

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Чичилюк Наталя Вікторівна

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка методу та інструментарію оцінки залишкового ресурсу повітряних
ліній передачі
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

Чичилюк Н. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Савченко Л.Г.

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Чичилюк Н.В. Оцінка залишкового ресурсу повітряних ліній електропередачі (ПЛ). Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Ця проблема є критично важлива у сфері електроенергетики. Вона безпосередньо пов'язана з забезпеченням надійності та безперебійності електропостачання, особливо в умовах зростаючого старіння інфраструктури.

Запропоновано методика визначення залишкового ресурсу ПЛ на основі даних про технічний стан їх елементів, з урахуванням виконуваних ремонтів та заміन обладнання дозволить підвищити надійність роботи обладнання та скоротити витрати.

Ключові слова: залишковий ресурс повітряних ліній, надійності та безперебійності електропостачання.

ABSTRACT

Chichilyuk N.V. Assessment of the residual resource of overhead power transmission lines (PTL). Qualification work for obtaining a master's degree in the specialty 141 – Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

This issue is critically important in the field of power engineering. It is directly related to ensuring the reliability and continuity of electricity supply, especially in the context of increasing infrastructure aging.

A methodology for determining the residual resource of PTL based on data about the technical condition of their elements, taking into account the repairs performed and equipment replacements, will enhance the reliability of equipment operation and reduce costs.

Keywords: residual resource of overhead lines, reliability and continuity of electricity supply.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	6
1.1 Показники надійності повітряних ліній електропередачі	7
1.2 Статистика стійких відключень повітряних ліній електропередачі	10
1.3 Методи оцінки технічного стану повітряних ліній електропередачі та визначення її фізичного зносу	11
1.4 Методи оцінки залишкового ресурсу об'єкта	13
Висновок по розділу	20
2. АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНЬ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	21
2.1 Розробка структури повітряних ліній електропередачі з урахуванням конструктивних особливості та задачі оцінки залишкового ресурсу.	21
2.2 Статистика аварійних відключень повітряних ліній електропередачі напругою 220 кВ та вище	26
2.3 Розрахунок показників надійності елементів, які призводять до відмови повітряних ліній електропередачі	28
Висновки по розділу	30
3. ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПОРАХ	31
3.1 Оцінка технічного стану залізобетонних опор	31
3.2 Оцінка технічного стану проводів та грозозахисних тросів	34
3.3 Методика визначення залишкового ресурсу повітряних ліній електропередачі на залізобетонних опорах	35
Висновки по розділу	41
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	43

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Проблема надійності електроенергетичних систем є ключовою в електроенергетиці. В окремих енергетичних системах кількість аварій протягом року досягає кількох десятків, а річний недовипуск електроенергії внаслідок аварій – кілька мільйонів кіловат-годин. При такій високій аварійності в енергосистемах оцінка залишкового ресурсу окремих видів установок та пошук шляхів підвищення надійності в ході експлуатації стають першочерговими завданнями [1].

Надійність електроенергетичної системи багато в чому пов'язана з надійністю електричних мереж і, зокрема, з надійністю повітряних ліній електропередачі (ПЛ). Довжина повітряних ліній напругою 330 кВ і вище в ОЕС України на кінець 2000 року склала: 330 кВ – 12790 км, 500 (400) кВ – 948 км, 750 кВ – 4335 км[1]. Переважна більшість ПЛ побудовано понад 40 років тому, існують і ПЛ із терміном служби понад 50 років. Елементи таких ліній увійшли або починають входити в період старіння, що збільшує кількість відмов ПЛ. Багато електроенергетичних організацій не можуть дозволити собі масове будівництво ПЛ замість застарілих, і проблема забезпечення надійності електропостачання з використанням старіючих ПЛ є актуальною.

У світлі сказаного визначення числа ремонтів та термінів реконструкції ПЛ з урахуванням залишкового ресурсу є актуальним технічним та економічним завданням. В основі визначення залишкового ресурсу має лежати оцінка технічного стану елементів ПЛ.

В електроенергетичній галузі розроблено чимало нормативних документів щодо оцінки технічного стану ПЛ, але практично відсутні нормативно-технічні рекомендації щодо оцінки показника фізичного зносу ПЛ та прогнозування їх залишкового ресурсу. Багато спеціалізованих організацій за результатами обстеження надають енергетичним компаніям лише технічний звіт про поточний стан ПЛ, і не беруть відповідальності щодо визначення ступеня фізичного зносу і залишкового ресурсу ПЛ. Оцінка цих показників ПЛ, як багатоелементного

об'єкта, залишається за їх власниками, які не мають ні критеріїв, ні методів та засобів такої оцінки.

При проведенні обстеження практично всі старі ПЛ мають численні дефекти, і в цьому випадку необхідна обґрунтована методика вибору тих ПЛ, які необхідно реконструювати в першу чергу з урахуванням обмеженого фінансування.

Вищеназвану задачу не можна вирішити без наукового обґрунтування та розробки методів та засобів оцінки залишкового ресурсу ПЛ. Це і стало підставою для вибору теми кваліфікаційної роботи.

Мета роботи. Розробка методів визначення залишкового ресурсу ПЛ на основі даних про технічний стан їх елементів, з урахуванням виконуваних ремонтів та заміन обладнання.

Об'єктом дослідження є повітряні лінії електропередачі, технічний стан складових її елементів, а предметом - порівняння методів оцінки залишкового ресурсу повітряних ліній електропередачі (ПЛ).

Запропоновано методика визначення залишкового ресурсу ПЛ на основі даних про технічний стан їх елементів, з урахуванням виконуваних ремонтів та заміन обладнання дозволить підвищити надійність роботи обладнання та скоротити витрати.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. **Чичилук Н. В.** ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 69-71с.
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ МАТЕРІАЛИ
НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ
ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024»
31 жовтня 2024 року м. Житомир
2. **Чичилук Н. В., Гонгало Н.В.** СТАТИСТИКА АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ
ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАПРУГОЮ 220 кВ ТА ВИЩЕ 67-69с.
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ

УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ МАТЕРІАЛИ
НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ
ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024»
31 жовтня 2024 року м. Житомир

3. **Гольцев В. В., Чичилук Н. В.** ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ПЛАВОЖЕЛЕДИЦІ 62-64с. МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024»
31 жовтня 2024 року м. Житомир

1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

1.2 Показники надійності повітряних ліній електропередачі

Надійність енергетичних об'єктів означає властивість об'єкта зберігати у часі здатність виконувати необхідні функції у заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування [2]. З позиції надійності найбільш суттєвими процесами є: функціонування та цілеспрямована зміна об'єкта, взаємодія об'єкта із середовищем, старіння (деградація матеріалу), відновлювальні та ремонтні впливи на об'єкт. В результаті накладання та взаємодії цих процесів один на одного, виникають певні події, і об'єкт приймає різні стани, що істотно впливають на виконувані ним функції. Подіями є відмова та відновлення, а станом – працездатним та непрацездатним [3].

Відмови ПЛ [3] класифікуються на:

1. стійкі (пошкодження) та збої (відключення з успішним АПВ);
2. раптові (випадковий наступ відмови) та поступові (пов'язані з досягненням граничного стану);
3. повні (аварійне відключення всіх фаз) та часткові (відключення однієї фази);
4. незалежні та залежні (від відмов інших об'єктів).

Працездатний стан ПЛ поділяється на робочий стан (виконує свої функції) та неробочий стан (перебуває під охоронною напругою).

Непрацездатний стан ПЛ може бути трьох видів:

1. стан попереджувального ремонту (роботи з виявлення, попередження та усунення несправності, які можуть призвести до відмов);
2. стан аварійного ремонту (роботи з відновлення його працездатності, порушеної внаслідок відмови);
3. граничний стан (старіння ПЛ, при якому її подальша експлуатація припиняється через зниження ефективності ремонтів, що проводяться).

Надійність загалом є комплексною властивістю, яка може включати ряд окремих властивостей, залежно від призначення ПЛ та умов її експлуатації. За типом описуваних подій та станів виділяють дві властивості надійності першого рівня [3]:

1. безвідмовність – властивість ПЛ безперервно зберігати працездатність протягом деякого часу або заданого напрацювання;
2. відновлюваність – властивість ПЛ бути пристосованою до попередження та виявлення причин виникнення відмов та їх усунення.

Показником надійності є технічна характеристика, яка кількісним чином визначає одну або декілька властивостей, що становлять надійність об'єкта [4].

Працездатність ПЛ відновлюється ремонтом або заміною їх елементів. Таким чином, ПЛ відносяться до об'єкта, що відновлюється, і для ПЛ основними показниками надійності є показники, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. - Показники надійності ПЛ

№	Показники	Формула	Статистична оцінка
1	Ймовірність безвідмовної роботи	$P(t) = \exp(\lambda t)$	$P^*(t) = \frac{N - n(t)}{N}$
2	Ймовірність відмови	$Q(t) = 1 - P(t)$	-
3	Інтенсивність відмови	$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}$	$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \cdot \Delta t}$
4	Середнє напрацювання до відмови	$T = \frac{1}{\lambda}$	$T^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$
5	Параметр потоку відмов	$\omega = \lambda = \frac{1}{T} = const$	$\omega^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}$
6	Середній час відновлення	-	$T_B = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} t_i}{N_B}$
7	Коефіцієнт вимушеного простою	-	$K_B = \frac{\Delta T_B \omega}{N \cdot \Delta t}$

У таблиці 1.1:

t – інтервал часу аналізованого періоду, років.

t_i – час безвідмовної роботи i -го об'єкта до відмови;

N – число об'єктів на експлуатації;

$n(t)$ – кількість об'єктів, які відмовили протягом часу t ;

$a(t)$ – частота відмов;

$n(\Delta t)$ – кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі часу від

$t - \frac{\Delta t}{2}$ до $t + \frac{\Delta t}{2}$;

$N_{cp}(t)$ – середня кількість об'єктів, що працюють, в інтервалі часу від

$t - \frac{\Delta t}{2}$ до $t + \frac{\Delta t}{2}$;

N_B – Число об'єктів, поставлених на відновлення.

У [5] вважають, що найважливішим показником безвідмовності є параметр потоку відмов, який можна розглядати як суму двох різних потоків

$$\omega = \omega_1(t) + \omega_2 \quad (1.1)$$

$\omega_1(t)$ – потік відмов, пов'язаний зі зносом та старінням елементів ПЛ та залежить від терміну служби;

ω_2 – потік відмов, що визначається раптовими зовнішніми впливами.

Надійність складного пристрою визначається надійністю його елементів. Відповідно до [6] елементом називають будь-яку частину, компонент, пристрій, підсистему, функціональний модуль, обладнання або систему, яка може бути розглянута як самостійна одиниця. У літературі з ПЛ кожен автор по-своєму розуміє словосполучення «елементи ПЛ», не пов'язуючи це з метою розрахунку надійності.

1.2 Статистика стійких відключень повітряних ліній електропередачі

По стійким відключенням ПЛ [5] виділяють п'ять основних причин втрати працездатного стану:

1. нез'ясовані причини (27%);
2. кліматичні дії (38%);
3. дефекти експлуатації (9%);
4. сторонні дії (22%);
5. дефекти монтажу та конструкції (4%).

Залежно від напруги ПЛ одні й самі чинники можуть по-різному впливати на експлуатовані ПЛ (Таблиця 2.).

Таблиця 2. - Розподіл стійких відключень ПЛ з різних причин та номінальної напруги [5]

Клас напруги	Розподіл відключень ПЛ, %							
	Сторонні впливу	Кліматичні впливу			Дефекти			Нез'ясовані причини
		гроза	вітер-ожеледиця	інші	експлуатації	конструкції	монтажу	
35	16,9	22,7	20,2	1,9	8,2	0,8	1,5	27,7
110	27,0	14,2	16,0	1,8	9,5	2,0	3,1	28,4
220	19,4	15,3	19,1	1,3	7,6	5,7	4,0	27,6
330	20,3	9,3	15,6	1,9	5,9	3,5	4,9	38,5
500	15,1	15,1	16,5	1,0	11,8	3,2	1,2	36,0
750	9,0	15,5	18,5	-	8,8	5,4	4,4	39,4

Аналіз даних таблиці 2 показує, що кореляція частки відключень (з будь-якої з причин) з класом напруги практично не існує.

1.3 Методи оцінки технічного стану повітряних ліній електропередачі та визначення її фізичного зносу

Проведення інструментального обстеження ПЛ неруйнівними методами дозволило визначати технічний стан окремих конструкцій.

Групою компанії «ЕЛСІ» [7] встановлено, що для залізобетонних конструкцій прийнятними є такі методи неруйнівного контролю, як:

1. метод пластичної деформації, заснований на вимірі розмірів відбитка, що залишається на поверхні бетону після зіткнення з нею сталеві кульки (молоток Кашкарова);
2. метод пружного відскоку, що полягає у вимірі величини зворотного відскоку ударника від поверхні бетону (склерометр Шмідта);
3. метод ударного імпульсу, що реєструє енергію удару, що виникає у момент зіткнення бойка з поверхнею бетону;
4. метод відриву зі сколюванням ребра конструкції, що полягає в реєстрації зусилля, необхідного для сколювання ділянки бетону на ребрі конструкції або місцевого руйнування бетону при викиданні з нього анкерного пристрою.

Зазначені методи дозволяють визначити характеристики міцності лише поверхневого шару бетону залізобетонної конструкції, причому в одній точці, і це є їх істотним недоліком.

Найбільш універсальним вважається метод ультразвукового контролю, оскільки, на відміну від інших методів, він дозволяє виміряти інтегральні параметри міцності. За технікою проведення випробувань цей метод ділиться на наскрізне ультразвукове випромінювання, коли датчики розташовуються з різних сторін зразка, і поверхневе ультразвукове випромінювання, коли датчики розташовані, з одного боку. Метод наскрізного ультразвукового випромінювання дозволяє контролювати міцність не лише при поверхневих шарів бетону, а й усього обсягу бетону конструкції. Виникнення у структурі бетону будь-яких дефектів, що зменшують його міцність, відповідним чином змінює швидкість та час поширення ультразвуку в бетоні.

У [8] пропонується метод, заснований на цифровій обробці зображень, що дозволяє всю область знімку подати у вигляді масиву пікселів, де кожен піксель характеризується інтенсивністю кольору та світла.

Використовуючи програмний алгоритм перетворення та обробки цифрового зображення ділянок опори, де можна виділити тріщини, що потрапили в область знімка, і зробити їх геометричні вимірювання. Цей метод може визначити дефекти на поверхні, що можна виявити і візуально. Недоліком цього методу є неможливість визначення прихованих дефектів.

В [9] вважають, що корозія арматури є одним із найбільш значущих факторів, що визначають фактичний технічний стан залізобетонних конструкцій, їх надійність та довговічність. Автори пропонують метод неруйнівного контролю корозійного стану арматури за допомогою приладів Canin+ (Proceq, Швейцарія).

Вимірюючи електрохімічний (окислювально-відновний) потенціал арматури, можна методом, що не руйнує, виявити ділянки виникнення корозії. Однак цей метод, так само, як і традиційний, результативний у разі корозії арматури, що вже почалася.

Найбільш актуальною проблемою є не діагностування корозії арматури, що вже почалася, а визначення ймовірності можливості її виникнення на більш ранній стадії. Одним із методів, що дозволяють контролювати проникність бетону без порушення конструкцій та відбору зразків, є метод вимірювання питомого електричного опору поверхневого шару бетону. Існує кілька методів вимірювання питомого електричного опору матеріалів. Найпростішим є метод із використанням 4 електродів (схема Веннера)[10].

У [11] досліджено стан та розвиток карбонізації залізобетонних конструкцій. Оцінку та прогнозування карбонізації здійснюють щодо зміни товщини нейтралізованого шару бетону. Її визначають за допомогою 0,1% спиртового розчину фенолфталеїну (індикаторним тестом рН). При цьому вважається, що бетон у незабарвленій зоні нейтралізований і втратив свої захисні властивості по відношенню до арматури, а в пофарбованій - знаходиться в задовільний стан. Розроблено комплексний метод оцінки та прогнозування технічного стану

залізобетонних конструкцій, що експлуатуються тривалі терміни у різних повітряних середовищах.

Міцність залізобетонної опори можна визначити безпосереднім випробуванням. При механічних випробуваннях залізобетонних стійок відповідно з [27] контрольне навантаження, при якому відбувається руйнування, визначається по формулі:

$$M_p = C \cdot M_m \quad (1.1)$$

Де C - коефіцієнт безпеки, що дорівнює 1,6 для важкого бетону;

M_m - згинальне навантаження, що відповідає несучій здатності.

1.4 Методи оцінки залишкового ресурсу об'єкта

Існує досить велика кількість методів визначення залишкового ресурсу по відношенню до конкретних об'єктів.

У [12] розглянути методи визначення залишкового ресурсу будівель. Оцінка залишкового ресурсу будівель і споруд НПЗ здійснюється за імовірнісною моделлю, заснованою на оцінці ступеня пошкодження будівельних конструкцій. Оцінка ступінь небезпеки дефектів, виявлених при огляді елементів будівлі, здійснюється за трирівневою системою з визначенням вагових коефіцієнтів.

У [13] розглядається термін служби залізобетонної конструкції, який залежить від фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей бетону, забезпечення функціонального стану конструкції в експлуатації. У статті представлено кількісний показник у вигляді міри функціонального стан бетону, що знаходиться в складних умовах експлуатації.

У [14] розглядається передбачення граничного стану залізобетонні та металеві конструкції на залізницях. За параметром фактичний стан пошкодження, дефект або несправність, структури, що розробляються в процесі експлуатації, числові значення яких перевищують номінальний поріг, встановленими нормативними технічними документами.

Для інженерних споруд виділяють три категорії технічного стану, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. – Класифікація параметра фактичного стану експлуатаційної будівлі

Категорія стану	Характеристика категорії за рівнем працездатності	Допустиме значення
Перша категорія x_1	Частковий вихід з ладу, незначне зменшення надійності і вимагають ремонтних робіт	$0 < x_1 \leq x_{kp1}$
Друга категорія x_2	Розвиток часткової відмови, що вимагає Ремонт	$x_{kp1} < x_2 \leq x_{kp2}$
Третя категорія x_3	Повна відмова, що вимагає реконструкції об'єктів	$x_3 > x_{kp3}$

Згідно з моделлю прогнозування стану експлуатованої конструкції за фактичним станом, конструкція схильна до зносу, а її технічний стан змінюється в процесі експлуатації і описується випадковим процесом $X(t)$, який відображає експлуатаційні характеристики конструкції на даний момент часу. Для цього технічний стан розбивається на частини з характеристиками параметра фактичного стану x_1 , x_2 , x_3 (табл. 3). Якщо $X(t) \in x_1$, то структура працездатна. При $X(t) \in x_2$ структура частково працездатна, а при $X(t) \in x_3$ вона непрацездатна.

При розробці математичної моделі прогнозування залишкового ресурсу споруди за параметром фактичного стану необхідно визначити такі дані:

1. характер зміни параметра фактичного стану у часі, тобто. процес старіння;
2. інтенсивність зміни параметра фактичного стану.

У реальних умовах безперервний моніторинг параметрів випадкового процесу здійснити досить складно, і контроль проводиться періодично. У кожний момент чергового контролю можливе одне із двох рішень: продовжувати експлуатацію чи виконати ремонт. Таке рішення приймається на основі аналізу інтенсивності зміни параметра фактичного стану $\mu(t)$.

Інтенсивність зміни параметра фактичного стану визначається за формулою:

$$\mu = \frac{f(t)}{F(t)} \quad (1.2)$$

де $f(t)$ – щільність ймовірності зміни значення фактичного параметра станів для часу t ;

$F(t)$ - ймовірність часу безвідмовної роботи в часі t .

При заданих допустимих значеннях параметра фактичного стану можна з ймовірністю визначити час настання відмови, тобто. переходу стану споруди з однієї категорії до іншої. При цьому стохастичний процес виглядатиме так:

$$X(t) = x_{\phi} + \mu \cdot t \quad (1.3)$$

де x_{ϕ} - зафіксоване під час обстеження споруди середнє значення параметру фактичного стану.

При створенні математичної моделі зміни параметра фактичного стану споруди у процесі експлуатації враховують кліматичну зону. Для цього вводяться кліматичні коефіцієнти для помірної та холодної кліматичних зон.

Моделювання зміни параметра фактичного стану у вигляді випадкового процесу провадиться наступним чином:

1) за нелінійним законом зміни параметра фактичного стану:

$$X(t) = x_{\phi} + k \cdot \ln t_i \cdot \mu, \quad (1.4)$$

$$X(t) = x_{\phi} + k \cdot t_i^n \cdot \mu, \quad (1.5)$$

2) при лінійному законі зміни параметра фактичного стану

$$X(t) = x_{\phi} + k \cdot t_i \cdot \mu, \quad (1.6)$$

де k - кліматичний коефіцієнт, що враховує особливості зміни параметра фактичного стану в регіоні;

t_i - кількість років, що розглядаються, $t_i = 1, 2, 3 \dots$

n - показник ступеня, що визначається залежно від раніше проведених ремонтів штучних споруд.

Математичну модель вибирають залежно від терміну служби:

1) за терміну служби до 20 років за виразом (1.3);

2) при терміні служби понад 20 років за виразом (1.5 та 1.6).

За результатами розрахунку будується графік зміни параметра фактичного

стану (Рисунок 1.).

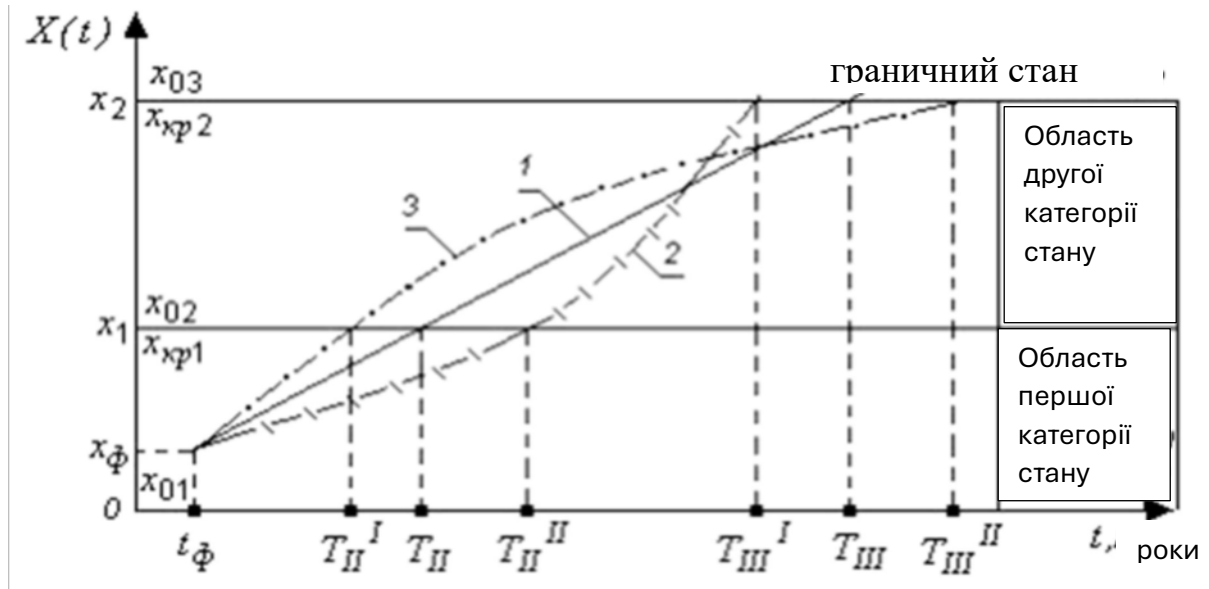


Рисунок 1. – Графік зміни параметра фактичного стану [18]

За допомогою цього графіка можна встановити прогнозовані напрацювання на відмови та граничний стан.

На рисунку 1. прийнято такі позначення:

1, 2, 3 – траєкторії дрейфу параметра фактичного стану;

x_ϕ - фактичне значення параметра фактичного стану;

t_ϕ - фактичне напрацювання на параметр;

x_{01} , x_{02} – початкові значення параметра, що відповідають першим та другим категорії стану;

$x_{кр1}$, $x_{кр2}$ – граничні значення параметра, що відповідають першій і другій категорії стану;

T_{II} , T_{II}^I , T_{II}^{II} - час експлуатації конструкції для другої категорії стану при зміні параметра з лінійними та нелінійними залежностями;

T_{III} , T_{III}^I , T_{III}^{II} - час експлуатації конструкції для третьої категорії стану при зміні параметра з лінійними та нелінійними залежностями;

При моделюванні та прогнозуванні періодичності ремонтів штучних споруд з урахуванням зміни їх фактичного стану, виконують наступний обсяг розрахунків:

1) визначають швидкість (інтенсивність) розвитку параметра фактичного стану на періоді спостереження (передісторії) $\mu(t)$;

2) визначають траєкторію дрейфу параметра фактичного стану на циклі регенерації $X_i(t)$ і з урахуванням залишкового напрацювання T_x з використанням математичних моделей (1.4 – 1.6);

3) визначають величину залишкового зносу

$$x_{\text{зн}} = (x_{ki} - x_{0i})(j_{pn} - j_p)k_p,$$

де x_{ki}, x_{0i} – критичні значення параметра фактичного стану за категоріями стану;

j_{pn} – число ремонтів, що допускаються. З урахуванням використання положень теорії зносу споруд допускається проведення ремонтів поточного змісту $j_{pn}^{\text{TC}} \leq 5$, а капремонтів $j_{pn}^{\text{TC}} \leq 3$;

j_p – число проведених раніше ремонтів (до початку прогнозу) розглянутого рівня ремонтпридатності;

k_p – величина допускового залишкового зносу штучного споруди після ремонту, $k_p = 0,1$.

4) визначають напрацювання споруди на ремонт відповідної рівня ΔT_{pi} залежно від характеру зміни параметра фактичного стану $X_i(t)$ за умови $X_i(t) \leq x_{ki}(T_{pi})$;

5) визначають загальне напрацювання споруди на капітальний ремонт T_{pi} та граничний стан.

У [15] розглянуто кілька методів оцінки залишкового ресурсу виробів.

Імовірнісний метод заснований на вивченні ряду зразків, випробуваних під дією суми випадкових процесів різної інтенсивності і піддаються консольному згинанню в електродинамічних установках.

Параметричний метод неруйнівного контролю ґрунтується на результатах вимірювання магнітної характеристики металу - коерцитивної сили, і широко використовується в металургії та машинобудуванні. Безпосередньо примусова

сила пов'язана з поточними експлуатаційними напруженнями і накопиченням пошкодження в металі, які визначають залишковий ресурс конструкції.

Метод дифузійного розподілу (DM-розподілу) з відомою початковою функцією розподілу ресурсу досліджуваних продуктів $F(t)$ або густиною розподілу ресурсу $f(t)$ визначає математичне очікування залишкового ресурсу.

Метод індивідуальних кривих втоми заснований на побудові кривих у вигляді квантилів відповідних значень ймовірності. Прогнозування розподілу залишкового ресурсу ґрунтується на фундаментальному припущенні, що кожен зразок має свою індивідуальну криву втоми.

Метод аналізу часових рядів дає можливість отримувати прогнози зафіксованих значень у найближчому майбутньому. Для прогнозування залишкового ресурсу використовується адаптивний алгоритм:

- 1) ініціалізація – аналіз внутрішньої структури даних та пошук кількісні та якісні тенденції. На цьому етапі вихідні дані поділяються на систематичні (прогнозовані) і випадкові (непередбачувані) складові;
- 2) прогнозування — прогнозування вартості ресурсу в момент часу $t+1$ з врахування значень ресурсу для моментів часу t , де $t = 0, 1, \dots, n$;
- 3) розрахунок похибки прогнозу – за похибку прогнозу допустимо приймати абсолютну різницю між фактичним значенням ресурсу в момент часу $t+1$ і прогнозованим значенням;
- 4) модифікація - це зміна оцінок, отриманих на першому етапі (перегляд показників) за час $t+1$ з урахуванням результуючої похибки прогнозування і з метою зменшення абсолютного значення похибки.

Кроки 2-4 повторюються до тих пір, поки не буде проаналізовано весь існуючий тимчасовий ряд. Остання оцінка (на момент часу $t = n$) використовується для прогнозу майбутніх значень ресурсу.

У [16] розглядаються гіпотези накопичення пошкоджень від втоми технічні пристрої.

У [17] розглянуті методи прогнозування залишкового ресурсу машин і конструкцій. Основою для прогнозування індивідуального залишкового ресурсу конкретного об'єкта, що експлуатується, є інформація, що включає:

- поточні дані про дефекти, виявлені під час планово-профілактичних діяльності або моніторинг;
- дані про навантаження та інші умови взаємодії об'єкта з середовищем;
- дані про матеріали, елементи, вузли, навантаження та інші параметри, які визначаються на стадії проектування.

Приводяться методи прогнозування використання залишкових ресурсів:

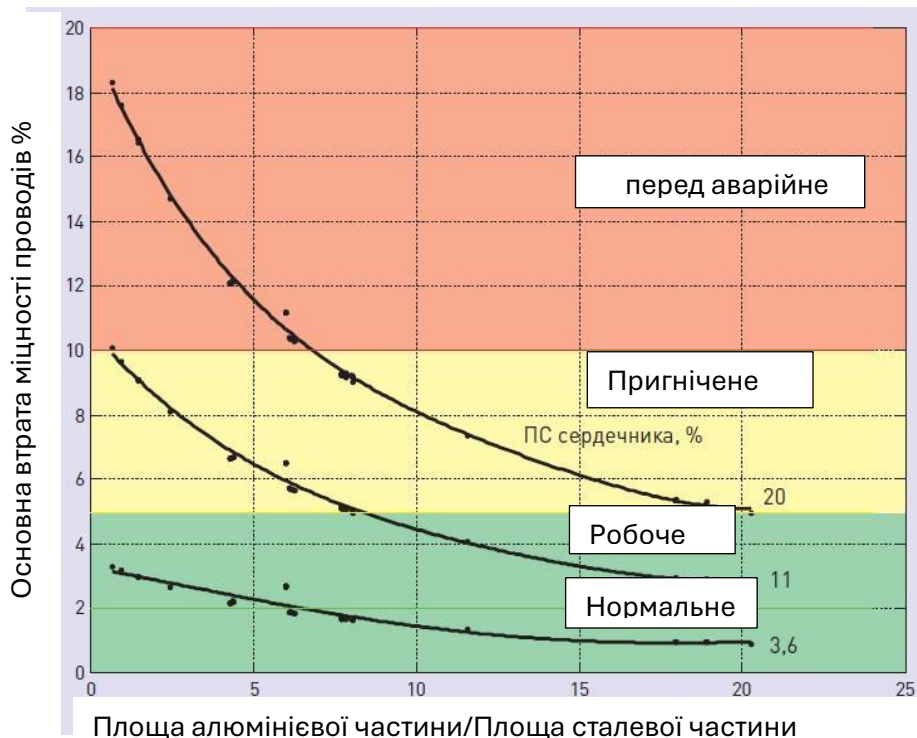
- кумулятивні, які дозволяють описати різноманітні явища, що призводять до досягнення граничних станів;
- вимірюваними навантаженнями;
- за критерієм розвитку тріщини розрізняють їх три види.

Також доступні такі методи прогнозування залишкових ресурсів:

- за змінами контрольованого параметра, заснованими на стандартизованих розрахункових нормах;
- прогнозування технічного стану та залишкового ресурсу повітряних ліній оцінюється на основі нечіткої логіки;
- оцінка надійності повітряних ліній, розроблених рекомендації щодо продовження терміну служби повітряних ліній з урахуванням технологічного ресурсу;
- методи оцінки та розрахунку надійності повітряних ліній які ґрунтуються на використанні імовірнісних та статистичних характеристик елементів повітряних ліній тощо.

У [30] було визначено, що залишковий ресурс проводів доцільно оцінювати за залишковою міцністю. Для оцінки технічного стану проводів та грозозахисних тросів застосовується магнітна дефектоскопія. ТОВ «Інтрон плюс» встановило залежність відносної втрати міцності проводів від відношення площі перерізу алюмінієвих жил до площі перерізу сталевого осердя (Рисунок 2.).

Для визначення відносної втрати міцності сталевго осердя дроти у графіці (Рисунок 2.) зіставляють втрату перерізу сталевго сердечника (ПС сердечника, %) та відношення площі алюмінієвої частини до площі сталевгої частини дроту. Для подальшої роботи доцільно використати методики [30]



Висновок по розділу

В розділі розглянуто: показники надійності повітряних ліній електропередачі, статистика стійких відключень повітряних ліній електропередачі, методи оцінки технічного стану повітряних ліній електропередачі та визначення її фізичного зносу, методи оцінки залишкового ресурсу об'єкта.

2. АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНЬ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

2.1 Розробка структури повітряних ліній електропередачі з урахуванням конструктивних особливості та задачі оцінки залишкового ресурсу.

2.1.1 Загальні положення.

Проведений у розділі огляд літературних джерел показує, що всі автори так чи інакше для аналізу пошкоджень ПЛ та прогнозування їх залишкового ресурсу використовують поняття опорних, провідникових та ізолюючих елементів ПЛ. Об'єднуючи елементи кожної з названих груп у відповідний компонент, можна зробити висновок, що необхідно і достатньо структурувати ПЛ за трьома компонентами: опорний, провідниковий та ізолюючий. До такої структури ПЛ підштовхує обставина, що багато організацій впроваджують систему управління активами, що дозволяє вести планування та облік технічного обслуговування та ремонту ПЛ за допомогою обчислювальних машин. Для такої системи також зручно розділити ПЛ на три компоненти.

Включення певного елемента ПЛ у той чи інший із названих компонентів можна здійснювати за низкою ознак: призначення, важливі особливості, кількість ланцюгів (гілок), нормовані розміри. Матеріал елементів не розглядається, тому що в даний час активно застосовуються різні композитні або комбіновані матеріали для створення полегшеної конструкції чи поліпшення якісних характеристик.

2.1.2 Опорний компонент

До елементів опорної складової відносяться стійки, траверси, кабельні стійки, сходинки, ригелі, розкоси, бандажі, фундаменти або палі для опори, заземлювальні пристрої, відтяжки, металеві деталі для кріплення відтяжок, U-подібні болти, анкерні пластини, анкерні фундаменти або палі.

1. За призначенням розрізняють проміжні і анкерні опори.

Проміжні опори призначені для підтримки проводів в нормальних режимів роботи повітряних ліній, коли вертикальні сили ваги всіх елементи компонентів повітряної лінії, а також льодові відкладення і вітрові навантаження. При цьому проміжні опори плоскі конструкцій з необхідною несучою здатністю у вертикальних і напрямки, перпендикулярні до лінії.

Проміжні опори поділяються на такі види:

1) прямі опори, які встановлюються на прямих ділянках лінії, при не розраховані на поворот волосіні на певний кут;

2) кутові опори, які встановлюються при незначних поворотах рядків від 10° до 20° .

Анкерні опори в нормальних умовах експлуатації повітряних ліній виконують функції як проміжні. Додатково розраховуються ці опори на сприйняття значних горизонтальних зусиль від натягнутих проводів і проводів заземлення. Анкерні опори виконані у вигляді просторових ферм, які більш стійкі до деформації. Різновидами анкерних опор є:

1) прямі опори, як і прямі проміжні опори встановлюються на прямих ділянках ПЛ;

2) кутові опори встановлюються при поворотах лінії понад 20° , де потрібна зміна напрямку лінії;

3) кінцеві опори встановлюються між самою ПЛ та конструкціями розподільчих пристроїв електричних станцій та підстанцій;

4) спеціальні опори, що встановлюються на відповідальних ділянках ВЛ. Спеціальні опори бувають відвідні, перехідні та транспозиційні. Відвідні опори встановлюються у місцях відгалуження ділянки лінії від основної траси ПЛ. Перехідні опори встановлюють у місцях перетину великих водойм, ущелин, вузьких долин. Транспозиційні опори встановлюються на ділянці лінії, де необхідно виконати зміну розташування фаз.

2. Проміжні опори за важливими особливостями поділяються на одностійкові, порталні та V-подібні, тоді як анкерні опори виконуються одностійковими та порталними.

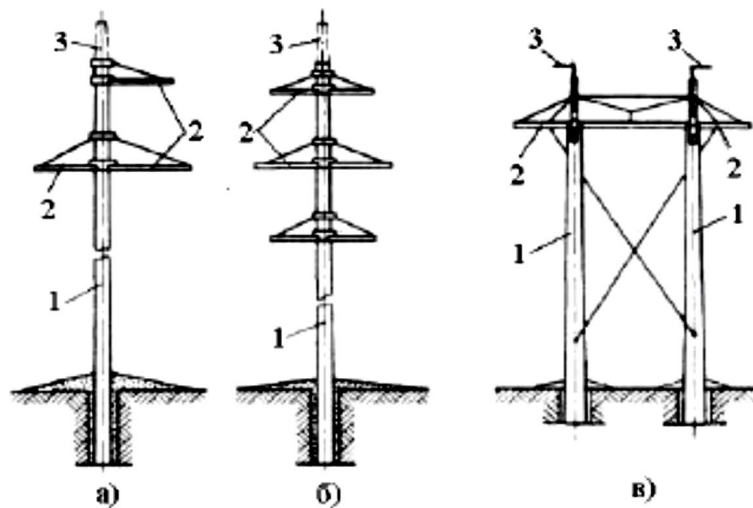


Рисунок. 3. - Проміжні залізобетонні опори:

а), б) - одностоякові одно- та двостоякові для ПЛ 35-220 кВ; в) портална з металевою траверсою «рівного опору» для ПЛ 500 кВ; 1 - стійка, 2 - траверси, 3 – тросостійка[28]

Одностоякові та порталні опори можуть бути вільно стоять відтяжками, і розрізняються за способом монтажу:

- 1) стовпи окремо стоячих опор встановлюються безпосередньо в землю або встановлюються на фундамент;
- 2) опорні стовпи з відтяжками встановлюються на фундамент і підтримуються за допомогою кабелів.

Можуть бути окремо стоячі опори з відтяжками, де це потрібно додаткове посилення несучої здатності в районах з сильними вітровими навантаженнями.

V-подібні опори встановлюються на фундаменти і підтримуються за допомогою кабельних відтяжок. Найчастіше такі опори використовуються на повітряних лініях в розмірах 1150 кВ.

- 3) За кількістю ланцюгів опори можна розділити на одноланцюгові, дволанцюгові та багатоланцюгові. Одноконтурні опори мають одну трифазну систему, де розташування фазних проводів може бути горизонтальним і трикутним. Дволанцюгові опори мають дві трифазні

системи, тобто підвіс двох ліній на одній опорі, в якій розташування фаз - це «бочка» і «зворотна ялинка». Багатоланцюгові полюси мають 3 і більше трифазних систем проводів.

- 4) Стандартизовані розміри включають в себе висоту опори. Опори сконструйовані певної висоти в залежності від класу напруги. Крім того, при перетини повітряних ліній з інженерними спорудами можуть застосовуватися піднесені опори.

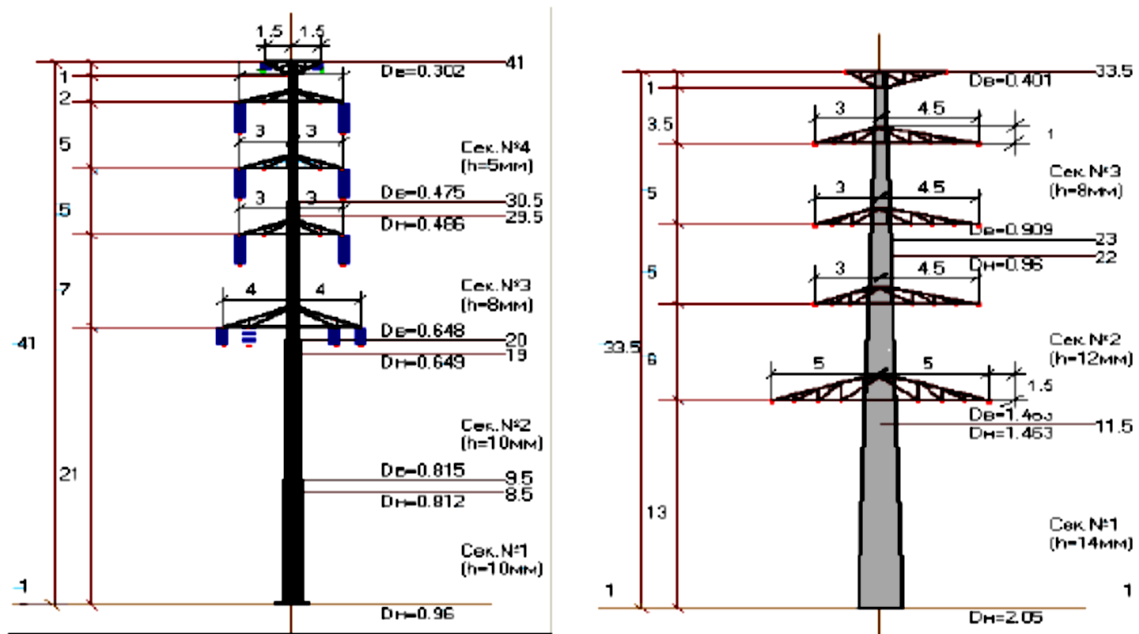


Рисунок 4. – Вільностоячі одностоякові 3-ланцюгові опори для ПЛ 220/110 кВ із двома грозозахисними тросами й 4-х ярусним розташуванням проводів серії ПМ220/ 110-3 і УМ220/ 110-3.

2.1.3 Ізоляційний компонент

До елементів ізолюючого компонента належать ізолятори, штирі, гаки, розрядники (у тому числі роги розрядні – іскрові проміжки), арматура зчіпна, підтримуюча, натяжна та захисна.

Класифікація ізолюючого компонента за низкою ознак така:

1. За призначенням розрізняють підтримуючі та натяжні ізолюючі підвіски. Натяжні ізолюючі підвіски служать для кріплення проводів та грозозахисних тросів до анкерних опор і відчують горизонтальне

зусилля від проводів та грозозахисних тросів. Підвіски, що підтримують ізолюючі призначені для підтримки проводів та зазнають вертикального навантаження від ваги дроту (або грозозахисного троса), а також ожеледиць.

2. За принциповими особливостями розрізняють штирьові ізолятори та підвісні ізолюючі підвіски. Штирьові ізолятори монтуються на гак, що ввертаються в дерев'яні опори, або на сталевий штир, що закріплюються на металевій частині опори за допомогою гайок. Штирьові ізолятори застосовуються на ПЛ у габаритах до 10 кВ. Підвісні ізолятори застосовуються на ПЛ у габаритах 35 кВ і вище, які збираються у гнучкі гірлянди чи можуть бути виконані стрижневими.
3. За кількістю ланцюгів розрізняють одноланцюгові, дволанцюгові та багатоланцюгові ізолюючі підвіски. Одноланцюгові ізолюючі підвіски складаються з однієї гірлянди ізоляторів. Для збільшення механічної міцності ізолюючих підвісок застосовують паралельні гірлянди ізоляторів в одній підвісці. Дволанцюгові ізолюючі підвіски складаються з двох паралельних або V-образних гірлянд, а багатоланцюгові можуть мати 3 і більше паралельні гірлянди.
4. До нормованих розмірів відносять будівельну висоту ізолюючої підвіски. Кількість ізоляторів у гірлянді визначається необхідною ізоляційним рівнем.

2.1.4 Провідниковий компонент

До елементів провідникового компонента відносяться самі дроти та грозозахисні троси, а також грозозахисний трос із вбудованим оптико-волоконним кабелем (ОКГТ), арматура сполучна, контактна та захисна.

Класифікація провідникового компонента за низкою ознак така:

1. За призначенням провідниковий компонент можна поділити на струмопровідні та захисні. До струмопровідних відносяться дроти, призначені передачі електричної енергії. До захисних відносяться

грозозахисні троси, що служать для захисту проводів від безпосереднього розряду в них блискавки.

2. За важливими особливостями можна поділити на багатодротяні, які діляться на ізольовані та неізольовані. Причинами застосування багатодротяних проводів є складність виготовлення холоднотянутого дроту діаметром більше 3-4 мм. Для збільшення механічної міцності багатодротяні дроти виготовляються з двох металів.
3. За кількістю гілок провідниковий компонент розрізняють на одинарні та розщеплені. Розщеплені дроти в основному виконують на ПЛ у габаритах 330 кВ і вище, метою якого є зменшення втрат на корону та зменшення радіоперешкод [19].
4. До нормованих розмірів для провідникового компонента відносяться: стріла провисання; довжина прольоту між опорами; відстань між проводами та грозозахисними тросами; відстань між розщепленими провідниками; відстань від проводів до землі, рослинності та інженерних споруд.

2.2 Статистика аварійних відключень повітряних ліній електропередачі напругою 220 кВ та вище

За період 1999 – 2016 р. р. в електричних мережах України напругою 220-1150 кВ сталося 5299 аварійних відключень ПЛ [20], які класифіковані в такий спосіб:

1. Недоліки експлуатації, що становлять 22% від загальної кількості відключень. У цей розділ включені відключення, пов'язані з:

- падіннями опор через корозію анкерного вузла кріплення тросових відтяжок та недостатнього заглиблення опор;
- обривами проводів та грозозахисних тросів та їх жив за ясної погоди та через незадовільний контакт у затискачах;
- розривами та розчепленнями ізолюючих підвісок через відсутність

замків та незадовільного шарнірного з'єднання арматури при ясній погоді;

- загоряння рослинності на трасі ПЛ;
- перекриттями ізоляції за ясної погоди через забруднення ізоляторів;
- перекриттями дротів на крону дерев.

2. Вплив сторонніх осіб, що становлять 4% від загальної кількості відключень. Цей розділ складається з відключень, пов'язаних із:

- падінням опор через розкрадання куточків та зрізу анкерних болтів тросових відтяжок;
- обривами та пошкодженнями проводів через роботу спецтехніки під ПЛ;
- дуговими перекриттями з проводів на спецтехніку, що працює в охоронній зоні ПЛ, а також на негабаритний транспорт, що проїжджає, під ПЛ;
- перекриттями ізоляції внаслідок руйнування ізоляторів при їх розстрілі з мисливських рушниць;
- начерками сторонніх предметів на дроти ПЛ;
- розведенням вогню в охоронній зоні ПЛ.

3. Вплив стихійних явищ, що становлять 21% від загального кількості відключень пов'язаних з:

- падінням опор;
- обривами проводів та грозозахисних тросів та їх жил;
- розривами та розчепленнями ізолюючих підвісок;
- танцем проводів та грозозахисних тросів;
- наближенням дроту на неприпустиму відстань до тіла опори;
- наближенням проводів та грозозахисних тросів на неприпустиме відстань один до одного або до землі через ожеледицю;
- перекриттям ізоляції при грозових перенапрузі та при густих туманах.

4. Нез'ясовані причини, що становлять 32% від загальної кількості відключень. У цей розділ входять відключення, що відбулися як за ясної погоди, і при вплив стихійних явищ, причини яких виявлено.

5. Відключення, не пов'язані з пошкодженням ПЛ, що становлять 21% від

загальної кількості вимкнень. До цього розділу відносяться відключення, що сталися з причин помилкових дій персоналу, несправності релейного захисту та автоматики, несправності обладнання ПС, несправності обладнання споживачів.

6. Відключення, пов'язані з дефектом виготовлення та неякісним будівництвом, що не перевищує 1% від загальної кількості. У цей розділ входять відключення, пов'язані з неякісним монтажем при будівництві, заводським браком матеріалів, що поставляються.

2.3 Розрахунок показників надійності елементів, які призводять до відмови повітряних ліній електропередачі

У літературі з теорії надійності електроенергетичних установок [21,22] показники надійності розраховуються на ПЛ загалом, а параметр потоку відмов визначається з розмірністю «кількість відмов на 100 км на рік». Подібний підхід широко застосовується лише при оцінці надійності у проектуванні електричних мереж.

У процесі експлуатації елементи опорного, ізолюючого та провідникового компонентів ПЛ піддаються зносу та старінню, що призводить до численних відмов ПЛ загалом та показники надійності з часом погіршуються. Для виділених 2.1 компонентів можна розрахувати окремо такі показники надійності.

На основі формули (5) з таблиці 1.1 параметр потоку відмов з розмірністю «на 100 км ПЛ» в одиницю часу перетворимо за формулою

$$\omega^* = \frac{n(\Delta t)}{L \cdot \Delta t} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де $n(\Delta t)$ – кількість елементів компонента, що відмовили, в інтервалі часу від $t - \frac{\Delta t}{2}$ до $t + \frac{\Delta t}{2}$;

L – сумарна довжина ПЛ, що мають аналогічний термін служби з тією, на якій відбулася відмова, км.

Параметр потоку відмов із розмірністю «на одну ПЛ» в одиницю часу

визначається формулою (5) таблиці 1.1. При цьому N - число ПЛ, що мають аналогічний термін служби з тим, де сталося пошкодження компонента.

Аналогічно можна визначити інтенсивність відмов із розмірністю «на одну ПЛ» в одиницю часу використовуючи формулу (3) з таблиці 1.1. Тоді інтенсивність відмов із розмірністю «на 100 км ПЛ» в одиницю часу перетворимо наступною формулою

$$\lambda_i = \frac{n(\Delta t)}{L_{\text{ср}} \cdot \Delta t}, \quad (2.2)$$

де $L_{\text{ср}}$ – середня довжина справно працюючих ПЛ, що мають аналогічний термін служби з тією, на якій сталося пошкодження компонента, в інтервалі часу від $t - \frac{\Delta t}{2}$ до $t + \frac{\Delta t}{2}$.

Розрахунки показників надійності ПЛ, результати яких склав:

- 1) середній час відновлення ПЛ при відмові елементів від 0,65 до 197,58 год;
- 2) середнє напрацювання на відмову елементів ПЛ від 0,4 до 82 років;
- 3) параметр потоку відмов елементів ПЛ від 0,0098 до 0,839-1;
- 4) інтенсивність відмов елементів ПЛ від 0,0059 до 0,2378-1;
- 5) коефіцієнт вимушеного простою при відмові елементів ПЛ від 0,00001 до 0,00338.

Розрахунками показано, що відмовам найчастіше піддається ізолюючий компонент, але він має перевагу, що полягає у швидкому відновленні та у найменших витратах на відновлення його елементів.

З урахуванням усіх вищенаведених показників надійності елементів ПЛ, найбільшу увагу необхідно звертати на опорний компонент, відновлення якого пов'язано з найбільшим часом відновлення з найбільшими витратами.

Висновки по розділу

1. Компонентна структура ПЛ дозволяє виконати не лише аналіз пошкоджень ПЛ, а також вести планування та облік технічного обслуговування та ремонту ПЛ за допомогою систем управління активами.

2. Аналіз технологічних порушень ПЛ показав, що відмови ПЛ відбуваються через пошкодження ізолюючої підвіски, проводів, грозозахисних тросів, стійки опор та анкерних вузлів кріплення тросових відтяжок опор.

3. Розраховані показники надійності елементів ПЛ свідчать, що більшу увагу необхідно звертати на опорний компонент. Незважаючи на низьку питому пошкоджуваність залізобетонних опор у порівнянні з металевими опорами, у нормативних документах відсутні методики оцінки залишкового ресурсу залізобетонних опор. Таким чином, для більш глибокого дослідження прийнято до розгляду залізобетонні опори.

3. ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПОРАХ

3.1 Оцінка технічного стану залізобетонних опор

3.1.1 Загальні положення

Ушкодження залізобетонних конструкцій у вигляді сколів та тріщини пов'язані з впливом кліматичних факторів, вологи та температурних змін у перехідні осінньо-зимові та зимово-весняні періоди, а також з випадковими механічними ушкодженнями під час монтажу опор. Періодичні зміни навантажень на залізобетонні конструкції прискорюють процеси накопичення пошкоджень та інших явищ, і викликають зниження міцності бетону та несучої Можливості опори. Втрата несучої здатності опори може призвести до її падіння та припинення електропостачання. Дані ушкодження, позначаються також на зміні моменту опору вигину перерізу залізобетонної стійки [23].

Вихідну міцність бетону R_0 можна визначити за міцністю бетону підземної частини кожної конкретної залізобетонної стійки, або по середньому значення міцності декількох стійок ділянки ПЛ [24]. При цьому вибірка має бути представницькою.

При відомому зовнішньому діаметрі залізобетонної стійки та її перерізу з [25, 26] можна визначити вихідний момент опору перерізу залізобетонної стійки W_0 .

Тоді вихідну міцність бетону залізобетонної стійки виразимо через формулу

$$R_0 = \frac{M_p}{W_0} \quad (3.1)$$

Де M_p – згинальний руйнівний момент, що прикладається до залізобетонної стійці, за якої відбувається руйнування, кН·м; W_0 – момент опору перерізу залізобетонної стійки, м³.

3.1.2 Особливості використання ультразвукового методу контролю міцності бетону залізобетонних опор

При появі дефектів у бетоні стійки опори змінюється час поширення ультразвукових коливань, що є показником для оцінки несучої здатності центрифугованих залізобетонних стійок опор. Залишкова міцність бетону залізобетонних стійок оцінюється за значенням часу поширення ультразвукових коливань, виміряного в поздовжньому та у поперечному напрямках щодо вертикальної осі стійки. У залежності від характеру розшарування бетону під експлуатаційними навантаженнями, ультразвуковий показник з часом може знижуватися в одному з напрямків, що свідчить про розвиток мікротріщини в іншому напрямку.

3.1.3 Методика перевірки достовірності результатів ультразвукового контролю бетону залізобетонних стійок

Для перевірки достовірності результатів ультразвукового контролю бетону залізобетонних стійок необхідно провести механічне випробування дефектної опори до руйнування стійки за схемою, показаною на рисунку 5.

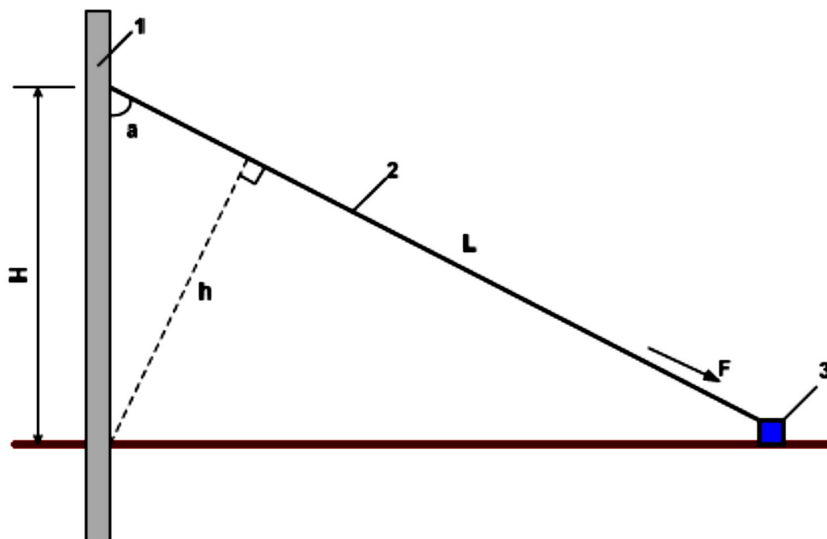


Рисунок 5 – Схема випробування залізобетонних стійок в польових умовах

На рисунку 5 прийнято такі позначення:

1 – залізобетонна стійка;

2 – тяговий трос завдовжки L ;

3 – лебідка;

H – висота від рівня землі до місця кріплення тягового троса (м);

h – плече сили, яке приймається під кутом 90° до тягового троса (м);

F – сила, що діє на залізобетонну стійку;

α – кут між залізобетонною стійкою та тяговим тросом.

Перед додатком згинального руйнівного навантаження, опору звільняють від проводів, грозозахисних тросів та ізолюючих підвісок. Траверси та стійку тросу не демонтують.

Висоту кріплення тягового троса на опорі вибирають згідно [25, 26] з обліком марки залізобетонної стійки. Тяговий трос приєднують до зафіксованій на одному місці лебідці через динамометр. Не рекомендується використовувати як тяговий механізм вантажний автомобіль, так як при його пересуванні змінюється кут між залізобетонною стійкою та тяговим тросом, що надалі призведе до похибок при розрахунках.

Після збирання схеми механічного випробування залізобетонної опори встановлюють всі габаритні розміри і обчислюють плече h сили F показаної на малюнку 3.3, необхідних для розрахунку згинального руйнівного навантаження. Поступовим плавним натягом тягового троса фіксують показання динамометра під час руйнування залізобетонної стійки.

Згинальний момент, що руйнує, що діє на залізобетонну стійку, визначається добутком сили F , що діє на залізобетонну стійку, на плече сили h за формулою

$$M_p = F \cdot h, \quad (3.2)$$

Плече сили h обчислюється рішенням прямокутного трикутника по теоремі Піфагора, тобто. множенням висоти від рівня землі до місця кріплення тягового

троса H на кут між залізобетонною стійкою та тяговим тросом a з наступного виразу

$$h = H \cdot \sin(\arccos \frac{H}{L}), \quad (3.3)$$

Підставивши вирази (3.3) (3.2), формула визначення згинального руйнівного моменту в польових умовах набуде наступного вигляду

$$M_p = F \cdot H \cdot \sin(\arccos \frac{H}{L}), \quad (3.4)$$

Отриманий результат звіряють із результатом діагностики, яка знаходиться за формулою

$$M_p = (C - K_c) \cdot M_{пр}$$

3.2 Оцінка технічного стану проводів та грозозахисних тросів

Відповідно до [31] обстеження проводів та грозозахисних тросів виконується на однорідних ділянках, що становлять не більше 10% від загальної довжини ПЛ. Повне обстеження проводів та грозозахисних тросів виконати неможливо режимів мереж, так як, потрібно тривале відключення ПЛ. Відповідно оцінка технічного стану проводів і грозозахисних тросів однорідним ділянкам ПЛ та за вибірковими зразками, демонтованими з ПЛ. Під час обстеження здійснюється перевірка обриву жил, втрати перерізу через корозійного зносу проводів та грозозахисних тросів.

За провідниковим компонентом встановлені такі критичні значення параметрів:

1) відповідно до [31] розривне зусилля проводів має бути не менше 95% від розрахункових властивостей проводів, тобто, монтаж проводів допускається при зниженні розривного зусилля до 5%;

2) згідно з [29] допускається зменшення поперечного перерізу проводів та грозозахисних тросів до 34% при обриві дротів;

3) аварійна втрата перерізу сталевого сердечника проводів та грозозахисних тросів становить 20% [33].

Виходячи з названих значень за параметр фактичного стану приймемо відносну втрату міцності сталевго осердя дроту, а критичне значення приймемо рівним 10% при досягненні передаварійного стану згідно **рисунку 1.2**.

Для грозозахисного троса приймемо втрату його перерізу, а критичний значення приймемо рівним 10% при досягненні передаварійного стану. Перевірку достовірності результатів магнітної дефектоскопії можна виконати з механічного випробування дротів, тобто. з розривного зусилля багатодротяного сталелеюміневого дроту, наведеному в [31].

3.3 Методика визначення залишкового ресурсу повітряних ліній електропередачі на залізобетонних опорах

3.3.1 Характеристика випадкового процесу зміни стану елементів повітряних ліній електропередачі

Можливість прогнозування залишкового ресурсу забезпечується при одночасної наявності наступних умов [34]:

- 1) відомі параметри, що визначають фактичний стан конструкції;
- 2) відомі критерії граничного стану конструкції;
- 3) є можливість періодичного (або безперервного) контролю значень технічного стану конструкції

Параметр фактичного стану контролюється у процесі експлуатації ПЛ і описується якісними та кількісними ознаками. За параметр фактичного стану приймають пошкодження, дефект чи несправність, що змінюється у процесі експлуатації, чисельні значення виходять за поріг, встановлений нормативно-технічної документацією.

Таблиця 3.2 – Характеристика параметра фактичного стану повітряної лінії

Категорія стану	Рівень працездатності	Залізобетонні стійки: Коефіцієнт стану бетону K_c	Відносна втрата міцності дроту, %. Втрати перерізу грозозахисного троса, %
Перша категорія	Працездатний стан	$0 \leq x_{\phi 1} \leq 0,3$	$0 \leq x_{\phi 1} \leq 5$
Друга категорія	Критичний стан	$0,3 \leq x_{\phi 2} \leq 0,6$	$5 \leq x_{\phi 2} \leq 10$
Третя категорія	Граничний стан	$x_{\phi 3} > 0,6$	$x_{\phi 3} > 10$

3.3.2 Прогнозування залишкового ресурсу повітряних ліній електропередачі

Властивості функції густини ймовірностей розподілу випадкової напрацювання дозволяють прогнозувати середній час настання відмови ПЛ. Відмова не обов'язково веде до повної непрацездатності ПЛ. В цьому випадку доцільніше визначати ймовірно необхідні терміни ремонту ПЛ. Проведення ремонтних робіт оновлює ПЛ та є моментом переходу її з несправного стану у справний. Отже, з урахуванням дрейфу параметра фактичного стану можна отримати графік, який описує прогнозовану періодичність проведення ремонтів за зміни параметра фактичного стану.

При прогнозуванні залишкового ресурсу компонентів з урахуванням зміни параметра фактичного стану її елементів проведемо такі розрахунки для побудови графіка [35]:

- 1) визначимо середнє значення параметра фактичного стану елементів;
- 2) визначимо середнє напрацювання ПЛ на відмову;

- 3) визначимо інтенсивність зміни параметра фактичного стану
(для залізобетонних опор за нормальним законом розподілу, для
провідникового компонента згідно із законом розподілу Вейбулла);
- 4) визначимо траєкторію зміни параметра фактичного стану;
- 5) визначимо середнє значення параметра фактичного стану елементів з
урахуванням залишкового зносу, що визначається за наступною формулою

$$x_{ocmi} = x_{\phi 1} \cdot \frac{\sum n_0}{N} \cdot \frac{t_n - t_0}{t_0}$$

де $x_{\phi 1}$ - фактичне початкове середнє значення фактичного параметра стану
на момент обстеження;

n_0 – кількість дефектних елементів на даний момент обстеження;

N – загальна кількість елементів на ПЛ;

t_n - прогнозований час при досягненні параметра фактичного стану до
граничного значення;

t_0 – час проведення обстеження.

6) визначимо щільність розподілу ймовірностей прогнозованих
напрацювань;

7) визначимо період проведення ремонтів чи реконструкції з найвищим
пікам щільності розподілу по кожному дрейфу параметра фактичного стану.

3.3.3 Розрахунок прогнозування залишкового ресурсу провідникового компонента

Як правило, в залежності від дефекту ремонт проводів виконується
установкою ремонтних затискачів або вставкою дроту певної довжини. Ці
ремonti не продовжують ресурс дротів. Суцільна заміна проводів на великих
ділянках ПЛ у період експлуатації зазвичай не проводиться. Тому при

прогнозуванні їхнього залишкового ресурсу не розглядається проведення ремонту до періоду реконструкції.

На Л-2540 встановлено провід АС 300/39, у якого відношення площі перерізу алюмінієвих жил до площі перерізу сталевого осердя становить 7,81. За результатами обстеження максимальна втрата перерізу становила 11,8%. Тоді відносна втрата міцності згідно з **рисунком 6.** становитиме 5,8% (фактична міцність склала 2210 Н/мм² від номінальної міцності 2346 Н/мм²).

Характер зміни параметра фактичного стану дротів визначається аналогічно. За отриманими результатами виробляють побудову графіка, наведеного на Рисунку 6.

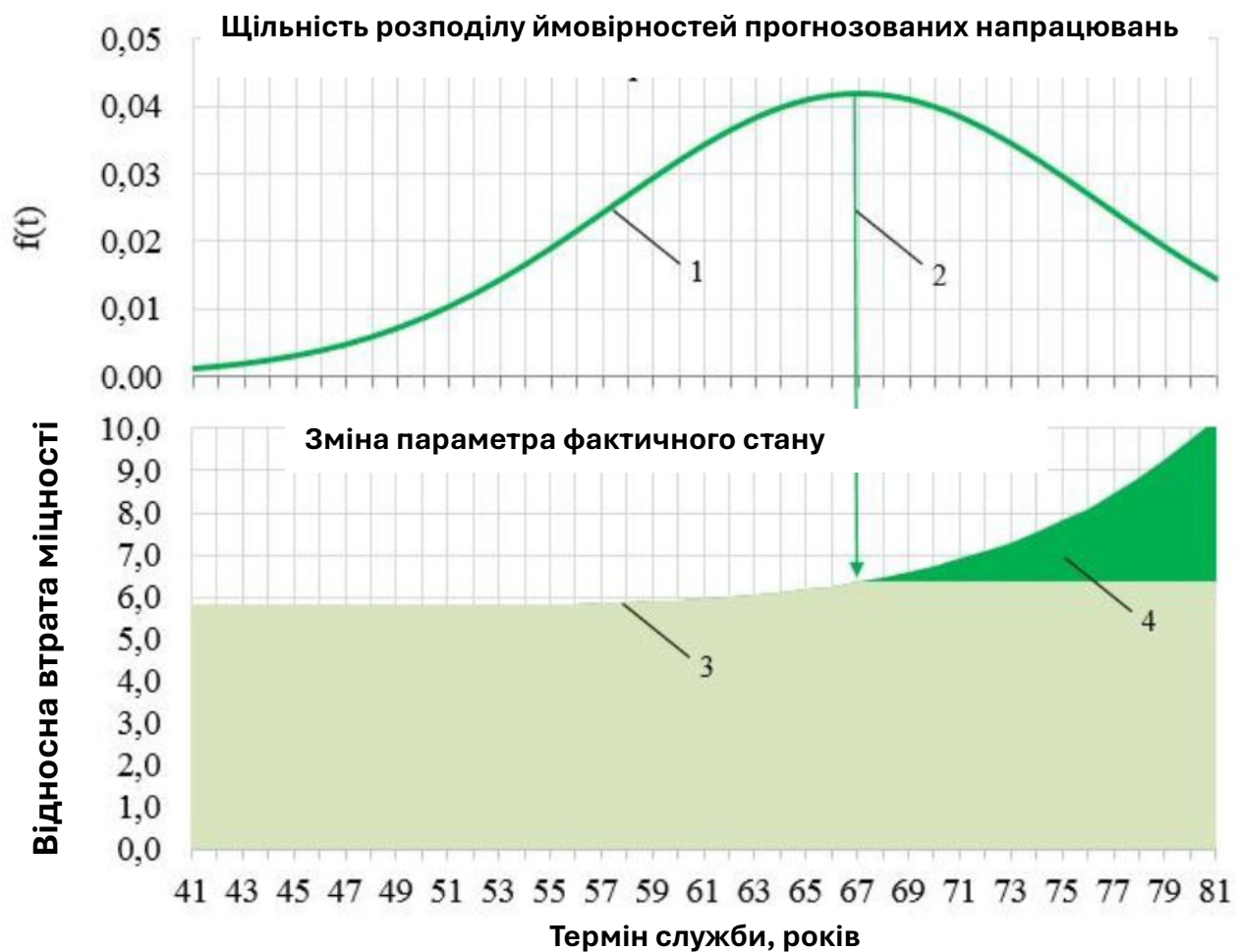


Рисунок 6. – Графік визначення залишкового ресурсу дроту Л-2540

За розрахунковими даними залишковий ресурс дроту становив 81 рік.

На рисунку 6. прийняті такі позначення:

1 – щільність розподілу ймовірностей прогнозованих напрацювань для реконструкції;

2 – проекція піку густини розподілу на траєкторію дрейфу параметра фактичного стану, що визначає початок реконструкції;

3 – траєкторія дрейфу параметра фактичного стану для реконструкції;

4 – період проведення реконструкції.

Отже, при терміні служби 67 років, що відповідає піку щільності розподілу ймовірностей, необхідно розпочати повну заміну дроту Л-2540. Зарубіжними дослідженнями [115] встановлено, що через втому металу та його корозії термін служби проводів обмежено 67-77 роками.

За розрахунковими даними залишковий ресурс дроту становив 81 рік. Отже, при терміні служби 67 років, що відповідає піку щільності розподілу ймовірностей, необхідно розпочати повну заміну дроту Л-2540. Зарубіжними дослідженнями [36] встановлено, що через втому металу та його корозії термін служби проводів обмежено 67-77 роками. Ремонт грозозахисних тросів також виконується установкою ремонтних затискачів або вставкою троса певної довжини, які не продовжують їх ресурс. Аналогічно проводу під час прогнозування залишкового ресурсу грозозахисних тросів не розглядається проведення ремонту до періоду реконструкції.

На Л-2540 встановлено грозозахисний трос ТК-11. За результатами обстеження максимальна втрата перерізу становила 4,8% (фактичний переріз становило 69,45 мм² від номінального перерізу 72,95 мм²).

Характер зміни параметра фактичного стану грозозахисного троса визначається аналогічно. За отриманими результатами виробляють побудова графіка, наведеного на Рисунку 7.

На Рисунку 7. прийняті такі позначення:

1 – щільність розподілу ймовірностей прогнозованих напрацювань для реконструкції;

2 – проекція піку густини розподілу на траєкторію дрейфу параметра фактичного стану, що визначає початок реконструкції;

3 – траєкторія дрейфу параметра фактичного стану для реконструкції;

4 – період проведення реконструкції.

За розрахунковими даними залишковий ресурс грозозахисного троса склав 80 років. Отже, при терміні служби 66 років, що відповідає піку щільності розподілу ймовірностей, необхідно розпочати повну заміну грозозахисного троса Л-2540.

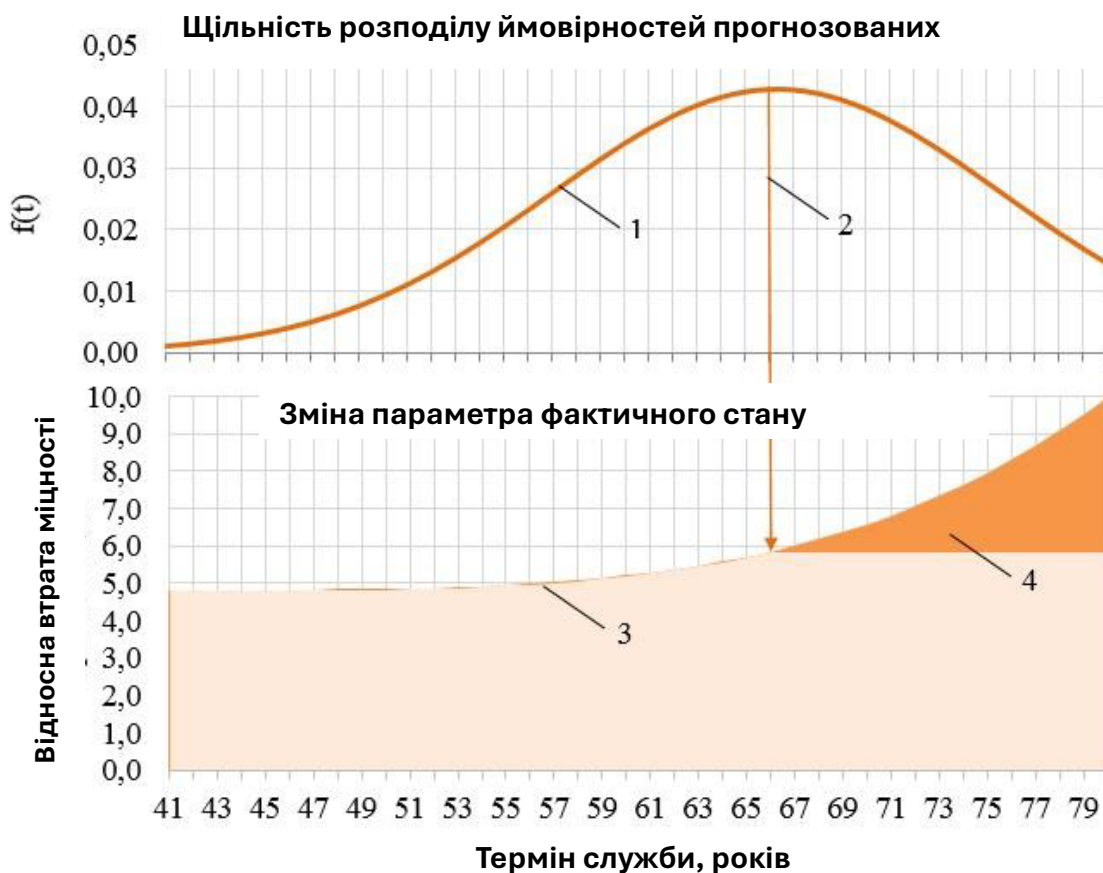


Рисунок 7. – Графік визначення залишкового ресурсу грозозахисного троса Л-2540

Висновки по розділу

В розділі розглянуто: оцінка технічного стану залізобетонних опор, оцінка технічного стану проводів та грозозахисних тросів, методика визначення залишкового ресурсу повітряних ліній електропередачі на залізобетонних опорах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі поставлених у роботі та вирішених завдань щодо структурної надійності електроенергетичних систем щодо оцінки залишкового ресурсу ПЛ отримані такі результати:

- 1 Запропоновано групування елементів ПЛ за трьома компонентами (опорний, ізолюючий та провідниковий). Компонентна структура ПЛ зручна для планування її технічного обслуговування та ремонту з використанням автоматизованих систем керування виробничими активами. Дана структура дозволяє оцінювати залишковий ресурс та розрахувати фізичний знос ПЛ загалом.
- 2 Аналіз відмов ПЛ АТ «KEGOC» за період 1999-2016 років. показав, що відмови відбувалися через пошкодження наступних елементів:
 - ізолюючі підвіски (42%);
 - дроти (20%);
 - стійка опори (17%);
 - грозозахисні троси (17%);
 - анкерні вузли кріплення тросових відтяжок опор (4%).
- 3 За час експлуатації залізобетонних опор відбувається зниження коефіцієнта безпеки через насичення бетону мікротріщинами, про що свідчать результати діагностування. Запропонований у роботі коефіцієнт запасу міцності бетону дозволяє визначити наближену фактичну міцність бетону залізобетонної стійки опор. Запропонований

коефіцієнт стану бетону дозволяє моделювати та прогнозувати залишковий ресурс центрифугованих залізобетонних стійок опор.

- 4 Ультразвуковий метод не можна поширювати на випадки оцінки несучої здатності залізобетонних стійок опор, коли зниження їхньої несучої здатності відбувається внаслідок корозії арматури. Для запобігання руйнуванню залізобетонних конструкцій внаслідок корозії арматури необхідно застосування неруйнівних методів контролю, що дозволяють діагностувати корозію на ранніх стадіях або до початку.
- 5 Прогнозування залишкового ресурсу ПЛ забезпечується за відомого параметр фактичного стану та критерії критичного стану елемента. За параметр фактичного стану прийнято:
 - коефіцієнт стану бетону для залізобетонних опор;
 - відносна втрата міцності для дротів;
 - втрата перерізу для грозозахисних тросів.
- 6 Для визначення термінів реконструкції ПЛ необхідно виконати зіставлення варіантів за кожним компонентом. Термін реконструкції ПЛ визначають за найгіршим варіантом компонентів або за іншими сценаріями, оцінюючи витрати на ремонти, що проводяться.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4/section-2/section-2/2-2>
2. СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576:2005 Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільних мереж напругою 0,38-20 кВ з повітряними лініями електропередачі. Настанова
https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68347
3. П. П. Рожков, С. Е. Рожкова КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з дисципліни «НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ» ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА <https://core.ac.uk/download/pdf/83144125.pdf>
4. ДБН В.2.6163:2010. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну СНиП П2381* окрім розділів 15*–19, СНиП П1875 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.0187 у час тині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78–4.134 ; чинні від 2011–12–01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с.
5. Шевченка, Н.Ю. Підвищення надійності реконструйованих повітряних ліній електропередачі /Н.Ю. Шевченка, Ю.В. Лебедєва, К.М. Бахтіярова // Повітряні лінії. - 2012. - №3. - С. 11-19.
6. ДСТУ 8647:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відмов. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93147

7. Гунгер Ю.Р. Діагностика опор та фундаментів повітряних ліній. Сучасні методи. Гунгер, В. Чернів // Новини електротехніки. – 2006. – №2 (38). – С. 134-136.
8. Горда О.В., к.т.н., доц., Пузько О.О., асп., КНУБА, м. Київ
ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІЖНИХ ДЕФЕКТІВ НА ЦИФРОВОМУ
ЗОБРАЖЕННІ ДЕФЕКТУ ТИПУ «ТРИЩИНА» Нові технології в
будівництві • № 30 • 2016
9. О.М. БОЛОТСЬКИХ, І.І. КОБЗАР, В.А. ПАНЧЕНКО, кандидати
технічних наук. Харківська національна академія міського господарства
ОБСТЕЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ
https://eprints.kname.edu.ua/2612/1/%D0%91%D0%9E%D0%9B%D0%9E%D0%A2%D0%A1%D0%9A%D0%98%D0%A5_%D0%9E.%D0%9D..pdf
10. Методи обстеження корозійного стану арматури ЗБК <https://intron-set.com.ua/metody-obsledovaniya-korrozionnogo-sostoyaniya-armatury-zhbk/>
11. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОННОГО ЗАХИСНОГО
ШАРУ В УМОВАХ АТМОСФЕРНИХ КЛІМАТИЧНИХ ВПЛИВІВ
<http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/1456/1/dis.Tytiuk.pdf>
12. Самігуллін Г.Х., Султанов М.М. Визначення залишкового ресурсу
промислових будівель і споруд нафтогазопереробних підприємств. –
2011. – №2. – С. 167-175.
13. Чернявский, В.Л. Ресурсне забезпечення адаптивності залізобетону /В.Л.
Чернявский, В.В. Галат, Ю.Б. Гиль, Ю.А. Спирин // ISSN 1814-3296.
Вісник Донбаскої національної академії будівництва і архітектури. –
2010. – №5 (85). –С. 346-352.
14. https://unece.org/DAM/env/documents/2015/WAT/12Dec_03-04_Almaty/6.10.15._%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B8_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8.pdf

15. Дубровін В.І., Клименко В.А. Методи оцінки залишкового ресурсу продукції (огляд) // ISSN 1028-9763. Математичні машини і системи.– 2010. – № 4. – С. 162-168.
16. file:///C:/Users/ivanp/OneDrive/%D0%A0%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%87%D0%B8%D0%B9%20%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%BB/%D0%94%D0%B8%D0%BF%D0%BB111111/Vsntume_2013_137_33.pdf
17. Болотин, В.В. Прогнозування ресурсу машин і конструкцій / В.В.Болотин. – М.: Машинобудування, 1984.- 312 с.
18. Боровик Г.М. Моделювання та прогнозування показників експлуатаційної надійності штучних споруд в умовах суворого клімату / Боровик Г.М. – Видавництво ДВСТУ, 2005. – 182 с.
19. Неклепаєв, Б.М. Електрична частина електростанцій та підстанцій / Б.М. Неклепаєв. - 2-ге вид., Перероб. та дод. - М: Вища школа, 1986. - 640 с.
20. Пазюк В.М., Токарчук О.А., Токарчук Д.М. Сучасний стан проблеми енергоефективності в світі та в Україні. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021. №1(112). С. 88 –99.
21. <https://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/nadezhnost-sistem-energetiki.html>
22. <https://forca.com.ua/knigi/navchannya/principy-rascheta-nadezhnosti-elektrosetevyh-konstrukcii.html>
23. <http://www.krioxolod.com.ua/ru/biblioteka/gosty-normativnye-akty/237-gost-17624-87-ultrazvukovoj-metod-opredeleniya-prochnosti.html>
24. Удосконалення експлуатаційного контролю корозійного стану підземної частини залізобетонних опор контактної мережі
<https://dissertation.com.ua/ru/node/905598>
25. ГОСТ 22687.1-85 Стійки конічні залізобетонні центрифуговані для опор високовольних ліній електропередач. Конструкція та розміри. - М.: Видавництво стандартів, 1987 - 74 с.
26. ГОСТ 22687.2-85 Стійки циліндричні залізобетонні центрифуговані для опор високовольних ліній електропередачі. Конструкція та розміри. - М.: Видавництво стандартів, 1987 - 39 с.

27. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ Конструкції будинків і споруд
ВИРОБИ БУДІВЕЛЬНІ БЕТОННІ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННІ ЗБІРНІ.
МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ НАВАНТАЖУВАННЯМ. ПРАВИЛА
ОЦІНКИ МІЦНОСТІ, ЖОРСТКОСТІ ТА ТРИЩИНО-СТІЙКОСТІ ДСТУ
Б В.2.6-7-95 (ГОСТ 8829-94)
28. Е. Д. Дьяков ПОВІТРЯНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ТЕКСТ
ЛЕКЦІЙ МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ХАРКІВСЬКА
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА с.16.
29. СОУ-Н ЕЕ 20.571:2007 Оцінка технічного стану повітряних ліній
електропередачі напругою від 35 кВ до 750 кВ. Частина 2. Конструктивні
елементи ліній
30. Волоховський, В.Ю. Магнітна дефектоскопія проводів та грозотросів
повітряних ліній електропередачі : Технологія, ефективність, проблеми /
В.Ю. Волоховський, О.М. Воронцов, В.В. Сухоруков, В.В. Цуканов, М.С.
Артем'єв, В.В. Чернець // Енергоексперт. – 2014. – №3. - С. 62-67.
31. ГОСТ 27.001-95 Система стандартів 'Надійність у техніці'. Основні
положення
32. ГОСТ 839-80 Провід неізолюваний для повітряних ліній
електропередачі. Технічні умови. - Видавництво стандартів, 2002.
33. ГІД 34.01.101-2009 Діючі галузеві нормативні документи з
експлуатації та ремонту електростанцій та мереж. Показчик (станом на
01.10.2022)
34. Надійність техніки. ОЦІНЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ
ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ (ТЕРМІНУ СЛУЖБИ) ТЕХНІЧНИХ
СИСТЕМ ДСТУ Київ ДП «УкрНДНЦ» 2015
35. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ КОНСТРУКЦІЙ
БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД ПІСЛЯ РІЗНИХ ВПЛИВІВ Гордіюк М. П.,
Семиног М. М., Голоднов О. І., Ткачук І. А., Іванов Б. В.
[file:///C:/Users/ivanp/Downloads/181523-Article%20Text-432175-1-10-
20200203.pdf](file:///C:/Users/ivanp/Downloads/181523-Article%20Text-432175-1-10-20200203.pdf)

36.Havard, D.G., Bellamy G., Buchan P.G., Ewing H.A., Horrocks
D.J.,Krishnasamy S.G., Motlis J., Yoshiki-Gravelsins K.S. AGED ACSR
CONDUCTORS, Part I – Testing Procedures for Conductors and Line Items //
IEEE Transactions on Power Delivery. 1992. - Vol. 7, No. 2.