервер баз даних;

6) персональний комп’ютер;

7) програмне забезпечення.

3.7 Програмне забезпечення СТД ПЛ

Керування БПЛА Matrice 300 RTK мультисенсорними камерами Zenmuse H20 та CoroCam 8 здійснюється за допомогою штатного програмного забезпечення та контролера DJI Smart Controller Enterprise.

Програмне забезпечення контролера DJI Smart Controller Enterprise має модуль польотних завдань Mission Flight. У ньому можливо створити нове польотне завдання та переглядати створені та збережені раніше. Маршрут польоту створюється по точках на карті, його можливо редагувати під час польоту БПЛА.

У програмне забезпечення мультисенсорної камери Zenmuse H20 інтегровані елементи штучного інтелекту (ШІ), які дозволяють автоматизувати інспекції та отримувати стабільні результати. У режимі роботи AI Spot-check ШІ розпізнає позначений раніше елемент ПЛ і під час наступного діагностування в ході слідування за автоматичним маршрутом об’єкт буде точно сфотографованим (рис. 3.9) [57]. Даний режим дозволяє створювати серії фотографій дефекту елемента ПЛ і досліджувати його розвиток у часі (рис. 3.10). У цьому режимі роботи візуальний сенсор H20 автоматично встановлюється у режим збільшення зображення і AFS. При цьому він не реагує на дії оператора, відносно камери, щоб не порушити точність AI Spot-check.

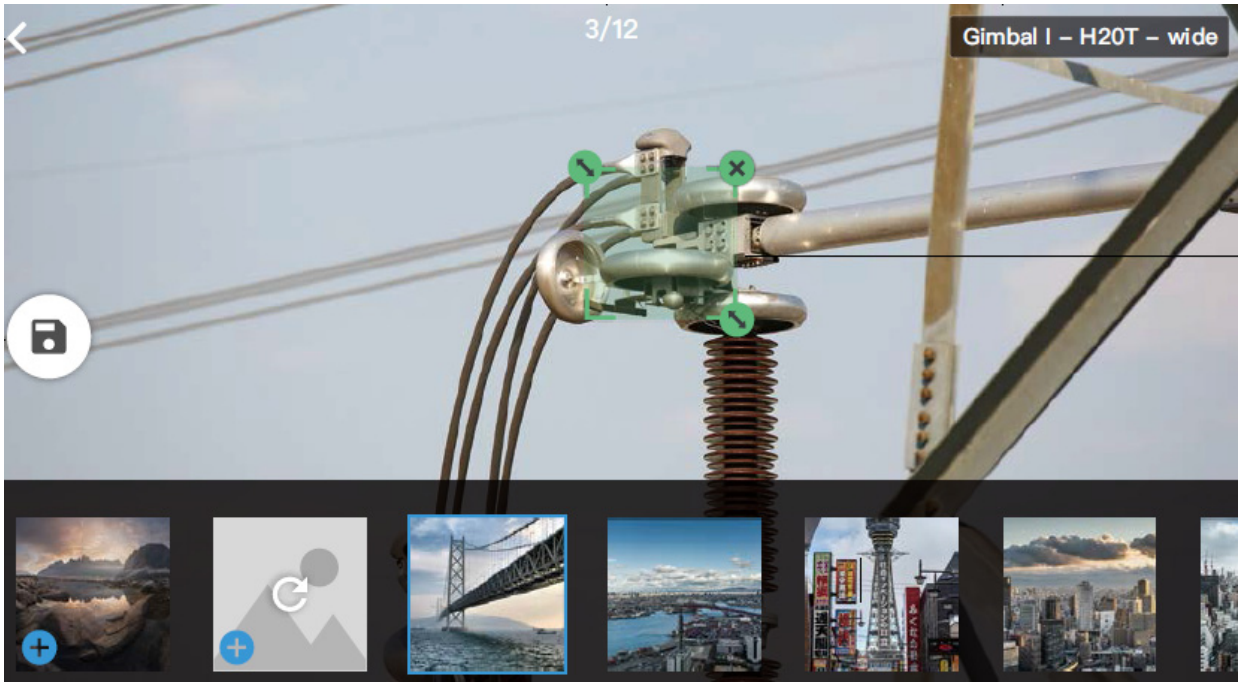


Рисунок 3.9 – Режим роботи AI Spot-check [57]

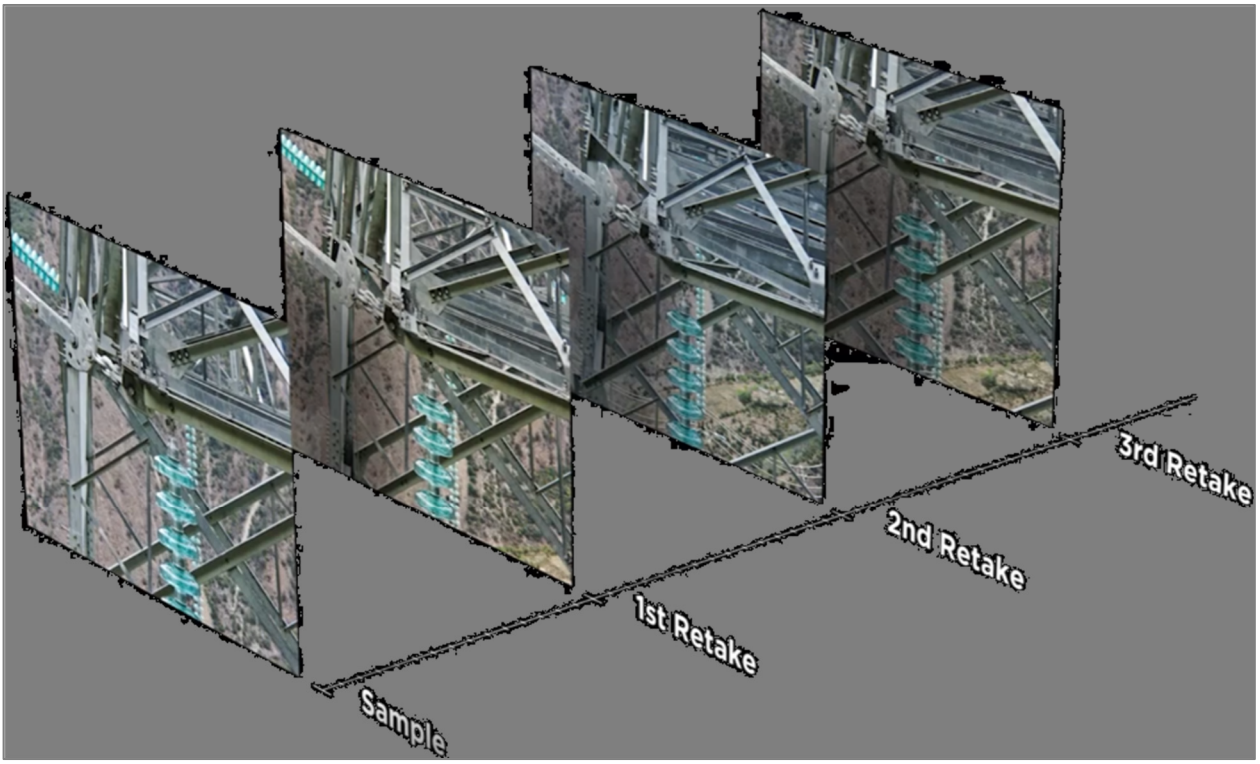


Рисунок 3.10 – Розвиток дефекту гірлянди ізоляторів у часі [57]

У режимі ширококутного об’єктива, камера Zenmuse H20 автоматично отримує та зберігає декілька зображень об’єкту контролю (рис. 3.11).

Значно розширити можливості діагностування ПЛ за допомогою БПЛА Matrice 300 RTK можливо використавши картографічний БПЛА DJI Phantom 4 RTK призначений для роботи на малих висотах та спеціалізоване програмне забезпечення DJI Terra. У Phantom 4 RTK вбудовано модуль RTK, який забезпечує отримання даних позиціонування в режимі реального часу з точністю до 1 см та мінімальною похибкою метаданих зображення, завдяки оптимізації результатів фотограмметричних методів. Система TimeSync забезпечує безперервний зв'язок між польотним контролером, камерою та модулем RTK. Під модулем RTK розташований модуль супутникових систем позиціонування, який забезпечує стабільність польоту в місцевості зі слабким сигналом. Суміщення цих двох блоків підвищує безпеку польоту та отримання точних даних картографії та інспекцій.

ПЗ DJI Terra яке було розроблено DJI з метою візуалізації навколишнього середовища. Призначене для планування польотних завдань, збору даних, картографування території поблизу ПЛ та аналізу отриманих даних.



Рисунок 3.11 – Інтерфейс ПЗ камери Zenmuse H20
у режимі ширококутного об’єктива [57]



Рисунок 3.12 – Побудована щільна хмара точок на основі знімків

У режимі роботи WayPoints програмного забезпечення DJI Terra можливо створити ефективні траєкторії польоту, на основі попередньо визначених дій у точці маршруту та таких параметрів БПЛА як висота, швидкість, кут нахилу карданного підвісу, курсу і т. п. Для обстежень конструктивних елементів опор ПЛ можливо створювати 3D-візуалізації польотів для проектування та моделювання польотних завдань на існуючих моделях.

DJI Terra надає змогу отримувати щільну хмару точок та 3D-модель, що містить повну інформацію про об’єкт моніторингу та рельєф місцевості у вибраній системі координат з ГІС прив’язкою (рис. 3.12). За отриманими даними проводиться їх аналіз – вимірювання, виявляються дефекти на ПЛ (збільшення стріли провисання проводу, відхилення опор від вертикалі і т.п.). На основі отриманих локальних 3D-моделей або моделей хмари точок можливо генерувати маршрутні точки чи маршрути польотів.

3.8 Висновки до 3-ого розділу

1. Проведений аналіз дистанційних методів діагностування ПЛ виявив, що найбільш придатними для проведення попереднього діагностування є оптично-візуальний і спектрально-акустичний методи, а для остаточного – тепловий і оптичної УФ-дефектоскопії методи.

2. Розроблено функціональну схему системи діагностування ПЛ, на основі функціонального підходу до діагностування та обґрунтованого вибору джерел чинників на ПЛ: внутрішніх робочих збурень, що діють у продовж певного проміжку часу та зовнішніх – навколишнього середовища.

3. Встановлено, що згідно критерію залишкової ентропії ПЛ найбільшу величину інформативності мають наступні параметри діагностування: температура проводу та контактних з'єднань ПЛ, розрядна активність та растрові зображення дефектів критичного рівня конструктивних елементів ПЛ

4. Розроблено структурну схему системи технічного діагностування ПЛ на основі висунутих технічних вимог, функціональної схеми та вибраних параметрів діагностування, що дозволяє реалізувати процедури функціонального діагностування ПЛ на базі БПЛА.

5. Встановлено, що порядок проведення діагностування ПЛ на базі БПЛА повинен складатися з наступних етапів: розробка та затвердження польотного завдання; узгодження польоту БПЛА; підготовка БПЛА до проведення діагностичних робіт на ПЛ; виконання діагностичних робіт на ПЛ.

6. Встановлено, що для вирішення задач попереднього діагностування ПЛ найбільш придатними є БПЛА з нерухомим крилом PD1900, а остаточного – мультироторний Matrice 300 RTK. Візуальний огляд елементів ПЛ доцільно виконувати за допомогою мультисенсорної камери Zenmuse H20, а пошук дефектів проводів, контактних з'єднань та ізоляції – мультсенсорного блоку БПЛА CoroCam 8.

7. З'ясовано, для реалізації системи технічного діагностування ПЛ достатньо програмного забезпечення, що поставляється разом з БПЛА та вимірювальним обладнанням, а для СБД та ПК – ПЗ MS Windows, MS Office. За необхідності, візуалізації навколишнього середовища можливо шляхом використання БПЛА DJI Phantom 4 RTK і програмного забезпечення ПЗ DJI Terra.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при проведенні робіт з технічного обслуговування повітряних ліній

При проведенні робіт з технічного обслуговування ПЛ розрізняють наступні шкідливі та небезпечні фактори:

- рухоме обладнання. Джерелом механічних травм можуть бути: рухомі машини в тому числі БПЛА; гострі краї, задирки і шорсткості на поверхні інструментів, обладнання та конструктивних елементів ПЛ; підйомно-транспортне обладнання, а також падіння предметів з висоти; процеси пов'язані з корозією металів, що є причиною ослаблення міцності конструкцій і сприяють раптовому їх руйнуванню;

- електромагнітні поля і випромінювання. Повітряні лінії електропередавання не призначені для випромінювання електромагнітної енергії в простір, однак їх проводах при роботі протікає електричний струм і при цьому відбувається паразитне випромінювання електромагнітних хвиль. Електромагнітні поля біологічно активні, тобто живі істоти реагують на їх дію. У людини найбільш чутливими до електромагнітних полів є центральна нервова система, серцево-судинна, гормональна і репродуктивна системи. Тривала дія на людину електромагнітних полів промислової частоти призводить до розладів, які суб'єктивно виражаються скаргами на головний біль, млявість, розлади сну, підвищену дратівливість, болі в серці. Можуть спостерігатися функціональні порушення в центральній нервовій системі, а також зміни в складі крові;

- електричний струм. Ураження електрострумом відбувається при наближенні людини до проводів ПЛ, що знаходяться під напругою на неприпустимо малу відстань, при потраплянні її в зону дії потенціалу обірваного проводу (крокова напруга), у результаті дотику до неструмопровідних частин, що виконані з електропровідного матеріалу, після переходу на них напруги з струмоведучих частин. Крім того, пристрої, технологічне обладнання, інструмент

та прилади, що використовують для своєї роботи електричний струм можуть бути джерелами небезпеки.

Електрострум чинить на людину термічний, електролітичний, біологічний та механічний впливи. Термічний вплив струму проявляється опіками окремих ділянок тіла, нагріванням до високої температури органів, що викликає в них значні функціональні розлади. Електролітичний вплив – це розкладання різних рідин у організмі на іони, в результаті чого відбувається порушення їх фізико-хімічного складу та властивостей. Біологічна дія струму проявляється у вигляді подразнення та збудження живих тканин організму, судомного скорочення м'язів, а також порушення внутрішніх біологічних процесів.

Дія електричного струму на людину призводить до травм або її загибелі. Найбільшу небезпеку становлять електричні удари – збудження живих тканин електричним струмом, що протікає через тіло людини, і супроводжується судорожними скороченнями м'язів. Крім зупинки серця і припинення дихання причиною смерті може бути електричний шок – важка нервово-рефлекторна реакція організму на сильне подразнення електричним струмом. Шоковий стан триває від декількох десятків хвилин до доби, після чого може настати загибель або одужання при проведенні інтенсивних лікувальних заходів;

- хімічні шкідливі речовини. Бензин, аерозолі фарб при контакті з організмом людини можуть викликати зміни в стані здоров'я. Вплив цих шкідливих речовин організм на людини може супроводжуватися отруєннями.

У процесі обслуговування повітряних ліній технічний персонал піддається комплексному впливу шкідливих факторів, серед яких: електромагнітні випромінювання промислової частоти, несприятливі погодні умови – проведення робіт просто неба, висотні роботи, недостатня освітленість.

Із аналізу небезпечних і шкідливих факторів при проведенні робіт з технічного обслуговування ПЛ слідує, що основною небезпекою є можливість ураження людини електричним струмом. Додаткові ризики становлять: механічні травми, висотні роботи (1,3 м і більше), робота поза приміщенням.

Таким чином, для забезпечення безпечного технічного обслуговування повітряних ліній необхідно застосовувати захисні заходи.

4.2. Заходи безпеки, щодо усунення небезпечних та шкідливих факторів

На основі проведеного аналізу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що можуть виникати при технічному обслуговуванні ПЛ, запропоновано наступні організаційні і технічні заходи.

До організаційних заходів, якими досягається безпека робіт на ПЛ відносяться [61]:

- затвердження переліку робіт, що виконуються за нарядами, розпорядженнями і в порядку поточної експлуатації;
- призначення осіб, відповідальних за безпечне проведення робіт;
- оформлення робіт нарядом, розпорядженням або затвердженням переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації;
- підготовка робочих місць;
- допуск до роботи;
- нагляд під час виконання робіт;
- переведення на інше робоче місце;
- оформлення перерв в роботі та її закінчення.

Згідно нарядів на ПЛ повинні виконуватися наступні роботи:

- зі зняттям напруги (в тому числі роботи з монтажу і заміни проводів і тросів в прольотах перетину, в зоні дії наведеної напруги, на одному відключеному колі багатоколової ПЛ 35 кВ і вище);
- без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них;
- без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою;
- із висотні роботи вище 3-х метрів від рівня землі;
- із розбиранням конструктивних елементів опори;
- із відкопуванням стійок опори па глибину більше ніж 0,5 м;
- із застосуванням вантажопідіймальних машин і механізмів в охоронній зоні;
- із розчищення траси ПЛ, якщо необхідне вживання заходів щодо уникнення падіння на проводи зрізаного гілля, дерев;

- із розчищення траси ПЛ, коли обрізання гілок пов'язане з небезпечним наближенням людей до проводів або можливістю падіння гілок на проводи.

За розпорядженням допускається виконувати наступні роботи на ПЛ:

- огляд лінії в легкопрохідній місцевості та за сприятливої погоди;

- відновлення постійних позначень на опорах;

- із підійманням до 3-х м від рівня землі до ніг людини;

- без розбирання конструктивних елементів електроопори;

- із відкопуванням стійок опори на глибину до 0,5 м;

- із розчищення траси ПЛ, коли відсутня загроза падіння на проводи гілок чи дерев;

- вимірювання габаритів ПЛ приладами вимірювання кутів;

- протипожежне очищення площадок навколо опор;

- фарбування бандажів на опорах;

- інструментальні заміри під час визначення дефектних опор.

Виконавець робіт може приступити до виконання завдання, що вказане в наряді лише після отримання дозволу від оперативного персоналу, що відповідає за включення ПЛ. Такий дозвіл не потрібен, якщо роботи будуть виконуватися за розпорядженням, або за нарядом, якщо вони передбачені без зняття напруги.

Виконавець робіт, перевіривши відсутність на лінії напруги, встановлює переносне заземлення, після чого допускає бригаду до виконання робіт. Виконавець робіт веде безперервний контроль за технічним персоналом. Після повного закінчення робіт і покидання траси ПЛ працівниками він заповнює в наряді рядок «Роботи за нарядом повністю закінчені, про закінчення робіт повідомив П. І. Б, час і дата» і ставить свій підпис.

До технічних заходів, що забезпечують електробезпеку робіт при технічному обслуговуванні ПЛ відносяться: відключення ліній; накладення переносних заземлень на проводи на місці роботи; вивішування плакатів «Не вмикати – працюють люди».

Напруга знімається шляхом вимикання вимикачів і роз'єднувачів. Приводи вимкнених апаратів запирають, а на їх рукоятки вивішують плакати «НЕ вмикати – робота на лінії». Ці технічні заходи здійснює оперативний персонал підстанції, що живить ПЛ яка виводиться в ремонт.

На місці проведення ремонтних робіт виконавець робіт переконується, що напруга відсутня, після чого відразу накладає переносне заземлення, один кінець якого попередньо повинен буть приєднаним до заземлюючого спуску на опорі, а при його відстуності – до стального стержня, який забивається у ґрунт на глибину не менше ніж 0,5 м. Заземлення накладається штангою і в діелектричних рукавицях.

Заземлення не потрібно накладати якщо при підйомі на опору, якщо від голови робітника до проводів лінії відстань не менше 1 м для ПЛ напругою до 20 кВ і 2 м для ПЛ 35 кВ і вище.

Роботи з використанням вантажопідйомних машин у охоронній зоні ПЛ оформлюються нарядом, у якому передбачаються всі необхідні заходи безпеки.

При виконанні робіт з використанням автокранів, бурових машин, екскаваторів, що виконуються на ПЛ під напругою або поблизу них відстань від висувної частини машин до найближчого проводу не повинна бути менше 1,5 м за напруги до 1 кВ, 2 м за напруги 1-20 кВ і 4 м за напруги 35-110 кВ.

При роботах з використанням вантажопідйомних робіт у межах охоронної зони ВЛ, що знаходиться під напругою, ці машини повинні бути заземлені проводом переносного заземлення з таким же перерізом, як і провід заземлення, що накладається на відключені проводи лінії.

Дуже небезпечними є роботи, що проводяться на вимкненій лінії, яка знаходиться поблизу інших ПЛ під напругою, внаслідок впливу напруги взаємної індукції, а також від напруги, що може бути наведена грозовою хмарою. У першому випадку захистом служить замикання накоротко всіх фаз відключеної лінії, у другому – при наближенні грози всі роботи на ПЛ необхідно припинити.

4.3 Розрахунок заземлювального пристрою опори повітряної лінії 110 кВ

На ПЛ 110 кВ заземлюються опори, що мають грозозахисний трос або інші пристрої блискавкозахисту та на яких установлено силові чи вимірювальні трансформатори, роз'єднувачі, запобіжники та ін. електроапарати. Опір заземлювачів одноланкових опор висотою до 50 м повинен бути меншим або рівним від значень представлених у табл. 4.1, а для дволанкових – меншим у два рази. Опір заземлювачів опор великих переходів із захисними апаратами має бути не більшим ніж 10 Ом за питомого опору землі до 1000 Ом·м і не більшим ніж 15 Ом у інших випадках [2].

Для опор ПЛ 110 кВ, що проходять в місцевостях з глинистими, суглинистими, супіщаними ґрунтами з питомим опором до 1000 Ом·м включно, у якості природних заземлювачів допускається використовувати арматуру залізобетонних фундаментів за умови забезпечення металічного зв'язку між анкерними болтами та арматурою фундаменту та за відсутності гідроізоляції залізобетону полімерами [2].

Проведемо розрахунок опору заземлювача для металевої опори типу У-110-1 (рис. 4.1) ПЛ 110 кВ, що розташована за межами населеного пункту на орній землі.

Таблиця 4.1 – Найбільший опір заземлювальних пристроїв ПЛ [2]

№ п/п	Питомий опір ґрунту, Ом·м	Максимальний опір заземлювального пристрою, Ом
1	$\rho < 100$	10
2	$100 \le \rho < 500$	15
3	$500 \le \rho < 1000$	20
4	$1000 \le \rho < 5000$	30
5	$\rho \ge 5000$	$6 \cdot 10^{-3}\ \rho$

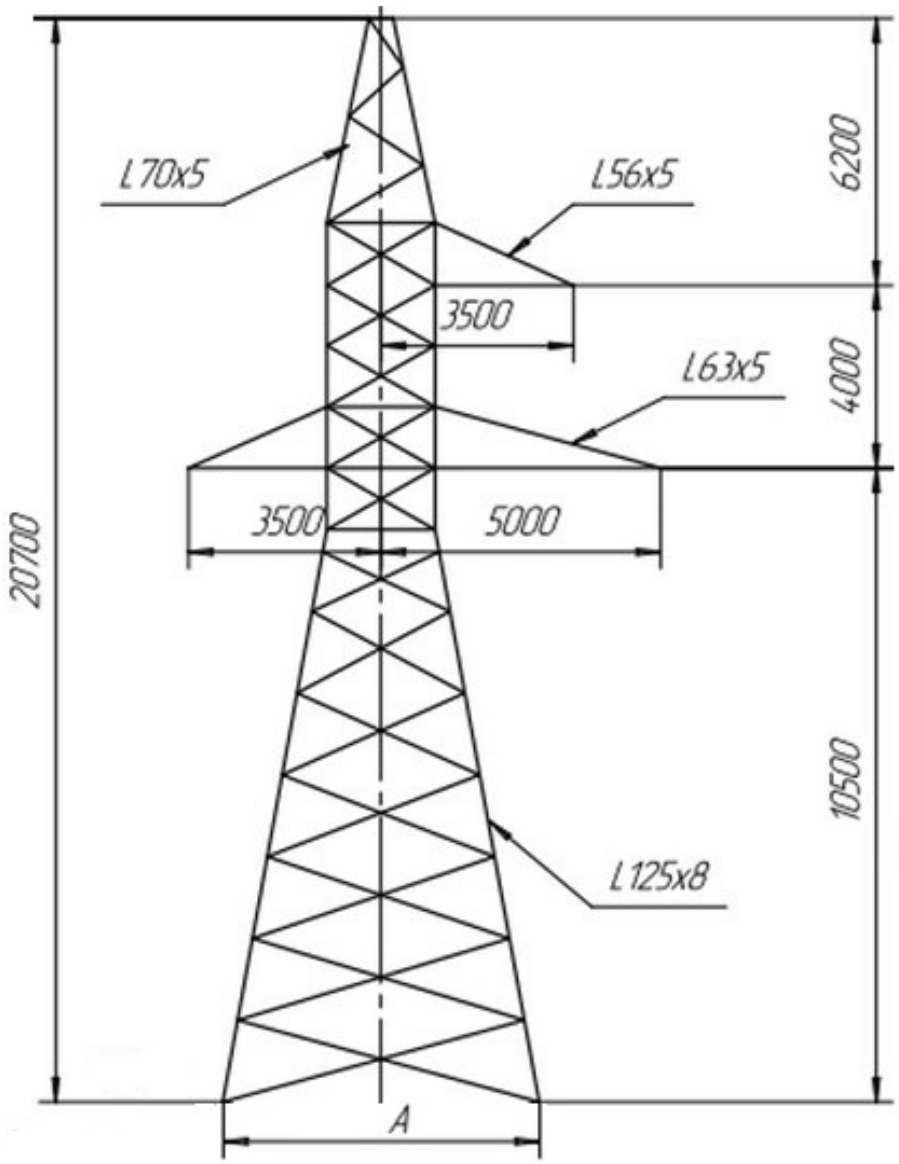


Рисунок. 4.1 – Габаритні розміри одноланкової анкерно-кутової опори типу У-110-1 (*А* – база опори, дорівнює 4800 мм)

Опору встановлено, на двошаровому ґрунті: верхній шар – чорнозем товщиною 0,5 м; нижній шар – лес. Оскільки опора знаходиться на сільськогосподарській землі то відстань від верхніх кінців вертикальних електродів заземлювача до поверхні землі повинна бути не менше 1 м, таким чином весь контур заземлення знаходиться в нижньому шарі ґрунту. Приймаємо, що фундамент опори захищений полімерною гідроізоляцією тому його арматура не може бути використана як додатковий заземлювач.

Контур заземлення опори виконується з урахуванням конструкції її фундаменту (рис. 4.2) і складається з 2-х заземлювачів, що з’єднані паралельно.

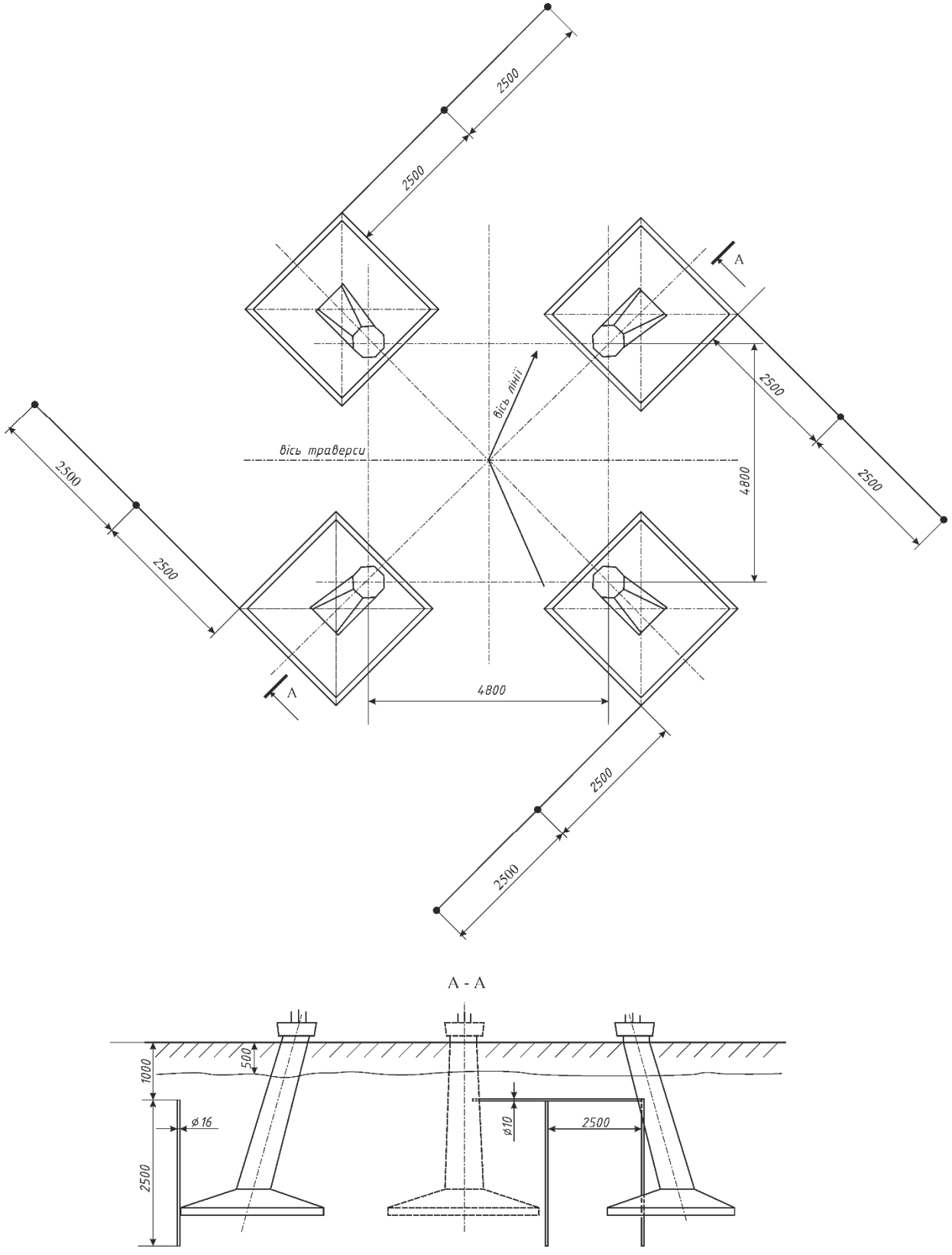


Рисунок 4.2 – Схематичний план заземлювального пристрою анкерно-кутової опори У-110-1

Загальний опір контуру заземлення повинен бути не більше 15 Ом (табл. 4.1) оскільки питомий опір лесу рівний 250 Ом·м. Тоді розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних та горизонтальних заземлювачів складують [62]:

$$\rho_{\text{р.в}} = K_{\text{з.в}} \cdot \rho_{\text{п}} = 1{,}2 \cdot 250 = 300 \text{ Ом·м};$$
$$\rho_{\text{р.г}} = K_{\text{з.г}} \cdot \rho_{\text{п}} = 1{,}5 \cdot 250 = 375 \text{ Ом·м},$$

де $\rho_{\text{п}}$ – питомий опір ґрунту, приймаємо з [62];

$K_{\text{з.в}}$, $K_{\text{з.г}}$ – коефіцієнти запасу для України (4-та кліматичної зони) [62].

Опір розтіканню одного вертикального електрода стрижневого типу [62]:

$$R_{\text{в.о}} = \frac{\rho_{\text{р.в}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[ln\frac{2l}{d} + 0{,}5 \cdot ln\frac{4t_1 + l}{4t_1 - l} \right] =$$

$$= \frac{300{,}0}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 2{,}5} \cdot \left[ln\frac{2 \cdot 2{,}5}{10{,}0 \cdot 10^{-3}} + 0{,}5 ln\frac{4 \cdot 2{,}25 + 2{,}5}{4 \cdot 2{,}25 - 2{,}5} \right] = 124{,}1 \text{ Ом},$$

де l – довжина вертикального електроду, м;

d – діаметр електроду, м;

t_1 – відстань від поверхні землі до середини вертикального електроду:

$$t_1 = t_{\text{г}} + 0{,}5 \cdot l = 1{,}0 + 0{,}5 \cdot 2{,}5 = 2{,}25 \text{ м}.$$

$t_{\text{г}}$ – відстань від поверхні ґрунту до верхнього кінця вертикального електроду, м.

Попередньо, кількість вертикальних електродів за попередньо прийнятого коефіцієнту використання $K'_{i.\text{в}} = 0{,}71$ [62] складе

$$n'_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в.о}}}{K'_{i.\text{в}} \cdot R_i} = \frac{124{,}1}{0{,}71 \cdot 30} = 5{,}8 \approx 6 \text{ шт.}$$

де R_i – необхідний опір напівконтуру.

Розрахунковий опір розтіканню горизонтальних заземлювачів [62]:

$$R_{\text{г}} = \frac{\rho_{\text{р.г}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{г}} \cdot K_{i.\text{г}}} \cdot ln\left[\frac{l_{\text{г}}^{\,2}}{d \cdot t_{\text{г}}}\right] = \frac{375}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 10 \cdot 0{,}67} \cdot ln\left[\frac{10^2}{10 \cdot 10^{-3}}\right] = 82{,}1 \text{ Ом.}$$

де $l_{\text{г}}$ – довжина горизонтального електроду, м;

$K_{i.\text{г}}$ – коефіцієнт використання горизонтальних заземлювачів, згідно [62].

Уточнюємо необхідний опір вертикальних електродів [62]:

$$R_{\text{в}} = \frac{R_{\text{г}} \cdot R_i}{R_{\text{г}} - R_i} = \frac{82{,}1 \cdot 30}{82{,}1 - 30} = 47{,}3 \text{ Ом.}$$

Приймаємо остаточно значення коефіцієнту використання $K_{i.\text{в}}$ = 0,76, тоді кількість вертикальних електродів складе

$$n_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в.о}}}{K_{i.\text{в.е}} \cdot R_{\text{в}}} = \frac{124{,}1}{0{,}76 \cdot 47{,}3} = 3{,}5 \approx 4 \text{ шт.}$$

Отже, остаточно приймаємо до установки 4 вертикальні електроди круглого перерізу, що захищенні цинковим покриттям нанесеним шляхом гарячого цинкування [2]. Тоді їх опір складе [62]:

$$R_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в.о}}}{K_{i.\text{в}} \cdot n_{\text{в}}} = \frac{124{,}1}{0{,}76 \cdot 4} = 40{,}8 \text{ Ом.}$$

Сумарний опір горизонтального та вертикального електродів

$$R_{\text{з}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{в}}} + \frac{1}{R_{\text{г}}}} = \frac{1}{\frac{1}{47{,}3} + \frac{1}{82{,}1}} = 27{,}3 \text{ Ом.}$$

Сумарний опір двох напівконтурів заземлення

$$R_{з\Sigma} = 0{,}5R_{з} = 0{,}5 \cdot 27{,}3 = 13{,}6 \text{ Ом.}$$

Перевірка

$$R_{з\Sigma} = 13{,}6 \quad < \quad R_{з.доп} = 15 \text{ Ом.}$$

4.4 Блискавкозахист повітряних ліній

Головною небезпекою для повітряних ліній є пряме влучання блискавки у фазні проводи з подальшим перекриттям ізоляції від дії перенапруги, що виникає при цьому. Після згасання блискавки на місці перекриття залишається електропровідний канал, що містить газ, який не встиг деіонізуватися і по якому під дією робочої напруги може і далі протікати струм з частотою 50 Гц [63].

До основних факторів від яких залежить ймовірність відключення повітряної лінії внаслідок удару блискавки відносяться:

- інтенсивність грозової діяльності в районі через який проходить траса ПЛ;
- номінальна напруга ПЛ;
- конструкція та матеріал з якого виготовлені стояки опор.

З підвищенням класу напруги збільшується висота опор і довжина ПЛ, а отже і ймовірність ураження її блискавкою. Тому порушення роботи систем електропостачання споживачів електричної енергії в більшості випадків внаслідок порушення цілісності ізоляції ПЛ.

При спорудженні та проектуванні ПЛ 110-750 кВ необхідно передбачити захист від прямих ударів блискавки грозозахисними тросами по всій довжині лінії. Для ПЛ напругою до 35 кВ встановлення грозозахисних тросів по всій довжині лінії не обов’язкове. Місця з послабленою ізоляцією на ПЛ напругою 6-35 кВ (окремі металеві та з/б опори і т.п.) необхідно захищати ОПН [2]. Застосування для цих ліній грозозахисних тросів недоцільно, оскільки внаслідок низької електричної міцності ізоляції ПЛ влучання блискавки в трос призводить до зворотного

перекриття троса на провід ПЛ.

Для захисту проводів ПЛ найбільшого поширення набули тросові блискавковідводи. Ефективність захисту ПЛ грозотросом визначається кутом захисту, тобто кутом між вертикаллю, що перпендикулярна тросу і лінією, що з'єднує провід і трос (рис. 4.3).

Захист ПЛ тросами від грозових перенапруг необхідно виконувати з урахуванням таких вимог [2]:

а) для одностоякових металевих і залізобетонних опор, що обладнані одним тросом допускається кут захисту до 30°, а для опори з двома тросами – до 20°;

б) для металевих опор на яких проводи розміщені горизонтально та встановлено два грозозахисних троси кут захисту відносно зовнішніх проводів для ПЛ 110-330 кВ повинен бути до 20°, для ПЛ 500 кВ – до 25°, для ПЛ 750 кВ – до 22°. У 3-6-му районах за ожеледдю та в районах з інтенсивним галопуванням проводів для ПЛ напругою від 110-330 кВ допускається кут захисту до 30°;

в) на портальних залізобетонних опорах кут захисту відносно крайніх проводів повинен бути до 30°.

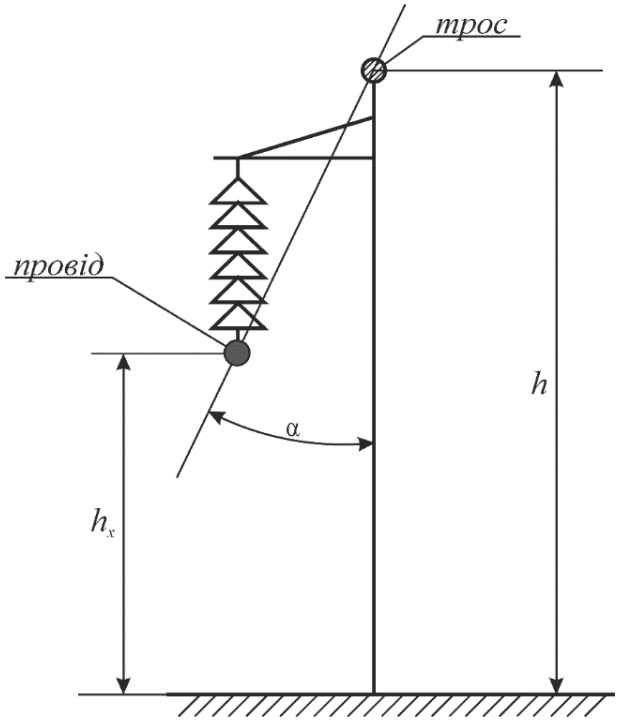


Рисунок 4.3 – Кут захисту тросового блискавковідводу

Отже, головне завдання грозозахисту повітряних ліній полягає в знижені до мінімуму числа грозових відключень. Допустима кількість відключень ПЛ на рік визначається за виразом:

$$N_{\text{відк.доп}} = N_{\text{доп}} \frac{1}{1-\beta_{\text{АПВ}}},$$

де $N_{\text{доп}}$ – число допустимих перерв у електропостачанні лінії в рік $N_{\text{доп}} \leq 0{,}1$ (за відсутності резервування) і $N_{\text{доп}} \leq 1$ (за наявності резервування);

β – коефіцієнт успішності АПВ, рівний 0,8-0,9 для ліній 110 кВ і вище на металевих і залізобетонних опорах.

При визначенні $N_{\text{відк.доп}}$ повинні бути враховані умови надійного електропостачання споживачів та надійної роботи вимикачів, що комутують ПЛ.

Спрацювання АПВ може утримати лінію в роботі, так як випадки пошкодження ізоляції на опорах ПЛ дугою відбуваються досить рідко. У цьому випадку удар блискавки не буде супроводжуватися перервою в електропостачанні. При неуспішному АПВ відбудеться повне відключення лінії електропередавання.

У цілому, надійність грозозахисту ПЛ можливо забезпечити шляхом виконання таких технічних заходів [64, 65]:

- підвішуванням грозозахисних тросів з малими кутами захисту – до 20-30°;
- зниженням імпульсного опору заземлювальних пристроїв опор;
- збільшенням числа ізоляторів у гірляндах опор ПЛ (підвищення імпульсної міцності лінійної ізоляції) і зниженням ймовірності горіння силової дуги;
- використанням ізольованої нейтралі або дугогасної котушки;
- застосуванням розрядників та ОПН для окремих опор низької напруги.
- використанням пристроїв АПВ;
- дотриманням нормованих відстаней у повітрі при перетині ПЛ між собою та з лініями зв'язку.

4.5 Висновки до 4-го розділу

1. Встановлено, що найбільш небезпечні і шкідливі фактори при технічному обслуговуванні повітряних ліній – це можливість ураження електричним струмом, внаслідок дотику до струмоведучих частин та вплив електромагнітних полів та випромінювань промислової частоти.

2. Встановлено, що організаційних та технічних заходів, що забезпечують електробезпеку робіт на повітряних ліній, найбільш важливими є: оформлення робіт, допуск до роботи, відключенні ліній, що ремонтуються, накладення переносних заземлень на місці роботи, вивішування плакатів безпеки.

3. Визначено, що для будівництва контуру заземлення анкерно-кутової опори У-110-1 з нормативним опором 15 Ом, що знаходиться в ґрунті типу лес у 4-й кліматичній зоні, достатньо використати два горизонтальних та вісім вертикальних електродів довжиною 2,5 м.

4. Виявлено, що вид грозозахисту повітряних ліній визначається їх класом напруги: для ПЛ напругою 110 кВ і вище найбільш дієвий захід – це використання грозозахисних тросів, а для ПЛ 6-35 кВ – достатньо встановлення ОПН або розрядників.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

У системі розподілу ОЕС України широко поширені ПЛ напругою 110(154) кВ. Вони утворюють складно-замкнену мережу, сумарною довжиною ПЛ понад 50 тис. км. Під час експлуатації цих ПЛ необхідно проводити їх періодичні (не рідше ніж один раз на рік) та позачергові огляди за всією довжиною. Також один раз на рік експлуатаційному персоналу необхідно проводити верхові огляди ПЛ з вибірковою перевіркою ізоляторів, проводів і тросів у затискачах та ін. [22].

Традиційно, обстеження та верхові огляди ПЛ здійснюються бригадами електромонтерів із залученням спеціальної техніки – телескопічної вишки. Через значне зношення обладнання, значну кількість зорових робіт ефективність таких заходів є низькою та не дає можливості забезпечити необхідну надійність систем електропостачання. Найбільш перспективним напрямом вирішення даної проблеми є застосування для виявлення дефектів конструктивних елементів ПЛ безпілотних літальних апаратів.

Використання БПЛА дає можливість швидко виявляти дефекти та відсутні конструктивні елементи на опорах ПЛ, визначати рівень наслідків від впливу небезпечних метеорологічних явищ, таких як вітер та ожеледь на лінійну арматуру, проводи та грозозахисні троси. Новий підхід до діагностування ПЛ дозволяє знизити витрати на зарплату персоналу, паливо, проведення оглядів охоронних зон ПЛ.

У випадку аварійного відключення ПЛ БПЛА надає можливість персоналу служби ліній оперативно виявляти причини та місце виникнення технологічного порушення, провести попередній аналіз ушкоджень і визначити обсяги аварійно-відновлювальних робіт.

Визначення економічної ефективності використання СТД на основі БПЛА проведемо на прикладі ділянки мережі ПЛ напругою 154 кВ загальною довжиною 150 км.

5.1 Визначення величини капітальних вкладень

Розрахунок капіталовкладень необхідних для впровадження системи діагностування ПЛ на базі БПЛА проводиться шляхом додавання вартості потрібного обладнання та витрат на підготовку спеціального персоналу.

Перелік та вартість необхідного обладнання подані в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Перелік обладнання для системи діагностики ПЛ

№ з/п	Назва, марка обладнання	Вартість, грн
1	Мультироторний БПЛА Matrice 300 RTK	609840
2	Стабілізована мультисенсорна камера Zenmuse H20	214830
3	НСК DJI Smart Controller Enterprise	37950
4	Зарядна станція DIJ BS60 Intelligent Battery Station	50062
5	Модуль БПЛАCoroCam 8 з карданним підвісом Gremsy T3	3000000
6	Сервер бази даних з необхідним ПЗ	150000
7	Персональний комп’ютер	30000
	Всього	4092682

Для виконання робіт з діагностування ПЛ за допомогою безпілотного літального апарату необхідно здійснити підготовку двох працівників навичкам пілотування та обслуговування такого обладнання. Витрати на підготовку спеціального персоналу (пілота та помічника пілота) складають 25000 грн.

Додаткові капіталовкладення, необхідні для впровадження даної системи:

$$K = 4092682 + 25000 = 4117682 \text{ грн.}$$

5.2 Визначення поточних витрат

Розрахунок поточних витрат проведемо за умови обслуговування ділянки електромережі ПЛ-154 кВ загальною довжиною 150 км протягом року для двох варіантів:

- базового (обстеження та верхові огляди із залученням оперативно-виїзних бригад та спецтехніки);

- нового з використанням БПЛА.

У розрахунку враховуються лише ті статті витрат, що відрізняються за варіантами.

Для виконання планових річних обсягів робіт в базовому варіанті потрібно залучити три бригади електромонтерів та два автогідропідіймачі. Кожна оперативно-виїзна бригада включає в себе електромонтера 6 розряду (бригадир), двох електромонтерів 4-го розряду та водія автомобіля (електромонтер 3-го розряду) бригади.

Поточні витрати в базовому варіанті:

$$B_{\text{пот}}^{\text{б}} = Зп^{\text{б}} + Соц^{\text{б}} + ВУба^{\text{б}} + ВУгп^{\text{б}} + Внед^{\text{б}} + Ін^{\text{б}},$$

де $Зп^{\text{б}}$ – річний фонд заробітної плата робітників оперативно-виїзних бригад:

$$Зп^{\text{б}} = 3\left(\sum_{i=1}^{n} Тс_i \cdot К_{\text{д}} \cdot 12\right) =$$
$$= \left(11500 + 9600 + 9600 + 8200\right) \cdot 1{,}2 \cdot 12 \cdot 3 = 1680480 \text{ грн.};$$

де $Тс_i$ – місячна тарифна ставка i-го робітника бригади;

$К_{\text{д}}$ – коефіцієнт додаткової зарплати, що враховує премії та всі види грошових доплат, приймаємо рівним 1,2;

n – кількість робітників в бригаді

$Соц^б$ – відрахування в соціальні фонди, які визначаються від всіх видів грошових виплат робітникам за нормами єдиного соціального внеску:

$$Соц^б = \frac{Зп \cdot Н\%}{100\%} = \frac{1680480 \cdot 22}{100} = 369706 \text{ грн.},$$

де $Н\%$ – норма єдиного соціального внеску.

$ВУба^б$, $ВУгп^б$ – витрати на утримання та експлуатацію бригадного автомобіля та автогідропідіймача. Ці витрати включають в себе:

- витрати на зарплату з відрахуваннями в соцфонди ремонтних робітників;

- вартість ремонтних матеріалів та запасних частин, шин, палива, оливи, технічних рідин та ін. витратних матеріалів, витрати на проходження техоглядів, амортизацію автомобіля, страхування.

Для цих витрат на підприємстві складається річний кошторис і визначаються питомі витрати на 1 км пробігу бригадного автомобіля та 1 годину роботи автогідропідіймача. За даними енергопостачальної компанії за минулий рік для бригадного автомобіля вони склали 15,2 грн./км; для автогідропідіймача – 685 грн./год.

Середній річний пробіг бригадного автомобіля в базовому варіанті складає 18000 км. Річний час роботи автогідропідіймачів по обслуговуванню верхових оглядів для визначеної ділянки ПЛ-154 кВ складає 720 годин. Тоді:

$$ВУба^б = 18000 \cdot 15{,}2 \cdot 3 = 820800 \text{ грн.};$$

$$ВУгп^б = 720 \cdot 685 = 493200 \text{ грн.}$$

$Внед^б$ – річні збитки пов’язані з недоданої електроенергією споживачам внаслідок відключення електромереж та їх виведення в ремонт. За даними оператора системи розподілу, для визначеної ділянки мережі вартість недоданої електроенергії споживачам складає 2800 тис. грн.

$Ін^{б}$ – інші витрати, приймаємо 10% від *Зп:*

$$Ін^{б}=1680480\cdot 0,1=168048$$

$$B_{\text{пот}}^{\text{б}} = 1680480 + 369706 + 820800 + \\ + 493200 + 2800000 + 168048 = 6332234 \text{ грн.}$$

У запропонованому варіанті для виконання обстеження та верхових оглядів ділянки мережі напругою 154 кВ загальною довжиною 150 км передбачається використовувати один комплект БПЛА. Роботи будуть виконуватись бригадою до якої входять два електромонтери 6-го розряду, що пройшли спеціальну підготовку та мають навики пілотування та обслуговування комплексу обладнання з БПЛА, а також водій бригадного автомобіля (електромонтер 3-го розряду).

Поточні витрати в новому варіанті визначаються за формулою та включають в себе наступні складові:

$$B_{\text{пот}}^{\text{н}} = Зп^{\text{н}} + Соц^{\text{н}} + ВУба^{\text{н}} + ВУбпла^{\text{н}} + Ар^{\text{н}} + Внед^{\text{н}} + Ін^{\text{н}}$$

$$Зп^{н} = \sum_{i=1}^{n} Тс_{i} \cdot Кд \cdot 12 = \left(13500 + 13500 + 8200\right) \cdot 1,2 \cdot 12 = 506880 \text{ грн.}$$

$$Соц^{\text{н}} = \frac{Зп \cdot Н\%}{100\%} = \frac{506880 \cdot 22}{100} = 111514 \text{ грн.}$$

$$ВУба^{\text{н}} = 25000 \cdot 15,2 = 380000 \text{ грн.}$$

Витрати на техобслуговування та ремонт комплексу БПЛА ($ВУ_{\text{бпла}}^{\text{н}}$):

$$ВУ_{\text{БПЛА}}^{\text{н}} = Вco + Вем;$$

де *Вco* – вартість робіт з сервісного обслуговування та ремонту елементів комплексу обладнання БПЛА. Дані роботи, за вимогою виробника, мають виконуватись спеціалізованими сервісними центрами, а їх вартість визначається трудомісткістю робіт та вартістю 1 нормо-год (950 грн). При середньому нальоті в рік, що не перевищує 2000 год, річна трудомісткість робіт з технічного обслуговування одного комплекту обладнання складає 45 нормо-год, тоді

$$Вco = 45 \cdot 950 = 42750 \text{ грн.}$$

Вем – вартість експлуатаційних та ремонтних матеріалів. В попередніх розрахунках може бути прийнята 80% від *Вco:*

$$Вем = 0{,}8 \cdot 42750 = 34200 \text{ грн.;}$$

$$ВУ^{н}_{БПЛА} = 42750 + 34200 = 76950 \text{ грн.}$$

Річні амортизаційні відрахування *Ар* визначаються з суми капіталовкладень у необхідне обладнання та річною нормою амортизації $Н_а$% яка складає 20% (за умови нормативного терміну експлуатації 5 років):

$$Ар^{н} = \frac{К \cdot Н_{а}\%}{100} = \frac{4117682 \cdot 20\%}{100\%} = 818536 \text{ грн.}$$

Використання запропонованої системи технічного діагностування дає можливість більш точно виявляти дефекти на ранніх стадіях та усувати їх під час виконання планових ремонтних робіт, уникаючи аварійних відключень електрообладнання. За попередніми розрахунками, використання новітніх технологій дозволить ОСР знизити аварійність і тривалість відключень

електроспоживачів до 40-45% [66]. Річні збитки, пов'язані з доданою електроенергією споживачам, у запропонованому варіанті складуть:

$$Внед^{н} = (1\text{-}0{,}42) \cdot Внед^{б} = (1\text{-}0{,}42) \cdot 2800000 = 1624000 \text{ грн.};$$

$$Ін^{н} = 506880 \cdot 0{,}1 = 50688 \text{ грн.};$$

$$B_{пот}^{н} = 506880 + 111514 + 380000 + \\ + 79650 + 818536 + 1624000 + 50688 = 3571268 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків приведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 Кошторис річних експлуатаційних витрат

Стаття витрат	Витрати, грн	
	Базовий	Новий
Основна та додаткова зарплата робітників	1680480	506880
Відрахування в соціальні фонди (ЄСВ)	369706	111514
Витрати на утримання та експлуатацію бригадного автомобіля	820800	380000
Витрати на утримання та експлуатацію автогідропідіймача	493200	-
Витрати на технічне обслуговування та ремонт елементів комплексу БПЛА	-	79650
Річні збитки пов'язані з недоданою електроенергією споживачам	2800000	1624000
Амортизаційні відрахування	-	818536
Інші витрати	168048	50688
Всього	6332234	3571268

5.3 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від застосування системи технічного діагностування ПЛ на базі БПЛА:

$$E_{\text{р}} = \left(B_{\text{пот}}^{\text{б}} - B_{\text{пот}}^{\text{н}}\right) - E_{\text{н}} \cdot K = \\ = \left(6332234 - 3571268\right) - 0{,}2 \cdot 4117682 = 823536 \text{ грн.},$$

де $E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних капіталовкладень, приймаємо рівним $E_{\text{н}} = 0{,}2$.

Період окупності додаткових капітальних вкладень за рахунок зниження експлуатаційних витрат

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{B_{\text{пот}}^{\text{б}} - B_{\text{пот}}^{\text{н}}} = \frac{4117682}{6332234 - 3571268} = 1{,}5 \text{ року}.$$

5.4 Висновки до 5-ого розділу

1. У результаті аналізу роздрібних цін на обладнання необхідне для технічної реалізації системи технічного діагностування ПЛ встановлено, що його кошторисна вартість складає 4092682 грн.

2. Встановлено, що впровадження системи технічного діагностування ПЛ на базі БПЛА є економічно доцільним. Величина річного економічного ефекту від запропонованих заходів в розрахунку на ділянку мережі довжиною 150 км складає 823,5 тис. грн., а період окупності додаткових капіталовкладень – 1,5 роки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання, що спрямоване на удосконалення системи технічного обслуговування повітряних ліній, що знаходяться в експлуатації тривалий час і дозволяє подовжити строк їх служби та зменшити витрати на їх обслуговування.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Встановлено, що в системі передачі НЕК Укренерго 83,3% трансформаторних потужностей знаходиться в експлуатації понад 30-ть років і 70% повітряних ліній понад 40-к років. Індекс SAIDI України має зростаючий тренд і значно більший у порівнянні з індексами SAIDI Європейських країн, що вказує на значно нижчий рівень обслуговування та експлуатації електроустановок, а прийнята концепція поступової заміни обладнання електромереж є неефективною. Існуючий підхід до обслуговування електроустановок зі значним строком служби є неефективним і потребує удосконалення шляхом переходу до системи ремонтів за фактичним станом на базі системи технічного діагностування.

2. Розроблено класифікацію груп експлуатаційних ушкоджень електроустановок за причинами, що їх викликають, що дозволило провести аналіз дефектів конструктивних елементів повітряних ліній і встановити, що ці дефекти можуть бути виявлені та зафіксовані за допомогою відповідних безконтактних методів діагностування, за умови використання безпілотних літальних апаратів. Найбільш доцільним шляхом підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній зі значним терміном експлуатації є впровадження в електромережах систем технічного діагностування.

3. Встановлено, що найбільш придатними для проведення попереднього діагностування є оптично-візуальний та спектрально-акустичний методи, а для остаточного – тепловий і оптичної УФ-дефектоскопії методи, а згідно критерію залишкової ентропії ПЛ найбільшу інформативність мають параметри діагностування такі, як температура проводу та контактних з’єднань ПЛ, розрядна

активність та растрові зображення дефектів критичного рівня конструктивних елементів ПЛ.

Розроблено структурну схему системи технічного діагностування ПЛ на основі висунутих технічних вимог, функціональної схеми та вибраних параметрів діагностування, що дозволяє реалізувати процедури попереднього діагностування ПЛ за допомогою БПЛА з нерухомим крилом PD1900, а остаточного – мультироторним Matrice 300 RTK корисним навантаженням якого є мультисенсорна камера Zenmuse H20 і мультисенсорний блок БПЛА CoroCam 8.

4. Встановлено, що найбільш небезпечними і шкідливими факторами при експлуатації повітряних ліній є ураження електричним струмом та вплив електромагнітних полів і випромінювань промислової частоти, а додаткові ризики становлять механічні травми, висотні роботи та робота поза приміщенням; з організаційних та технічних заходів, що забезпечують електробезпеку робіт найбільш важливими є: оформлення робіт, допуск до роботи, відключенні ліній, що ремонтуються, накладення переносних заземлень на місці роботи, вивішування плакатів безпеки, спорудження контурів заземлення опор.

5. Встановлено, що очікуваний економічний ефект за весь строк служби системи технічного діагностування ПЛ на базі БПЛА складає 823,5 тис. грн. для 100 км ліній з дисконтованим терміном окупності – 1,5 років.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Проект Плану розвитку системи передачі на 2022-2031 роки. URL: https://ua.energy.

2. Правила улаштування електроустановок. – Х.: Вид-во «Форт», 2017. 760 с.

3. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2020 році. Затверджено Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг №893 від 26 травня 2021 року: URL: https://www.nerc.gov.ua.

4. Встановлена потужність енергосистеми України. URL: https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosystemy-ukrayiny.

5. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році. URL: https://ua.energy.

6. Цицорин А. Н. О потерях холостого хода силовых трансформаторов 6-10 кВ // Электрические станции. 2011. № 3. С. 48-51.

7. Волчков Ю. Д., Балабин А. А. Анализ составляющих потерь электроэнергии в силовых трансформаторах ОАО «Орелэнерго» // Четвертая международная науч.-практ. интернет-конференция «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век»: Сборник материалов (апрель–май 2006 года). – Орел: ОрелГТУ, 2006. С. 112-115.

8. Стрелкова Г. Г. Технічний стан та перспективи розвитку розподільних електричних мереж України / Г. Г. Стрелкова, А. М. Пустовойтов // Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку: зб. наук. пр., Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського. 2018. С. 50-51.

9. Підвищення надійності функціонування розподільних електричних мереж / Р. В. Бондаренко, О. М. Довгалюк, Г. В. Омельяненко, О. Є. Піротті, Т .В.

Сиромятнікова // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків, 2018. Вип. 195. С. 69-71.

10. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – Х.: Видавництво «Форт», 2018. 370 с.

11. Використання безпілотників для підвищення безпеки та ефективності енергетичної системи / [Є. І. Сокол та ін.]; під ред. Є. І. Сокола. Х. : ФОП Бровін О. В., 2020. 148 с.

12. Постанова НКРЕКП від 12.06.2018 №374 «Про затвердження форм звітності щодо показників якості електропостачання та інструкцій щодо їх заповнення». URL: http://www.nerc.gov.ua/?id=32506

13. CEER Benchmarking Report 6.1 on the Continuity of Electricity and Gas Supply, Ref: C18-EQS-86-03, 26 July 2018. 84 p.

14. Постанова НКРЕ від 23.07.2016 №1009 «Про встановлення параметрів регулювання, що мають довгостроковий строк дії, для цілей стимулюючого регулювання»: URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1266-13.

15. Трунова І., Мірошник О., Мороз О., Пазій В. Аналіз ефективності використання інвестицій для підвищення надійності електропостачання. *Енергозбереження*. *Енергетика*. *Енергоаудит*. 2020 р. №10 (152). С. 23-29.

16. Иванов В. А. Фещенко А. А. Особенности подходов к техническому обслуживанию и ремонту оборудования в непрерывном производстве. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20, №3. С. 82-84.

17. Матусевич О. О. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій Дніпропетровськ: Дніпроетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім акад. В. Лазаряна, 2015. 295 с.

18. Пазій В. Г., Мірошник О. О. Аналіз проблем та діагностики //Науковий вісник ТДАТУ, 2017. Вип. 7. Т. 1. С. 187-195.

19. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин. Москва: Изд. дом МЭИ, 2006. 432 с.

20. Эксплуатация электрооборудования / Г. П. Ерошенко та ін. Москва: Колос, 2007. 344 с.

21. Хренников А. Ю., Гольдштейн В. Г. Классификация основных видов дефектов и повреждений трансформаторно-реакторного оборудования и факторов, приводящих к их возникновению. *Вестник Самарского государственного технического университета*. *Серия: Технические науки*. 2008. С. 166-171.

22. СОУ-Н ЕЕ 20.502:2007. Повітряні лінії електропередавання напругою 35 кВ і вище. Київ, 2007. 141 с.

23. Андриевский В. Н. Эксплуатация воздушных линий электропередачи. М.: Энергия, 1976. 616 с.

24. Хорольский В. Я., Таранов М. А. Эксплуатация систем электроснабжения. М.: ИНФРА-М, 2019. 288 с.

25. Защита электрических сетей от природных рисков / Пер. Д. Крупенев та ін. – Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE). URL: https://www.osce.org/ru/secretariat/293556).

26. Зеличенко А. С. Устройство и ремонт воздушных линий электропередачи. М.: Высш. школа, 1981. 264 с.

27. Бедерак Я. С., Тарадай В. І. Забезпечення надійної роботи електроустановок споживачів. Харків: Видавництво «Форт», 2020. 170 с.

28. Арбузов Р. С. Овсянников А. Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2009. 136 с.

29. Шляхи підвищення надійності ПЛ з урахуванням координації міцності елементів в районах з підвищеними ожеледно-вітровими навантаженнями / Є. В. Горохов та ін. *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. 2010. Том 6. №2. с. 113-130.

30. Мирзаабдуллаев А.О. Проблемы заземления грозозащитного троса на металлических опорах воздушных линий электропередачи. *Энергоэксперт*. 2017. № 3. С. 42-44.

31. Правила охорони електричних мереж. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 1997 р. № 209. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/209-97-%D0%BF#Text.

32. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 36 с.

33. Горохов Э. В., Казакевич М. И., Шаповалов С. М., Назим Я. В. Аэродинамика электросетевых конструкций / Под. ред. Э.В. Горохова, М.И. Казакевича. Донецк, 2000. 336 с.

34. Гук Ю. Б., Казак Н. А., Мясников А. В. Теория и расчет надёжности систем электроснабжения / под. ред. Р. Я. Федосенко. М.: Энергия, 1970. 176 с.

35. Основы технической диагностики. В 2-х книгах. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза /под. ред. П. П. Пархоменко. М.: Энергия, 1976. 464 с.

36. Киселев Ю. В. Основы теории технической диагностики. Самара: СГАУ, 2004. 138 с.

37. Александров В. Н., Катрач В. И., Севрук З. Б., Норейко М. М. О техническом диагностировании воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше. *Энергетика*. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2000. №3. С. 25-33.

38. Горобей Р. Диагностирование электрооборудования 0,4-750 кВ средствами инфракрасной техники. Київ: «КВІЦ», 2007. 374 с.

39. Акустичні методи діагностики коронного розряду в лініях електропередач / О. Г. Гриб та ін. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. *Технічні науки*. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Харків : ХНТУСГ, 2019. Вип. 203. С. 12.-15.

40. Моніторинг показників якості акустичним методом / О. Г. Гриб [та ін.]. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Сер.: *Енергетика*: *надійність та енергоефективність*: зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ", 2019. № 29 (1354). С. 47-51.

41. Мамчур Н. Д. Муравьёв А. В. Методы обнаружения и борьбы с коронными разрядами на высоковольтном оборудовании. *Эффективные инструменты современных наук* – 2021, зб. материалів XVIII Междунар. научн.-

практ. конф. Прага, 22-30 апреля, 2021 г. Прага: Education and Science, 2021. Vol. 5. С. 65-70.

42. Орехов Э. А. Абрамов В. В. Методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования. *Энергоэксперт*. 2020. №2. С. 10-13.

43. Дистанционные методы и системы дефектоскопии высоковольтной изоляции электрооборудования по оптическому излучению / Завидей В. И. и др. *Электро*. 2008. 3. С. 39-42.

44. Кошкин В. В. Техническая диагностика системд. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. 140 с.

45. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев и др.; под общ. ред. В. В. Клюева. Москва: Машиностроение, 1989. 672 с.

46. Сафарбаков А. М. Лукьянов А. В., Пахомов С. В. Основы технической диагностики. Иркутск: ИрГУПС, 2006. 216 с.

47. Четвергов В. А. Овчаренко С. М, Бухтеев В. Ф. Техническая диагностика локомотивов / под. ред. В. А. Четвергова. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж/д транспорте», 2014. 371 с.

48. Методические указания по применению летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи и энергетических объектов. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.200.10.235-2016. 2016. 95 с.

49. Державна авіаційна служба України. URL: https://avia.gov.ua/.

50. Drone mission planning and flight control software by sph engineering. URL: https://www.ugcs.com.

51. Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотного летательного аппарата / В.П. Дикой и др. *Энергия единой сети*. 2014. №2 (13) апрель – май. С. 16-25.

52. Габитов И. А., Маллаев Н. Б. Разработка роботизированного летательного комплекса для мониторинга состояния линий электропередач. *Вестник МЭИ*. 2017. № 1. С. 25-30.

53. Барбасов В. К., Орлов П. Ю., Фёдорова Е. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования линий электропередачи. *Электрические станции*. 2016. №10. С. 31-35.

54. Дрон DJI Matrice 300 RTK. URL: https://www.dji.com/matrice-300.

55. Ультрафиолетовые камеры (дефектоскопы) Corocam: URL http://www.corocam-uv.ru/menu_1.html.

56. Мараев А. М. Диагностика изоляторов и жил токопроводов с помощью уф-дефектоскопа и тепловизора. *Энергоэксперт*. 2020. № 1. С. 48-51.

57. Камера DJI Zenmuse H20. URL: https://www.dji.com/zenmuse-h20-series.

58. БПЛА CoroCAM ® 8. URL: https://www.uvirco.com/corocam-8-uav/.

59. Науменко А.П. Методы технической диагностики: Материалы лекций. Омск: ОмГТУ, 2016. 125 с.

60. Бондаренко В. Е., Шутенко О. В., Баклай Д. Н. Математические основы технической диагностики объектов электрических сетей: учеб. пособие в 2 частях. Ч. 1. Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. 256 с.

61. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. НПАОП 40.1-1.21-98.

62. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / под. общ. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. М.: Энергия. 1980. 576 с.

63. Собчук В.С., Собчук Н.В., Буркін О.Б. Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 154 с.

64. Кабашев А. В. Молниезащита электроустановок систем электроснабжения: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 124 с.

65. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под. ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 768 с.

66. Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Швець С. В. Захаренко Н. С. Підвищення надійності системи електропостачання за рахунок безпілотних літальних апаратів. *Наукові праці ВНТУ*. 2020. №1. С. 1-6.

ДОДАТОК А. ЗВІТ ПОДІБНОСТІ