

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЕСШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему:

«Забезпечення надійної роботи повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледних навантажень»

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу магістратури, групи ЕЕ-23М

ОПП «Електротехнічні системи

електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Артем КУЗНЕЦОВ

«_____» _____ 2024 р.

Керівник роботи к. т. н., доц.

_____ Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ

«_____» _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту 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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Петро ПЛІШКОВ

« » 2024 р.

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

Кузнецову Артему Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Забезпечення надійної роботи повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледних навантажень.

Ensuring reliable operation of overhead power lines under icy conditions»

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 3.12.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи забезпечення надійної роботи повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледних навантажень шляхом удосконалення технологічного процесу плавки ожеледі.

Завдання: 1. Оцінити вплив ожеледно-вітрових навантажень на повітряні лінії. 2. Проаналізувати практичні методи забезпечення надійної роботи ПЛ в умовах ожеледно-вітрових навантажень. 3. Проаналізувати параметри ожеледно-паморозевих відкладень. 4. Дослідити вплив метеорологічних умов і параметрів ПЛ на процеси ожеледоутворення. 5. Дослідити та удосконалити технологію процесу плавки ожеледі на ПЛ 10 кВ. 6. Розробити організаційні і технічні заходи з техніки безпеки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І. В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ. Актуальність дослідження</i>	<i>2.09 – 4.09</i>	
2	<i>Розділ 1. Огляд стану проблеми</i>	<i>5.09 – 20.09</i>	
3	<i>Розділ 2. Дослідження умов утворення ожеледно-паморозових відкладень на повітряних лініях</i>	<i>23.09 – 18.10</i>	
4	<i>Розділ 3. Дослідження та удосконалення процесу плавки ожеледі на повітряних лініях 10 кВ</i>	<i>21.10 – 8.11</i>	
5.	<i>Розділ 4. Охорона праці</i>	<i>11.11 – 15.11</i>	
6.	<i>Формулювання загальних висновків</i>	<i>18.11 – 22.11</i>	
7.	<i>Оформлення переліку використаних джерел</i>	<i>25.11 – 27.11</i>	
8.	<i>Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді слайдів</i>	<i>28.12 – 3.12</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника

Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ

(ім'я та прізвище)

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача

Артем КУЗНЕЦОВ

(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 91 с.; 27 рис.; 6 табл.; 29 джерел; 1 дод. на 11 с.

Кузнецов А. О. Забезпечення надійної роботи повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледних навантажень. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

Об’єкт дослідження – динаміка стану ожеледно-паморозевих відкладень на повітряних лініях електропередавання під впливом природних та техногенних факторів.

Предмет дослідження – технічні, організаційні та методичні підходи до удосконалення плавки ожеледі на повітряних лініях електропередавання.

Мета кваліфікаційної роботи – забезпечення надійної роботи повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледних навантажень шляхом удосконалення технологічного процесу плавки ожеледі.

У першому розділі оцінено вплив ожеледно-вітрових навантажень на повітряні лінії та виконано аналіз практичних методів їх захисту. Другий розділ присвячений обґрунтуванню та розробці дослідження умов утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній. У третьому розділі виконано дослідження та удосконалення організації плавки ожеледі на повітряних лініях 10 кВ. У додатку А проведено аналіз організаційних і технічних заходів з безпечної експлуатації електроустановок, виконано розрахунок заземлюючого пристрою трансформаторної підстанції.

Результати досліджень, проведених у даній магістерській роботі можуть бути використані операторами системи розподілу вдосконаленої моделі організації процесу плавки ожеледі при плануванні та розробці заходів із захисту повітряних ліній від наднормативних ожеледних навантажень.

Ключові слова: повітряна лінія, ожеледно-вітрова аварія, ожеледно-паморозеве відкладення, плавка ожеледі, надійність, заземлюючий пристрій.

ABSTRACT

Qualification work 91 p.; 27 fig.; 6 tabl.; 29 sources; 1 app. of 11 p.

Kuznetsov A. O. Ensuring reliable operation of overhead power lines under icy conditions. – Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrotechnical Systems of Electricity Consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

Object of the research – the dynamics of ice-sleet deposit conditions on overhead power transmission lines under the influence of natural and technogenic factors.

Subject of the research – technical, organizational, and methodological approaches to improving the ice melting process on overhead power transmission lines.

The purpose of the qualification work – ensuring the reliable operation of overhead power transmission lines under icing conditions by improving the technological process of ice melting.

In the first chapter, the impact of icing and wind loads on overhead lines is assessed, and practical methods for their protection are analyzed. The second chapter is devoted to the substantiation and development of the study of conditions for the formation of ice-sleet deposits on overhead line conductors. The third chapter focuses on researching and improving the organization of ice melting on 10 kV overhead lines. Appendix A includes an analysis of organizational and technical measures for the safe operation of electrical installations, as well as the calculation of a grounding device for a transformer substation.

The results of the research conducted in this master's thesis can be used by distribution system operators for the enhanced organizational model of ice melting processes when planning and developing measures to protect overhead lines from excessive icing loads.

Keywords: overhead power line, icing and wind-related outage, ice-frost deposit, ice melting, reliability, grounding device.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ	12
1.1. Вплив ожеледно-вітрових навантажень на повітряні лінії електропередавання.....	12
1.2. Оцінка надійності повітряних ліній 10 кВ	16
1.3. Практичні методи для забезпечення надійної роботи ПЛ в умовах ожеледно-вітрових навантажень.....	19
1.4. Постановка задач подальших досліджень	26
1.5. Висновки до розділу.....	27
2. ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ УТВОРЕННЯ ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИХ ВІДКЛАДЕНЬ НА ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ.....	28
2.1. Параметри ожеледно-паморозевих відкладень	28
2.2. Вплив метеорологічних умов на процес утворення ожеледно-паморозевих відкладень на ПЛ	33
2.3. Вплив параметрів повітряних ліній на процес утворення ОПВ.....	36
2.4. Характеристичні параметри ожеледних навантажень.....	41
2.4. Висновки до розділу.....	43
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВКИ ОЖЕЛЕДІ НА ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ 10 кВ.....	45
3.1. Схеми плавки ожеледі на ПЛ 10 кВ	45
3.2. Удосконалення організації проведення плавки ожеледі.....	58

3.3. Економічна ефективність впровадження удосконаленої плавки ожеледі.....	67
3.4. Висновки до розділу	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	81
А.1. Організаційні заходи з безпечної експлуатації електроустановок.....	81
А.2. Технічні заходи з безпечної експлуатації електроустановок	85
А.3. Розрахунок заземлюючого пристрою.....	87
А.4. Висновки	91

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВН – висока напруга;

ВРУ – відкрита розподільна установка;

ВТД – вольтдодатковий трансформатор;

ЗРУ – закрита розподільна установка;

КЗ – коротке замикання;

ОПВ – ожеледно-паморозеві відкладення;

ОСР – оператор системи розподілу;

ПЛ – повітряна лінія;

ПС – трансформаторна підстанція;

РУ – розподільна установка;

СМО – система масового обслуговування;

ВСТУП

Актуальність теми. Ожеледно-вітрові аварії становлять одну з найсерйозніших загроз для повітряних ліній електропередавання (ПЛ). Утворення ожеледних відкладень на проводах у поєднанні з сильними вітровим навантаженням створює складні умови для експлуатації ПЛ, що нерідко призводить до тяжких аварій із масовими обривами проводів, руйнуванням опор і, як наслідок – знеструмленням цілих районів електромереж. Серед повітряних ліній високої напруги (ВН) найменш надійними є ПЛ 6-10 кВ, які через свою значну протяжність і конструктивні особливості часто зазнають значних пошкоджень під час дії стихійних метеорологічних явищ [1-3]. У таких ситуаціях забезпечення надійного електропостачання стає складною технічною задачею, що вимагає впровадження обґрунтованих рішень.

На сьогодні запропоновано десятки способів захисту ПЛ від ожеледі, що базуються на електротеплових, механічних, хімічних, конструктивних методах. Проте практика показує, що найбільш економічно вигідним і дієвим заходом підвищення надійності ПЛ розподільних мереж в умовах ожеледних навантажень є плавка ожеледі на основі електротеплового методу [3-5]. Цей метод може реалізовуватися двома підходами: проведенням профілактичного прогріву, що запобігає обледенінню проводів і звільненню проводів від ожеледно-паморозевих відкладень, що вже утворилися шляхом їх плавлення

Статистичні дані доводять, що навіть за умов застосування сучасних заходів захисту ожеледно-вітрові аварії відбуваються із періодичністю 10-15 років [6]. Це вказує на необхідність дослідження методів організації систем плавки ожеледі на групах ПЛ одного району електромереж, що працюють у складних метеорологічних умовах. Важливим завданням є також оптимізація технічних аспектів впровадження цих систем для забезпечення їх максимальної ефективності.

Таким чином, проблема підвищення надійності ПЛ в умовах ожеледних навантажень є актуальною.

Мета роботи – забезпечення надійної роботи повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледних навантажень шляхом удосконалення технологічного процесу плавки ожеледі.

Для реалізації визначеної мети необхідно розв'язати наступні дослідницькі завдання:

- оцінити вплив ожеледно-вітрових навантажень на повітряні лінії;
- проаналізувати практичні методи забезпечення надійної роботи ПЛ в умовах ожеледно-вітрових навантажень;
- проаналізувати параметри ожеледно-паморозевих відкладень;
- дослідити вплив метеорологічних умов і параметрів ПЛ на процеси ожеледоутворення;
- дослідити та удосконалити технологію процесу плавки ожеледі на ПЛ 10 кВ;
- розробити організаційні і технічні заходи з техніки безпеки.

Об'єкт дослідження – динаміка стану ожеледно-паморозевих відкладень на повітряних лініях електропередавання під впливом природних та техногенних факторів.

Предмет дослідження – повітряні лінії електропередавання напругою 10 кВ, що функціонують в умовах ожеледно-вітрових навантажень.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети та реалізації визначених завдань дослідження було застосовано комплексну методологічну базу, що включає сукупність взаємодоповнюючих наукових методів дослідження, а саме: системного аналізу та синтезу, теоретичного узагальнення, формалізації, методи теорії масового обслуговування, компаративного аналізу, математичного моделювання, теорії електричних кіл.

Наукова цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- подальшого розвитку набула математична модель організації процесу плавки ожеледі, розроблена на основі теорії систем масового обслуговування, яка враховує регулювання процесу плавлення залежно від інтенсивності ожеледоутворення та критичного діаметра ожеледної муфти на проводах повітряних ліній електропередавання;

- подальшого розвитку набула математична модель оцінки економічної ефективності плавки ожеледі на повітряних лініях електропередачі, що дозволяє визначити доцільність інвестицій в удосконалення технологічного процесу та сприяє підвищенню енергетичної ефективності й надійності розподільчих мереж.

Практична цінність отриманих результатів для операторів системи розподілу полягає у можливості використання вдосконаленої моделі організації процесу плавки ожеледі при плануванні та розробці заходів із захисту повітряних ліній від наднормативних ожеледних навантажень. Яка дозволяє формалізувати й оптимізувати процес плавки ожеледі для групи ПЛ 10 кВ, які підключені до однієї підстанції, з урахуванням мінімізації витрат, пріоритетності обслуговування ліній та забезпечення надійності електропостачання.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Вплив ожеледно-вітрових навантажень на повітряні лінії електропередавання

Поєднання таких стихійних метеорологічних явищ, як ожеледь і вітер, становить найбільшу загрозу для повітряних ліній. Ці явища носять випадковий характер, можуть охоплювати одночасно територію декількох областей та призводити до значних матеріальних збитків [3, 7]. Наднормативні ожеледно-вітрові навантаження на ПЛ викликають ушкодження різного ступеня проводів, грозозахисних тросів, ізоляторів, деформації опор, а в особливо тяжких випадках і руйнування стояків електроопор (рис. 1.1), а отже і аварійного відключення ліній. Рівень стійкості ПЛ до таких явищ визначається їх залишковим запасом міцності, тривалістю експлуатації, конструктивними особливостями, якістю технічного обслуговування.



Рисунок 1.1 – Злам залізобетонної опори ПЛ 10 кВ

Проаналізуємо статистичні дані найбільших ожеледно-вітрових аварій, що сталися на території України за останні десятиліття [7].

У період з 9 по 18 січня 1985 року на території кількох районів Харківської області сталася масштабна ОВА. Її причиною стало інтенсивне ожеледоутворення на проводах ПЛ, внаслідок випадання переохолодженого дощу. Вага ожеледної муфти досягала 7 кг/м, а товщина її стінки – до 46 мм. Внаслідок цієї аварії було пошкоджено 1908 опор і обірвано 177 км проводів. Найбільших ушкоджень зазнали ПЛ 0,4–10 кВ.

У період з 3 по 4 грудня 1988 року в Одеській області сталося стихійне метеорологічне явище III рівня небезпеки. На проводах ПЛ утворилися надзвичайно складні відкладень ожеледі та паморозі діаметром 40–90 мм за умов штормового вітру зі швидкістю до 20 м/с. Це призвело до виникнення наднормативних механічних навантажень на ПЛ у межах 13,4–46,9 Н/м, що спричинило масштабні руйнування ПЛ. У результаті аварії загальний обсяг пошкоджень опор ПЛ різних класів напруги становив: 10342 шт. ПЛ 0,4 кВ; 17670 шт. ПЛ 6-10 кВ; 236 шт. ПЛ 35 кВ і 220 шт. ПЛ 110 кВ. Виявлені пошкодження ПЛ характеризувалися двома типовими ознаками: обривом проводів та руйнуванням залізобетонних опор на рівні ґрунту [7].

У цей же час, на Кримському півострові на ПЛ 10 кВ утворилися відкладення із діаметром ожеледної муфти до 100-120 мм, а разом із гребенеподібними бурульками, що злилися – до 150 мм і вагою до 7,2 кг/м. При цьому ожеледно-вітрове навантаження становило 36,3 Н/м при ожеледі та 54,5 Н/м з урахуванням бурульок. Унаслідок цієї аварії було пошкоджено опори ПЛ різних класів напруги: 991 шт. ПЛ 6-10 кВ, 807 шт. ПЛ 0,4 кВ і 13 опор на ПЛ 35 кВ. Ці пошкодження також супроводжували масові обриви проводів.

У період з 5 по 14 лютого 1996 року в ДАЕК «Крименерго» сталися масштабні пошкодження опор ПЛ 6-110 кВ спричинені дією екстремальних ожеледно-вітрових навантажень. Товщина стінки ожеледі варіювалась у межах 20-150 мм. Загальна кількість ушкоджених опор ПЛ різних класів напруги склала: 1563 шт. ПЛ 6-10 кВ; 21 шт. ПЛ 35 кВ і 1 шт. ПЛ 110 кВ.

У період з 27 по 28 листопада 2000 р. було зафіксоване сильне обледеніння проводів і грозозахисних тросів ПЛ [7]. У табл. 1.1 наведені дані про кількість ушкоджених опор у період з 26 по 30 листопада 2000 р. за класами напруги. Ця ожеледно-вітрова аварія стала найбільш масштабною природною катастрофою для електромереж України за останнє століття. Стихія спричинила пошкодження навіть на лінії надвисокої напруги. Зокрема, на ПЛ 750 кВ «Вінниця – Чорнобиль» були обірвані проводи.

У період з 11 по 12 листопада 2007 року сильний вітер із поривами понад 30 м/с у поєднанні з налипанням мокрого снігу та ожеледдю спричинив масові ушкодження та аварійні відключення ПЛ у низці областей. Унаслідок дії стихії та спрацювання релейного захисту були відключені ПЛ таких класів напруги: 110, 150 кВ – 34 лінії; 35 кВ – 84 лінії; 6-10 кВ – 1212 ліній. Це призвело до повного знеструмлення 12300 КТП 10(6)/0,4 кВ у 1578 населених пунктах.

У період з 28 грудня 2009 року по 10 січня 2010 року налипання мокрого снігу та утворення ожеледі на ПЛ, спричинили масштабні технологічні порушення в роботі 6044 об'єктів електромереж напругою 0,4–150 кВ, що належали 20-ти електропередавальних організацій України.

Таблиця 1.1 – Кількість ушкоджених опор ПЛ 26-30 листопада 2000 р, шт.

Назва енергопостачальної компанії	Класи напруги, кВ			
	110-154	35	10	0,4
Одесаобленерго	337	112	52860	112662
Вінницяобленерго	200	240	39225	405250
Кіровоградобленерго	20	40	12000	10000
Миколаївобленерго	2	260	4000	6000
Хмельницькобленерго	-	50	2674	3798
Черкасиобленерго	30	25	1809	2361
Житомиробленерго	-	-	492	472
Всього	589	727	113060	175818

Сильні дощі з мокрим снігом 20 листопада 2014 року за температури близько 0 °С спричинили утворення ОПВ на проводах ПЛ в Житомирській області. Товщина стінки складних відкладень варіювалася від 3 до 6 мм. Унаслідок дії стихії було пошкоджено 326 опор і зафіксовано 175 обривів проводів ПЛ 10 кВ, а також 87 опор і 1094 обриви проводів ПЛ 0,4 кВ.

На рис. 1.2 представлено графік частотності масштабних ожеледно-вітрових аварій. Він показує як змінювалися інтервали між цими подіями в часі. Видно, що після значних аварій у 1988 та 1996 роках частота подій знизилась, що можна свідчити про певні покращення в експлуатації ПЛ або зміні кліматичних умов. Однак поодинокі події, такі як аварії в 2007 та 2010 роках, вказують на те, що ризик залишається, хоча й відбувається рідше. Це підкреслює важливість підготовки до нечастих, але дуже руйнівних ОВА

Проведений аналіз статистичних даних показує, що ОВА є серйозним природним ризиком для електромереж України. У порівнянні з іншими ПЛ ВН найбільше пошкоджень припадає на ПЛ 6-10 кВ. У цілому, розподіл кількості ушкоджень за класами напруги демонструє суттєві відмінності, що пов'язані із конструктивними особливостями ліній та їхньою експлуатаційною роллю. Крім того, тяжкі аварії, які трапляються раз на 10-15 років, свідчать про циклічність екстремальних метеорологічних явищ, що потребує врахування в плануванні захисту ПЛ.

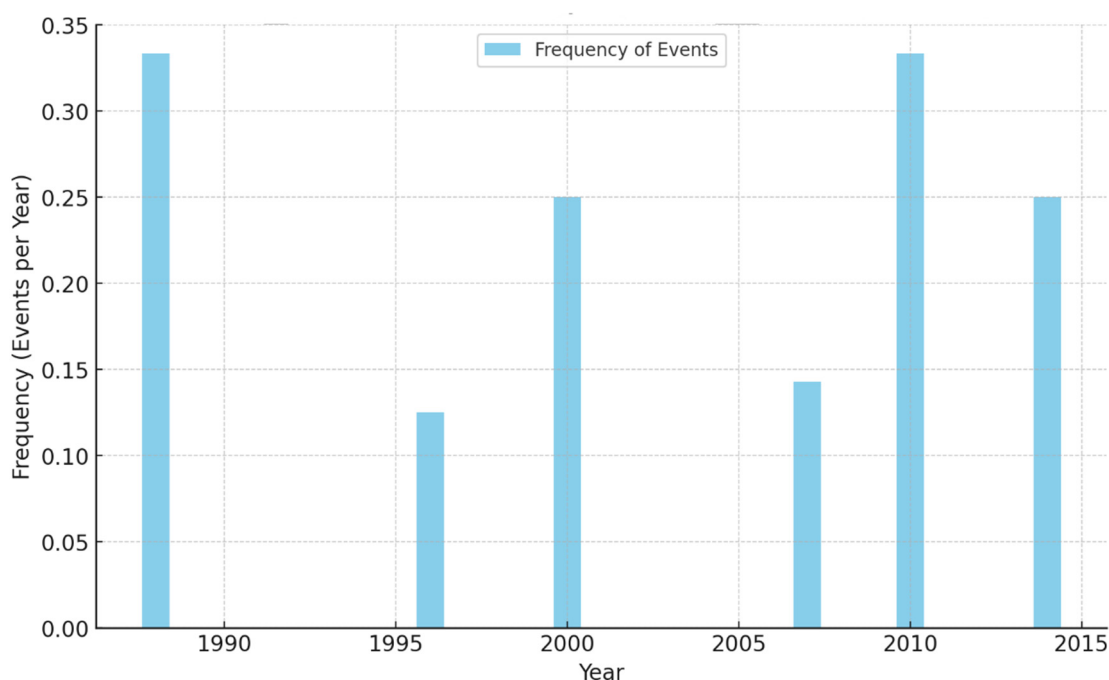


Рисунок 1.2 – Частотність масштабних ОВА на ПЛ 10 кВ у часі

Отже, серед ПЛ вищих класів напруги лінії 10 кВ виявляються найменш захищеним від дії ожеледно-паморозевих відкладень і тому потребують проведення додаткових заходів для підвищення надійності роботи. Тому важливим є проведення оцінки надійності цих ліній.

1.2 Оцінка надійності повітряних ліній 10 кВ

Найважливішою технічною вимогою до ПЛ та інших електроустановок є їхня надійність. Надійність означає, що система має стабільно працювати в заданому режимі при типових умовах експлуатації. Наприклад, лінія електропередачі повинна постійно передавати електроенергію споживачам з потрібною напругою та силою струму. Загальна надійність електричних мереж складається з двох частин:

- надійності кожного окремого елемента (проводу, ізоляторів, опор тощо)
- живучості всієї ПЛ - тобто її здатності продовжувати роботу навіть при виході з ладу окремих елементів.

Відмови електрообладнання неминучі навіть за умов високої якості обладнання та належної експлуатації. Це зумовлено об'єктивними випадковими чинниками та впливом екстремальних кліматичних умов, захист від яких потребував би економічно недоцільних запасів міцності.

Для розрахунку одиничних показників надійності використовуються дані про кількість і тривалість порушень нормального режиму роботи повітряних ліній електропередавання. Послідовність подій, що відбуваються по чергово одна за одною в певні моменти часу, створює потік подій. Ключовою характеристикою цього потоку є параметр потоку відмов, який розраховується на основі наявних статистичних даних [8]:

$$\omega(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{L_{\Sigma} \cdot \Delta t}, \quad (1.1)$$

де $n(t, t + \Delta t)$ – кількість відмов на інтервалі часу $[t, t + \Delta t]$;

L_{Σ} – сумарна довжина ПЛ, що мають термін експлуатації $T_e (t \leq T_e \leq t + \Delta t)$;

Δt – період усереднення, приймаємо $\Delta t = 1$ рік.

На рис. 1.3. представлені основні причини технологічних порушень у роботі ПЛ 10 кВ за один календарний рік у відсотках.

У табл. 1.2 наведено результати аналізу статистичних даних щодо технологічних порушень у роботі розподільних електричних мереж 10 кВ. Дані отримано від оператора системи розподілу центральноукраїнського регіону. Загальна протяжність ПЛ – 9373,6 км, які працюють у 4-му районі, за характеристичним значенням ожеледі [9] та не обладнані системами захисту від ожеледно-паморозевих відкладень.

На основі даних табл. 1.2 та формули (1.1) визначено фактичний загальний параметр потоку відмов для повітряних ліній, який становить $\omega = 0,126$ 1/рік·км, тоді як його проектне значення $\omega_{\text{пр}} = 0,076$ 1/рік·км [8] менше 1,6 рази.

Виявлене відхилення фактичного показника від проектних значень підкреслюють потребу у вдосконаленні та розробці методів для захисту ПЛ 6-10 кВ від технологічних порушень. З цією метою розглянемо основні технічні заходи, спрямовані на підвищення стійкості ПЛ до впливу стихійних метеорологічних явищ.

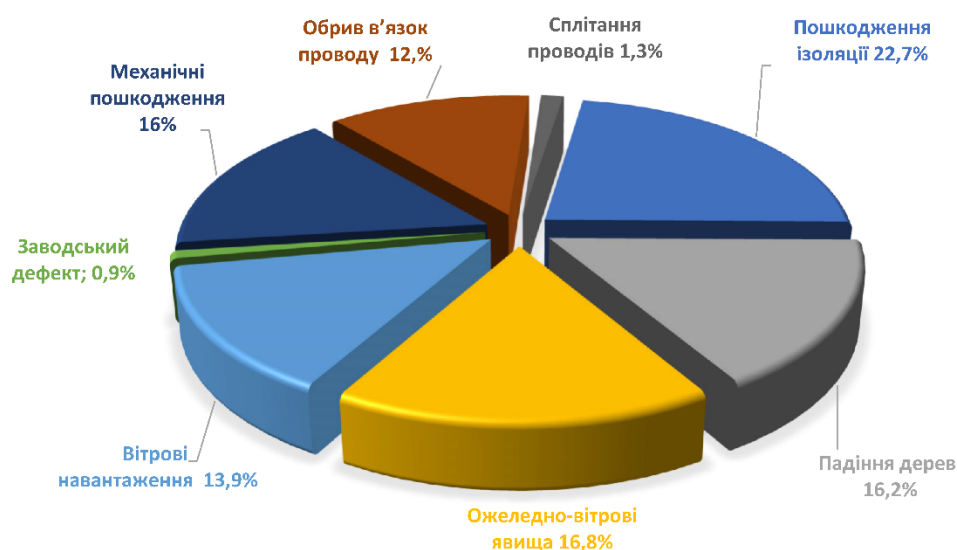


Рисунок 1.2 – Причини технологічних порушень у роботі ПЛ 6-10 кВ

Таблиця 1.2 – Кількість відмов повітряних ліній 10 кВ за один календарний рік

Причина технологічного порушення	Параметр		
	<i>n</i> , шт.	%	ω , 1/рік·км
Пошкодження ізоляції			
Грозові перенапруги	92	7,82	0,0098
Заводські дефекти	15	1,27	0,0016
Старіння ізоляції	129	10,96	0,0138
Сторонній вплив	31	2,63	0,0033
Всього	267	22,68	0,0285
Пошкодження проводу			
Вітрові навантаження	161	13,68	0,0155
Заводський дефект	9	0,76	0,0010
Механічні пошкодження	164	13,93	0,0175
Накид	5	0,42	0,0005
Обрив в'язок проводу	145	12,32	0,0172
Ожеледно-вітрові явища	175	14,87	0,0187
Падіння дерев	186	15,8	0,0198
Сплітання проводів	16	1,36	0,0017
Всього	861	73,15	0,0919
Пошкодження опор			
Вітрові навантаження	3	0,25	0,0003
Дефекти опор	1	0,08	0,0001
Механічні навантаження	6	0,51	0,0006
Наїзди транспорту	16	1,36	0,0017
Ожеледно-вітрові явища	23	1,95	0,0025
Всього	49	4,16	0,052
ВСЬОГО	1177	100	0,126

1.3 Практичні методи для забезпечення надійної роботи ПЛ в умовах ожеледно-вітрових навантажень

Практичні методи захисту ПЛ від ожеледно-паморозевих відкладень, які широко застосовуються в електричних мережах ОСР, можна поділити на три основні види залежно від принципу руйнування відкладень: електротеплові, механічні та конструктивні (рис. 1.3).

Електротепловий метод полягає у підвищенні температури проводу до рівня, за якого неможливе утворення ОПВ, або відбувається протоплювання його стінки та скидання, якщо воно вже сформоване. Використання нагріву за допомогою ефекту Джоуля для очищення проводів від льоду є одним із найдавніших способів. Цей метод був успішно випробуваний компанією Нової Англії під час шторму 1920 року [10]. Електротепловий метод включає в себе два різновиди: профілактичний прогрів і плавку ожеледі.

Профілактичний підігрів передбачає навмисне збільшення струмового навантаження у проводах ПЛ для підвищення їхньої температури вище 0°C . Це запобігає утворенню льоду на їх поверхні. Важливо здійснювати підігрів завчасно, до появи перших ознак обледеніння, орієнтуючись на погодні умови, що можуть сприяти його формуванню.

Існує два основні методи підвищення температури проводів ПЛ. Перший передбачає підвищення робочого струму лінії (проведення режимних заходів), а другий базується на створенні штучного короткого замикання.

Для розподільних мереж перший метод має обмежену ефективність через малі струми в них. Навіть при спробах перерозподілу навантаження між кількома ПЛ, це не завжди запобігає утворенню льоду, виключенням можуть бути магістральні ділянки. Більше того, на розвантажені ПЛ з необхідно захищати альтернативними методами від ожеледно-паморозевих відкладень.

Створення струмів штучного КЗ досягається шляхом закорочування ПЛ у попередньо визначеній точці з одного кінця та подачею напруги з іншого (рис. 1.4). Струм КЗ має бути достатніми для одночасного прогріву всіх трьох фаз ПЛ. Однак у цей період споживачі електроенергії залишаються без живлення [13].

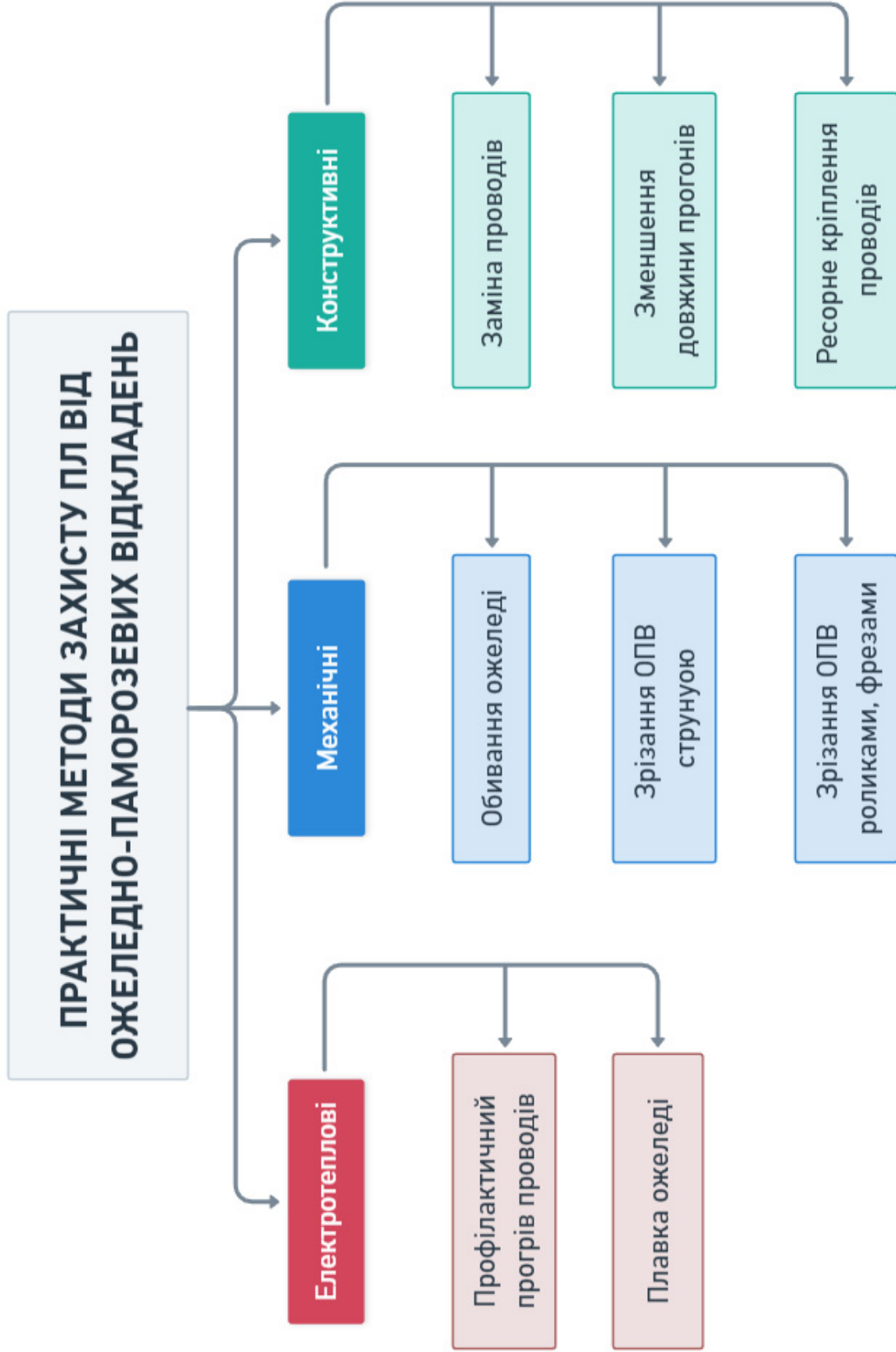


Рисунок 1.3 – Практичні методи захисту ПЛ від ОПВ

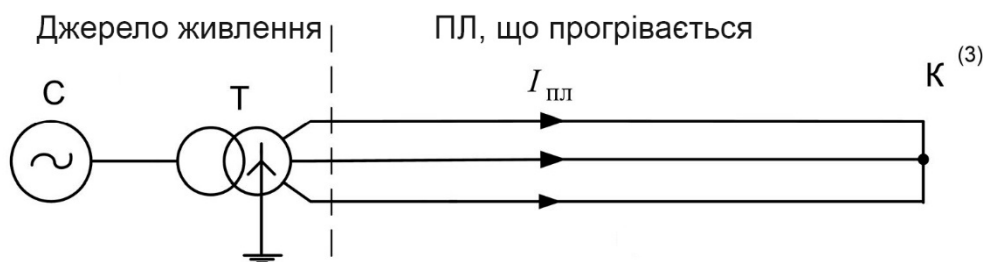


Рисунок 1.4 – Схема прогріву проводів ПЛ способом трифазного КЗ

Основною перевагою профілактичного прогріву є його вища енергоефективність порівняно з плавленням ожеледі, оскільки він потребує значно менших витрат енергії, ніж видалення вже сформованих ОПВ [12].

Принцип дії плавки ожеледі полягає в створенні таких режимів роботи електричної мережі, за яких через і ділянки ПЛ, що прогриваються протікають струми, що істотно перевищують номінальні. Це дозволяє ефективно й надійно звільняти ділянки ПЛ великої протяжності від небезпечних механічних навантажень. Цей метод має низку важливих переваг: він забезпечує швидке очищення проводів від льоду; якщо використовується плавка змінним струмом – то потребує установки мінімального додаткового обладнання; відзначається простотою схем реалізації та можливістю автоматизації процесу. Проте існують і деякі недоліки: при проведенні плавки ожеледі споживачі, в більшості випадків, втрачають живлення; ручне збирання схем плавлення потребує значних витрат часу та людських ресурсів, що може призвести до запізненого реагування та зниження ефективності. Автоматизація процесу плавлення ОПВ дозволяє вирішити останню проблему, однак вона збільшує загальну вартість методу

Більш складними є ситуації з коли відбувається інтенсивне обледеніння на території декількох районів електричних мереж сукупною тривалістю до тижня. У таких умовах часто виникає потреба в багаторазовому проведенні плавки ожеледі на одних і тих самих ПЛ, що значно знижує ефективність методу та підвищує ризик масштабних пошкоджень ліній.

Серед інших обмежень методу: залежність тривалості плавлення від метеорологічних умов, висока енергоємність процесу та необхідність завчасного виявлення початку утворення ожеледі.

Механічний метод полягає в тому, що при деформації проводу або прикладанні механічного зусилля до ОПВ відбувається порушення цілісності кристалічної структури льоду, що спричиняє утворення мікротріщин, їхнє поширення та врешті-решт – руйнування відкладень і їхнє осипання з проводів.. Це один із найдавніших способів боротьби з ОПВ, який спочатку полягав у тому, що робітники оббивали ожеледь з проводів за допомогою довгих жердин рис. 1.5. Очевидно, що підходи до звільнення проводу ПЛ за допомогою підходів приведених на рис. 1.5 можуть бути використані лише для ліній низької напруги, в яких проводи знаходяться порівняно близько до землі. Для високовольтних ПЛ розроблено декілька різновидів реалізації цього метода.

Компанія ВС Hydro розробила метод очищення проводів від снігу за допомогою вантажу вагою 90 кг, що кріпиться до 30-метрового канату. На канаті через 1 м зроблені вузли. Принцип очищення проводу такий: канат розміщується під проводом так, що цього нижня частина з вузлом звисає вертикально, а верхня



а)



б)

Рисунок 1.5 – Очищення проводу від ОПВ за допомогою [14]:

а) діелектричної жердини; б) діелектричного тросу



Рисунок 1.6 – Механічне видалення ожеледі з ПЛ
за допомогою гелікоптера [10]

частина піднята під кутом 30 градусів до проводу. При такому розташуванні вузли на мотузці періодично вдаряють по проводу, піднімають і опускають його, що призводить до поступового струшування снігу [14].

Ефективність такого способу очищення ПЛ набагато вища порівняно з традиційним методом за допомогою ізолюваних жердин і гелікоптера.

Другий підхід полягає у використанні автоматичного робота для механічного очищення ОПВ з проводу. Один із таких роботів, дистанційно керований транспортний засіб (ROV), був розроблений у Hydro-Quebec's Research Institute (IREQ) [15]. Він має радіус дії 1 км. У якості протиожеледного інструменту використаний комплект сталевих роликів (рис. 1.7).

Подібні роботи, ймовірно, доведеться встановлювати на ПЛ з гелікоптерів або з автовеж з ізолюваними платформами, оскільки обледенілі конструктивні елементи ПЛ не дозволяють електромонтерам встановити їх уручну. Також необхідно вирішити проблему перенесення цих робіт з одного прогону ПЛ на інший.

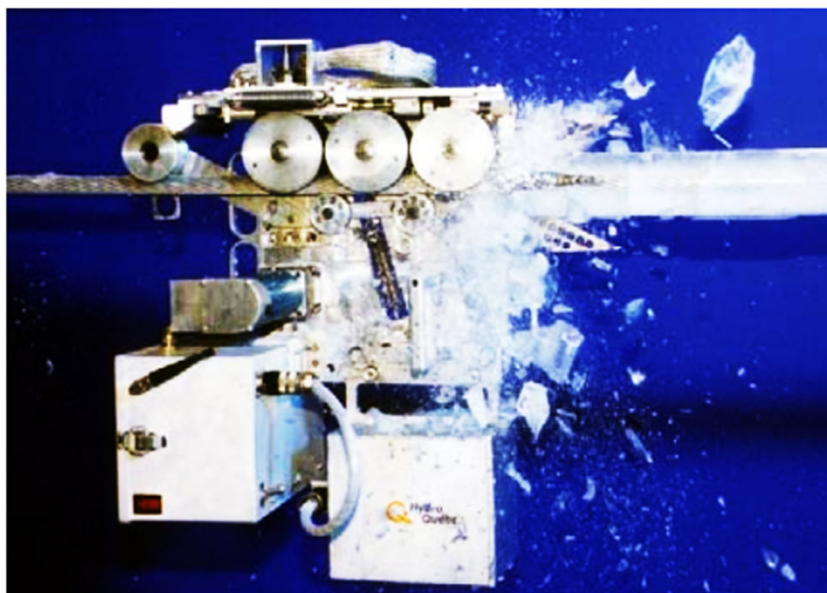


Рисунок 1.7 – Робот для видалення льоду ROV [15]

Дослідження показують, що механічні методи потребують у 100 000 разів менше енергії порівняно з тепловими методами для видалення льоду, що є їх головною перевагою [10].

Основними недоліками цього методу є високий ризик пошкодження проводів та тросів під час їх очищення, а у випадку застосування переносного обладнання (роботів, діелектричних жердин тощо) метод вимагає залучення великої кількості електротехнічного персоналу.

Конструктивні методи базуються на зміні конструкції елементів повітряної лінії та поділяються на такі: заміна або вдосконалення конструкції проводу, зменшення довжини прогонів, ресорне кріплення проводів. Удосконалення цих елементів спрямоване на підвищення механічної міцності ПЛ. Однак, забезпечення надійності розподільчих електричних мереж шляхом підвищення механічної міцності (наприклад, через збільшення перетину проводів, використання сталевалюмінієвих чи захищених проводів тощо) є складним завданням. Його вирішення залежить від правильного вибору розрахункових зовнішніх навантажень, зокрема ожеледі та вітру, їх поєднань, а також від точності оцінювання здатності елементів ПЛ протистояти дії екстремальних природних явищ.

Завищення механічної міцності конструктивних елементів ПЛ призводить до значних витрат ресурсів на будівництво або реконструкцію, тоді як зниження розрахункових навантажень спричиняє аварії, часто з тяжкими наслідками. У таких випадках порушується електропостачання великих регіонів, що спричиняє значні економічні збитки.

На сьогодні розроблено багато нових конструкцій проводів ПЛ та запропоновано підходи до вдосконалення тих, що перебувають в експлуатації [16]. Головною перевагою цього підходу є те, що ПЛ, наприклад, з удосконаленими проводами, не потребують додаткових захисних заходів від утворення ОПВ. Проте цей метод має також певні обмеження. По-перше, виробництво таких проводів потребує більшої кількості кольорових металів у порівнянні зі звичайними. По-друге, процес їх виготовлення технологічно складніший, що призводить до підвищення вартості. По-третє, такі проводи можна встановлювати лише на нових ПЛ або під час реконструкції існуючих.

Зменшення довжини прогонів ПЛ досягається додатковою установкою електропор, що забезпечує підвищення механічної стійкості лінії, зменшення впливу вітрових і ожеледно-паморозевих навантажень, а також сприяє зниженню провисання проводів, що покращує експлуатаційні характеристики лінії. Проте цей захід збільшує загальну вартість ПЛ через зростання витрат на матеріали, будівництво та обслуговування, потребує більше земельних відводів.

Ресорна в'язка проводів – це конструктивний метод кріплення, який використовує спеціальні амортизаційні елементи – ресори для рівномірного розподілу механічних навантажень. Таке кріплення проводу забезпечує більш гнучке кріплення, що ефективно поглинає динамічні впливи, знижує вібрації та захищає ізолятори від перевантажень, подовжуючи їх термін служби. Ресорна в'язка особливо актуальна для ПЛ з високими механічними навантаженнями або у зонах частих екстремальних погодних явищ, таких як сильний вітер чи ожеледь. Однак, цей метод має й певні недоліки: складність конструкції та монтажу, збільшення ваги лінії, а також вищу вартість виробництва і встановлення. Крім того, ресорні елементи можуть зношуватися, що потребує

регулярного обслуговування. Незважаючи на це, ресорна в'язка є ефективним рішенням для підвищення стійкості ПЛ до ожеледно-вітрових навантажень.

Отже, конструктивні методи підвищення надійності ПЛ, хоча й забезпечують значне покращення механічних характеристик та стійкості до екстремальних навантажень, але потребують істотних витрат на їх реалізацію. Це вимагає ретельного аналізу співвідношення витрат і отриманих переваг, а також оптимального вибору технічних рішень залежно від конкретних умов експлуатації.

1.4 Постановка задач подальших досліджень

Ожеледно-вітрові навантаження є одним із найбільших природних ризиків для надійності повітряних ліній, що зумовлює необхідність постійного вдосконалення підходів до їх захисту. Як показали попередні дослідження, серед доступних методів боротьби з ожеледно-паморозевими відкладеннями плавка ожеледі є найбільш ефективним. Однак впровадження цього методу потребує детального розгляду питань організації та оптимізації процесу плавки ожеледі, особливо в умовах інтенсивного ожеледоутворення на великих територіях.

Для досягнення цієї мети доцільно зосередитися на таких завданнях:

- оцінити вплив ожеледно-вітрових навантажень на повітряні лінії;
- проаналізувати практичні методи забезпечення надійної роботи ПЛ в умовах ожеледно-вітрових навантажень;
- проаналізувати параметри ожеледно-паморозевих відкладень;
- дослідити вплив метеорологічних умов і параметрів ПЛ на процеси ожеледоутворення;
- дослідити і удосконалити технологію процесу плавки ожеледі на ПЛ 10 кВ;
- розробити організаційні і технічні заходи з техніки безпеки.

Комплексний підхід до вирішення цих завдань дозволить удосконалити технологію процесу плавки ожеледі, що забезпечить підвищення стійкості розподільних мереж до екстремальних метеорологічних умов. Впровадження цих рішень сприятиме мінімізації аварійності ПЛ та зниженню витрат на відновлення енергопостачання після ожеледно-вітрових навантажень.

1.5 Висновки до розділу

1. Встановлено, що ожеледно-вітрові аварії є суттєвим природним ризиком для надійності електромереж України, найбільше ушкоджень припадає на ПЛ 6–10 кВ внаслідок їх значної протяжності та конструктивних особливостей, а аварії з масштабними наслідками трапляються приблизно раз на 10–15 років, що вказує на певну циклічність екстремальних метеорологічних явищ.

2. Визначено, що фактичний параметр потоку відмов для ПЛ 6-10 кВ у центральноукраїнському регіоні становить 0,126 1/рік·км, що перевищує проектне значення на 65%. Показано, що основними причинами відмов є вплив екстремальних кліматичних умов та відсутність систем захисту від ожеледно-паморозевих відкладень, що підтверджує потребу у вдосконаленні заходів для підвищення надійності розподільних мереж, особливо в умовах ожеледно-вітрових навантажень.

3. Встановлено, що практичні методи захисту ПЛ від ожеледно-паморозевих відкладень доцільно класифікувати як електротеплові, механічні та конструктивні, серед яких найбільш ефективною і легкою у технічній реалізації є плавка ожеледі, яка за умови правильного проведення забезпечує високу ефективність, однак її реалізація потребує оптимальної організації на групах взаємопов'язаних ліній особливо в умовах інтенсивного ожеледоутворення на великих територіях.

4. Намічено задачі подальших досліджень, що дозволить максимально ефективно вирішити питання організації процесів плавки ожеледі на повітряних лініях електропередавання, забезпечити надійну роботу мереж в умовах інтенсивного ожеледоутворення.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ УТВОРЕННЯ ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИХ ВІДКЛАДЕНЬ НА ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ

2.1 Параметри ожеледно-паморозевих відкладень

Ожеледно-паморозеві відкладення, що утворюються на проводах та грозозахисних тросах повітряних ліній класифікуються наступним чином:

- ожеледь (склоподібна або матова);
- зерниста (щільна) паморозь;
- кристалічна паморозь (осад подібний до інію);
- відкладення мокрого снігу;
- складне відкладення (різні суміші опадів).

Кристалічна паморозь має низьку густину $0,01-0,05 \text{ г/см}^3$, її відкладення не досягають значних розмірів, тому вона не чинить істотного впливу на ПЛ.

Для повітряних ліній небезпечними є ожеледь, зерниста паморозь, замерзлі відкладення мокрого снігу та складне відкладення, тому розглянемо їх детально.

Ожеледь – це шар прозорого чи не прозорого льоду скловидної будови високої щільності. Ожеледь може утворюватися внаслідок двох принципово відмінних процесів: сублімації та гравітаційного осідання крапель води.

Перший вид льоду виникає внаслідок прямого переходу водяної пари в твердий агрегатний стан і називається сублімаційним льодом. Сублімаційний лід утворюється за наявності переохолодженого туману та слабкого вітру. За цих умов краплі туману випаровуються поблизу кристалів, що сприяє подальшому їх сублімаційному росту. Характерною рисою сублімаційного льоду є яскраво виражена кристалічна структура та низька густина.

Другий вид льоду утворюється внаслідок осідання з наступним замерзанням на поверхні проводу переохолоджених крапель дощу або мряки. Цей процес має два різних механізми, залежно від розміру крапель. Малі краплі води замерзають миттєво при контакті з поверхнею проводу. Завдяки швидкому

замерзанню вони зберігають майже круглу форму. У процесі виділяється незначна кількість теплоти, яка швидко розсіюється в навколишнє середовище. Великі краплі після контакту з проводом вони спочатку розтікаються по його поверхні, а потім поступово замерзають, утворюючи прозорий шар льоду, схожий на скло (рис. 2.1). Цей процес відбувається повільніше через дві основні причини: великі краплі мають менше переохолодження порівняно з малими, замерзання великих крапель супроводжується виділенням більшої кількості теплоти, яка може підвищувати температуру плівки води до 0°C , уповільнюючи процес формування льоду. Великі краплі призводять до суцільного обледеніння проводу.

Густина скловидної ожеледі лежить у межах $-0,8-0,9 \text{ г/см}^3$ [17] тому вона є найбезпечнішим осадом для ПЛ. Молочна (матова) ожеледь має дещо меншу густину $-0,6 \text{ г/см}^3$. Ожеледь, що виникає внаслідок дощу, мряки може утворюватися за наступних метеорологічних параметрів [17]:

- температура повітря: від 0°C до -10°C ;
- швидкість вітру – будь-яка;
- розмір крапель – великий.



Рисунок 2.1 – Небезпечне відкладення ожеледі на проводі АС-50/8 з максимальним діаметром 30 мм

Зерниста паморозь – це снігоподібний осад із зернистою структурою, зазвичай матово-білого кольору (рис. 2.2). Вона утворюється шляхом осідання переохолоджених крапель туманів і мжички на навітряній стороні проводу ПЛ у вигляді щільного пір'я. Основну роль у формуванні цього осаду відіграє інерційне осідання, однак для ПЛ, що знаходяться під високою напругою також відіграють і електростатичні сили. Цей вид паморозі формується переважно в туманну, вітряну погоду при температурі повітря від -8°C до -3°C . За таких умов краплі туману перебувають у переохолодженому стані та миттєво замерзають при зіткненні з проводом, зберігаючи сферичну форму.

Найбільш інтенсивне утворення зернистої паморозі спостерігається за високої швидкості вітру, щільного туману та слабкого морозу ($-7\ldots-3^{\circ}\text{C}$). Її густина на території України коливається в межах $0,4\text{--}0,6\text{ г/см}^3$. При підвищенні температури повітря та збільшенні розміру крапель густина може зростати до $0,6\text{ г/см}^3$, а зовнішній вигляд паморозі стає схожим на мутну ожеледь.

Зерниста паморозь у поєднанні з сильним вітром часто призводить до обривів проводів, а іноді й до руйнування опор ПЛ.



Рисунок 2.2 – Кристалічна паморозь на ПЛ [14]

На рис. 2.3 представлено діапазони температури та швидкості вітру, що відповідають утворенню певного виду ожеледно-паморозевого відкладення.

Відкладення мокрого снігу – це шар налиплого снігу, що поступово утворюється у безвітряну погоду на верхній частині проводу ПЛ та одночасно сповзаючий до низу.

Відкладення мокрого снігу на проводах ПЛ може утворюватися двома способами: лише на верхній частині проводу (одностороннє) або, що трапляється частіше, по всій довжині кола. Це відкладення формується з деформованих мокрих сніжинок, між якими розташовуються краплі води. Завдяки таненню сніжинок та наявності водяних крапель такий сніг має високу адгезію і здатний утримуватися на тонких проводах.

Зазвичай, відкладення мокрого снігу утворюється при температурі повітря від 0 до $+1^{\circ}\text{C}$, при температурі понад $+1^{\circ}\text{C}$ процес росту сповільнюється або взагалі припиняється. Відкладення мокрого снігу найшвидше накопичуються в безвітряну погоду при інтенсивному снігопаді. Якщо після цього відбувається зниження температури повітря 0°C , то накопичений мокрий сніг на проводах ПЛ замерзає, утворюючи льодовий шар. Таким чином, утворюється небезпечне для ПЛ відкладення, оскільки воно створюють додаткове вітрове навантаження на проводи внаслідок збільшення його парусності.



Рисунок 2.3 – Залежність типу ожеледно-паморозевих відкладень від температури та швидкості вітру [17]

Змерзле відкладення мокрого снігу – це шар льоду, що утворюється внаслідок замерзання налиплого мокрого снігу. Форма таких відкладень на проводі ПЛ та їх структура залежать від динаміки температури, характеру опадів і, частково, від швидкості вітру. Якщо налипання мокрого снігу відбувалося за температури повітря близько $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$, то шар осаду буде рівномірним, склоподібного прозорого вигляду та дуже схожим на ожеледь. У разі випадіння мокрого снігу за температури, близької до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, відкладення має низьку щільність і нагадує сніговий шар. За безперервного випадіння снігу з одночасним зниженням температури повітря з позитивних до негативних значень структура відкладення стає вкрай неоднорідною: від прозорого льоду на поверхні проводу, до кристалічного снігу, який утворює верхній шар цього обледеніння. Через таку різноманітність у структурі щільність замерзлого мокрого снігу може значно коливатися – від $0,2$ до $0,6\text{ г/см}^3$.

Змерзле відкладення мокрого снігу вирізняється своєю стійкістю. Воно може довго утримуватися на проводах ПЛ навіть за сильного вітру. Через це такі відкладення є не менш небезпечними для повітряних ліній ніж ожеледь.

Під час процесу обледеніння проводів ПЛ дуже часто утворюються складні відкладення – суміші. Це є наслідком зміни метеорологічних умов під час процесу ожеледоутворення. Процес утворення суміші відбувається декілька етапів – спочатку на проводі ПЛ утворюється один вид відкладення, а потім – інший і т.д. Суміш – це поєднання різних видів ожеледних відкладень: зернистої паморозі на ожеледі, ожеледі на зернистій паморозі, кристалічної паморозі на замерлому відкладенні мокрого снігу, зернистої паморозі та утвореної на ній кристалічної паморозі на ожеледі тощо. Тому густина суміші коливається в досить широких межах $0,2\text{--}0,6\text{ г/см}^3$ і визначається типом переважаючого відкладення. Характерною особливістю сумішей є утворення відкладень зі значним діаметром (до 200 мм) і їхня здатність зберігатися на проводі впродовж декількох тижнів, що суттєво збільшує парусність проводів і за сильного вітру може призводити до їх обривів.

2.2 Вплив метеорологічних умов на процес утворення ожеледно-паморозевих відкладень на ПЛ

Температура повітря є визначальним фактором не лише у формуванні різних видів ОПВ, але й суттєво впливає на тривалість цих процесів. Зниження температури повітря під час утворення ожеледі призводить до довготривалого збереження льоду на проводах і грозозахисних тросах ПЛ. У результаті при появі вітру виникає вібрація та галоупування проводів, що призводить до появи на них розвинених і критичних дефектів.

Згідно [9], розрахункову температуру повітря під час дії вітру в разі ожеледі рекомендовано приймати -5°C . Ожеледь утворюється переважно за температури від 0 до -2°C ; у цьому ж діапазоні температур найчастіше спостерігається відкладення мокрого снігу. Зерниста паморозь може формуватися в двох діапазонах температури повітря: від 0 до -4°C і від -4 до -8°C . Складні відкладення переважно утворюються за температури від 0 до -4°C .

Повторюваність температури повітря під час обледеніння проводів ПЛ вказує на те, що кожен вид ОПВ утворюється в певному діапазоні температур. При цьому частота повторюваності температур для різних видів ожеледоутворення залежить від географічних особливостей району.

Температура повітря має значний вплив на густину ОПВ. Час замерзання переохолоджених крапель води різного розміру, які формують відкладення на об'єкті, визначається температурою поверхні цього об'єкта, температурою повітря та розміром самих крапель. Усі ці фактори впливають на структуру осаду, а отже, і на його густину.

При зниженні температури повітря від 0 до -5°C спостерігається зменшення густини атмосферних відкладень, але при подальшому охолодженні вона залишається майже сталою. Це явище пояснюється особливостями поведінки переохолоджених хмарних крапель із типовим радіусом $5\text{--}15\text{ мкм}$. За температур нижче -5°C краплі замерзають настільки швидко, що різниця в часі кристалізації, наприклад, між -10°C і -15°C стає практично непомітною.

Коли температура повітря знижується від 0 до -5°C , спостерігається зменшення густини атмосферних відкладень, але при подальшому охолодженні густина стабілізується і залишається сталою (рис. 2.4). Це явище пояснюється особливостями поведінки переохолоджених крапель хмар з типовим радіусом 5-15 мкм. За температур нижче -5°C вони замерзають настільки швидко, що час кристалізації, наприклад, при -10°C і -15°C стає фактично однаковим. Однак, для крапель значно більшого розміру різниця у часі кристалізації є суттєвою.

Густину зернистої паморозі для діапазону температур повітря $[-1; -16]$ можливо визначати за виразом:

$$\gamma(t_{\text{п}}) = \gamma_{-1} |t_{\text{п}}|^{-x}, \quad (2.1)$$

де γ_{-1} – густина відкладення при температурі -1°C ;

$t_{\text{п}}$ – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$;

x – показник степені.

Крім температури повітря, швидкість вітру також відіграє важливу роль у формуванні структури ОПВ. За певних умов він може сприяти злиттю дрібних крапель у великі, що забезпечує їх розтікання по поверхні проводу, або, навпаки, поділу великих крапель на дрібні.

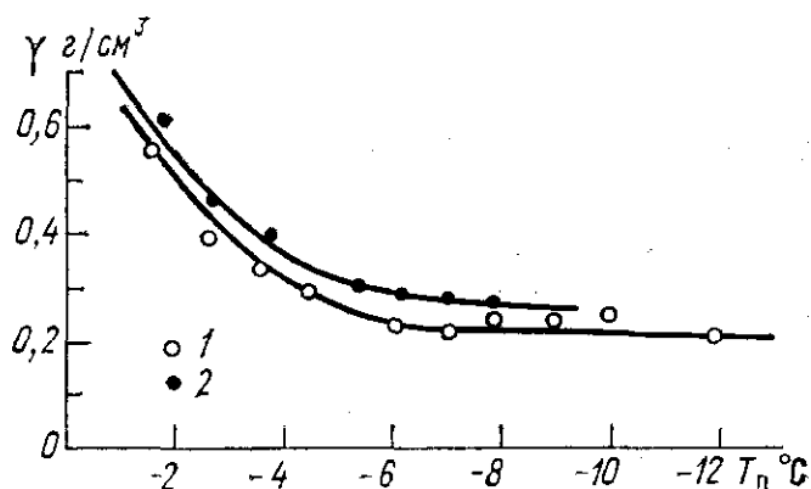


Рисунок 2.4 – Залежність густини ОПВ від температури повітря та швидкості вітру: 1) $v \leq 6 \text{ м/с}$; 2) $7 \leq v \leq 12 \text{ м/с}$;

Ожеледь у 30% випадків утворюється за швидкості вітру від 2 до 4 м/с, а зерниста паморозь за швидкостей вітру в межах від 1 до 8 м/с. Мокрий сніг і кристалічна паморозь зазвичай утворюються в умовах затишшя, тоді як складні відкладення, як і ожеледь, найчастіше спостерігаються при швидкості вітру від 2 до 4 м/с (34 %). Максимальні швидкості вітру на початку обледеніння проводів можуть досягати 24 м/с [17].

На основі проаналізованих параметрів ожеледно-паморозевих відкладень і метеорологічних умов їх утворення складено узагальнену таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Узагальнені метеорологічні умови утворення ОПВ та їх характеристики

Вид опаду	Температура повітря, °С	Швидкість вітру, м/с		Густина опаду, г/см ³
		aver.	max	
Ожеледь	0...-10	0-15	24	0,6 – 0,9
Зерниста паморозь	-3...-20	1-15	24	0,1 – 0,6
Суміш	0...-20	1-15	30	0,15 – 0,33
Мокрий сніг	-2...+1			0,3 – 0,6

продовження табл. 2.1.

Вид опаду	Атмосферне явище	Тривалість явища	Ступінь небезпеки для ПЛ
Ожеледь	мжичка, дощ, туман	години	найвищий
Зерниста паморозь	туман, мжичка	години	високий
Суміш	мжичка, дощ, крупа, мокрий сніг, туман	до кількох діб	середній
Мокрий сніг	налипаючий мокрий сніг	години	високий

2.3 Вплив параметрів повітряних ліній на процес утворення ОПВ

Параметри ПЛ суттєво впливають на особливості та обсяг утворення ожеледно-паморозевих відкладень, оскільки вони визначають умови взаємодії проводу з атмосферними опадами. До головних параметрів відносяться: висота розміщення проводів, закручування проводів, діаметр проводу, напрям вектора швидкості вітру відносно осі ПЛ і струм навантаження ПЛ.

Висота розташування проводів є важливим фактором: спостереження показують, що в діапазоні від 2 до 20 метрів маса ожеледних відкладень зростає приблизно в три рази.

Утворення ожеледно-паморозевих відкладень на одинарних проводах ПЛ вздовж прогону відбувається нерівномірно. На ділянках на відстані 5–10 м від ізоляторів стійкі відкладення ОПВ практично відсутні. Це пояснюється тим, що односторонні відкладення, які тут формуються, досягають розмірів 40–60 мм і відпадають під дією сили тяжіння та дії вітру. Ближче до середини прогону спостерігається перехід від односторонніх відкладень до утворення еліпсоїдних муфт, які більш рівномірно охоплюють провід. Найбільші розміри ОПВ утворюються саме в середині прогону, де вплив вітру є менш інтенсивним, а навантаження на провід, що може призводити до його провисання або пошкоджень.

Здатність проводів до закручування залежить від їхньої жорсткості, яка визначається матеріалом проводу, його конструкцією та діаметром. Менш жорсткі проводи легше піддаються закручуванню під дією зовнішніх навантажень. Першою фазою ожеледоутворення на проводах типу А, АС є нуклеація – осідання з навітряного боку крапель туману, морозі або мокрого снігу, що відбувається під час охолодження проводу нижче температури замерзання води 0°C (рис. 2.5, а). Наступна фаза – це акумуляція льоду. На початковоутвореному шарі льоду продовжують накопичуватися нові переохолоджені краплі води (рис. 2.5, б). Під дією вітру краплі води наносяться на провід з певного напрямку, що призводить до нерівномірного нарощування

льоду (з боку вітру товщина муфти буде більшою). Внаслідок дії сили гравітації нерівномірне ожеледне навантаження опускається та спричиняє поворот проводу. За цієї форми ожеледі ймовірність галопування проводів є найбільшою. Товщина стінки ожеледі на верхній частині проводу складає 1-3,5 мм.

Питоме ожеледне навантаження від несиметричного еліптичного осаду, Н/м:

$$P = 0,77 \cdot 10^{-2} \rho_{\text{опв}} D^2 - d_{\text{пр}}^2, \quad (2.2)$$

де $\rho_{\text{опв}}$ – густина ожеледно-паморозевого відкладення, кг/м³;

D – діаметр муфти ОПВ, мм:

$$D = d_{\text{пр}} + 2b, \quad (2.3)$$

b – товщина стінки ОПВ на проводі, м;

$d_{\text{пр}}$ – діаметр проводу, мм.

Якщо провід швидко нагріти, то ця одностороння ожеледь відпаде під дією власної ваги. За повільного нагріву момент сили тяжіння $G_{\text{ом}}$, що прикладений у центрі тяжіння перерізу ожеледної муфти $G_{\text{ом1}}$ відносно осі проводу О, викличе поворот ожеледної муфти (рис. 2.6). При цьому центр тяжіння $S_{\text{ом1}}$ зміщується в

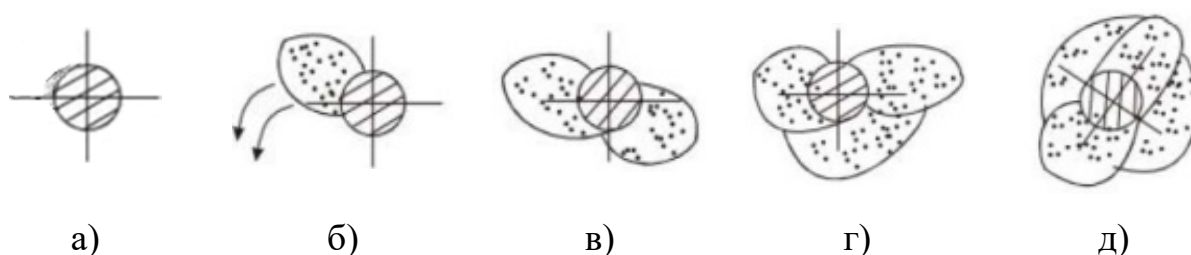


Рисунок 2.5 – Стадії формування ОПВ на проводі ПЛ [19]:

а) нуклеація (початкова);

б) - г) акумуляція;

д) стабілізація (зрілість муфти)

положення $C_{ом2}$, а також змінюється положення канавки, що проплавляється в ожеледно-паморозевому відкладенні з 1-1' на 2-2'.

Несиметричність форми ожеледно-паморозевих відкладень оцінюється за допомогою коефіцієнта несиметрії:

$$k_{нс} = \frac{b_{2y}}{b_{1y}}, \quad (2.4)$$

де b_{1y} – умовна товщина муфти з ОПВ, що еквівалентна за навантаженням циліндричній муфті;

b_{2y} – середня умовна товщина муфти з ОПВ між 1 та 2' (рис. 2.6).

Значення коефіцієнта несиметрії лежить у наступних межах:

- одностороння ожеледь на стадії нуклеації – $k_{нс} = 0,05 - 0,15$;

- ексцентричні ожеледні відкладення – $k_{нс} = 0,35 - 0,65$;

- несиметричні відкладення зернистої паморозі та суміші – $k_{нс} = 0,65 - 0,85$.

Якщо процес ожеледоутворення не переривати, то односторонні відкладення будуть утворюватися декілька разів кожен раз повертаючи провід

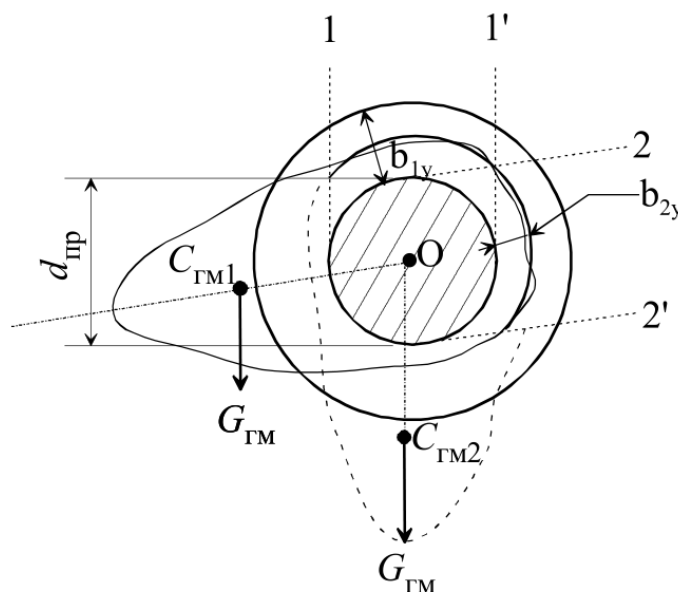


Рисунок 2.6 – Механіка ожеледної муфти на проводі

(рис. 2.5, в, г). Навіть при порівняно невеликих кутах закручування ($60-80^\circ$) переріз осаду стане овалоподібним (рис. 2.5, г).

Після чого настає фаза стабілізації (зрілість муфти), коли навколо проводу утворюється майже рівномірна ожеледна муфта з перерізом відкладень близьким до круга. (рис. 2.5, д). При цьому кут пороту проводу складає близько 180° . Ця муфта продовжує наростати впродовж усього періоду обледеніння. На практиці, кут закручування багатожильних проводів в середині прогону ПЛ може досягати $400-500^\circ$.

Маса такого циліндричного відкладення складе

$$m = \rho_{\text{опв}} \frac{\pi}{4} (D^2 - d_{\text{пр}}^2) \cdot l_{\text{опв}}, \quad (2.5)$$

$l_{\text{опв}}$ – ділянка проводу з ОПВ, м.

Питоме навантаження циліндричного відкладення, Н/м

$$P = 0,77 \cdot 10^{-2} \rho_{\text{опв}} (D_{\text{б}} D_{\text{м}} - d_{\text{пр}}^2), \quad (2.6)$$

де $D_{\text{б}}, D_{\text{м}}$ – діаметри ОПВ, відповідно, більший та менший.

Відношення $D_{\text{б}}/D_{\text{м}}$ визначається географічним районом утворення ОПВ і особливостями самого процесу утворення ОПВ. Зазвичай приймається, що для ожеледі $D_{\text{б}}/D_{\text{м}} = 0,6$, а для зернистої паморозі та суміші – $D_{\text{б}}/D_{\text{м}} = 0,75$.

Закручування проводу не лише сприяє утворенню стійкої муфти, але й значно подовжує період утримання льодових відкладень. У разі тривалого процесу з чергуванням фаз ожеледоутворення з повторюваними перервами можливе утворення нових відкладень на вже існуючих. На проводах, схильних до закручування, крижані відкладення можуть накопичуватися протягом тривалого часу (до місяця), досягаючи значної маси – $10-20$ кг/м і більше. Тому, закручування проводів має значний вплив як на форму, так і на масу ОПВ, що може суттєво впливати на їх механічну стійкість.

Зовнішній діаметр проводів також значно впливає на формування ОПВ. Залежність маси відкладень від діаметра проводу $d_{\text{пр}}$ має нелінійний характер: маса зростає до максимуму при $d_{\text{пр}} = 3\text{--}8$ см, а потім поступово зменшується.

Зростання маси ожеледних відкладень також залежить від швидкості вітру, наприклад, при швидкості вітру до 10 м/с для проводу діаметром 10 мм підвищення складає 40%, при швидкості вітру більше 10 м/с – 70%. Крім того, збільшення діаметра проводу сприяє підвищенню густини відкладень, наприклад, при збільшенні діаметра проводу з 0,5 см до 4,0 см густина зростає в середньому на 60%.

Якщо вектор швидкості вітру відносно осі проводу направлений під $\angle \alpha$, то маса ОПВ буде пропорційна $\sin \alpha$. Теоретично, при $\alpha \rightarrow 0$, маса відкладень також повинна наближатися до нуля. Однак, через пульсацію вектора швидкості вітру та турбулентний характер потоків, які приносять переохолоджені краплі, повної відсутності відкладень не спостерігалось. На практиці, за малих значень кута α маса відкладень зменшується на 60–80%, а самі відкладення мають пористу, структуру, що суттєво знижує їх густину: для ожеледі – на 80%, для сумішей і зернистої паморозі – на 65–70%.

Характер роботи енергосистеми суттєво впливає на формування ожеледі на лініях електропередачі. Висока напруга створює навколо проводів електрополе, яке заряджає водяні краплі. Заряджені краплі притягуються до поверхні проводів і осідають на них. Сила притягання крапель прямо пропорційна квадрату напруги та обернено пропорційна кубу відстані до проводу. Через це на проводах під напругою інтенсивність утворення ожеледі приблизно на 30% вища, ніж на лініях без напруги.

Коли через провід проходить струм навантаження, виділяється тепло, яке пропорційне активному опору проводу та квадрату струму. Підвищення температури проводу залежить від умов тепловідведення, зумовлених характеристиками навколишнього середовища. Якщо температура проводу перевищує $+1$ °С, утворення ОПВ припиняється. У випадку вже сформованої ожеледної муфти нагрівання призводить до її часткового плавлення, утворюючи канавку, ширина якої трохи перевищує діаметр проводу.

2.4 Характеристичні параметри ожеледних навантажень

Згідно з [9] характеристичні (нормативні) значення навантаження від ожеледі g_p , Н/м, для проводів діаметром 10 мм повітряних ліній електропередачі, що проходять в рівнинній місцевості і підвішені на висоті 10 м над поверхнею землі, визначаються за картою територіального районування України (рис. 2.7).

Розрахункове значення навантаження від ожеледі на проводи і грозозахисні троси ПЛ (діаметром до 70 мм), що розміщуються на висоті до 100 м на відносно рівня землі визначають за виразом, Н/м:

$$G_{mp} = k_1 \cdot \mu_1 \cdot \gamma_{fG} \cdot g_p, \quad (2.7)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує залежність від ожеледного навантаження від висоти;

μ – коефіцієнт, що враховує збільшення ожеледного навантаження від збільшення діаметра проводу;

γ_{fG} – коефіцієнт запасу лінійного ожеледного навантаження для заданого середнього періоду повторюваності T .

Характеристичні (нормативні) значення навантаження від ожеледі g_p можуть бути уточнені за допомогою карт кліматичного районування. Для цього використовуються дані багаторічних спостережень, проведених гідрометеорологічними станціями, постами спостереження гідрометеослужби та власниками електромереж. Зокрема, збираються та аналізують динамічні ряди швидкості вітру, інтенсивності та густини ОПВ, а також частота появи умов, за яких можливе галопування проводів [9].

Під час обробки результатів метеоспостережень слід враховувати вплив мікрокліматичних факторів, обумовлених природними особливостями (рельєф місцевості, висота над рівнем моря, наявність значних водойм тощо) і антропогенними об'єктами (греблі, водоскиди, ставки-охолоджувачі, смуги щільної забудови). Оброблення проводиться з урахуванням рекомендацій [19].

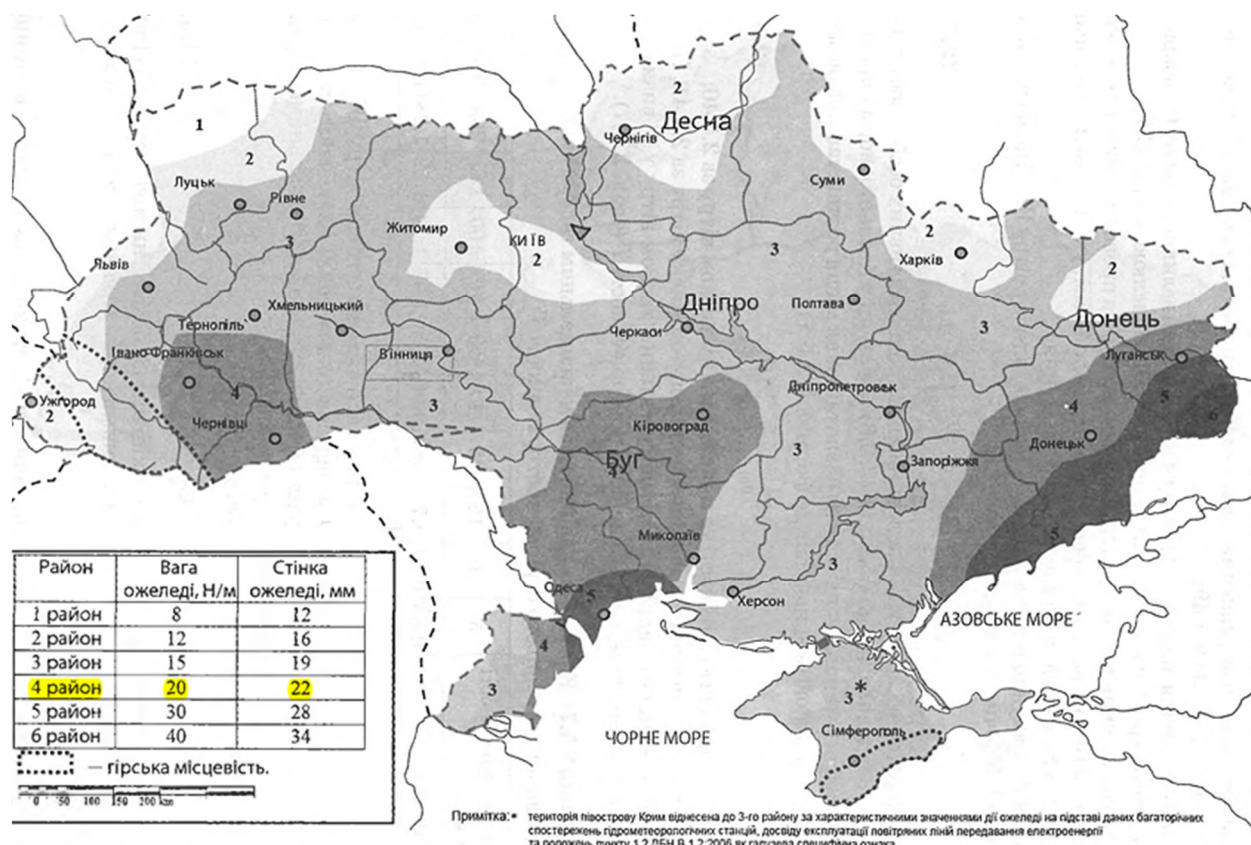


Рисунок 2.7 – Карта районування території України за характеристичними показниками ожеледних навантажень [9]

Результати проведених досліджень показують, що основним параметром, який визначає кліматичне навантаження на ПЛ, є товщина стінки ожеледно-паморозевих відкладень. Для оцінки цього параметра необхідні детальні кліматичні дані про територію, де прокладена ПЛ.

Ожеледно-паморозеві відкладення можуть призводити до таких негативних наслідків для ПЛ:

- розрегулювання проводів і тросів, їх зближення між собою;
- зближення проводів і тросів через підскоки, спричинені нерівномірним скиданням ожеледі;
- інтенсивне галопування, яке викликає КЗ між проводами і тросами, опіки проводів, ушкодження арматури, а в деяких випадках – руйнування лінійної арматури;
- значні перевантаження проводів і тросів, їх обриви, особливо при додаткових ушкодженнях електричною дугою;

- ушкодження та руйнування траверс;
- руйнування опор внаслідок обриву проводів і тросів, спричинені перевантаженням від ожеледі або її поєднанням із сильним вітром, коли неврівноважене навантаження значно перевищує розрахункове.

Враховуючи серйозні наслідки ожеледно-вітрових аварій, які можуть спричинити, наприклад, дезорганізацію електропостачання цілих регіонів, необхідно впроваджувати ефективні заходи для їх запобігання, зокрема:

- своєчасне проведення режимних заходів, що дозволяють підтримувати температуру проводів на рівні, який запобігає утворенню ожеледі;
- проведення профілактичного прогрівання проводів ПЛ;
- оперативне проведення плавки ожеледі на проводах і тросах.

Отже, що характеристичні (нормативні) значення ожеледного навантаження на проводи і троси ПЛ визначаються за кліматичними картами, доповненими даними багаторічних метеорологічних спостережень. Основним параметром кліматичного навантаження є товщина стінки ожеледно-паморозевих відкладень, яка залежить від місцевих природних і мікрокліматичних умов. Ожеледні відкладення створюють значне додаткове навантаження на елементи ПЛ, що може спричиняти механічні пошкодження, короткі замикання та дезорганізацію електропостачання. Для запобігання негативним наслідкам необхідно впроваджувати комплексні профілактичні заходи, включаючи підтримання температури проводів, профілактичний прогрів і своєчасну плавку ожеледі.

2.5 Висновки до розділу

1. Визначено, що найбільшу небезпеку для ПЛ становлять атмосферні відкладення таких видів: ожеледь, зерниста паморозь, замерзлий мокрий сніг та їхні складні суміші. Густина та структура цих відкладень залежать від температури повітря, швидкості вітру, типу процесу утворення, діаметра переохолоджених крапель рідких опадів, а для мокрого снігу – від розміру та водності сніжинок.

2. Встановлено, що температура повітря та швидкість вітру є ключовими факторами у формуванні ожеледно-паморозевих відкладень на ПЛ, причому: скловидна ожеледь утворюється за температур від 0 до -4°C , зерниста паморозь – від 0 до -8°C , а складні відкладення – від 0 до -4°C . Швидкість вітру також впливає на їх утворення: ожеледь найчастіше виникає за 2-4 м/с, зерниста паморозь – за 1-8 м/с, а мокрий сніг та кристалічна паморозь – у затишші. Температура повітря визначає густину відкладень, яка знижується при зниженні температури до -5°C , а далі – стабілізується.

3. Встановлено, що збільшення висоти встановлення проводів з 2 м до 20 м спричиняє триразове зростання маси ОПВ, при цьому діаметр проводів впливає на масу та густину ОПВ, а малі кути напрямку вітру відносно осі проводу знижують їх масу на 60–80% і значно зменшують густину, водночас закручування проводів під дією асиметричних навантажень сприяє формуванню стабільних ожеледних муфт, що подовжують період утримання відкладень.

4. Встановлено, що нормативні значення ожеледного навантаження на проводи повітряних ліній електропередавання діаметром 10 мм, які проходять рівнинній місцевості на висоті 10 м над поверхнею землі визначаються за картою територіального районування України, а розрахункові визначаються шляхом застосування підвищувальних коефіцієнтів для врахування висоти підвісу, збільшення діаметра проводу та лінійного ожеледного навантаження для заданого середнього періоду повторюваності.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВКИ ОЖЕЛЕДІ НА ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ 10 кВ

3.1 Схеми плавки ожеледі на ПЛ 10 кВ

На сьогодні плавка ожеледі на проводах і тросах повітряних ліній є одним із найефективніших методів попередження ожеледно-вітрових аварій. Вона дозволяє усувати ОПВ на десятках кілометрів ПЛ за час 0,5-1 год, запобігаючи появі наднормативних механічних навантажень і усуваючи галоупування проводів. Для плавки ожеледі на повітряних лініях напругою 10 кВ застосовується змінний струм: на ділянках довжиною 10-25 км використовується напруга 6 кВ, а на ділянках довжиною 15-40 км – напруга 10 кВ [20]. Залежно від умов можуть застосовуватися різні способи плавки ожеледі:

- короткого замикання, коли лінія, що обігривається, закорочується з одного кінця, а з протилежного до неї підключається джерело живлення з достатньою потужністю для забезпечення необхідного струму плавки;
- зустрічного вмикання фаз джерел електроенергії, при якому фазні проводи на протилежних кінцях лінії підключаються до джерел живлення із взаємним фазовим зсувом векторів напруги;
- перерозподілу навантажень в електричній мережі, коли за допомогою спеціальних схемно-режимних заходів збільшується струмове навантаження на лінію, проводи якої підлягають обігріву, до необхідної величини;
- накладенням струмів, коли використовується спеціальне обладнання, наприклад, вольтододатковий трансформатор, для створення додаткового струму, що накладається на робочий струм і протікає через лінію, яку обігривають.

Найбільш поширеним в розподільних електромережах є метод плавки ожеледі струмом КЗ, який є найпростішим і найефективнішим. Цей метод дозволяє автоматизувати процес збирання схеми плавки та відновлення

нормальної роботи електромережі. Плавка ожеледі за способом короткого замикання має різні схемні варіанти виконання, що відрізняються видом штучного КЗ:

- трифазного КЗ (рис. 3.1);
- двофазного короткого замикання при з'єднанні фазних проводів ПЛ, що обігривається за однією зі схем:

а) «фаза-фаза», коли ожеледь плавиться одночасно на двох послідовно з'єднаних фазах ПЛ;

б) «фаза-дві фази» (рис. 3.2), в якій ожеледь плавиться лише на одній фазі, а дві інші прогріваються половинним струмом плавки.

Плавка ожеледі за способом три- та двофазного КЗ виконується на ПЛ, що виведені з роботи (споживачі втрачають живлення) і можлива як при номінальній напрузі ПЛ, так і при зниженій. Головною перевагою цього методу є його простота та мінімальна кількість необхідних оперативних перемикачів. Це значно скорочує час на монтаж і демонтаж схеми плавки. Для спрощення процесу замикання фаз та встановлення заземлення зазвичай використовуються стаціонарні комутаційні пристрої.

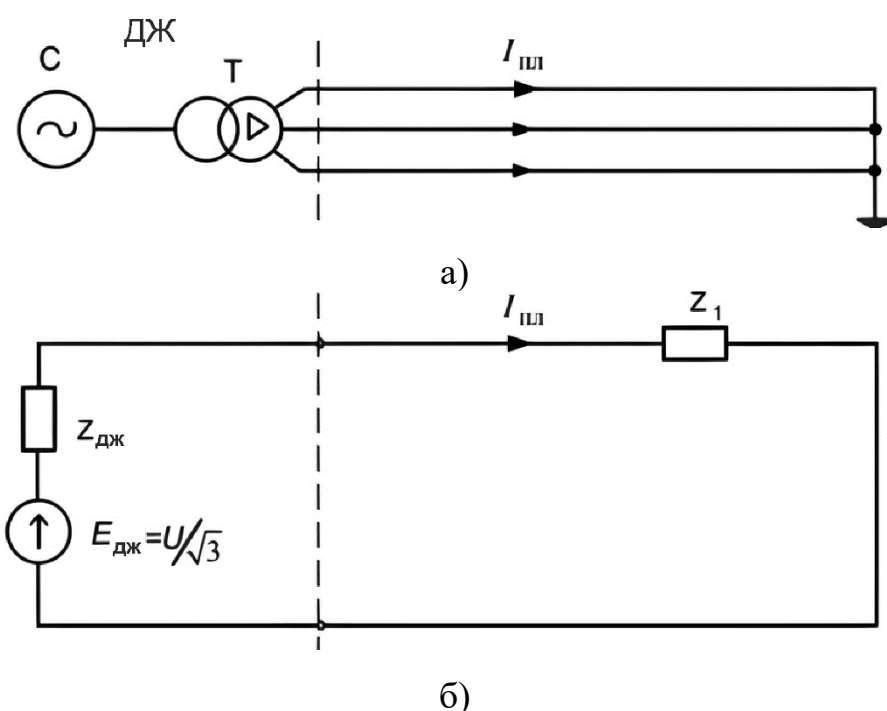


Рисунок 3.1 – Схеми плавки ожеледі за способом трифазного КЗ:

а) електрична схема; б) розрахункова схема заміщення

При застосуванні схеми плавки ожеледі за способом трифазного КЗ плавлення відбувається за один цикл. При цьому у вторинних обмотках трансформатора протікають симетричні струми прямої послідовності, тоді параметри еквівалентного генератора будуть наступні (рис. 3.1):

$$E_{дж} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}; \quad (2.1)$$

$$\underline{Z}_{дж} = \underline{Z}_{с1} + \underline{Z}_{т1}, \quad (2.2)$$

де U – лінійні напруги вторинних обмоток трансформатора T , при вимкненій ПЛ;
 $Z_{с1}$, $Z_{т1}$ – комплексні опори прямої послідовності, відповідно, системи C і трансформатора T .

Натомість, застосування схем, що реалізують спосіб двофазного КЗ (рис. 3.2) потребує два цикли плавлення, що збільшує загальний час процесу. У цих схемах параметри еквівалентного генератора визначаються з урахуванням рівності опорів прямої та зворотної послідовності за формулами:

$$E_{дж} = U_{л}; \quad (2.3)$$

$$\underline{Z}_{дж} = 2\underline{Z}_{с1} + \underline{Z}_{т1}, \quad (2.4)$$

При проектуванні систем плавки ожеледі все обладнання та апаратура розраховуються з урахуванням допустимих струмових навантажень. У випадках, коли плавки проводяться одночасно на 2-х чи 3-х фазах при їх паралельному з'єднанні, через кожну фазу проходить струм плавки $I_{пл}$.

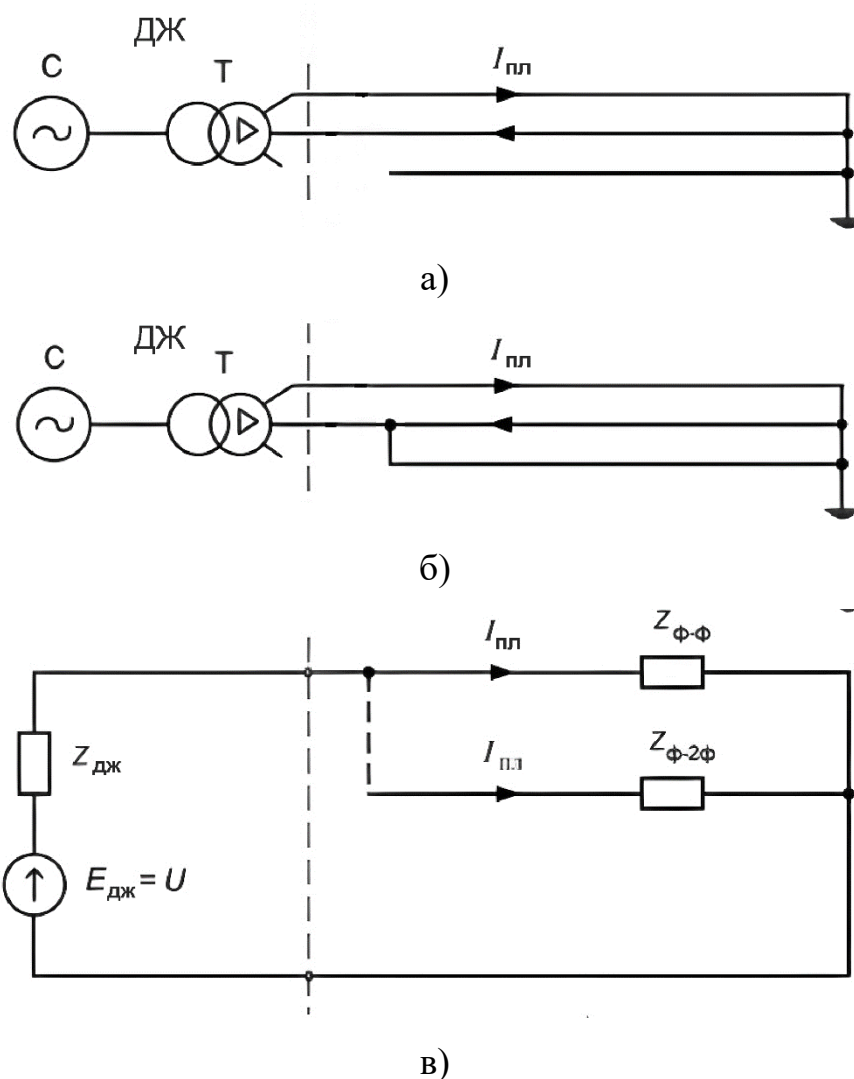


Рисунок 3.2 – Схеми плавки ожеледі за способом двофазного КЗ:

- а) «фаза-фаза»;
- б) «фаза-дві фази»;
- в) розрахункова схема

Спосіб зустрічного вмикання фаз дозволяє здійснювати одночасне плавлення ожеледі на трьох фазах ПЛ за допомогою зрівняльних струмів впродовж одного циклу. Цей метод є особливо ефективним для ПЛ, що з'єднують дві підстанції, паралельних ліній та в кільцевих схемах електромережі.

При куті між струмом плавки $I_{пл}$ і напругою $U_{л}$ $\varphi = 60^\circ$ підстанція II відас в прогріваєму ПЛ лише реактивну потужність, при $\varphi > 60^\circ$ – отримує активну, а віддає реактивну, а при $\varphi < 60^\circ$ – віддає активну та реактивну потужності (рис. 3.3). Тому підстанція, що має резерви активної та реактивної потужності, повинна підключатися до ПЛ із випереджаючим $\angle \varphi$.

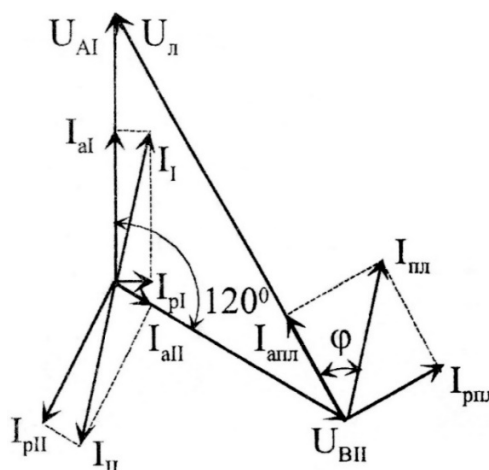


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма при плавці ожеледі способом зустрічного вмикання джерел енергії ($\varphi = 45^\circ$)

Забезпечення безперервного електропостачання споживачів під час прогріву ПЛ можливе лише при фазовому зсуві напруг на 60 ел. град. Для цього в кільцевій мережі встановлюється нормально вимкнений секційний вимикач Q (рис. 3.4). Лінії підключаються до незалежних джерел живлення, які мають відповідний фазовий зсув векторів напруги. Під час плавлення ожеледі вимикач Q вмикається, що спричиняє накладання додаткового струму, викликаного різницею напруг між двома незалежними джерелами живлення, на струм навантаження.

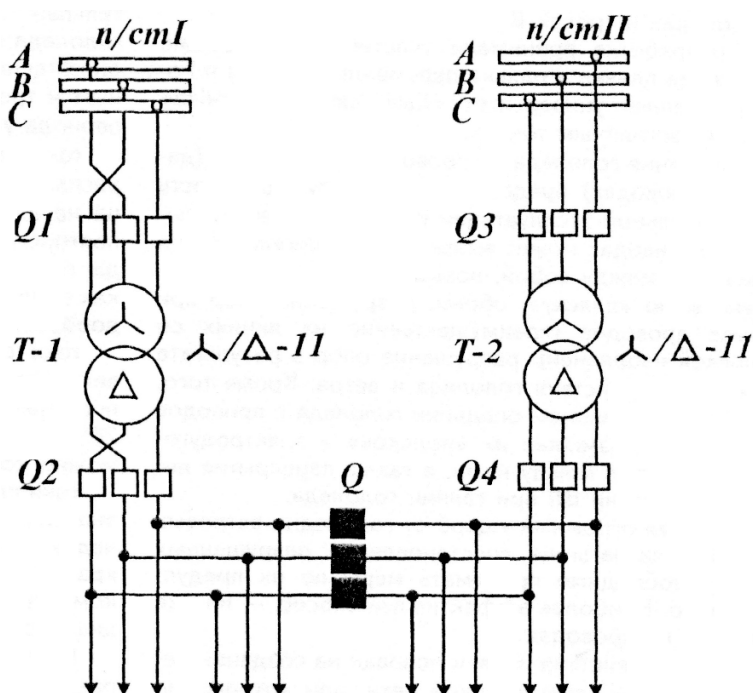


Рисунок 3.4 – Схема плавки ожеледі способом зустрічного вмикання фаз (фазовий зсув напруг 60 ел. град)

Важливою умовою успішної реалізації цього методу є електричний зв'язок між джерелами живлення на стороні ВН, наприклад, через спільні шини 35 кВ або повітряну лінію. Досягнення кутового зсуву в 60 або 180 ел. градусів можливе лише за умови використання трансформаторів 11-ї групи з'єднання обмоток.

На практиці також застосовуються схеми плавки ожеледі, що забезпечують кутовий зсув напруг джерел живлення 120 та 180 ел. градусів (рис. 3.5, рис. 3.6). Особливим і найпростішим у реалізації є випадок, коли джерела живлення на сусідніх підстанціях мають однакову напругу. При зустрічному вмиканні фаз на одному з кінців лінії досягається кут зсуву 120 градусів, що дозволяє збільшити напругу плавлення від фазної до лінійної, на відміну від способу трифазного короткого замикання.

Для досягнення зустрічного вмикання фаз при стандартних схемах з'єднання обмоток трансформаторів Т-1, Т-2 (рис. 3.5) проводи ПЛ, що прогривається підключають на одному кінці до фаз А, В і С, а на іншому – до фаз В, С і А, відповідно.

За відсутності зсуву фаз (нульовий фазовий зсув) напруга плавлення дорівнює різниці напруг джерел живлення ($U_{пл} = U_1 - U_2$), що забезпечує ефективне плавлення на коротких лініях.

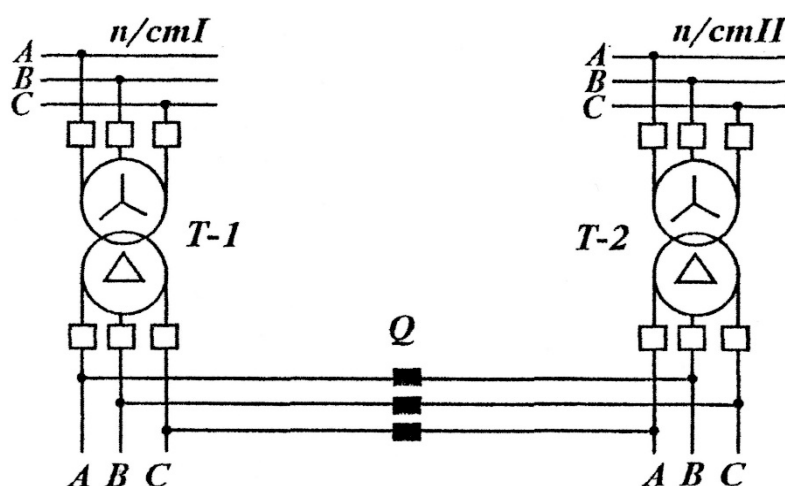


Рисунок 3.5 – Схема плавки ожеледі способом зустрічного вмикання фаз
(фазовий зсув напруг 120 ел. град)

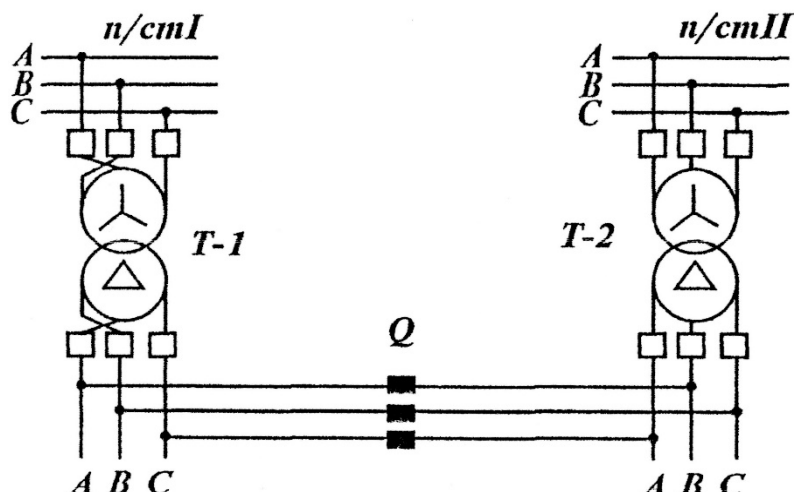


Рисунок 3.6 – Схема плавки ожеледі способом зустрічного вмикання фаз
(фазовий зсув напруг 180 ел. град)

Розподільні мережі 10 кВ, де передбачено спосіб плавки ожеледі зустрічним вмиканням фаз можуть постійно працювати з кутовими зсувами 60, 120 чи 180 ел. град. при розімкнених секційних вимикачах Q . Ці вимикачі вмикаються лише на час проведення плавки ожеледі та перетворюють схему нормального режиму в кільцеву із заданим кутовим зсувом фаз. При проведенні плавки ожеледі за цим способом у всіх трьох фазах протікають симетричні струми прямої послідовності, то для параметрів еквівалентного генератора (рис. 3.7, б) справедливі наступні рівності:

$$\underline{E}_{дж} = \underline{U}_{\phi 1} + \underline{U}_{\phi 2}; \quad (2.5)$$

$$\underline{Z}_{дж} = \underline{Z}_{лдж.І} + \underline{Z}_{лдж.ІІ} = \underline{Z}_{лс.І} + \underline{Z}_{лт.І} + \underline{Z}_{лс.ІІ} + \underline{Z}_{лт.ІІ}, \quad (2.6)$$

де $\underline{Z}_{лдж.І} + \underline{Z}_{лдж.ІІ}$ – еквівалентний опір прямої послідовності джерел ДЖ1 і ДЖ2.

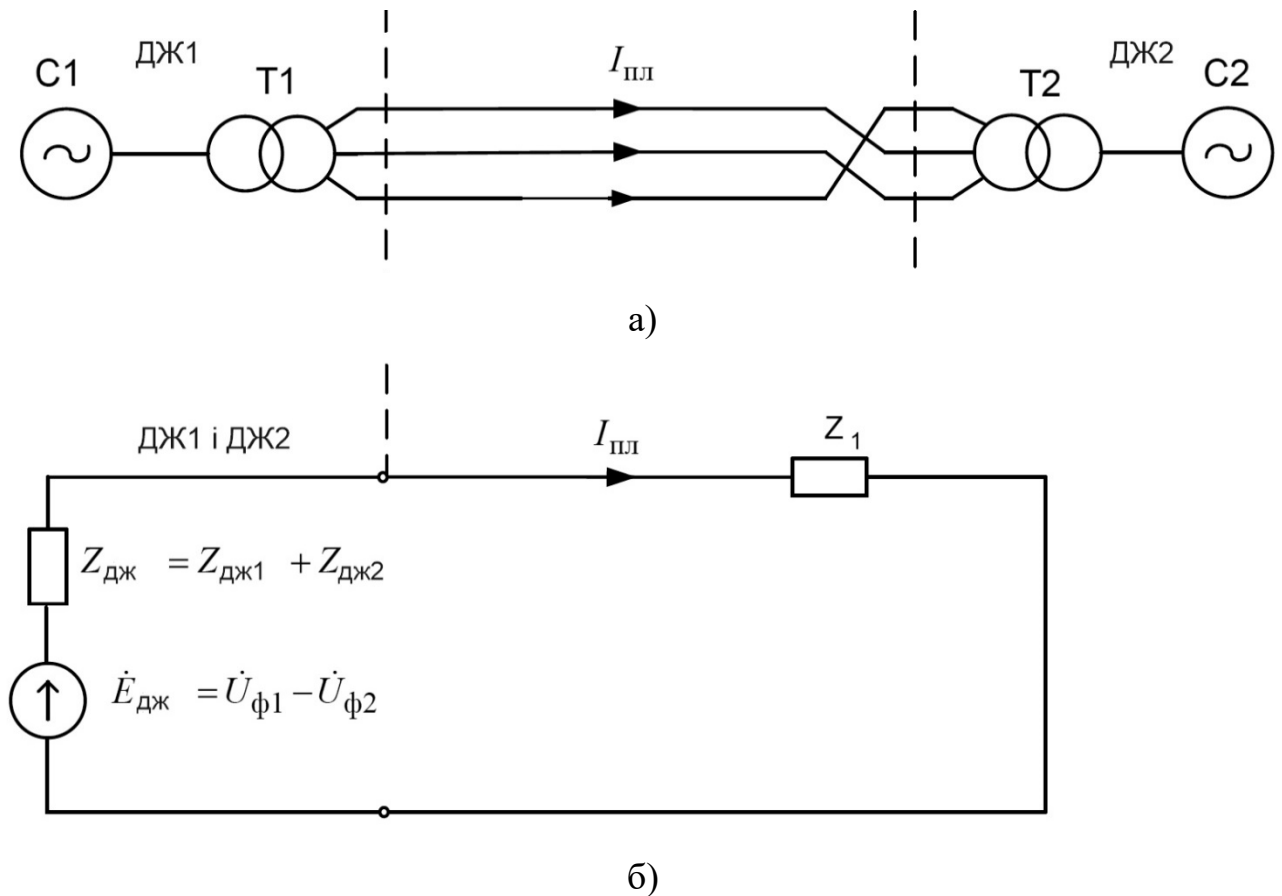


Рисунок 3.7 – Схема плавки ожеледі способом зустрічного вмикання фаз

а) схема зустрічного вмикання ДЖ1, ДЖ2;

б) розрахункова схема

Необхідні для плавлення ожеледі зрівняльні струми виникають завдяки різниці у величині або фазовому зсуві векторів напруги на протилежних кінцях повітряної лінії, що прогрівається. За цих умов, напруга плавки визначається за формулою:

$$U_{\text{пл}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cdot \cos \varphi}, \quad (2.7)$$

де U_1, U_2 – напруги по кінцях розімкнутої ПЛ;

φ – кут зсуву між векторами напруги $\dot{U}_1$ та $\dot{U}_2$.

Струм плавки визначається як

$$I_{\text{пл}} = \frac{U_{\text{л}}}{Z + Z_{\text{с1}} + Z_{\text{с2}}}, \quad (2.8)$$

Активна та реактивна потужності ПС I і ПС II, можуть бути визначені за формулами

$$P_{\text{I}} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{пл}} \cos(\varphi - 30^\circ); \quad (2.9)$$

$$Q_{\text{I}} = \sqrt{3}U_{\text{пл}}I_{\text{пл}} \sin(\varphi - 30^\circ); \quad (2.10)$$

$$P_{\text{II}} = \sqrt{3}U_{\text{пл}}I_{\text{пл}} \cos(\varphi - 150^\circ); \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{II}} = \sqrt{3}U_{\text{пл}}I_{\text{пл}} \sin(\varphi - 150^\circ). \quad (2.12)$$

Спосіб плавки ожеледі шляхом перерозподілу навантажень передбачає збільшення струмового навантаження ПЛ шляхом перерозподілу навантаження в мережі. Цього можливо досягти за допомогою проведення наступних заходів:

- підвищенням навантаження підстанцій, що отримують живлення від ПЛ, що прогрівається;
- відключенням частини паралельних ліній, до лінії, що прогрівається;
- переведенням кільцевої схеми електричної мережі в у радіальний режим роботи;
- регулюванням напруги на кінцях ПЛ, що прогрівається за рахунок зміни коефіцієнта трансформації трансформаторів.

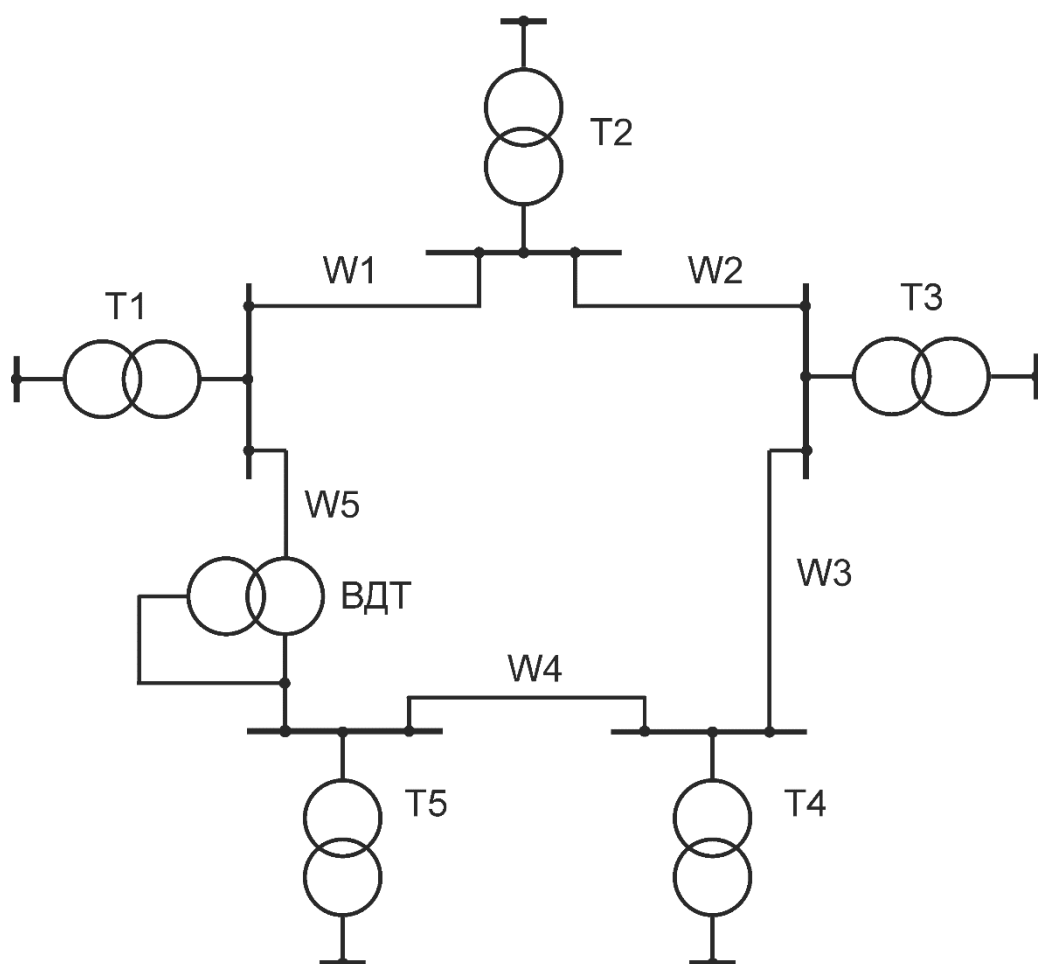
Головною перевагою цього способу плавки ожеледі є те, що ПЛ, яка прогрівається залишається в роботі при її номінальній напрузі. Однак, цей спосіб плавки ожеледі не набув широкого застосування в електромережах внаслідок ряду технічних обмежень. Головна складність полягає в тому, що струм

плавлення залежить від режиму енергосистеми, а необхідні схемно-режимні заходи неможливо визначити заздалегідь. Крім того, для реалізації цього способу необхідно виключати інші лінії, що призводить до зниження надійності електропостачання споживачів і зниження якості електричної енергії. Тому ПЛ, що захищається необхідно завантажувати активною потужністю, оскільки при цьому в меншій мірі порушується режим напруги в мережі. Тому цей спосіб не завжди може надійно забезпечити плавлення льоду. Проте він ефективний для профілактичного обігріву фазних проводів ПЛ, що залишаються в роботі.

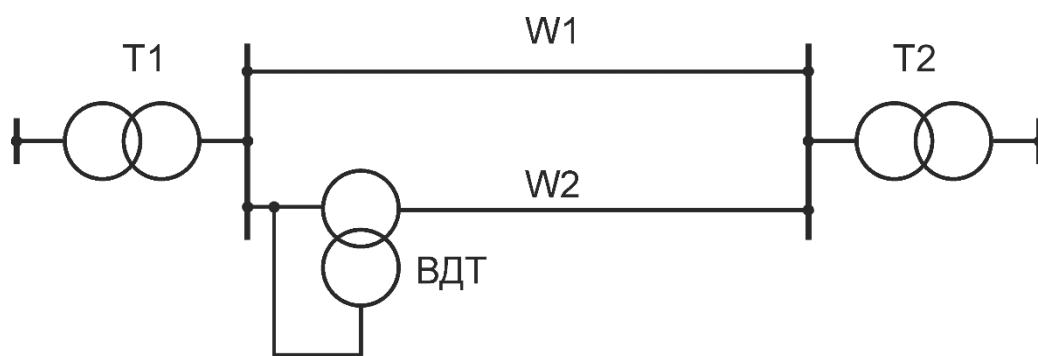
Для профілактичний обігрів ПЛ потребує менших струмів, ніж для плавка ожеледі, і вимоги до їх величини не такі суворі – потрібно лише підтримувати температуру проводів дещо вище 0°C . Такі струми порівняно легко досягаються шляхом незначного перерозподілу навантаження в електромережі, до якої підключена лінія, що прогривається.

В останньому випадку з'являється зрівняльний струм, обумовлений різницею напруг по кінцях ПЛ, а результуючий струм лінії дорівнює геометричній сумі зрівняльного струму та струму навантаження.

Плавка ожеледі накладанням струмів полягає в накладанні додаткового струму, який створюється в контурі, до якого входить півтряна лінія, що прогривається. Для цього в контур вмикають джерело ЕРС, рівень напруги і фаза якого підбираються таким чином, щоб збільшити струму до необхідного рівня. Для накладення струмів найбільш придатними є кільцеві ділянки мережі або ліній з паралельними ланками. В якості джерела ЕРС доцільно використовувати вольтдодатковий трансформатор (ВДТ), що вмикається в розріз кільця (рис. 3.8, а). Такий трансформатор дозволяє регулювати величину повздовжньої та поперечної ЕРС і тим самим забезпечувати оптимальний режим плавки ожеледі. Потужність ВДТ можливо зменшити, якщо вмикати його не в коло ПЛ, що прогривається, а в коло ПЛ з найменшим навантаженням.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Схеми плавки ожеледі за способом накладання струмів:

а) кільцева схема;

б) з паралельними лініями

Схема пофазної плавки струмами накладання в мережах з ізолюваною нейтраллю представлена на рис. 3.9.

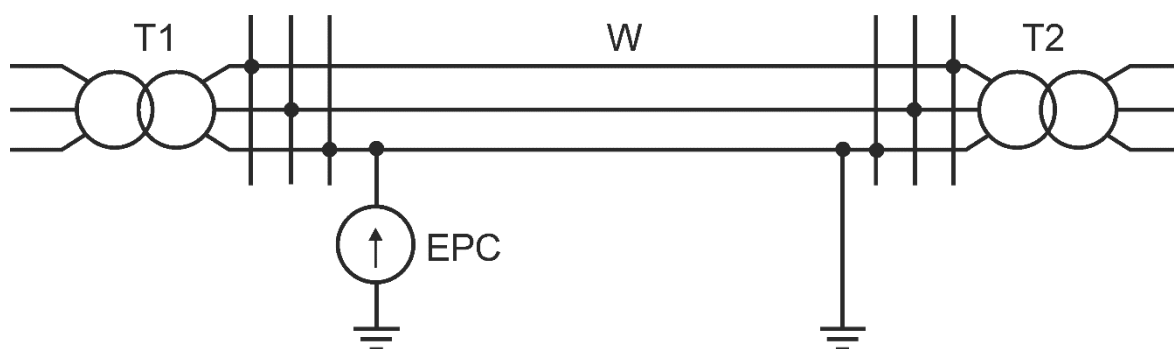


Рисунок 3.9 – Пофазна плавка ожеледі струмами накладання у мережі з ізолюваною нестраллю

Струм накладання визначається за формулою

$$I = \frac{U_{\text{дод}}}{Z}, \quad (2.13)$$

де $U_{\text{дод}}$ – додаткова напруга, що була створена в контурі;

Z – повний опір контуру.

Отже, найпоширенішими методами плавки ожеледі на ПЛ 10 кВ є спосіб три- та двофазного короткого замикання, внаслідок їх простоти, високої ефективності, однак при їх застосуванні необхідно відключення ліній.

Зустрічне вмикання фаз забезпечує безперервне електропостачання, але його застосування обмежене певної топологією мережі.

Перерозподіл навантаження найкраще підходить для профілактики, але не забезпечує надійного плавлення льоду і тому не знайшов широкого застосування в розподільних мережах.

Накладання струмів дає можливість регулювання параметрів плавлення, проте вимагає використання дорогого додаткового обладнання, тому також практично не використовується.

У цілому, вибір методу визначається характеристиками мережі, наявністю обладнання та категорійністю електроспоживачів.

На основі проведеного аналізу способів плавки ожеледі в мережах 10 кВ була сформована підсумкова таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика способів плавки ожеледі змінним струмом у мережах 10 кВ

Спосіб плавки ожеледі	Переваги	Недоліки	Умови застосування	Ефективність
Коротке замикання	- простота реалізації; - мінімальна кількість перемикань; - висока ефективність	- тимчасове припинення електропостачання споживачів;	- використовується при номінальній або зниженій напрузі; - ПЛ виводиться з роботи	Висока: плавлення ожеледі за 1-2 цикли (три- або двофазне КЗ)
Зустрічне вмикання фаз	- одночасне плавлення на трьох фазах; - збереження електропостачання	- складність реалізації; - потребує створення фазового зсуву; - необхідне додаткове обладнання	- ефективний для ПЛ між підстанціями або кільцевих мереж; - потребує трансформаторів зі спеціальної групи з'єднання обмоток	Висока: симетричні струми дозволяють плавити ожеледь в короткі терміни
Перерозподіл навантаження	- ПЛ залишається в роботі; - мінімальний вплив на енергосистему	- залежність від режиму енергосистеми; - технічні обмеження; - зниження надійності електропостачання	- використовується для профілактичного обігріву ПЛ; - потребує ретельного балансування навантаження	Середня: підходить більше для профілактики, ніж для усунення ожеледі
Накладання струмів	- можливість регулювання параметрів плавки ожеледі за допомогою вольтододакового трансформатора	- складність реалізації, потреба у вольтододаковому трансформаторі; - залежність від умов мережі	- застосовується для кільцевих схем або ліній з паралельними гілками	Висока: дозволяє оптимізувати режим плавлення для різних умов мережі

3.2 Удосконалення організації проведення плавки ожеледі

Для організації процесу плавки ожеледі на групі ПЛ 10 кВ можливо використати різні підходи, які враховують технічні, економічні та організаційні аспекти. Серед цих підходів варто виділити застосування теорії масового обслуговування (СМО), яка дозволяє формалізувати процес, забезпечити системність його аналізу та оптимізувати розподіл ресурсів.

Використання СМО є найбільш простим і водночас ефективним способом моделювання таких процесів, оскільки вона враховує нерегулярний характер заявок, пріоритетність повітряних ліній, а також забезпечує зниження ризику технологічних відмов. Цей підхід дозволяє організувати плавку ожеледі із максимальною ефективністю навіть за умов обмежених ресурсів.

У загальному випадку, СМО представляє собою комплексну структуру, яка включає генератор запитів на обслуговування (джерело заявок), а також набір обслуговуючих каналів (рис. 3.10). Вони опрацьовують вхідні запити згідно з визначеними правилами та алгоритмами, що формують дисципліну обслуговування системи. Всі компоненти взаємодіють між собою для забезпечення процесу обробки вхідних вимог на обслуговування [21].

Розглянемо технологічний процес плавки ожеледі на ПЛ 10 кВ, що підключені до однієї ПС 35/10 кВ, як систему масового обслуговування.

У цьому випадку СМО буде складатися з таких компонентів:

- джерела запитів – групи ПЛ 10 кВ, які потребують плавки ожеледі через досягнення критичного рівня навантаження або товщини ожеледі;

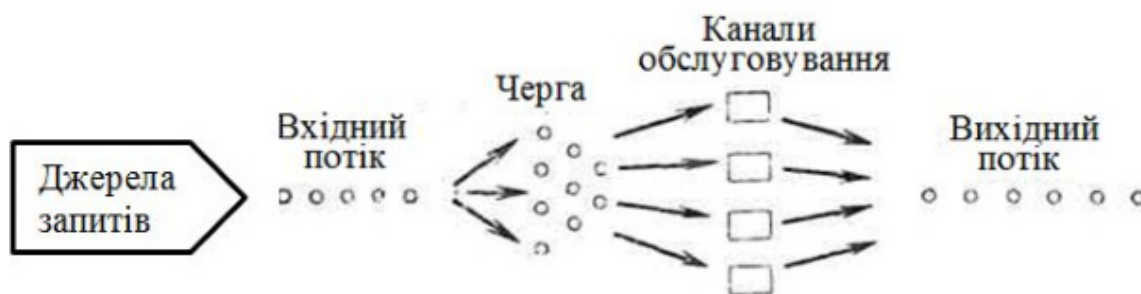


Рисунок 3.10 – Структура системи масового обслуговування

- каналу обслуговування – підстанції 35/10 кВ, що забезпечує процес плавки ожеледі для кожної ПЛ окремо, формуючи чергу.

- дисципліни обслуговування – організації обробки запитів у системі.

Запити на обслуговування надходять до системи з кінцевого джерела, тобто кількість можливих заявок обмежена кількістю ПЛ. Вхідний потік запитів описується як пуассонівський процес із середньою інтенсивністю λ , яка залежить від інтенсивності ожеледоутворення. Інтервали часу між запитами ξ_k вважаються незалежними випадковими величинами з однаковим розподілом ймовірностей: $A(t)=P(\xi k_3 < t)$.

Середній час обслуговування кожної заявки $1/\mu$ визначається технічними характеристиками процесу плавки, зокрема наявною потужністю та кількістю електротехнічного персоналу.

Організація обслуговування запитів визначається відповідно до категорій надійності електропостачання ПЛ:

- статичні пріоритети: ПЛ вищої категорії за безперебійністю електропостачання обслуговуються першими. Черга на обслуговування формується відповідно до методу FIFO (First In, First Out) у межах однієї категорії;

- алгоритми обслуговування: якщо запит від ПЛ з нижчим пріоритетом уже обробляється (плавка, ще не почалася), але надходить запит від лінії з вищим пріоритетом, обслуговування переривається.

Для аналізу роботи системи розглянемо наступні параметри:

- інтенсивність вхідного потоку заявок: λ ;
- інтенсивність обслуговування: μ ;
- ймовірність відмови в обслуговуванні: $P_{\text{від}}$, що залежить від розміру черги та коефіцієнта завантаження k_3 ;
- час очікування в черзі

$$T_{\text{оч}} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}, \rho = k_3. \quad (2.14)$$

Нехай задача удосконалення процесу плавки ожеледі полягає в мінімізації витрат на її проведення. При цьому враховується не лише безпосередня вартість плавки, але й пов'язані з нею побічні витрати:

$$B_{\Sigma} = B_{\text{ав}} + B_{\text{оп}} + B_{\text{орг}}, \quad (2.15)$$

де $B_{\text{ав}}$ – економічні збитки внаслідок аварій на ПЛ;

$B_{\text{оп}}$ – операційні витрати на сам процес плавки;

$B_{\text{орг}}$ – витрати, пов'язані з організацією процесу.

Економічні збитки внаслідок аварій на ПЛ складаються з витрат на ремонт ушкоджених ліній та збитку від недоданої електроенергії внаслідок простою:

$$B_{\text{ав}} = n \cdot p_{\text{ав}} \left(\epsilon_0 \cdot l_{\text{ср}} \cdot \Gamma + z_0 \cdot P_{\text{від}} T_{\text{ср}} \right), \quad (2.16)$$

де n – кількість повітряних ліній, що підключені до ПС;

$p_{\text{ав}}$ – ймовірність ушкодження ПЛ внаслідок аварії;

ϵ_0 – витрати на відновлення 1 км ПЛ, приймаємо 205 тис. грн.;

$l_{\text{ср}}$ – середня довжина однієї ПЛ;

Γ – відносна пошкоджуваність лінії після впровадження плавки ожеледі;

z_0 – питомий показник збитку від аварійно недоданої споживачам електроенергії, приймається 114 грн./кВт·год;

$P_{\text{від}}$ – середня потужність відключених споживачів при проведенні плавки ожеледі на одній ПЛ (середнє навантаження ПЛ);

$T_{\text{ср}}$ – середній час простою однієї ПЛ;

$p_{\text{ав}}$ – ймовірність аварії враховується як експоненціальна функція зменшення ризику зі збільшенням інтенсивності ожеледоутворення:

$$p_{\text{ав}} = 0,15e^{-k\lambda}, \quad (2.17)$$

k – емпіричний коефіцієнт.

Операційні витрати на сам процес плавки ожеледі включають вартість електроенергії та зарплата персоналу:

$$B_{\text{оп}} = 24k_3 (c_1 \cdot P_{\text{пл}} + m \cdot B_{\text{л.г}}), \quad (2.18)$$

де k_3 – коефіцієнт завантаження, $k_3 = \lambda / \mu \cdot n$;

μ – середня інтенсивність обслуговування;

c_1 – ринкова вартість електроенергії для ОСР;

$P_{\text{пл}}$ – активна потужність, необхідна для проведення плавки на одній ПЛ;

m – кількість залученого електротехнічного персоналу;

$B_{\text{лг}}$ – вартість однієї людино-години роботи персоналу.

Складовими витрат, що пов'язані з організацією процесу плавки ожеледі є логістичні та витрати на час очікування в черзі на плавку (якщо черга призводить до додаткових витрат):

$$B_{\text{орг}} = n (c_{\text{л}} + 24w_{\text{оч}} \cdot z_0 \cdot P_{\text{від}}), \quad (2.19)$$

де $c_{\text{л}}$ – середні логістичні витрати на одну повітряну лінію;

$w_{\text{оч}}$ – середній час очікування проведення плавки в черзі

$$w_{\text{оч}} = \frac{k_3}{\mu(1 - k_3)}; \quad (2.20)$$

Підставивши вирази (2.16), (2.18), (2.19) у формулу (2.15) отримаємо загальну формулу витрат у розгорнутому вигляді:

$$B_{\Sigma} = n \cdot p_{\text{ав}} (e_0 \cdot l_{\text{ср}} \cdot \Gamma + z_0 \cdot P_{\text{від}} T_{\text{ср}}) + 24k_3 (c_1 \cdot P_{\text{пл}} + m \cdot B_{\text{л.г}}) + \\ + n (c_{\text{л}} + 24w_{\text{оч}} \cdot z_0 \cdot P_{\text{від}}). \quad (2.21)$$

З метою спрощення розв'язання задачі зробимо наступні припущення:

1) плавка ожеледі проводиться на ПЛ почергово. Це пов'язано з обмеженням потужності трансформаторів на ПС, що унеможлиблює одночасне обслуговування кількох ліній, тому $k_3 = \lambda/\mu$;

2) плавка ожеледі проводиться послідовно, тобто кожна лінія обслуговується окремо. Це виключає необхідність враховувати багатоканальність, що спрощує модель.

3) організаційні витрати не враховуються. Незалежно від того, чи використовується вдосконалена технологія плавки, чи звичайна, технічному персоналу все одно необхідно: приїжджати на ПС, виконувати підключення ПЛ, контролювати процес плавки і т.д. Логістичні витрати та витрати на очікування не впливають на відмінності між технологіями;

4) ремонтні витрати залежать лише від ймовірності аварії. Витрати на ремонт лінії $e_0 \cdot l_{\text{сп}} \cdot P_{\text{ав}}$ безпосередньо залежать від ймовірності аварії, яка у свою чергу залежить від інтенсивності ожеледоутворення.

З урахуванням зроблених припущень, рівня (2.21) спроститься та набуде наступного вигляду:

$$B_{\Sigma} = n \cdot p_{\text{ав}} (e_0 \cdot l \cdot \Gamma + z_0 \cdot P_{\text{від}} T_{\text{сп}}) + 24 \frac{\lambda}{\mu} (c_1 \cdot P_{\text{пл}} + m \cdot B_{\text{л.г}}), \quad (2.22)$$

Для переходу від функції витрат до цільової функції виконаємо формалізацію задачі. Задача оптимізації зводиться до визначення оптимального значення параметра інтенсивності вхідного потоку заявок λ , яке мінімізує загальні витрати на організацію плавки ожеледі:

$$B_{\Sigma}(\lambda) = n \cdot p_{\text{ав}}(\lambda) (e_0 \cdot l \cdot \Gamma + z_0 \cdot P_{\text{від}} T_{\text{сп}}) + 24 \frac{\lambda}{\mu} (c_1 \cdot P_{\text{пл}} + m \cdot B_{\text{л.г}}). \quad (2.23)$$

Тоді задача оптимізації буде сформульована наступним чином:

$$\begin{cases} B_{\Sigma}(\lambda) \rightarrow \min; \\ \lambda > 0; \\ 0 < \Gamma \leq 1. \end{cases} \quad (2.24)$$

У виразі (2.24) перше обмеження враховує, що інтенсивність вхідного потоку повинна бути додатною, а друге, що система обслуговування повинна бути стабільною ($k_3 < 1$).

Оптимізація була виконана методом обмеженого пошуку мінімуму одновимірної функції – методом «bounded» з бібліотеки SciPy мови програмування Python. Цей метод базується на комбінації кількох стратегій оптимізації, зокрема:

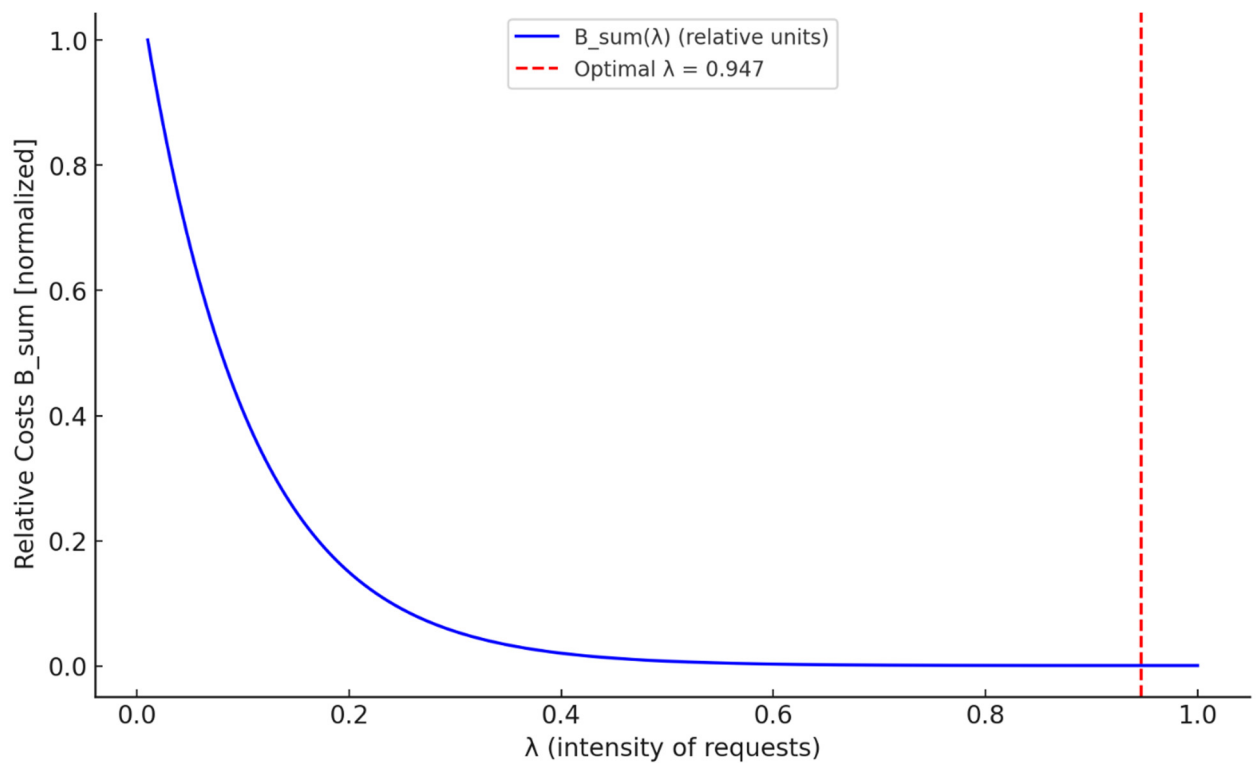
- метод золотого перерізу: використовується для пошуку мінімуму одновимірної функції в заданому діапазоні та забезпечує швидкий і стабільний збіг до мінімального значення;
- додаткове уточнення результату: на етапі зближення інтервалу методу золотого перерізу застосовуються уточнені алгоритми, щоб досягти максимальної точності;
- гарантована коректність у заданих межах: межі для параметра λ [0,01; 1] гарантують, що результат знаходиться в фізично коректній області.

Перелік та значення вихідних параметрів, які були використані при розв'язанні задачі приведені в табл. 3.2.

У результаті розв'язання задачі було отримане значення $\lambda^* = 0,947$ (рис. 3.11), що відповідає найкращому балансу між ризиком аварій ($p_{\text{ав}} \propto \lambda$) і вартістю обслуговування (λ/μ). Це дозволяє забезпечити економічно ефективний процес плавки ожеледі, уникаючи аварій і перевантаження системи плавки. Якщо реальна інтенсивність заявок λ виходить за межі оптимуму, витрати швидко зростають.

Таблиця 3.2 – Вихідні до розрахунку втрат

№ п/п	Параметр	Познач.	Од. вим	Значення
1	Кількість ПЛ, що підключені до ПС	n	шт.	12
2	Вартість ремонту 1 км ушкодженої ПЛ	ϵ_0	тис.	205
3	Середня довжина ПЛ, що підключена до ПС	$l_{\text{ср}}$	км	9,6
4	Відносна пошкоджуваність (базове значення)	Γ	-	1,0
5	Вартість недоданої електроенергії	z_0	грн. /кВт·год	114
6	Середня потужність споживачів, що відключені	$P_{\text{від}}$	кВт	266
7	Середній час відключення ПЛ	$T_{\text{ср}}$	1/р	$5,479^{-3}$
8	Ринкова вартість електроенергії для ОСР	c_1	грн	5,80785
9	Необхідна потужність плавлення ожеледі	$P_{\text{пл}}$	кВт/км	210
10	Кількість персоналу	m	чол.	3
11	Вартість роботи персоналу	$B_{\text{л.г}}$	грн./л-г	83,55

Рисунок 3.11 – Залежність $B_{\text{сум}} = f(\lambda)$

Отримане значення λ^* дозволяє визначити, коли починати плавку ожеледі. Якщо реальна інтенсивність ожеледоутворення L (визначається експериментально) перевищує λ^* , то це сигнал до запуску плавки, інакше система може бути перевантажена, а ризик аварій збільшиться.

На рис. 3.12. представлена залежність оптимального параметра λ від кількості ліній n при різних значеннях параметра обслуговування μ . З якого слідує, що Оптимальне значення λ^* збільшується зі зростанням n . Це пов'язано з тим, що більше ліній потребують обслуговування, тому інтенсивність надходження заявок на плавку зростає, щоб не допустити аварійного стану. Причиною такої поведінки є те, що ймовірність того, що на одній чи кількох ПЛ товщина стінки ожеледі наблизиться до критичного значення. Для уникнення перевантаження системи та мінімізації загальних витрат інтенсивність λ має бути вищою.

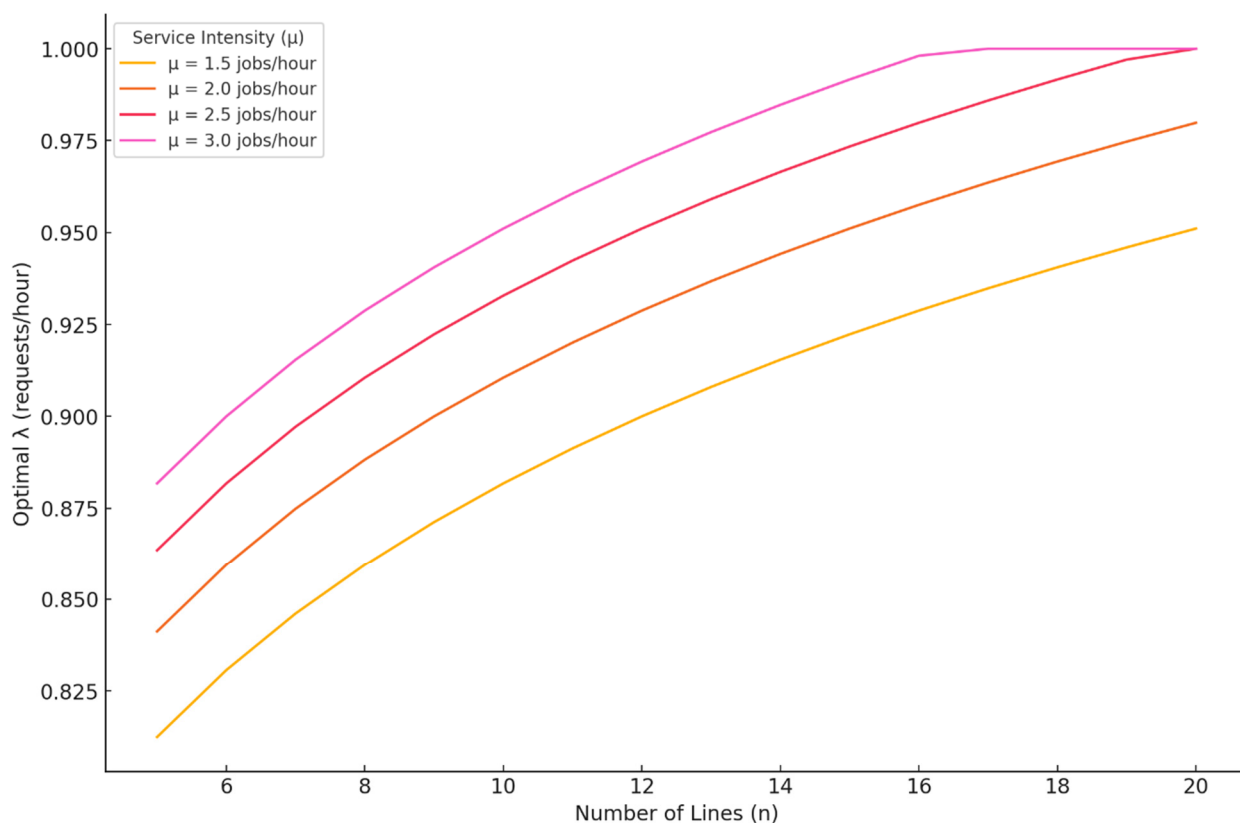


Рисунок 3.12 – залежність $\lambda = f(n)$ при різних μ

При високих значеннях μ (наприклад, $\mu=3.0$): система обслуговування працює швидше, тому оптимальне значення λ^* є меншим. Навіть якщо заявок надходить багато, система справляється з їх обслуговуванням, і немає необхідності підвищувати інтенсивність вхідного потоку.

Графік для великих μ показує більш «пласку» залежність λ^* від n . При низьких значеннях μ (наприклад, $\mu=1.5$). Система обслуговування працює повільніше, тому для уникнення перевантаження оптимальне λ^* є значно більшим. Система потребує більшої інтенсивності вхідного потоку заявок, щоб вчасно реагувати на загрозу перевищення критичної товщини ожеледі на проводах. За допомогою рис. 3.12 можливо планувати ресурсне забезпечення системи обслуговування залежно від кількості ліній і визначати, наскільки ефективно вона працює при різних параметрах.

Розглянутий підхід дозволяє ефективно визначати пріоритети плавки ожеледі на повітряних лініях:

- плавка на лінії з найбільшою товщиною стінки ожеледі виконується першочергово, оскільки саме ці лінії мають найвищий ризик аварійного стану.
- лінії з меншою товщиною стінки ожеледі залишаються в черзі, очікуючи зменшення ризику.

У цілому, при проведенні плавки ожеледі на групі ліній:

- збільшення кількості ліній підвищує важливість правильно визначати інтенсивність λ для своєчасного початку плавки, щоб уникнути перевищення критичної товщини ожеледі $D_{кр}$ на лініях;
- за умови великої кількості ліній, потрібна більш ретельна координація та моніторинг стану;
- збільшення швидкості обслуговування зменшує оптимальне значення λ^* , що дозволяє знизити навантаження на систему обслуговування та сприяє економічно ефективному проведенню плавки без перевантаження обладнання та персоналу;
- своєчасний початок плавки на критичних лініях знижує ймовірність пошкодження через перевищення нормативної товщини стінки ожеледі.

3.3 Оцінка ефективності проведення плавки ожеледі на ПЛ 10 кВ

У світовій практиці набули значного поширення методики фінансово-економічної оцінки інвестицій, що були розроблені Організацією Об'єднаних Націй з промислового розвитку (UNIDO). Серед різних інструментів аналізу інвестиційних проектів особливе місце посідає показник NPV (чиста теперішня вартість), який став найбільш вживаним при ухваленні інвестиційних рішень. Цей показник є різницею між сумою дисконтованих грошових надходжень від інвестицій, що були приведені до теперішньої вартості за певною відсотковою ставкою та початковим обсягом інвестованих коштів [22, 23]:

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1 + RD)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{(1 + RD)^i}. \quad (3.25)$$

Враховуючи те, що проект потребує здійснення одноразових інвестиційних витрат на організацію удосконаленого процесу плавки ожеледі, то розрахунок виконується згідно формули [23]:

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1 + RD)^i} - I_0, \quad (3.26)$$

де CF_i – грошові надходження, які пов'язані з реалізацією проекту за i -й рік;

I_0 – величина одноразових інвестицій;

i – номер року роботи проекту ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

n – строк служби проекту, для розподільних мереж приймаємо 8 років [21];

RD – процентна ставка дисконту, приймаємо рівною усередненій процентній ставці (за часом) кредитів у гривнях строком більше 5-ти років, наданих НБУ нефінансовим корпораціям. У липні – листопаді 2023 р. $RD = 17,0\%$

[25]. При проведенні розрахунку приймаємо, що кожного наступного року ця відсоткова ставка кредиту знижується на 0,5%.

Якщо виявиться, що $NPV > 0$, то інвестиція в удосконалену плавку ожеледі на ПЛ 10 кВ доцільна.

При проведенні плавок ожеледі на ПЛ 10 кВ грошові надходження i -го року реалізації проекту CF_i виникають за рахунок зменшення наступних економічних показників:

- витрат на електроенергію при проведенні плавок ожеледі, ΔB_1 ;
- витрат на відновлення пошкоджених ПЛ, ΔB_2 ;
- збитків споживачів, внаслідок недоданої їм електроенергії, ΔZ ;
- втраченого оператором системи розподілу прибутку від реалізації електроенергії споживачам через аварії, $\Delta \Pi$.

Тоді

$$CF_i = \Delta B_{1,i} + \Delta B_{2,i} + \Delta Z_i + \Delta \Pi_i. \quad (3.27)$$

Скорочення витрат на електроенергію при проведенні плавок ожеледі досягається за рахунок зменшення їх загальної тривалості та підвищення успішності:

$$\Delta B_{1,i} = c_{ц.з.i} (W_{1,i} - W_{2,i}), \quad (3.28)$$

де $c_{ср.зв.i}$ – прогнозована ціна закупівлі електроенергії на ринках електричної енергії 5807,85 грн./МВт·год [26]. При проведенні розрахунків вважається, що середньозважена ціна на електричну енергію буде зростати щорічно на 20%;

$W_{1,i}$, $W_{2,i}$ – річна витрата електроенергії на проведення плавок ожеледі у i -му році, відповідно, до оптимізації їх проведення та після.

Зменшення витрат на відновлення пошкоджених ПЛ:

$$\Delta B_{2,i} = \Delta \omega B_{\text{л}} l_0 l_{\Sigma} - E_{p,i}, \quad (3.29)$$

де $\Delta \omega$ – спад параметра потоку відмов ПЛ 10 кВ після впровадження удосконаленої системи плавки ожеледі;

$B_{\text{л}}$ – витрати на відновлення 1 км ПЛ 10 кВ, що виконана на залізобетонних опорах проводом АС-50/8, становлять 205 тис. грн./км. Приймаємо, що вартість відновлення ПЛ щорічно зростає на 15%;

l_0 – частка довжини лінії, що потребує відновлення після ожеледної аварії, складає 7,9%;

l_{Σ} – середнє значення сумарної довжини групи повітряних ліній напругою 10 кВ розподільної мережі для однієї ПС 35/10 кВ становить 95 км.

Практика вдосконалення технологічного процесу плавки ожеледі показує, що в середньому її успішність вдається збільшити на 30-40% [24], для подальших розрахунків приймаємо 35%. Отже, очікуване підвищення надійності (спад параметру потоку відмов) ПЛ складе:

$$\Delta \omega = \omega_1 - \omega_2 = 0,00886 - 0,00126 = 0,0076 \text{ 1/рік}, \quad (3.30)$$

де ω_1 – параметр потоку відмов для ПЛ на яких плавка ожеледі проводиться без застосування засобів автоматизації та вдосконалення технологічного процесу;

ω_2 – параметр потоку відмов ПЛ на яких впроваджені заходи з підвищення ефективності плавки ожеледі.

Річні експлуатаційні витрати у i -му році:

$$E_{p,i} = A + B_i + Z + B_p, \quad (3.31)$$

A – амортизаційні відрахування, становлять 12,5% від додаткових капіталовкладень K_d :

$$A = 0,125K_d; \quad (3.32)$$

B_i – витрати на відновлення пошкоджених ліній за умови проведення вдосконалених плавов ожеледі в i -му році:

$$B_i = \omega_2 B_{\Sigma} l_0 l_{\Sigma}; \quad (3.33)$$

Z – очікувані річні збитки споживачів, що спричинені перервами в електропостачанні внаслідок технологічних порушень, викликаних ожеледно-вітровими явищами:

$$Z = z_0 \omega_2 l_{\Sigma} P_{\text{ср}} \bar{T}_v; \quad (3.34)$$

де z_0 – питомий показник збитку від аварійно недоданої споживачам електроенергії, при розрахунках приймається 114 грн./кВт·год на основі закордонного досвіду;

P_p – середньорічна активна потужність споживачів ПЛ 10 кВ, що підключена до підстанції;

$\bar{T}_v$ – середній час відновлення ділянки повітряної лінії 10 кВ, становить $5,48 \cdot 10^{-3}$ років;

B_p – витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання для плавки ожеледно-паморозевих відкладень:

$$B_p = T_p Z_{\text{ср.г}} \left(1 + \frac{H_{\text{д.з}}}{100} \right) \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100} \right), \quad (3.35)$$

T_p – норма витрати часу на виконання профілактичних робіт, прийнята 20 годин на рік;

$З_{ср.г}$ – середньогодинна зарплата обслуговуючого персоналу, становить 83,55 грн.;

$H_{д.з}$ – норматив додаткової зарплати, 15%;

$H_{соц}$ – норматив відрахувань у соціальні фонди, 22%.

Зменшення очікуваних річних збитків споживачів, що спричинені перервами в електропостачанні внаслідок технологічних порушень, викликаних ожеледно-вітровими явищами:

$$\Delta Z_i = z_0 \Delta \omega l_{\Sigma} P_{ср} \bar{T}_v. \quad (3.36)$$

Очікуване зменшення втраченого оператором системи розподілу прибутку від реалізації споживачам електроенергії внаслідок ожеледно-вітрових аварій:

$$\Delta \Pi_i = \Delta c_i \Delta \omega l_{\Sigma} P_{ср} \bar{T}_v, \quad (3.37)$$

де Δc_i – прибуток енергокомпанії в i -му році внаслідок продажу 1 кВт·год електроенергії, приймається рівним різниці відпускної вартості електроенергії для промислових споживачів II-го класу напруги c_{II} та оптової вартості електроенергії: $\Delta c_i = c_{II,i} - c_{оп,i}$.

Станом на листопад 2024 р. орієнтовно $c_{II} = 8083,34$ грн./МВт·год [26].

Інвестиції включають у себе капітальні витрати на впровадження системи K , тобто $I_0 = K$. Необхідні капіталовкладення складаються з вартості обладнання B_o та додаткових витрат на обладнання $B_{д.о}$.

Додаткові витрати $B_{д.о}$ на обладнання включають:

- вартість монтажних робіт – 10%;
- вартість пусконаладжувальних робіт – 7%;
- витрати на навчання обслуговуючого персоналу – 3%.

Отже,

$$K = B_o + B_{до} = 1,2B_o, \quad (3.38)$$

де B_o – вартість обладнання системи, у цінах 2024 року складає 74200 грн.

Дисконтований період окупності плавки ожеледі з удосконаленою організацією проведення [27]:

$$DPP = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1 + RD)^i} > I_0, \quad (3.39)$$

Результати розрахунку очікуваних техніко-економічних показників впровадження інформаційної системи моніторингу стану для зони обслуговування однієї ПС 35/10 кВ представлено в табл. 3.2.

У табл. 3.3 наведено розраховані техніко-економічні показники від впровадження модернізованої системи плавки ожеледі для зони обслуговування однієї підстанції 35/10 кВ.

Отже, виявиться, що на 2-му році експлуатації $NPV = 27024,08 > 0$, тобто інвестиція в удосконалену плавку ожеледі на ПЛ 10 кВ доцільна.

Удосконалена система плавки ожеледі на повітряних лініях електропередачі має суттєві переваги. Завдяки більш точному визначенню оптимального моменту початку плавки, вона забезпечує економію електроенергії при проведенні захисних заходів та підвищує надійність електропостачання споживачів.

3.4 Висновки до розділу

1. Встановлено, що найбільш поширеним і ефективним методом захисту ПЛ у зимовий період є плавка ожеледі струмами КЗ завдяки його простоті та мінімальній кількості необхідних оперативних перемикачів, проте його проведення потребує відключення електроспоживачів, а метод зустрічного вмикання фаз хоча і забезпечує безперервне електропостачання споживачів, проте його застосування обмежується певною топологією мережі та наявністю електричного зв'язку між підстанціями.

2. Розраховано, що оптимальна інтенсивність вхідного потоку заявок λ^* , яка мінімізує загальні витрати та ризик аварій на ПЛ, становить 0,947 з урахуванням технічних обмежень потужності трансформаторів та операційних витрат на процес плавки, а збільшення кількості ПЛ вимагає підвищення значення λ^* , щоб забезпечити своєчасне їх обслуговування та запобігти перевищенню критичної товщини стінки ожеледі.

3. Визначено, що впровадження модернізованої системи плавки ожеледі є економічно доцільним ($NPV > 0$), а її дисконтований період окупності становить близько 4-х років.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання, що стосується підвищення ефективності процесу плавки ожеледі на повітряних лініях електропередачі напругою 10 кВ. Робота спрямована на удосконалення технологічних підходів та оптимізацію ресурсного забезпечення для мінімізації аварійних ризиків і витрат.

Основні результати дослідження полягають у наступному:

1. Встановлено, що ожеледно-вітрові аварії є значним природним ризиком для повітряних ліній 6-10 кВ, які найбільше зазнають ушкоджень через їх значну протяжність та конструктивні особливості, а їх масштабні аварії, що спричинені екстремальними метеорологічними умовами, мають циклічний характер і відбуваються приблизно раз на 10-15 років, що підтверджує актуальність вдосконалення заходів щодо підвищення їх надійності.

2. Визначено, що фактичний параметр потоку відмов для ПЛ 6-10 кВ у центральноукраїнському регіоні становить 0,126 1/рік·км, що на 65% перевищує проектне значення внаслідок впливу екстремальних кліматичних умов і відсутності ефективних систем захисту від ожеледно-паморозевих відкладень, а серед практичних методів захисту найбільш ефективною є плавка ожеледі, яка потребує удосконалення організації на групах взаємопов'язаних ліній для забезпечення високої надійності в умовах інтенсивного ожеледоутворення.

3. Визначено, що найбільшу небезпеку для повітряних ліній становлять атмосферні відкладення у вигляді ожеледі, зернистої паморозі, замерзлого мокрого снігу та їх складних сумішей, а ключовими чинниками їх формування є температура повітря та швидкість вітру, діаметр переохолоджених крапель рідких опадів, причому: скловидна ожеледь утворюється за температур від 0 до -4 °С, зерниста паморозь – від 0 до -8 °С, а складні відкладення – від 0 до -4 °С. Швидкість вітру також впливає на їх утворення: ожеледь найчастіше виникає за

2-4 м/с, зерниста паморозь – за 1–8 м/с, а мокрий сніг та кристалічна паморозь – у затишшя.

4. Встановлено, що збільшення висоти підвішування проводів з 2 м до 20 м спричиняє триразове зростання маси ожеледно-паморозевих відкладень, діаметр проводів також впливає на їх масу та густину, малі кути напрямку вітру відносно осі проводу зменшують масу відкладень на 60-80%, а закручування проводів під дією асиметричних навантажень сприяє утворенню стабільних ожеледних муфт, що подовжують період утримання відкладень.

5. Встановлено, що практичним і ефективним методом захисту ПЛ у зимовий період є плавка ожеледі струмами КЗ завдяки його простоті та мінімальній кількості необхідних оперативних перемикачів, проте його проведення потребує відключення електроспоживачів, а метод зустрічного вмикання фаз хоча і забезпечує безперервне електропостачання споживачів, однак обмежується наявною топологією конкретної мережі та наявністю електричного зв'язку між підстанціями.

6. Розраховано, що оптимальна інтенсивність вхідного потоку заявок λ^* , яка мінімізує загальні витрати та ризик аварій на ПЛ, становить 0,947 з урахуванням технічних обмежень потужності трансформаторів та операційних витрат на процес плавки.

7. Визначено, що впровадження модернізованої системи плавки ожеледі є економічно доцільним, оскільки чиста теперішня вартість NPV є позивною, а дисконтований період окупності становить близько 4 років, що підтверджує ефективність інвестицій у запропоновану цю технологію.

8. Визначено, що забезпечення безпечної експлуатації електроустановок досягається шляхом реалізації комплексу організаційних і технічних заходів. До основних організаційних заходів належать: затвердження переліку робіт, що виконуються за нарядами, розпорядженнями чи в порядку поточної експлуатації; призначення відповідальних осіб; оформлення робіт згідно з встановленими процедурами; підготовка робочих місць; допуск до роботи; нагляд під час

виконання завдань, а також організація перерв і закінчення робіт, а до технічних – відключення напруги, захисне заземлення, занулення, захисне відключення, електричне розділення мереж різної напруги, застосування низької напруги, ізоляція струмоведучих частин та вирівнювання потенціалів.

9 Розраховано, що для досягнення нормативного значення опору заземлюючого пристрою ПС 35/10 кВ у 4 Ом, за умови використання природного заземлювача з опором 20 Ом, необхідно побудувати заземлювальний пристрій із 4-х вертикальних електродів довжиною 2 м і діаметром 20 мм, розмістивши їх по кутах прямокутного горизонтального заземлювача зі сторонами 35×46 м, що виконаний з прутка діаметром 20 мм.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Козловський, О. А. Обґрунтування вибору параметру діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній розподільних електричних мереж / О. А. Козловський, А. Ю. Орлович, А. В. Некрасов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3. – 2015. – С. 149-157.
2. Дослідження чутливості та стійкості техніко-економічної моделі системи плавлення ожеледі на групі взаємопов'язаних ПЛ 10 кВ / О. А. Савченко, О. О. Мірошник, О. А. Козловський та ін. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. – Вип. 24. – Том 3. – С. 114-121.
3. Козловський О. А., Сіріков, О. І. Автоматизована система технічної діагностики проводів повітряних ліній електропередачі 6-10 кВ. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2012. – Вип. 25. – Том 1. – С. 383-390.
4. Білаш І.П., Савченко О.А. Оптимізація потужності плавлення ожеледі на ПЛ 6-10 кВ розподільних електричних мереж. Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. 2010. – Вип. 102. – С. 14-16.
5. Жарков В. Я. Плавка ожеледі на проводах – дієвий засіб підвищення надійності ПЛ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ. – Харків, 2010. – Вип. 101. – С. 41-42.
6. Білаш І. П. Задачі моніторингу повітряних ліній електропередавання в ожеледних районах / І. П. Білаш, О. А. Савченко, О. В. Пархоменко // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2011. – Вип. 117. – С. 13-15.

7. Черемісін Н. М., Зубко В. М., Пархоменко О. В. До питання про контроль стану ожеледно-паморозевих відкладень на ВЛ 0,38-110 кВ та планування ремонтних робіт на них // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, 2010. – Вип. 101. – С. 16–18. (Серія «Технічні науки»).
8. Фокин Ю. А. Туфанов В. А. Оценка надежности систем электроснабжения. М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
9. Правила улаштування електроустановок. Х.: Вид-во «Форт», 2017. – 760 с.
10. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires. Working Group B2.29. December 2010. – 100 p.
12. Determination of Current Required to De-Ice Transmission Line Conductors / Prud'Homme P., Roux M.O., Guilbault P at all. Proc. of 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 2005), Montréal, June 2005.
13. Гребенюк А.М. До питання про реальні методи попередження аварій від обледеніння ЛЕП // Гірничі електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2003. – Вип. 70. – С.15-18.
14. Atmospheric Icing of Power Networks / M Farzaneh (ed.), Springer, 2008. 381 p.
15. Leblond A. and A. Côté, “Atmospheric Icing of OPGW: Monitoring and De-Icing”, Proc. Int'l OPGW Symposium , Montréal, May 3-5, 2004
16. Kozlovskiy, O., Trushakov, D., Savchenko, O., Rendzinyak, S., & Korud, V. (2022). Improving the operation characteristics of non-insulated overhead power lines. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98(2), 28-32.
17. Хоменко І. А. Умови і механізми утворення замерзаючих опадів й ожеледно-паморозевих явищ над територією України: монографія. – Одеса: ТЕС, 2018. – 108 с.
18. Хоменко І. А. Метеорологічні умови утворення ожеледно–паморозевих та снігових відкладень в Україні. Фізична географія та геоморфологія. – 2015. – Вип. 4(2). – С. 5-7.

19. Кліматичне забезпечення будівництва та експлуатації електричних мереж : СОУ-НЕС 21.262:2008. – К. : ОЕП «ГРІФРЕ», 2008. – 35 с.
20. Дяков А.Ф., Засыпкин А.С., Левченко И.И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. – Пятигорск: РП «Южнергеонадзор. – 2000. – 284 с.
21. Литвинов А.Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник / А. Л. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 141 с.
22. ГКД 340.000.002-97. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику / Методика. Енергосистеми й електричні мережі. Затверджені наказом Міністерства Енергетики України від 20.01.97 №1 ПС та введені в дію з 01.01.97.
23. Верба В. А., Загородніх О. А. Проектний аналіз. К.: КНЕУ, 2000. 322 с.
24. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2017.
25. Цикл зниження облікової ставки: перші підсумки. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/tsykl-znyzhennya-oblikovoyi-stavky-pershi-pidsumky>
26. Ціни для побутових споживачів універсальної послуги. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.kresc.com.ua/firm-tariffs2024-11.shtml>
27. Гаркуша Н. М., Цуканова О. В., Горошанська О. О. Моделі і методи прийняття рішень в аналізі та аудиті. К.: Знання, 2012. 583 с.
28. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб.: для студ. спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.]; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2023. – 74 с.
29. Жидецкий В.Ц. Основы охраны труда. – Львів: Афіша, 2004. – 250 с.

ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Організаційні заходи з безпечної експлуатації електроустановок

До організаційних заходів з безпечної експлуатації електроустановок відносяться [29]:

- 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 у роботі та закінчення.
- Відповідальність за безпечне виконання робіт в електроустановках покладається на таких осіб [29]:

- працівника, який видає наряд, розпорядження;
- працівника, що дає дозвіл на підготовку робочого місця;
- працівника, яка готує робоче місце, допуск;
- працівника, який допускає до роботи (допускаючий);
- керівника робіт;
- працівника, який наглядає за безпечним виконанням робіт (наглядач);
- членів бригади.

Робітник, який видає наряд, розпорядження, встановлює можливість безпечного виконання роботи. Він відповідає за достатність і правильність зазначених у наряді заходів безпеки, за якісний і кількісний склад бригади і призначення працівників, відповідальних за безпечне виконання робіт, а також

за відповідність груп з електробезпеки працівників, які зазначені в наряді, роботі, що виконується.

Підготовка робочих місць і допуск можуть проводитись тільки з дозволу оперативних працівників. Забороняється змінювати передбачені нарядом (розпорядженням) заходи з підготовки робочих місць. Підготовку робочих місць, як правило, виконують два працівники, які мають право на оперативні перемикання в даній електроустановці. Дозволяється виконувати підготовку робочого місця керівнику робіт з одним із членів бригади, якщо вони мають права на оперативні перемикання в даній електроустановці.

Керівник робіт і наглядач повинні весь час перебувати на місці робіт, в міру можливості – на тій ділянці, де виконується найвідповідальніша і найбільш травмонебезпечна робота. Наглядачеві забороняється поєднувати нагляд з виконанням будь-якої роботи.

Члени бригади з групою III можуть виходити з РУ чи повертатися на робоче місце самостійно. Члени бригади з групою I і II – тільки у супроводі члена бригади з групою III або особи, яка має право одноособового огляду електроустановок. Кількість членів бригади, що залишаються на робочому місці, має бути не менше двох, включно з керівником робіт. Члени бригади, які повернулися, можуть стати до роботи тільки з дозволу керівника робіт.

У РУ, з яких знято напругу, можна залишатися на робочому місці і продовжувати роботу одному працівнику зі складу бригади.

Під час перерв у роботі протягом робочого дня (на обід, за умовами проведення робіт) бригада у повному складі виводиться з робочого місця. Двері приміщень РУ і огорожень електроустановки замикаються на замок. Наряд залишається у керівника робіт (наглядача). Плакати, огороження, заземлення залишаються на місці. Члени бригади не мають права повертатися на робоче місце за відсутності керівника робіт (наглядача). Допуск бригади до роботи після такої перерви здійснюється керівником робіт без оформлення в наряді. Під час перерв у роботі, пов'язаних із закінченням робочого дня, увесь склад бригади виводиться з робочого місця.

Керівник робіт (наглядач) здає наряд оперативному працівнику, а за його відсутності – залишає наряд в папці діючих нарядів. У електроустановках без місцевих оперативних працівників керівнику робіт (наглядачеві) дозволяється після закінчення робочого дня залишати наряд у себе.

Всі роботи, які проводяться в електроустановках, що не вимагають оформлення наряду, виконуються:

- за розпорядженнями уповноважених на це осіб, відповідно, з попереднім оформленням у журналі обліку робіт за нарядами і розпорядженнями або в оперативному журналі;
- у порядку поточної експлуатації.

Розпорядження про проведення робіт має разовий характер. Термін його дії визначається тривалістю робочого дня виконавців.

Працівник, який віддав розпорядження, призначає керівника робіт (наглядача), членів бригади, визначає можливість безпечного проведення робіт і визначає необхідні для цього організаційні та технічні заходи.

Розпорядження записується в журнал обліку робіт за нарядами і розпорядженнями особою, яка його віддала, або оперативним працівником.

За нарядом виконуються роботи на кінцевих муфтах КЛ, розміщених в РУ і на КЛ, що проходять по території і в кабельних каналах РУ, на пристроях зв'язку, розташованих в РУ, в колах електровимірювальних приладів і лічильників, увімкнених через вимірювальні трансформатори.

За розпорядженням в електроустановках до 1000 В можуть виконуватися ті роботи з монтажу, перевірки, регулювання, зняття для ремонту і встановлення вимірювальних приладів, лічильників, пристроїв релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку, роботи на приводах комутаційних апаратів, у вторинних колах і в колах електроприводів схем автоматичного та дистанційного керування, які провадяться:

- в приміщеннях, де немає струмовідних частин напругою понад 1000 В;
- в приміщеннях, де струмовідні частини напругою понад 1000 В перебувають за постійними суцільними або сітчастими огороженнями, а також в приладних відсіках КРУ;

- в коридорах керування ЗРУ, де неогорожені струмовідні частини напругою понад 1000 В розташовані над проходом на висоті не менше 2,75 м під напругою до 35 кВ включно і на висоті 3,5 м під напругою до 110 кВ включно;

- у шафах релейного захисту ВРУ, в агрегатних шафах і приводах вимикачів, винесених за сітчасте огороження.

До робіт, що виконуються за розпорядженням протягом однієї зміни із зняттям напруги в електроустановках до 1000 В, належать: ремонт магнітних пускачів, пускових кнопок, автоматичних вимикачів, рубильників, реостатів, контакторів та подібної до них пускової і комутаційної апаратури за умови встановлення її поза щитами і збірками; ремонт окремо розташованих магнітних станцій і блоків керування; заміна запобіжників; ремонт освітлювальної проводки; роботи, що виконуються в електроустановках з одностороннім живленням; ремонт одиничних електроприймачів (електродвигунів, електрокалориферів тощо).

Зазначені роботи мають виконувати дві особи зі складу ремонтних працівників, один з яких повинен мати групу III, інший – групу II. В окремих випадках з відома працівника, що віддає розпорядження, допускається виконувати ці роботи одному ремонтному працівнику з групою III.

Керівник робіт з моменту отримання дозволу на проведення робіт за розпорядженням здійснює нагляд за працівниками, які входять до складу бригади, щодо дотримання ними правил безпеки.

Після закінчення робіт керівник робіт має вивести бригаду з місця роботи, перевірити робоче місце і повідомити про це працівнику, який віддав розпорядження.

Закінчення робіт оформлюється в журналі обліку робіт за нарядами і розпорядженнями.

А.2 Технічні заходи з безпечної експлуатації електроустановок

Безпека експлуатації електроустановок досягається використанням наступних технічних заходів: захисного заземлення, занулення, захисного відключення, електричного розділення мереж різної напруги, застосування малої напруги, ізоляцією струмоведучих частин, вирівнювання потенціалів [29].

У цих електроустановках мережу напругою до 1000 В, зв'язану з мережею напругою вище 1000 В через трансформатор, захищають від появи у ній високої напруги при пошкодженні ізоляції між обмотками нижчої і вищої напруги пробивним запобіжником.

У електроустановках напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю застосовується занулення або захисне відключення.

Захисне відключення застосовується як основний або додаткового спосіб захисту у випадку, якщо не може бути забезпечена безпека застосуванням захисного заземлення або занулення або їх застосування викликає труднощі.

При неможливості застосування захисного заземлення, занулення або захисного відключення допускається обслуговування електроустановок з ізолюючих майданчиків.

Усунення небезпеки поразки людини електричним струмом під час дотику до не струмоведучих частин, що знаходяться під напругою досягається шляхом використання захисного заземлення. Яке призначене для зниження до безпечних меж напруги дотику і кроку за рахунок малого опору заземлювача.

Занулення передбачає глухе заземлення нейтралі джерела або трансформатора трифазного струму, одного виводу джерела однофазного струму, наявність нульового дроту і його повторного заземлення.

Заземлення нейтралі джерела струму має на меті знизити напругу на корпусах устаткування і на нульовому проводі, з яким ці корпуси з'єднані, до безпечного значення при замиканні фазного провідника на землю.

Повторне заземлення нульового проводу призначене для зниження напруги на корпусах устаткування при замиканні фази на корпус як при

справному, так і при обірваному нульовому дроті. Занулення в електроустановках до 1000 В застосовується в 4-провідних мережах з глухозаземленою нейтраллю трансформатора або генератора.

Пристрій захисного відключення (ПЗВ) складається з чутливого елемента, що реагує на зміну контрольної величини, і виконавчого органу, що відключає відповідну ділянку мережі.

Чутливий елемент може реагувати на потенціал корпусу, струм замикання на землю, напругу і струм нульової послідовності, оперативний струм. Як вимикачі можуть застосовуватися контактори, магнітні пускачі, автоматичні вимикачі з незалежним розчіплювачем, спеціальні вимикачі для ПЗВ.

Електричне розділення мереж здійснюється через спеціальний роздільний трансформатор, що відокремлює мережу з ізольованою або глухозаземленою нейтраллю від ділянки мережі, що живить електроприймач. При цьому зв'язок між живлячою мережею і мережею приймача здійснюється через магнітне поле. Роздільний трансформатор є спеціальним трансформатором з коефіцієнтом трансформації, рівним 1, напругою не більше 380 В, з підвищеною надійністю конструкції і ізоляції. Від трансформатора здійснюється живлення не більш одного приймача із струмом не більше 15 А.

Низька напруга (до 42 В) застосовується для ручного інструменту, переносного і місцевого освітлення в будь-яких приміщеннях і поза ними. Вона застосовується також в приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечних для живлення світильників місцевого стаціонарного освітлення, якщо вони розташовані на висоті менше 2,5 м.

Вирівнювання потенціалів корпусів електроустаткування і пов'язаних з ним конструкцій і основи здійснюється пристроєм контурного заземлення, електроди якого розташовуються навколо будівлі або споруди із заземленим або зануленим устаткуванням. У середині контурного заземлювача під підлогою приміщення або майданчика прокладаються горизонтальні повздовжні і поперечні електроди, з'єднані зваркою з електродами контуру. Вирівнювання потенціалів корпусів обладнання і конструкцій здійснюється приєднанням

конструкцій і всіх корпусів до мережі занулення або заземлення. Вірювання потенціалів застосовується як додатковий технічний спосіб захисту при наявності занулення або заземлення у приміщеннях з підвищеною небезпекою або особливо небезпечних.

Персонал, що обслуговує електроустановки, повинен мати всі необхідні електрозахистні засоби, що забезпечують безпеку обслуговування цих електроустановок.

А.3 Розрахунок заземлюючого пристрою

Необхідно виконати заземлюючий пристрій для ПС 35/10 кВ від якої отримує живлення група ПЛ 10 кВ, загальною довжиною 95 км.

Попередньо намічаємо, що заземлювальний пристрій розташовується по периметру ПС, що має розміри 35×46 м. У якості вертикальних заземлювачів використовуються сталі стержні діаметром 20 мм і довжиною 2,0 м. Верхні кінці електродів розташовують на глибині 0,6 м від поверхні ґрунту. До них приварюють горизонтальні електроди стрижневого типу із тієї ж сталі, що і вертикальні електроди. Опір природного заземлювача рівний 20 Ом.

Розрахункову схему заземлюючого пристрою представлено на рис. А.1.

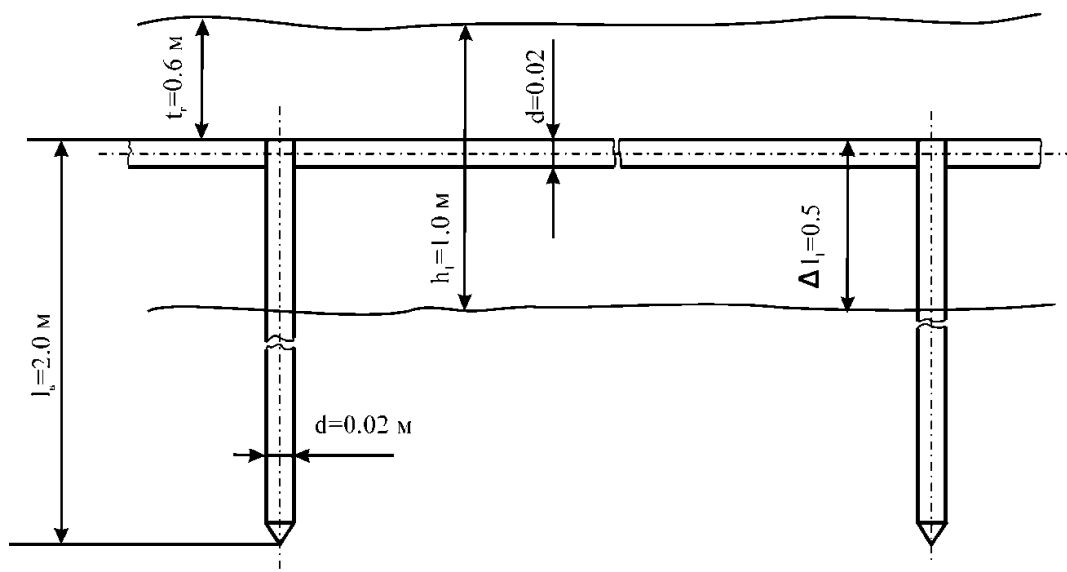


Рисунок А.1 – Розрахункова схема заземлюючого пристрою

Для сторони ВН у відповідності з [9] опір заземлюючого пристрою визначається за формулою:

$$R_3 \leq \frac{U_p}{I_3} = \frac{125}{9,3} = 13,4 \text{ Ом},$$

де $U_p = 125 \text{ В}$, так як заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок до 1 кВ і вище;

I_3 – найбільший струм, що протікає через заземлюючий пристрій при замиканні на землю:

$$I_3 = \frac{U \cdot l_{\text{пл}}}{350} = \frac{10 \cdot 95}{350} = 27,1 \text{ А}.$$

де $l_{\text{кл}}$ – загальна довжина кабельних мереж.

Опір заземлюючого пристрою для електроустановок напругою до 1 кВ не повинен перевищувати 4 Ом [9], тому приймаємо, що $R_3 = 4 \text{ Ом}$.

Попередньо намічаємо рядне розташування вертикальних електродів.

Необхідний опір штучного заземлювача:

$$R_i = \frac{R_3 \cdot R_{\text{п}}}{R_{\text{п}} - R_3} = \frac{4 \cdot 20}{20 - 4} = 5,0 \text{ Ом};$$

де $R_{\text{п}}$ – опір природного заземлювача, Ом

Розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних та горизонтальних заземлювачів:

$$\rho_{\text{р.п}} = \rho_{\text{п}} \cdot K_{\text{п.г}} = 80 \cdot 4 = 320 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\rho_{\text{р.в}} = \rho_{\text{п}} \cdot K_{\text{п.в}} = 500 \cdot 1,8 = 900 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

де $\rho_{\text{п}}$ – питомий опір ґрунту, Ом·м;

$K_{п.г}, K_{п.в}$ – коефіцієнти запасу, відповідно, для горизонтальних та вертикальних електродів.

Еквівалентний питомий опір вертикального стрижневого електрода при розміщенні його двошаровому ґрунті

$$\rho_{п.в.е} = \frac{l}{\frac{\Delta l_1}{\rho_{п.г}} + \frac{\Delta l_2}{\rho_{п.в}}} = \frac{2}{\frac{0,4}{500} + \frac{1,6}{80}} = 96,15 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Опір розтіканню одного вертикального електрода стрижневого типу:

$$\begin{aligned} R_{о.в.е} &= \frac{\rho_{п.в.е}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot l}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4t+1}{4t-1} \right] = \\ &= \frac{96,2}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot 2}{20 \cdot 10^{-3}} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,6 + 2}{4 \cdot 1,6 - 2} \right] = 43,0 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

де t – відстань від поверхні землі до середини електрода:

$$t = 0,6 + 0,5 \cdot l_{в} = 0,6 + 0,5 \cdot 2 = 1,6 \text{ м}.$$

Приблизна кількість вертикальних електродів за попередньо прийнятого коефіцієнта використання $K_{i.в} = 0,74$ (відношення відстані між електродами до їх довжини рівне 3):

$$N = \frac{R_{о.в.е}}{K_{i.в} \cdot R_i} = \frac{43,0}{0,74 \cdot 4} = 12 \text{ шт.}$$

Розрахунковий опір розтіканню горизонтальних заземлювачів:

$$R_r = \frac{\rho_{п.г}}{2 \cdot \pi \cdot l_r \cdot K_{i.г}} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_r^2}{2 \cdot d \cdot t_r} = \frac{320}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,6 \cdot 0,56} \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot 162^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6} \right] = 8,2 \text{ Ом},$$

де $K_{i,\Gamma}$ – коефіцієнт використання горизонтальних заземлювачів;

l_{Γ} – сумарна довжина горизонтальних електродів, м.

Уточнюємо необхідний опір вертикальних електродів:

$$R_{\text{в.е}} = \frac{R_{\text{п.г.е}} \cdot R_i}{R_{\text{п.г.е}} - R_i} = \frac{8,2 \cdot 5}{8,2 - 5} = 12,8 \text{ Ом.}$$

Кількість вертикальних електродів за коефіцієнта використання $K_{i,\text{в.е}} = 0,86$:

$$N = \frac{R_{\text{о.в.е}}}{K_{i,\text{в.е}} \cdot R_{\text{в.е}}} = \frac{43,0}{0,86 \cdot 4,51} = 4 \text{ шт.}$$

Остаточно, приймаємо до установки 4 вертикальних заземлювачі, тоді їх опір складе:

$$R_{\text{в.е}} = \frac{R_{\text{о.в.е}}}{K_{i,\text{в.е}} \cdot N} = \frac{43,0}{0,86 \cdot 4} = 12,5 \text{ Ом.}$$

Отже, кінцевий опір заземлювального пристрою складе

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{в}}} + \frac{1}{R_{\Gamma}} + \frac{1}{R_{\Pi}}} = \frac{1}{\frac{1}{12,5} + \frac{1}{8,2} + \frac{1}{20}} = 3,96 \text{ Ом.}$$

Перевірка:

$$R_3 = 3,96 < R_{\text{н}} = 4 \text{ Ом.}$$

A.4 Висновки

1. Встановлено, що основними організаційними заходами з безпечної експлуатації електроустановок є затвердження переліку робіт, що виконуються за нарядами, розпорядженнями чи в порядку поточної експлуатації, призначення відповідальних осіб, оформлення робіт відповідно до встановлених процедур, підготовка робочих місць, допуск до роботи, нагляд під час виконання завдань, а також організація перерв і закінчення робіт.

2. Встановлено, що основними технічними заходами з безпечної експлуатації електроустановок є відключення напруги, захисне заземлення, занулення, захисне відключення, електричне розділення мереж різної напруги, застосування низької напруги, ізоляція струмоведучих частин, вирівнювання потенціалів.

3. Розраховано, що для досягнення нормативного значення опору заземлюючого пристрою ПС 35/10 кВ у 4 Ом, за умови використання природного заземлювача з опором 20 Ом, необхідно побудувати заземлювальний пристрій із 4-х вертикальних електродів довжиною 2 м і діаметром 20 мм, розмістивши їх по кутах прямокутного горизонтального заземлювача зі сторонами 35×46 м, що виконаний з прутка діаметром 20 мм.