

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 ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2023 р.

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

на тему:

«Моніторинг ожеледоутворення на повітряних лініях 110 кВ»

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу магістратури, групи ЕЕ-22М

ОПП «Електротехнічні системи

електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Владислав КОРШИКОВ

«_____» _____ 2023 р.

Керівник роботи к. т. н., доц.

_____ Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ

«_____» _____ 2023 р.

Рецензент к. т. н., доц. _____

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
електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2023 р.

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

Коршикову Владиславу Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моніторинг ожеледоутворення на повітряних лініях 110 кВ.
Monitoring of ice formation on 110 kV overhead lines

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 25.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи зниження відмов повітряних ліній 110 кВ у екстремальних погодних умовах, на основі удосконалення їх систем моніторингу ожеледоутворення.

Завдання: 1. Виконати огляд найбільших ожеледно-вітрових аварій в електромережах України. 2. Провести аналіз стану повітряних ліній 110 кВ. 3. Проаналізувати існуючі систем моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ. 4. Визначити інтегральні параметри найбільш небезпечних для ПЛЕ ожеледно-паморозевих відкладень і механізми їх утворення. 5. Обґрунтувати параметри контролю системи моніторингу ожеледоутворення. 6. Розробити систему моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ. 7. Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній 110 кВ в умовах ожеледоутворення за рахунок впровадження системи моніторингу. 8. розробити організаційні та технічні заходи з ТБ та ОП при експлуатації ЕУ.

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. Обґрунтування актуальності дослідження</i>	<i>4.09 – 8.09</i>	
2	<i>Розділ 1. Стан питання</i>	<i>11.09 – 22.09</i>	
3	<i>Розділ 2. Вибір параметрів контролю системи моніторингу ожеледоутворення</i>	<i>25.09 – 27.10</i>	
4	<i>Розділ 3. Розробка системи моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ</i>	<i>1.11 – 24.11</i>	
5.	<i>Розділ 4. Охорона праці</i>	<i>27.11 – 1.12</i>	
6.	<i>Формулювання загальних висновків</i>	<i>4.12-7.12</i>	
7.	<i>Оформлення списку використаних джерел</i>	<i>6.12 – 11.12</i>	
8.	<i>Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді слайдів</i>	<i>12.12 – 20.12</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис керівника

Козловський О. А.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис здобувача

Коришков В. В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 101 с.; 29 рис.; 8 табл.; 48 джерел; 1 дод. на 9 с.

Коршиков В. В. Моніторинг ожеледоутворення на повітряних лініях 110 кВ. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єктом дослідження є процес утворення ожеледно-паморозевих відкладень на повітряних лініях електропередавання 110 кВ.

Предметом дослідження є механічні навантаження від вітру та ожеледно-паморозевих відкладень на проводи повітряних ліній 110 кВ

Метою кваліфікаційної роботи є зниження відмов у роботі повітряних ліній 110 кВ у екстремальних погодних умовах, на основі удосконалення їх систем моніторингу ожеледоутворення.

У першому розділі роботи виконано аналіз стану повітряних ліній 110 кВ, методів і засобів, що підвищують їх стійкість до ожеледно-вітрових аварій. Другий розділ присвячений вибору параметрів контролю ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії, на основі аналізу їх інтегральних параметрів і механізмів утворення. У третьому розділі проведено розробку системи моніторингу ожеледоутворення на повітряних лініях 110 кВ і її основних підсистем. У додатку виконано аналіз організаційних і технічних заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках загального призначення напругою вище 1000 В. За результатами роботи зроблено висновки та рекомендації щодо підвищення ефективності запропонованої системи моніторингу ожеледоутворення.

Ключові слова: повітряна лінія електропередавання, система моніторингу, обледеніння проводів, ожеледно-паморозеві відкладення, вимірювальний перетворювач

ABSTRACT

Qualification work 101 p.; 29 Fig.; 8 tables; 48 sources; 1 addition on 9 p.

Korshykov I. A. Monitoring of ice formation on 110 kV overhead lines. – 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, 2023.

The object of the study is the process of formation of ice-frost deposits on 110 kV overhead power lines.

The subject of the research is mechanical loads from wind and ice-frost deposits on wires of 110 kV overhead lines

The purpose of the qualification work is to reduce failures in the operation of 110 kV overhead lines in extreme weather conditions, based on the improvement of their icing monitoring systems.

In the first section of the work, an analysis of the condition of 110 kV overhead lines, methods and means that increase their resistance to ice and wind accidents was performed. The second section is devoted to the selection of parameters for controlling ice-frost deposits on the overhead line, based on the analysis of their integral parameters and formation mechanisms. In the third section, the development of the icing monitoring system on 110 kV overhead lines and its main subsystems was carried out. The appendix contains an analysis of organizational and technical measures that ensure the safety of work in general-purpose electrical installations with a voltage above 1000 V. Based on the results of the work, conclusions and recommendations are made to improve the effectiveness of the proposed icing monitoring system.

Keywords: overhead power line, monitoring system, icing of wires, glaze, frost deposits, measuring transducer

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1. СТАН ПИТАННЯ.....	12
1.1. Огляд найбільших ожеледно-вітрових аварій в електромережах України	12
1.2. Аналіз технічного стану повітряних ліній 110 кВ	20
1.3. Аналіз активних методів підвищення стійкості повітряних ліній до ожеледоутворення	22
1.4. Огляд систем моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ	29
1.5. Завдання дослідження.....	39
1.6. Висновки до 1-ого розділу	40
2. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ	41
2.1. Інтегральні параметри ожеледно-паморозевих відкладень.....	41
2.2. Механізми утворення ОПВ	49
2.2.1. Утворення кристалічної паморозі	49
2.2.2. Утворення зернистої паморозі.....	52
2.2.3. Утворення ожеледі.....	56
2.3. Вибір параметрів контролю ОПВ на ПЛЕ.....	58
2.4. Висновки до 2-ого розділу	60
3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ НА ПЛЕ 110 кВ.....	61
3.1. Система моніторингу ожеледоуворення	61

3.2. Підсистема раннього виявлення ОПВ	66
3.3. Підсистема контролю ожеледного навантаження на провід.....	69
3.4. Рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації повітря- них ліній 110 кВ в умовах ожеледоутворення за рахунок впровадження системи моніторингу	82
3.5. Висновки до 3-ого розділу	85
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	86
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ	93
А.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при проведенні робіт з технічного обслуговування ліній	93
А.2. Заходи безпеки, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках ..	96
А.2.1. Організаційні заходи.....	96
А.2.1. Технічні заходи	98
А.3. Висновки	101
А.4. Перелік використаних джерел	101

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСКПО – автоматизованих системи керування плавкою ожеледдю;

ВП – вимірювальний перетворювач;

ДРП – джерело реактивної потужності;

ЗВД – зустрічне вмикання джерел електроенергії;

КЗ – коротке замикання;

ЛП – лінійний пост;

ОПВ – ожеледно-паморозеве відкладення;

ПВП – первинний вимірювальний перетворювач;

ПЛЕ – повітряна лінія електропередачі;

РТК – робото-технічний комплекс;

СМО – система моніторингу ожеледоутворення;

ТН – трансформатор напруги;

АРМ – автоматизоване робоче місце;

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з ключових задач будь-якої електроенергетичної системи є забезпечення надійного та якісного електропостачання споживачів. У сучасному світі одним із найважливіших аспектів в енергетичній сфері є проблема захисту повітряних ліній системи передачі та розподілу електроенергії від обледеніння та його можливих наслідків [1-5].

Ожеледоутворення на проводах і тросах повітряних ліній електропередавання (ПЛЕ) викликає наднормативні механічні навантаження на всі її конструктивні елементи, а особливо тяжких випадках може призводити до обриву проводів і тросів, руйнування арматури, деформації і пошкодження стовпів електроопор.

Екстремальні навантаження на повітряні лінії враховуються за допомогою коефіцієнта запасу міцності залежно від заданого середнього періоду повторюваності для найбільш несприятливих погодних умов для певного географічного району. Однак, зміни клімату на території України в багатьох регіонах нівелюють закладений запас міцності. Також, в експлуатації знаходиться значна кількість повітряних ліній розподільних мереж нормативний ресурс яких практично вичерпаний і вони виявляються найбільш вразливими до дії атмосферних навантажень, що і підтверджується статистичними даними.

Найбільш поширений методом підвищення надійності роботи повітряних ліній електропередачі в умовах ожеледоутворення – застосування плавки ожеледі струмами штучного короткого замикання. Однак її ефективність або взагалі успішність цілком залежить від своєчасності проведення. Тому для підвищення ефективності дії захисту електричних мереж електропостачальні компанії використовують системи моніторингу ожеледоутворення на повітряних лініях електропередачі. Однак, ці системи мають ряд недоліків і потребують удосконалення.

Таким чином, розробка засобів моніторингу ожеледоутворення на повітряних лініях розподільних електромереж є актуальною.

Мета і завдання досліджень – зниження відмов у роботі повітряних ліній 110 кВ у екстремальних погодних умовах, на основі удосконалення їх систем моніторингу ожеледоутворення.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- виконати огляд найбільших ожеледно-вітрових аварій в електромережах України;
- провести аналіз стану повітряних ліній 110 кВ;
- проаналізувати існуючі систем моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ;
- визначити інтегральні параметри найбільш небезпечних для ПЛЕ ожеледно-паморозевих відкладень і механізми їх утворення;
- обґрунтувати параметри контролю системи моніторингу ожеледоутворення;
- розробити систему моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ;
- розробити рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній 110 кВ в умовах ожеледоутворення за рахунок впровадження системи моніторингу;
- розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці при експлуатації електроустановок.

Об'єкт дослідження – процес утворення ожеледно-паморозевих відкладень на повітряних лініях електропередавання.

Предмет дослідження – механічні навантаження від вітру та ожеледно-паморозевих відкладень на проводи повітряних ліній 110 кВ.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених у кваліфікаційній роботі завдань дослідження були використані такі методи дослідження: метод аналізу та синтезу, формалізації, методи математичної статистики, класичні методи аналізу процесів у електричних колах, метод моделювання.

Наукова цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- обґрунтовані параметри моніторингу системи ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ;
- отримала подальший розвиток математична модель розрахунку механічних навантажень на провід повітряної лінії від дії вітру, ожеледно-паморозевих відкладень і їх комбінації.

Практична цінність результатів, що були отримані в кваліфікаційній роботі для електроенергетичної галузі України полягає в розробці технічних рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації системи моніторингу ожеледоутворення на повітряних лініях 110 кВ.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Повний обсяг роботи складає 101-ну сторінку. Основна частина викладена на 92-х сторінках друкованого тексту та містить 29-ть рисунків і 8-м таблиць. До переліку використаних джерел входить 48-м джерел, які викладені на 4-х сторінках.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд найбільших ожеледно-вітрових аварій в електромережах України

Найбільш небезпечними для ПЛЕ є екстремальні метеорологічні впливи, такі як комбінації ожеледі та вітрових навантажень на їх проводи та грозозахисні троси. Ці впливи представляють собою випадкові метеорологічні явища, які, як правило, охоплюють великі території, мають масштабний характер і, відповідно, призводять до значних матеріальних збитків.

За територією України ожеледні явища мають нерівномірний просторово-часовий розподіл. Найбільша повторюваність числа днів із ожеледдю на дротах ожеледного верстата спостерігається в наступних областях [6]:

- у січні: в Донецькій, Херсонській областях і АР Крим – 6-6,5%;
- у лютому: в Донецькій – 7,6 %; Хмельницькій, Чернігівській, Запорізькій Луганській і Херсонській – 5,3-5,7%;
- у березні: у Луганській, Донецькій, Херсонській області та АР Крим – 7,4-8,2 %;
- у квітні: у Херсонській області – 16,1 %; у Кіровоградській, Запорізькій області та АР Крим – 9,7 %;
- у жовтні: у Закарпатській області – 14,3%; у Харківській, Полтавській, Черкаській областях та АР Крим – 7,1-9,5 %.
- у листопаді: у Чернігівській, Сумській, Харківській та Донецькій областях – 6,1-6,9 %;
- у грудні: у Харківській, Луганській та Донецькій областях 6,0-6,5.

Отже, у вказаних областях і місяцях року слід очікувати ожеледних аварій з найбільшою імовірністю.

До найбільш суттєвих ожеледно-вітрових аварій (ОВА) останніх десятиліть на території України відносяться такі [7-9].

Аварія 9-18 січня 1985 р. охопила територію Дворічанського, В. Бурлуцького, Вовчанського та Купенського районів Харківської області. на проводах ПЛЕ спостерігалось інтенсивне ожеледоутворення, що було викликане переохолодженням дощем. Вага льоду під час відкладення досягала 7 кг/м, а товщина стінки – 46 мм. Аварія характеризувалася великим обсягом пошкоджень: впало і було пошкоджено 1908 опор та обірвано 177 км проводів. Найбільші пошкодження під час аварії зазнали повітряні лінії напругою 0,4-10 кВ.

Аварія 3-4 грудня 1988 року в Одеській області внаслідок наростання ожеледно-паморозевих відкладень до 50-100 мм і збільшення швидкості вітру до 20 м/с набула катастрофічного характеру – були зруйновані опори та обірвані проводи й грозозахисні троси ПЛЕ. Ушкоджень зазнали м. Одеса, де під вагою ожеледі та внаслідок падіння обледенілих дерев були зруйновані міські та контактні електромережі, а також м. Іллічівськ, Арцизький, Бедгород-Дністровський, Біляївський, Овідіопольський, Саратський і Тарутинський райони. Товщина стінки ожеледі на проводах досягала 20,4-45,3 мм, а вітрове навантаження – 13,4-46,9 Н/м. Внаслідок аварії було ушкоджено на ПЛЕ 0,4 кВ 10342 опори; на ПЛЕ 6-10 кВ 17670 опор; на ПЛЕ 35 кВ 236 опор; на ПЛЕ 110 кВ 220 опор; на ПЛЕ 154 кВ 1 опора; на ПЛ 330 кВ – 24 опори.

Пошкодження ПЛЕ мали однаковий характер: злам залізобетонних опор і залізобетонних приставок на рівні землі з падінням перпендикулярно або під певним кутом до осі траси (рис. 1.1). У Херсонській області аварія охопила Біловірський, Генічеський, Голопристанський, Іванівський, Каховський, Каланчацький, Новотроїцький, Скадовський, Цюрупинський, Чаплинський райони області. Товщина стінки ожеледі коливалися в межах 16,4-41,1 мм при цьому вітрове навантаження досягало 32,8 Н/м. У цей період на Кримському півострові ОВА охопила територію Красноперекіпського, Ленінського, Роздольненського, Сакського та Чорноморського районів. Особливо інтенсивне ожеледоутворення на ПЛЕ спостерігалось в Ленінському та Красноперекіпському районах. Так, на ПЛЕ 35 кВ Красноперекіпськ-НС-172 діаметр ОПВ сягав 100 мм, а разом з бурульками гребенеподібного виду, що злилися, до 150 мм, швидкість



Рисунок 1.1 – Злам залізобетонної опори ПЛЕ 110 кВ

вітру при цьому 25 м/с; товщина стінки ожеледі сягала 26,9 мм, а з урахуванням бурульок до 46,2 мм, вітрове навантаження при ожеледі, відповідно 36,3 Н/м і 54,5 Н/м. У районі Вірменська на ПЛЕ 10 кВ діаметр ожеледних відкладень сягав 100-120 мм, з урахуванням бурульок вага 1 погонного метра 7200 г, товщина стінки 45,6 мм, вітрове навантаження при ожеледі 36,3 Н/м. У результаті цієї аварії було пошкоджено на ПЛЕ 6-10 кВ – 991 опору, ПЛЕ 0,4 кВ – 807 опор, ПЛ 35 кВ – 13 опор. Пошкодження електроопор проводжувалися масовими обривами проводів.

У період з 5 по 14 лютого 1996 р. у ДАЕК «Крименерго» мали місце масові ушкодження опор повітряних ліній 6-110 кВ внаслідок дії екстремальних ожеледно-вітрових навантажень. Товщина стінки ожеледі коливалась в межах 20-150 мм. Загальна кількість ушкоджених опор за класами напруги склала: 6, 10 кВ – 1563 шт.; 35 кВ – 21 шт.; 110 кВ – 1 шт.

27–28 листопада 2000 р. внаслідок виходу південного циклону і розповсюдження сибірського антициклону здійснювалося винесення теплого вологого повітря з південного заходу, а з північного сходу в приземному шарі

розповсюдилася від'ємна температура від сибірського антициклону. Ці метеорологічні явища зумовили випадіння рясних опадів у вигляді дощу та мокрого снігу, що призвело до початку сильного обледеніння проводів і грозозахисних тросів повітряних ліній електропередавання у Вінницькій, Житомирській, Кіровоградській, Миколаївській, Одеській, Хмельницькій і Черкаській областях [8].

У табл. 1.1 представлені дані щодо кількості ушкоджених опор у період з 26 по 30 листопада 2000 р. за класами напруги та відсоток ушкоджених ліній, який що був розрахований, на основі протяжності ліній і середньостатистичної кількості опор на 1 км лінії. Діаметри ожеледі на ожеледних верстатах метеорологічних станцій у цих областях наведено в табл. 1.2 [8].

Внаслідок цієї масштабної ОВА приблизно 4,5 тис. населених пунктів втратили електропостачання. До ліквідації руйнівних наслідків стихії було залучено до 7 тис. чоловік і 1311 одиниць техніки, а збитки склали 750 млн. грн. - 1 млрд. грн. у цінах 2000 р.

Таблиця 1.1 – Кількість ушкоджених опор ПЛЕ у період ОВА з 26 по 30 листопада 2000 р. за класами напруги

Назва енерго-постачальної організації	Класи напруги, кВ							
	110-154		35		10		0,4	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Вінницяобленерго	200	1,7	240	12,7	39225	13,6	405250	5,1
Одесаобленерго	337	3,6	112	3,0	52860	17,5	112662	17,4
Черкасиобленерго	30	0,4	25	1,5	1809	0,8	2361	0,4
Кіровоградобленерго	20	0,3	40	1,4	12000	5,5	10000	2,1
Миколаївобленерго	2	<0,1	260	7,6	4000	1,9	6000	1,5
Хмельницькобленерго	-	-	50	2,1	2674	1,3	3798	0,6
Житомиробленерго	-	-	-	-	492	0,2	472	0,1
Всього	589	1,2	727	4,5	113060	7,8	175818	5,0

Таблиця 1.2 – Дані метеостанцій УкрГМЦ за 27–28 листопада 2000 р.

Назва метеорологічної станції	Діаметр ожеледі на ожеледному верстаті, мм	Назва метеорологічної станції	Діаметр ожеледі на ожеледному верстаті, мм
Первомайськ	56	Умань	22
Миколаїв	40	Хмільник	22
Гайворон	37	Хмельницький	22
Вінниця	32	Шепетівка	21
Помічна	27	Любашівка	20
Жмеринка	27	Вознесенськ	20

У період з 11 по 12 листопада 2007 року переміщення центру активного південного циклону на південь України призвело до виникнення сильного вітру з поривами, що перевищували 30 м/с. Налипання мокрого снігу та ожеледь стали основною причиною масових ушкоджень і аварійних відключень ПЛЕ У Дніпропетровській, Донецькій, Запорізькій, Миколаївській, Харківській, Черкаській, Київській областях і АР Крим внаслідок спрацювання релейного захисту були аварійно відключені ПЛЕ наступних класів напруги: 110, 150 кВ – 34 шт., 35 кВ – 84 шт., 6, 10 кВ – 1212 шт. Результатом стало повне знеструмлення 12 300 трансформаторних підстанцій 10(6)/0,4 кВ у 1578 населених пунктах. У захода ліквідації цієї ОВА було задіяно 3326 осіб і 1084 одиниці спецтехніки.

У період з 28.12.2009 р. по 10.01.2010 р. через несприятливі метеорологічні умови, які викликали снігопади з налипанням мокрого снігу та утворення ожеледі на проводах та грозозахисних тросах ПЛЕ призвели до технологічних порушень у роботі 6044-х об'єктів електричних мереж напругою 0,4-150 кВ у 20-ти електропередавальних організаціях України. Ця ожеледно-вітрова аварія охопила територію близько 59 тис. км² з населенням до 2 млн. осіб.

Ожеледно-вітрова аварія, що відбувалася в 2000 році стала найбільшою природною катастрофою для електромереж України за весь час їх існування. Було ушкоджено та зруйновано кількість опор, що у багато разів перевищила

пошкодження під час усіх попередніх ожеледно-вітрових аварій. Унаслідок дії стихії були ушкоджені навіть повітряні лінії надвисокої напруги, наприклад, на ПЛЕ 750 кВ «Вінниця – Чорнобиль» були обірвані проводи, що призвело до спрацювання захисту 3-го блоку Чорнобильської АЕС і аварійної зупинки реактора [10].

З аналізу доступних статистичних даних слідує, що ожеледно-вітрові аварії в електричних мережах відбуваються фактично щорічно, а з тяжкими наслідками – приблизно один раз на 10-15 років. За кількістю ушкоджених конструктивних елементів перше місце займають ПЛЕ нижчих класів напруги, однак за об'ємом недоданої електроенергії навпаки – вищих. Це пов'язано з тим, що повітряні лінії будувалися за різними нормативних документами, які змінювалися впродовж часу і, як наслідок, мають різні коефіцієнти запасу міцності навіть у межах одного класу напруги (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Граничні умови та причини руйнування ПЛЕ

Характеристики ПЛЕ		Граничні умови		Причина руйнування
$U_{\text{ном}}$, кВ	період проектування	$k_{\text{п}}$	v , м/с	
10	1971-1986	1,8-1,9	12	обриви проводів, руйнування проміжних опор
10	після 1988	2,0	15	руйнування опор
35-150	після 1986	2,2-2,5	15	руйнування опор

де $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга, кВ;

$k_{\text{п}}$ – коефіцієнт перевищення товщини нормативної стінки ожеледі:

$$k_{\text{п}} = \frac{d_{\text{гр}}}{d_{\text{норм}}},$$

$d_{\text{гр}}$, $d_{\text{норм}}$ – діаметри ожеледі, відповідно, граничний і нормативний, мм;

v – швидкість вітру, м/с.

У кожній другій з розглянутих ожеледно-вітрових аварій наявні дані про технологічні порушення в роботі ПЛЕ 110 кВ, особливістю яких є те, що їх ушкодження носять каскадний характер (рис. 1.2). Це пов'язано з тим, що при будівництві повітряних ліній 35-150 кВ після 1986 року закладався більший коефіцієнт запасу міцності, тому їх ушкодження відбуваються при утворенні сильної та надзвичайно сильної ожеледі, а також сильних складних відкладень ожеледі та паморозі й надзвичайно складних відкладень ожеледі та паморозі, що відноситься до метеорологічних явищ, відповідно, II-III рівнів небезпечності [36].

Згідно статистики 85% руйнувань ПЛЕ під час експлуатації відбувається внаслідок дії наднормативних ожеледних і ожеледно-вітрових навантажень, причому 30-35% відсотків складає ушкодження опор, а інші – проводів, грозозахисних тросів та ізоляторів [10].

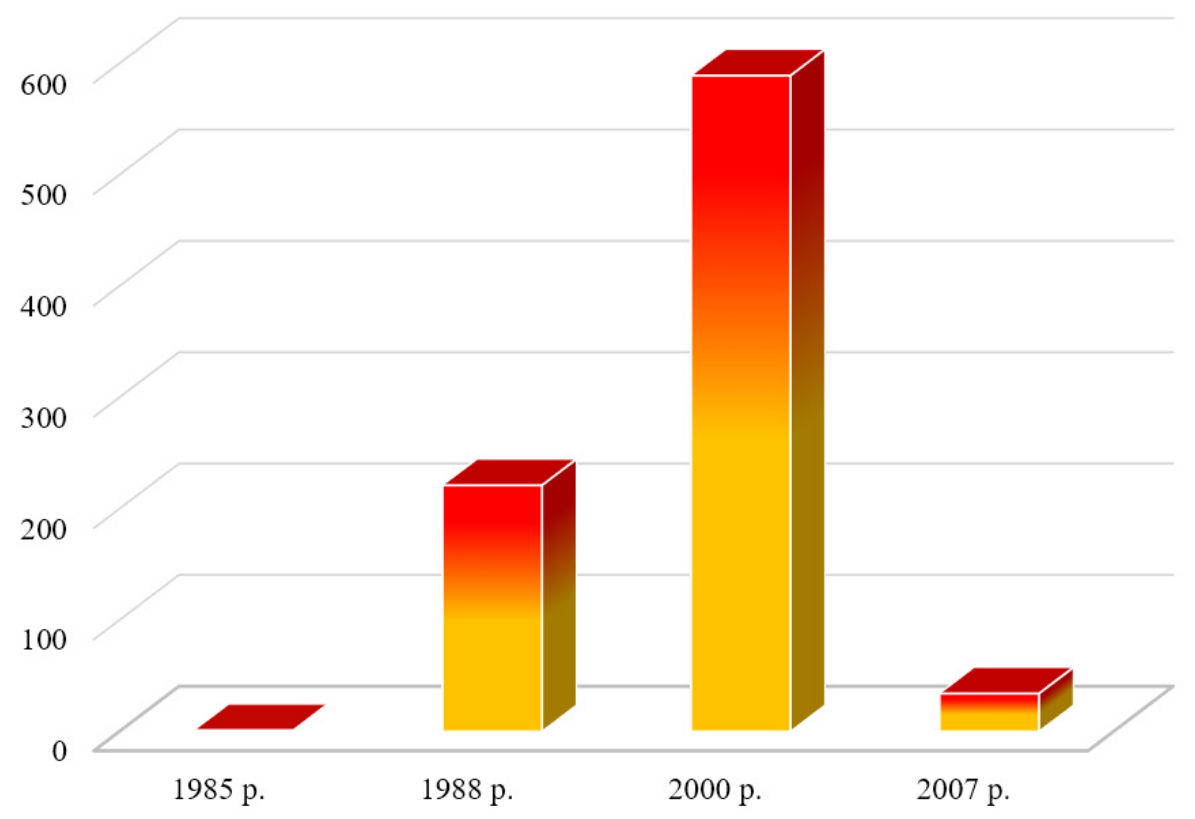


Рисунок 1.2 – Кількість ушкоджених опор ПЛЕ 110 кВ
в ожеледно-вітрових аваріях 1985-2010 рр.

З метою вибору методів і засобів захисту ПЛЕ від наднормативних ожеледно-вітрових навантажень необхідно встановити причини, що призводять до їх ушкоджень і руйнувань.

На основі проведеного аналізу ожеледно-вітрових аварій та літературних джерел [7, 11-13] можливо зробити висновок, що причинами ушкоджень ПЛЕ 110 кВ є наступні:

- надрозрахункові навантаження. Зміна клімату на території України, що призвела до виникнення сильних ожеледно-паморозевих відкладень. Кліматичний вплив на конструктивні елементи ліній носить випадковий характер, тому будь-яке нормативне значення механічного навантаження може бути перевищене з певним ступенем імовірності. Ця обставина призведе до невідворотного ушкодження ПЛЕ від ожеледно-вітрових впливів;

- відсутність встановлених систем моніторингу ожеледоутворення та плавки ожеледі на лініях або неуспішне їх використання;

- помилки проектування через недосконалість нормативних документів, помилок у методиках і розрахунках як для окремих конструктивних елементів ПЛЕ, так і для ліній у цілому;

- низька якість будівельно-монтажних робіт: відхилення від проектних рішень, порушення технологій монтажу, наприклад, заміна залізобетонних стояків СВ110-3,5 на СВ110-2,5, заглиблення стояків у фундаментні котловани на позначки, що не відповідають проектним значенням;

- неякісна експлуатація, що найбільше проявляється в екстремальних погодних умовах;

- відновлення ПЛЕ після аварій без урахування оновлення нормативних документів, призводить до накопичення ліній зі зниженою стійкістю до кліматичних впливів, що потребують реконструкції;

- заводський брак конструктивних елементів ПЛЕ.

Усунення виявлених причин дасть змогу захистити ПЛЕ 110 кВ від руйнування та істотно зменшити швидкість втрати ними нормативного ресурсу. Однак, ще однією причиною, що має вплив на вибір того чи іншого методу захисту ПЛЕ ожеледоутворення є технічний стан самої лінії. Тому необхідно проаналізувати наявний технічний стан повітряних ліній 110 кВ.

1.2 Аналіз технічного стану повітряних ліній 110 кВ

Довжина повітряних ліній 110 кВ (за ланцюгами) системи передачі електричної енергії України складає 568,9 км [14], а системі розподілу – 35463 км [15] (станом на 01.01.21 р). Повітряні лінії електропередавання 110 кВ працюють в безперервному режимі, від них в значній мірі залежить надійність і економічність електропостачання споживачів, обладнання більшості з них було виготовлено в 70-х років минулого століття і тому практично відпрацювало свій проектний строк експлуатації. Так згідно даних наведених у табл. 1.1, 80% магістральних повітряних ліній знаходяться в експлуатації більше 40-ка років [14]. Щорічний приріст ПЛЕ зі строком експлуатації складає близько 1% в рік, що свідчить про недостатні темпи оновлення та будівництва нових ПЛЕ. У підсумку це призводить до подальшого старіння ліній та ускладнення їх подальшої експлуатації НЕК «Укренерго».

Дані щодо технічного стану системоутворюючих ПЛЕ в електроенергетичних системах України станом на 1.01.21 р. подано у табл. 1.2. Згідно цих даних, найбільш задовільна ситуація наявна в Південній енергосистемі де «лише» 48,9% ПЛЕ знаходяться в експлуатації зі строком служби більше 40-ка років, а ще 22% строк служби складає від 30-40 років. У інших енергосистемах, ситуація ще гірша і відсоток ПЛЕ, які нормативний термін експлуатації яких завершився (40 років) коливається в межах 64,72-81,5%. В енергосистемах спостерігається незначний щорічний приріст повітряних ліній, зі терміном експлуатації більше 40-ка років, що свідчить проте, що ПЛЕ старіють швидше ніж оновлюються.

Таблиця 1.1 – Технічний стан магістральних ПЛЕ України станом на 01.01.21 р.

Клас напруги, кВ	Всього, км		У т. ч. знаходяться в експлуатації (років) (за ланцюгами)			
	по трасі	за ланцюгами	до 25	25-30	30-40	понад 40
110	458,288	568,900	66,43	5,420	42,380	454,67
110	—	100%	11,7%	0,9%	7,5%	80,0

Таблиця 1.2 – Строк служби ПЛЕ в електроенергетичних системах України

Назва енергосистеми	Всього, км		У т. ч. знаходяться в експлуатації (років) (за ланцюгами, %)			
	по трасі	за ланцюгами	до 25	25-30	30-40	понад 40
Дніпровська	4577,69	4956,90	375,60	197,05	1176,05	3207,98
Донбаська	1346,05	1856,60	114,46	-	263,83	1478,31
Західна	3418,86	3796,36	205,85	2,46	703,50	2884,55
Кримська	1274,82	1311,11	150,63	-	97,38	1063,11
Південна	2651,14	2770,86	544,09	263,39	607,56	1355,82
Південно-Західна	2259,87	2263,40	229,54	-	358,31	1675,55
Північна	3644,17	3903,09	195,11	5,42	972,26	2730,30
Центральна	2689,00	2700,79	483,35	0,76	268,80	1948,64
<i>Разом</i>	21861,60	23559,10	2298,62	468,54	4447,68	16344,26

Також важливо відзначити, що внаслідок зміни кліматичних умов на території України впродовж останнього десятиріччя значна кількість повітряних ліній електропередавання, що були споруджені у 70-80-ті роки, стала вразливою до підвищених кліматичних навантажень. Це особливо відчутно в осінньо-зимовий період у південних та північних районах України (Південна, Дніпровська та Північна енергосистеми). Зі збільшенням вітрових, ожеледно-вітрових навантажень і впливу вібрації та галопування проводів помітно зросла кількість технологічних відмов ПЛЕ внаслідок, пошкоджень їх пришвидшилось їх зношення. Внаслідок цього виникла необхідність у технічному переоснащенні та реконструкції ПЛЕ першочергово у зазначених регіонах і загалом по Україні, оскільки проектний термін експлуатації (40 років) більшості з них вже вичерпався.

Щорічні плани регіональних енергосистем передбачають роботи з ремонту фундаментів металевих і залізобетонних опор, заміни грозозахисного тросу, фарфорової ізоляції та ін. заходи організаційні та технічні направлені на забезпечення надійності повітряних ліній. Проте важливо визнати, що через

прискорене старіння ПЛЕ та вплив підвищених навантажень, кожного року ці роботи вимагають все більше матеріальних та трудових витрат.

Наявна ситуація ускладнюється ще й тим, що в останні роки через брак коштів на профілактичні та планові ремонтів ПЛЕ знизилась їх якість виконання, що призвело до підвищення ймовірності виникнення аварійних ситуацій [14, 16]. Тому обсяги робіт оновлення та будівництва ПЛЕ не відповідають потребам. Наприклад, у 2020 році, згідно наказу №1 та інвестиційної програми НЕК «Укренерго», було замінено лише 82 залізобетонні опори, тоді як реальна потреба енергосистем в заміні станом на 01.01.2021 року становить більше 1650 опор.

У підсумку переважна більшість повітряних ліній електропередавання 110 кВ як системи передачі, так і системи розподілу мають істотний знос і знижену механічну міцність. При цьому, ситуація істотно погіршується внаслідок кліматичних змін на території України, які призводить до виникнення аномальних атмосферних явищ, що створюють надрозрахункові навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній. Наслідком цього є підвищення кількості технологічних порушень у роботі ПЛЕ. Крім того, проблема поглиблюється обмеженим фінансуванням на реконструкцію повітряних ліній. За даних обставин, вирішити проблему подовження строку експлуатації повітряних ліній та захисту їх від наднормативних навантажень при мінімальних капітальних вкладеннях можливо шляхом застосування спеціальних методів та засобів.

1.3 Аналіз активних методів підвищення стійкості повітряних ліній до ожеледоутворення

Серед десятків запропонованих методів захисту ПЛЕ від ОПВ економічно більш доцільними визнані активні методи боротьби (рис. 1.3), що пов'язано з короткочасністю існування надрозрахункових ожеледних навантажень на конструктивні елементи ПЛЕ. Тривалість цих навантажень для середньостатистичної повітряної лінії складає приблизно 0,03-0,5% від її повного строку служби [17].

Активні – це такі методи, застосування яких не пов'язане зі зміною конструкції повітряної лінії електропередавання.

Активні методи боротьби з ОПВ на ПЛЕ діляться на такі види:

- тепловий;
- електростатичний;
- механічний.

Тепловий метод полягає в підвищенні температури проводу ПЛЕ до величини при якій утворення ОПВ стає неможливим або відбувається його руйнування, якщо воно утворилося раніше. Підвищення температури проводу досягається двома шляхами:

- збільшенням струму навантаження ПЛЕ (режимні заходи);
- штучним створенням струмів короткого замикання (КЗ).

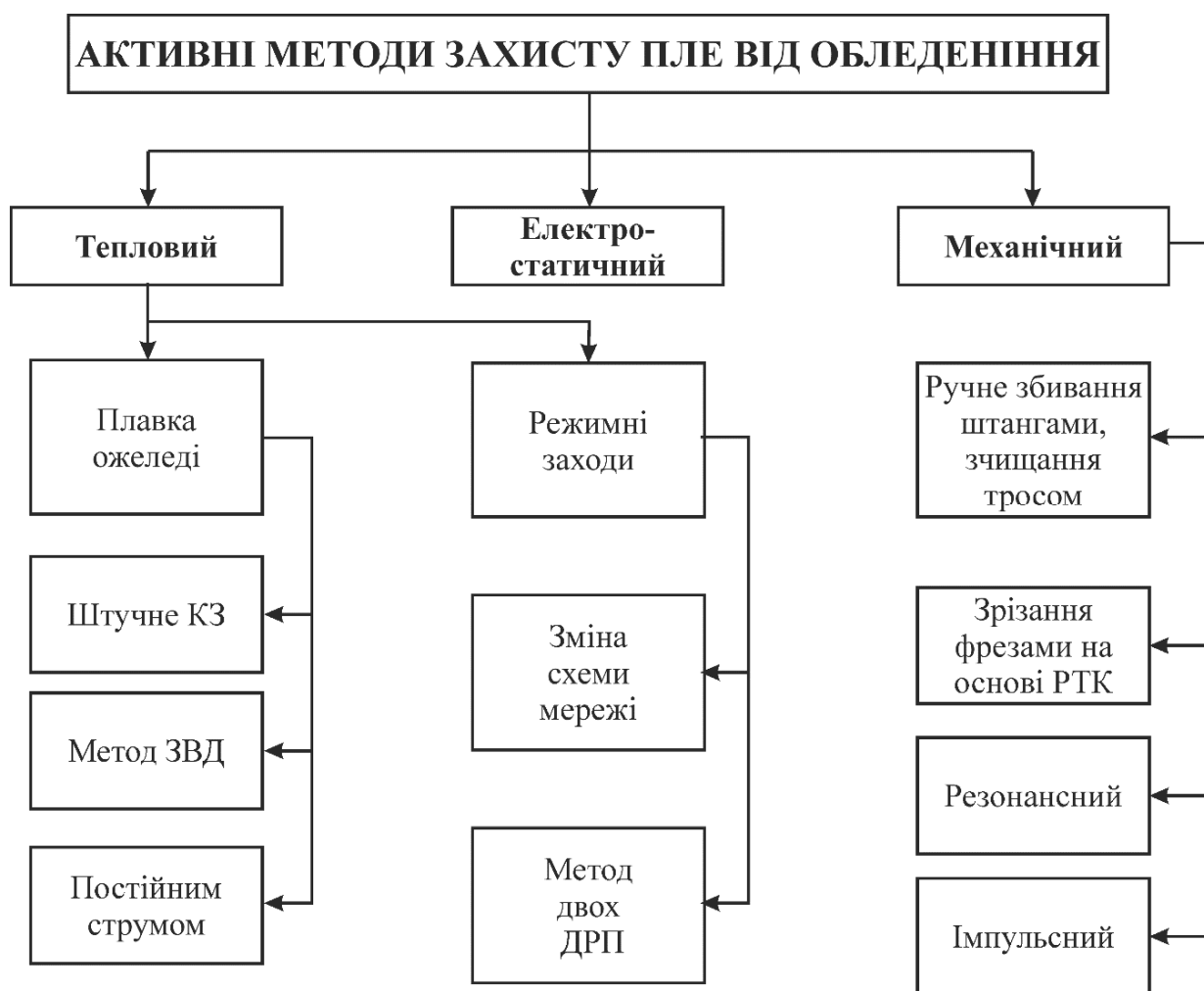


Рисунок 1.3 – Активні методи боротьби з ОПВ на ПЛЕ

Застосування першого шляху для ПЛЕ 110 кВ є обмеженим, так як не для всіх ліній можливо організувати перерозподіл навантаження. Крім того, завантаження однієї ПЛЕ призведе до розвантаження чи повного відключення інших, для яких також необхідно забезпечити захист від ОПВ іншими методами.

У праці [20] був запропонований різновид режимного методу, сенс якого полягає в наступному: захист ПЛЕ від ОПВ здійснюється за допомогою двох трифазних джерел реактивної потужності (ДРП), одне з яких встановлюється на початку лінії, а інше в – кінці. Перше джерело виступає в ролі джерела реактивної потужності, а інше – споживача. Метод дозволяє проводити плавку ОПВ без відключення ПЛЕ і споживачів, схема плавки завжди зібрана, процес плавки легко автоматизувати, при наявності потужного джерела реактивної потужності та споживача (керованого реактора) можливо одночасно захищати декілька ліній, у нормальному режимі роботи лінії можливо керувати потоками реактивної потужності. До недоліків методу слід віднести: обмеженість методу – захист можливо здійснити лише на тих лініях де передбачена компенсація реактивної потужності, також необхідна установка керованих реакторів; за відсутності вказаного обладнання на ПЛЕ – висока вартість методу.

Принцип дії плавки базується на створенні режимів роботи електромережі, при яких по ділянках ПЛ з ОПВ протікають струми, які значно перевищують робочі та дають змогу швидко й надійно звільнювати ці ділянки від небезпечних механічних навантажень. Плавка ожеледі на ПЛЕ 35-110 кВ підвищеними струмами є найбільш ефективним, вивченим, практично розробленим і методом боротьби з ОПВ, що впроваджений у електромережах багатьох електропостачальних компаній. На сьогодні існує велика кількість схем плавок ожеледі: способом короткого замикання ПЛЕ (рис. 1.4), зустрічного вмикання джерел електроенергії, способом накладення струмів, постійним струмом за допомогою блоків ВУПГ і т. д. Питання про застосування того чи іншого різновиду плавки ожеледі визначається реальними параметрами мережі [19].

Переваги методу: висока ефективність – дає змогу усунути на проводах та грозозахисних тросах ПЛЕ ожеледь за короткий строк; необхідність мінімальної кількості обладнання для неавтоматизованих схем; простота збирання схем плавки ожеледі; можливість автоматизації технологічного процесу.

Недоліки методу: значна тривалість підготовчих робіт – на ручне збирання схем плавки ожеледі витрачаються багато часу; необхідність контролю температури проводу – сухі ділянки проводу можуть бути перегріті струмом плавлення та втратити механічну міцність; залежність тривалості плавки від метеорологічних параметрів [20]; висока енергоємність; значна трудомісткість – для проведення плавки ожеледі необхідна велика кількість людських ресурсів і тому захід часто буває запізнілим, а отже і безуспішним; у більшості випадків застосування схем плавки споживачі втрачають живлення.

Останній недолік усувається шляхом автоматизації основних операцій плавки ожеледі за рахунок встановлення додаткового обладнання на ПС. Це призводить до збільшення капіталоємності методу. При інтенсивному ожеледоутворенні з тривалістю декілька діб, що одночасно охоплює територію мереж декількох електропостачальних компаній і супроводжується сильним вітром необхідно проводити плавки на одних і тих же приєднаннях декілька разів і одночасно. У таких складних погодних умовах ефективність плавки різко знижується і, як правило, відбуваються масові ушкодження та відключення ПЛЕ. Якщо виконувати прогноз і відслідковувати динаміку ожеледоутворення на проводів можливо скорити час проведення плавки ожеледі і підвищити їх успішність.

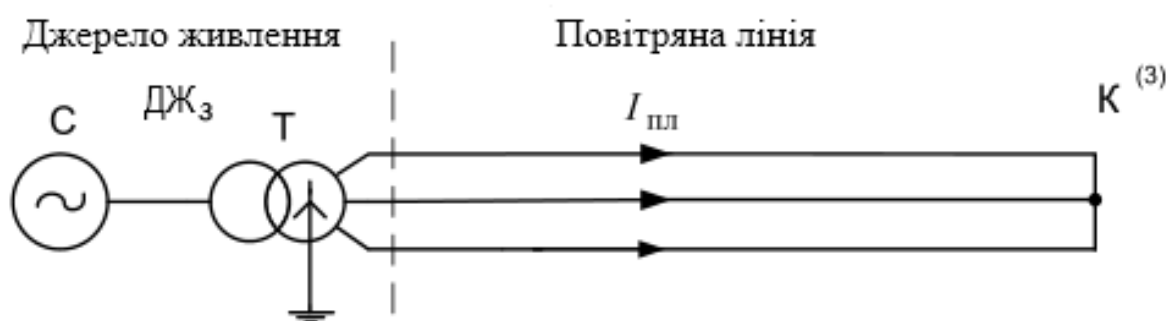


Рисунок 1.4 – Схема плавки ожеледі за способом КЗ⁽³⁾ з глухозаземленою нейтраллю

Електростатичний метод полягає в підключенні джерела випрямленого струму до нейтралі з'єднання обмоток силового трансформатора або штучної створеної таким чином, що проводи ПЛЕ мають одну полярність, а земля – іншу (рис. 1.5). При взаємодії сил складного електростатичного поля змінної та постійної напруги і сил падаючої краплі переохолодженої дощу створюються умови при яких крапля обтікає провід. У випадку потрапляння крапель на провід структура відкладення, що утворюється змінюється в бік зменшення густини ОПВ. У результаті маса відкладень зменшується на 40...80 % [21, 22] і вони не створюють істотних навантажень на елементи ПЛЕ. За напруженості електричного поля поблизу проводу 10-15 кВ/см густина відкладень встановлюється у межах 0,21...0,14 г/см³. Необхідна потужність джерела випрямленого струму визначається режимом замикання фази на землю в мережі. Практично цей метод було випробувано на ПЛЕ напругою 35 кВ.

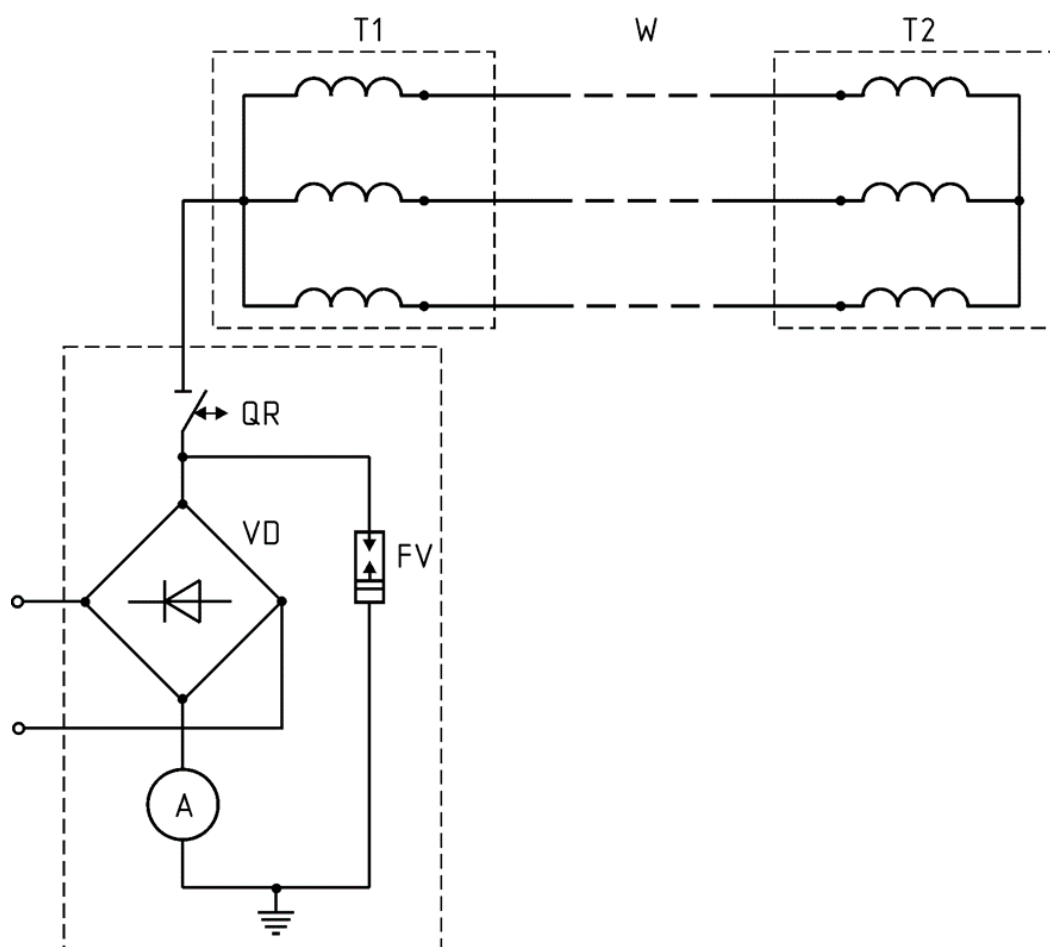


Рисунок 1.5 – Схема захисту проводів ПЛЕ за допомогою електростатичного методу

Переваги методу: низька споживана потужність порівняно з плавкою ожеледі; можливість автоматизації технології процесу захисту; захист не впливає на роботу пристроїв ВЧ-зв'язку та РЗА; під час дії захисту споживачі не втрачають живлення; низька вартість технічної реалізації.

Основні недоліки: необхідність наявності джерела випрямленого струму; потребує роз'єднання, на час роботи протиожеледного захисту, кіл «лінія-розрядник-земля», а також нульового провідника ТН типу ЗНОМ; ефективність захисту залежить від розмірів крапель дощу; необхідність завчасного визначення початку процесу ожеледоутворення.

Електростатичний метод має цілий ряд суттєвих переваг, однак він потребує подальших теоретичних та практичних досліджень і може розглядатися як перспективний.

Механічний метод полягає в усуненні ОПВ з проводів ПЛЕ шляхом прикладання до них руйнівних зусиль. Це один із перших методів боротьби з ОПВ. Початково робітники електромереж оббивали ожеледь, що намерзла на проводи ПЛЕ довгими жердинами. Очевидно, що у такій реалізації цей метод мав ряд суттєвих недоліків, однак отримав подальший розвиток. У наш час, деякі електротехнічні компанії продовжують очищувати складні відкладення ожеледі та паморозі з проводів і грозозахисних тросів за допомогою штанги чи фрези приєднаної до гелікоптера (рис. 1.6). Також розробляються різноманітні пристрої які створюють штучні ударні хвилі в проводі, його крутильні деформації чи зтрушуючі зусилля і т. п. [23-25].

У [23] запропоновано робото-технічний комплекс (ROV) який переміщується по проводу ПЛЕ автономно. Видалення льоду відбувається високомісними стальними роликами, які сколюють ОПВ при його русі по проводі. ROV отримує живлення від вбудованої батареї акумуляторів. Керування комплексом здійснюється оператором, що знаходиться на землі. Подібні пристрої необхідно встановлювати та знімати за допомогою безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в кожний прогін ПЛЕ.



Рисунок 1.6 – Очищення проводу ПЛЕ від ОПВ за допомогою гелікоптера

Більш досконалыми є електромеханічні методи. Розроблено пристрій, що складається із петлі проводу та генератора імпульсів [24]. Петля спірально намотується на провід ПЛЕ, а її кінці підключаються до генератора. При утворенні ОПВ на проводі генератор вмикається і його електромагнітні імпульси при проходженні по витках петлі проводу створюють струшуючі зусилля, що руйнують ОПВ на проводі ПЛЕ.

Найбільш перспективним, з точки зору очищення відкладень на проводі є спосіб видалення ожеледі з подвійних або кратних проводів ліній електроперева, що полягає у пропусканні змінного електроструму або імпульсів струму з частотою близькою до механічного резонансу, і амплітудою, достатньою для подолання зовнішніх і внутрішніх сил тертя [25].

Механічний метод зазвичай застосовують на ПЛЕ де відсутні будь-які інші засоби боротьби з ОПВ.

Перевагами методу є простота та порівняно низька вартість.

До недоліків слід віднести низьку продуктивність, очищення проводу можливо лише на ПЛЕ траси яких мають гарний доступ для обслуговуючого персоналу, проведення заходів можливе після закінчення ожеледоутворення.

1.4 Огляд систем моніторингу ожеледоутворення на ПЛ

Головний недолік всіх активних способів боротьби з ОПВ полягає в тому, що їх ефективність і успішність залежить від своєчасності проведення [10, 11, 22, 26, 27]. Щоб правильно вибрати момент початку проведення заходів захисту ПЛЕ від ожеледі необхідна своєчасна, достовірна інформація про початок процесу її утворення і динаміку його розвитку. Тому головним напрямом підвищення ефективності плавки ожеледі на ПЛЕ – це впровадження в електромережах автоматизованих системи керування плавкою ожеледдю (АСКПО) (рис. 1.7) [22, 26, 27]. Основними елементами такої системи є:

- система моніторингу ожеледоутворення;
- система передачі телеметричної інформації;
- система плавлення ожеледі.

До системи моніторингу ожеледоутворення зазвичай входить дві підсистеми:

- раннього виявлення появи ОПВ на проводі;
- підсистема контролю інтенсивності ожеледоутворення на проводі.

Основними функціями СМО є:

- виявлення початку утворення ОПВ на проводі ПЛЕ;
- відстеження інтенсивності ожеледоутворення;
- архівування вимірних параметрів;
- підготовка телеметричної інформації в режимі реального часу та через задані проміжки;
- контроль закінчення плавки ожеледі.

У більшості існуючі СМО відрізняються, типом первинних вимірювальних і вимірювальних перетворювачів, метеорологічних параметрів, ожеледного навантаження, способом кодування та передачі інформації. Зазвичай інформація передається по радіоканалу, ВЧ каналу зв'язку ПЛЕ, у деяких системах використовували землю та грозозахисні троси.

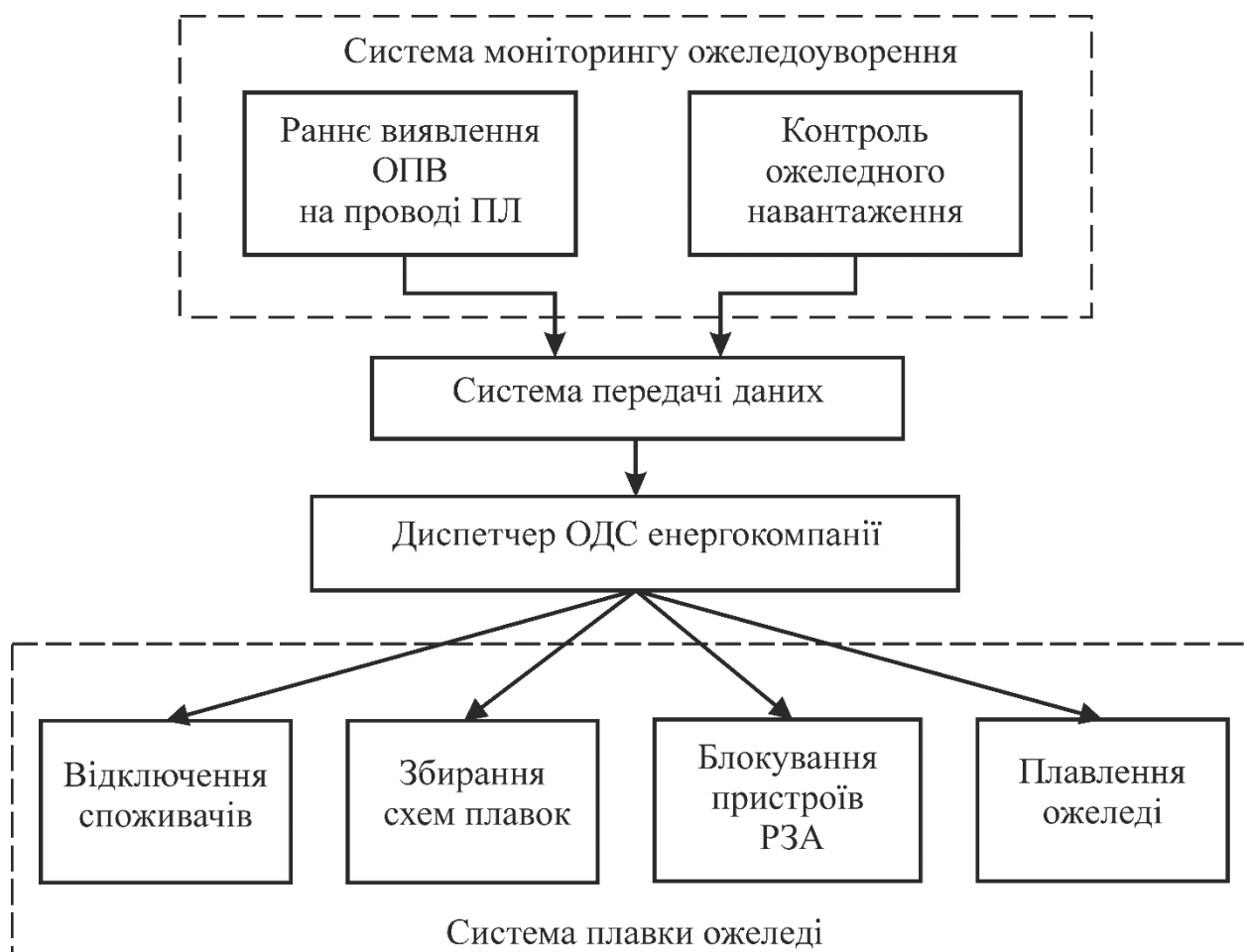


Рисунок 1.7 – Структурна схема автоматизованої системи плавки ожеледі

У розробленій Київським політехнічним інститутом СМО з контактними давачами ожеледного навантаження (ДОН) прямої дії у якості каналу зв'язку використовувався тракт нульової послідовності з передачею інформації сигналами постійного струму за схемою "фаза-земля" з часоімпульсним кодуванням (рис. 1.8). У такій системі можуть використовуватися давачі ожеледі будь-якої конструкції, що мають контактну систему [28]. Система працює наступним чином: при досягненні ожеледдю певної величини замикається контакт давача ДОНН внаслідок чого, на блок синхронізації на контрольному пункті СГ-КПН подається сигнал ХN. Сигнал YN з СГ-КПН поступає на диспетчерський пункт. Декодування сигналів здійснюється блоком синхронізації на диспетчерському пункті СГ-ДП за допомогою найпростіших часо-кодових дешифраторів. Для живлення СГ-ДП, СГ-КПН встановлюються трансформатори ОМ-0,66/10/0,22.

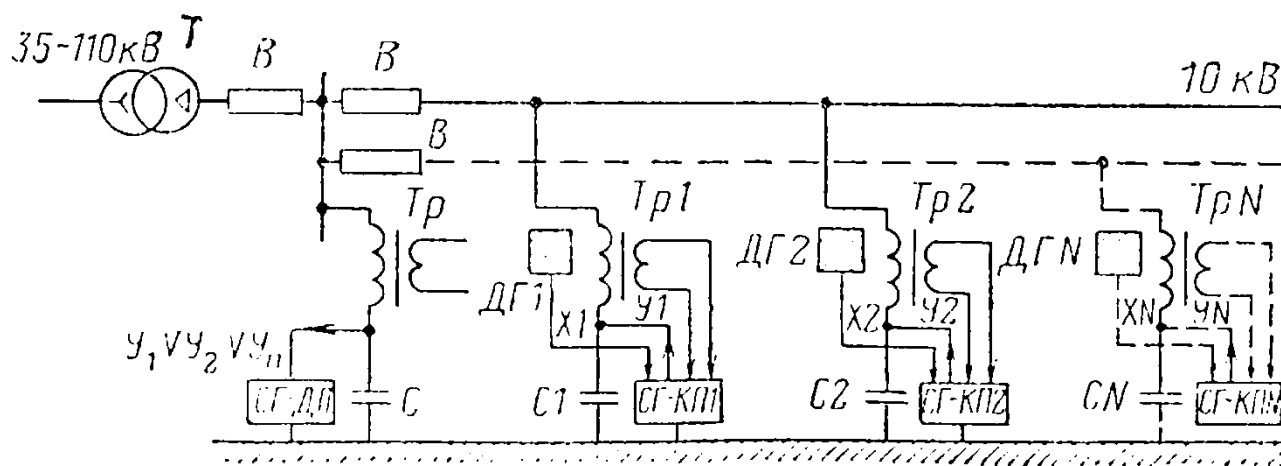


Рисунок 1.8 – Система моніторингу ожеледоутворення [28]

Недоліками цієї системи є:

- неможливість виявлення початку обледеніння проводів ПЛЕ;
- неможливість ідентифікації типу ОПВ;
- здійснення ступінчастого контролю ожеледного навантаження, а отже і інтенсивності обледеніння проводів ПЛЕ;
- низька надійність контактного ДОН, зумовлена нечіткими спрацювання під час сильного обледеніння, а також незручність налаштування.

Більш досконалою була серія СМО які дозволяли безперервного контролювати ожеледне навантаження на проводи ПЛЕ напругою 6-500 кВ [26, 29, 31]. У них передача інформації здійснювалася значенням напруги постійного струму (рис. 1.9). Вимірювальні трансформаторами TV1, TV2 і розділювальні конденсатори C1, C2 створювали канал зв'язку «фаза-земля». Лінійний перетворювач (ЛП) у пункті контролю (ПК) здійснював кодування сигналу, а прийомний перетворювач (ПП) – декодування сигналу первинного вимірювального перетворювача ожеледного навантаження (ДОН).

Головними недоліками систем побудованих на основі вимірювальних перетворювачів з релейним виходом є:

- похибка контролю ожеледного навантаження при зниженні опору ізоляції мережі з контрольованою ПЛЕ за несприятливих атмосферних умов, що призводила до заниження показів вагових сигналізаторів ожеледі;

- неможливість побудови групової СМО з декількома ПК на різних ПЛЕ, що приєднані до однієї секції шин трансформаторної підстанції;

- необхідність тарирування каналу передачі «фаза-земля» на кожній ПЛЕ при монтажі та наступних перевірках системи.

Незважаючи на вказані недоліки декілька десятків таких СМО були введені в експлуатацію

в різних енергосистемах.

Більшість розглянутих недоліків відсутня в СМО, що включають [31]:

- автоматичні метеорологічні пости;

- магнітопружні заводо захищені вимірювальні перетворювачі ожеледного навантаження;

- підсистему передачі телеметричної інформації;

- спеціалізоване програмне забезпечення.

За допомогою таких систем контролю можливо вести безперервне або ступінчасте вимірювання маси й швидкості наростання ОПВ, фіксувати момент їх відпадання. Головним їх недоліком є хибні спрацювання від вітру за відсутності відкладень на проводах. Усунення цього недоліку потребує зниження точності вимірювань ожеледного навантаження.

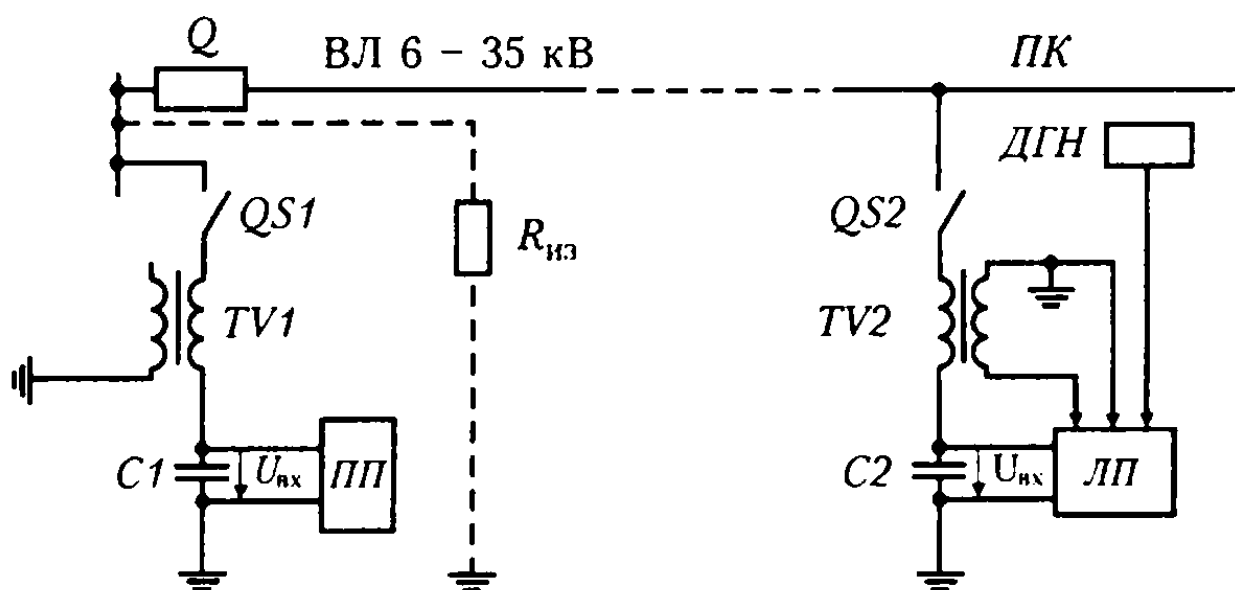


Рисунок 1.9 – Система моніторингу ожеледоутворення [29]

Основою описаних системи є різновиди магнітопружних вимірювальних перетворювачі типів ДМС, ДГН і т.п., що дозволяють проводити ступінчастий або безперервний контроль ожеледного навантаження. Їх принцип дії на магнітопружному ефекті, що полягає в зміні магнітних властивостей феромагнетику під дією на нього механічної навантаження. Головною перевагою таких первинних вимірювальних перетворювачів є відсутність рухомих частин та лінійна характеристика. Незважаючи на це, вони мають і певні недоліки. Так на магнітопровід чинять вплив зовнішні магнітні поля від струмів, що протікають у проводах ПЛЕ, а металевий кожух вимірювальної системи збільшує потоки розсіювання, від яких потрібно відлаштовуватися. Значний вплив на характеристики магнітопружного перетворювача має режим обробки електротехнічної сталі в процесі виготовлення магнітопроводу перетворювача. У результаті магнітопружні вимірювальні перетворювачі одного типорозміру мають значний розкид характеристик, що виключає їх взаємозамінність.

У останній час намітилася тенденція зі створення підсистем СМО з множини незалежних блоків збору даних (БЗД) [27, 32-35] (рис. 1.10). Модулі зазвичай є однотипними і призначені для виконання певної функції, наприклад, раннього визначення появи ОПВ на проводі, вимірювання маси ОПВ на проводі, контролю інтенсивності обледеніння, контролю метеорологічних параметрів навколишнього середовища і т. д. При цьому вони обладнуються модемами для передачі інформації по радіоканалах (у т. ч. і GSM стандарту), що їх робить автономними один від одного. До функцій модулів, зазвичай, входить первинна обробка та протоколювання виміряних даних, що надходить з первинних вимірювальних перетворювачів. У даному випадку СМО створюється множиною таких модулів за допомогою комунікаційного сервера, що знаходиться в енергопостачальної організації. Якщо в енергопостачальній компанії знаходяться в експлуатації інші системи моніторингу, то подібна система може бути включена до її складу та виступати в якості підсистеми моніторингу ожеледоутворення.

Системи моніторингу ожеледоутворення побудовані за вказаною архітектурою мають ряд суттєвих переваг:

- високу надійність;
- можливість зміни конфігурації та розширення параметрів контролю без зміни початкової системи;
- взаємозамінність однотипних модулів;
- можливість відновлення інформації: при відмові одного чи декількох модулів інформацію можливо частково отримати за допомогою екстраполяції для цього району розподільної мережі на основі даних з інших модулів;

Блок збору інформації містить мікроконтролер, який опитує вимірювальні перетворювачі, проводить первинну обробку отриманих даних, а також самодіагностику. Інші елементи інформаційної системи виконуються на основі серійного обладнання та програмного забезпечення. Передача інформації між блоками НЗМ і БПІ здійснюється зазвичай за допомогою радіоканалу.

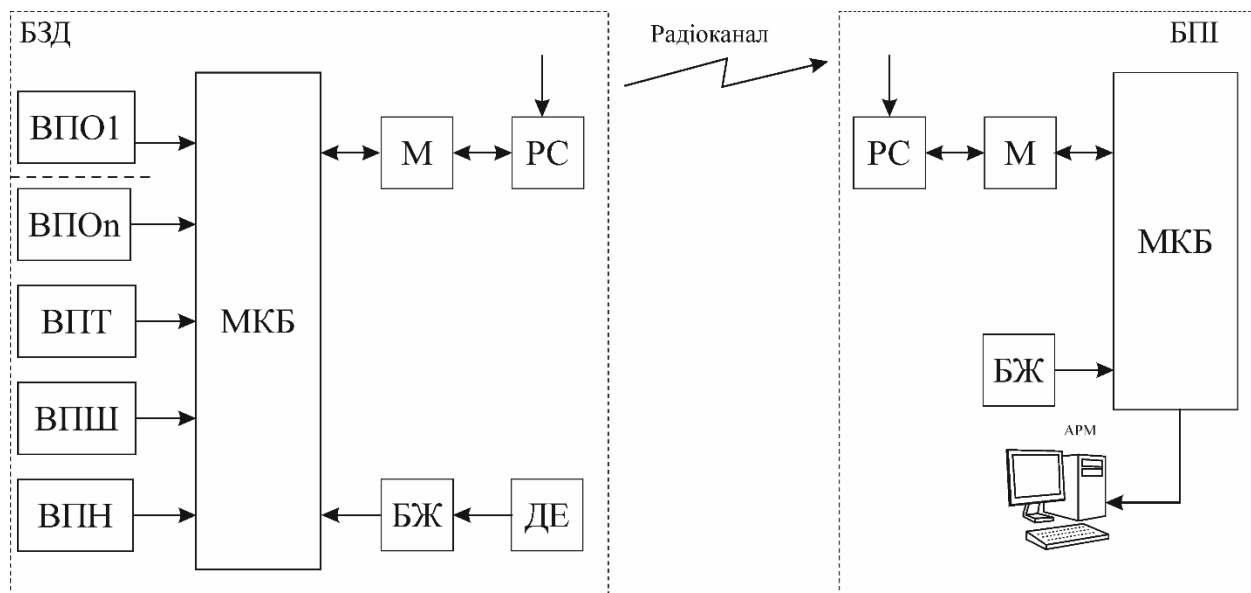


Рисунок 1.10 – Структурна схема СМО на основі незалежних модулів:

ВПО₁ - ВПО_n – вимірювальні перетворювачі ожеледного навантаження;
 ВПШ – вимірювальний перетворювач швидкості вітру; ВПН – вимірювальний перетворювач напрямку вітру; МКБ – мікропроцесорний блок; М – модем; РС – радіостанція; БЖ – блок живлення; ДЕ – джерело енергії

У [33] було запропоновано систему моніторингу стану проводу ПЛЕ (рис. 1.11). Яка складається з трьох ієрархічних рівнів: об'єктів контролю, регіонального та центрального.

Рівень об'єктів контролю утворює множина блоків збору даних (БЗД), що розміщуються на контрольованих ПЛЕ. Стандартні блоку збору даних побудовані на основі є інтелектуальних модулів (рис. 11.1). На входи цього модуля поступає інформація про температуру оточуючого повітря, струм навантаження повітряної лінії та час, необхідний для утворення штучного ожеледі на проводі. За величиною струму в ПЛЕ визначається процес плавкри ожеледі. Отримані дані з вимірювальних перетворювачів протоколюються в енергонезалежному

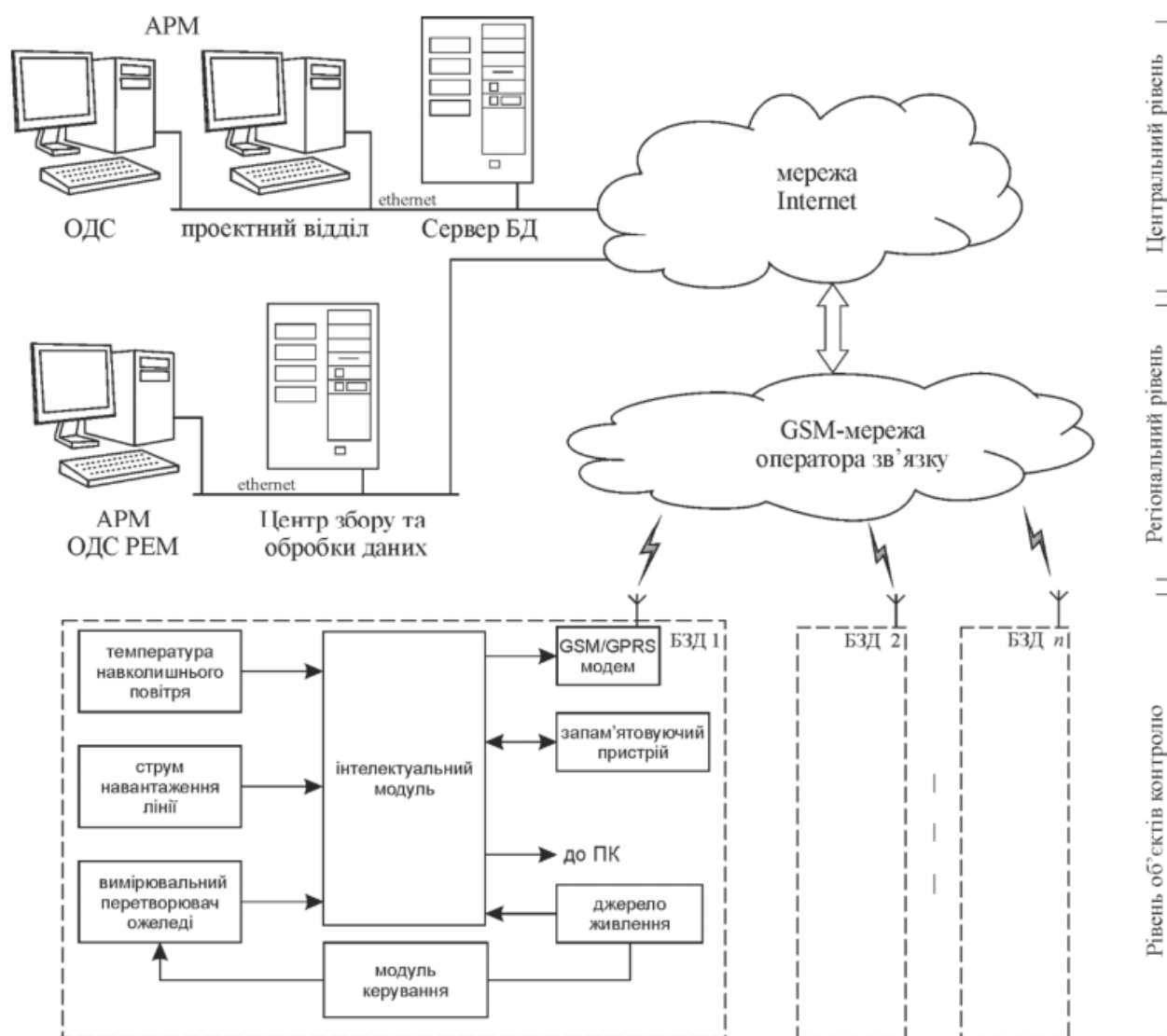


Рисунок 1.11 – Структурна схема системи моніторингу стану проводу ПЛЕ [33]

запам'ятовуючому пристрої. Зв'язок окремих блоків збору даних з центром збору та обробки інформації виконаний за архітектурою типу «зірка». Це рішення має суттєві переваги порівняно з ін. мережевими архітектурами: нечутливість системи до відмови одного блоку збору даних, високу масштабованість, легкість виявлення та усунення несправностей у системі, високу продуктивність, легке налаштування та адміністрування. Особливістю системи є те, що БЗД для передавання даних використовують наявні канали зв'язку стільникових операторів.

Регіональний рівень системи включає в себе комунікаційне обладнання, яке визначається як центр збору та обробки даних, розташований в межах районних електричних мереж. Основними компонентами цього обладнання є сервер додатків, сервер баз даних та ядро системи. Сервер додатків відповідає за встановлення зв'язку з БЗД, керування доступом клієнтів до інформації та виконання бізнес-логіки додатків. Сервер баз даних відповідає за обслуговування та керування базою даних, забезпечення цілісності та збереження інформації, приведення її до єдиного формату та безперервну передачу на АРМ диспетчера. Це робоче місце призначене для візуалізації поточного стану повітряних ліній, відображення тривожних сигналів спрацювання первинних вимірювальних перетворювачів ожеледно-паморозевих відкладень, а також для роботи з накопиченими архівами даних. Ядро операційної системи забезпечує координований доступ до ресурсів сервера і надає сервіси файлової системи та мережових протоколів. Центри збору та обробки даних, сервери баз даних виконуються за допомогою стандартного обладнання та програмного забезпечення, і можуть бути інтегровані як частина існуючої комплексної системи технічного моніторингу повітряних ліній енергопостачальної компанії.

Центральний рівень системи моніторингу стану ПЛЕ відповідає за здійснення збору, упорядкування, консолідацію та тривале зберігання інформації, що надходить з регіональних центрів збору та обробки даних. Його структура включає робочі станції автоматизованих робочих місць, комунікаційне обладнання, сервер баз даних і спеціалізоване програмне забезпечення. Усі технічні засоби об'єднуються в локальну мережу Ethernet. Актуальна інформація про ожеледну обстановку у розподільних мережах передається на АРМ центральних диспетчерських центрів енергокомпанії.

Ще одним яскравим представником описаного підходу до побудови СМО є система CAT-1, перша версія якої була розроблена в 1991 р. американською компанією The Valley Group, Inc (з 2007 р. входить до концерну NEXANS) [34, 35]. Головне призначення цієї СМО – раннє визначення ожеледоутворення. Головними її елементами є (рис. 1.12):

- мікроконтролерний блок;
- блок визначення тяжіння проводів;
- підсистема передачі даних;
- підсистема живлення;
- вимірювальні перетворювачі температури та випромінювання проводів;
- блок вимірювання швидкості та напрямку вітру;
- базова станція CATMaster;
- програмний комплекс IntelliCAT.



Рисунок 1.12 – Система раннього визначення ожеледоутворення:

- а* – мікроконтролерний блок з сонячною панеллю;
- б* – додатковий модуль САТРАС;
- в* – вимірювальний перетворювач температури навколишнього середовища;
- г* – вимірювальний перетворювач пиромінування проводу ПЛЕ;

Мікроконтролерний блок (основний модуль) містить блок електроніки, вбудований модем, антени для передавання даних. Його джерелом живлення служить акумуляторна батарея 12 В, яка заряджається від сонячної панелі. Модуль може працювати в жорсткому діапазоні температур – від -40 до +60 °С. Модуль САТРАС представляє собою додаткове джерело живлення та дозволяє системі працювати автономно до 7 діб. Все обладнання поставляється в герметичних корпусах та розміщується на електроопорі ПЛ (рис 1.10).

Базова станція CATMaster встановлюється на найближчій підстанції в 19” стійку та забезпечує обмін даними між системами «CAT-1» та EMS/SCADA у масштабі реального часу. Програмний комплекс IntelliCAT здійснює розрахунки всіх необхідних показників на основі даних, що були отримані із базової станції CATMaster у систему EMS/SCADA. Отримані результати можуть передаватися назад до системи EMS/SCADA або відображатись на екрані оператора ОДС. До один такого програмного комплексу може підключатися до 16-ти ПЛЕ незалежно від їхньої конфігурації.

Дана система була введена в експлуатацію в більше ніж 100-та енергосистемах світу.

Проведений аналіз розроблених та впроваджених в електричні мережі напругою 6-500 кВ систем моніторингу ожеледоутворення показує, що одних відсутня підсистема раннього визначення початку ожеледоутворення, інші мають значну похибку вимірювання ожеледного навантаження. Тому система моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ повинна мати підсистему ранньої фіксації початку ожеледоутворення, бути побудованою на основі високоточних тензометричних вимірювальних перетворювачів, розділяти вітрове та ожеледне навантаження, використовувати сучасні засоби та канали для передачі телеметричної інформації.

1.5 Завдання дослідження

Виконаний аналіз:

- найбільших ожеледно-вітрових аварій в електромережах України за останні 40-к років;
- технічного стану повітряних ліній електропередавання 110 кВ;
- методів і засобів підвищення стійкості повітряних ліній до ожеледоутворення;

показав, що приблизно один раз на 15-ть років відбуваються значні ожеледно-вітрові аварії на ПЛЕ 110 кВ, внаслідок істотного зносу ліній і виникнення наднормативних кліматичних навантажень. А існуючі системи моніторингу ожеледоуворення на повітряних лініях не надають повної інформації про стан лінії і тому потребують вдосконалення.

Для вирішення цієї комплексної проблеми необхідно розв'язати наступні часткові завдання дослідження:

- проаналізувати інтегральні параметри найбільш небезпечних для ПЛЕ ожеледно-паморозевих відкладень і механізми їх утворення;
- обґрунтувати параметри контролю системи моніторингу ожеледоутворення;
- розробити систему моніторингу ожедоутворення на ПЛЕ 110 кВ, основою якої є підсистема раннього виявлення ОПВ і підсистема контролю ожеледного навантаження на провід;
- розробити рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній 110 кВ в умовах ожеледоутворення за рахунок впровадження системи моніторингу;

Також необхідно розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці при експлуатації електроустановок загального призначення.

1.6 Висновки до 1-ого розділу

1. Встановлено, що один раз у 12-15 років на повітряних лініях електропередавання 110 кВ відбуваються значні ожеледно-вітрові аварії.

2. Виявлено, що повітряні ліній електропередавання 110 кВ, як системи передачі, так і системи розподілу мають істотний знос і знижену механічну міцність при цьому піддаються впливу аномальних атмосферних явищ, проблема поглиблюється обмеженням фінансуванням капітальних ремонтів.

3. Встановлено, що для захисту ПЛЕ 110 кВ від ожеледно-паморозевих відкладень найбільш придатним методом є плавка ожеледі електрострумами, що значно перевищують номінальні, однак для її успішного проведення необхідно застосовувати системи моніторингу ожеледоутворення.

4. Виявлено, що існуючі системи моніторингу ожеледоутворення на повітряних лініях потребують удосконалення, шляхом додавання підсистеми ранньої фіксації початку ожеледоутворення, використання високоточних тензометричних вимірювальних перетворювачів, виокремлення вітрового та ожеледне навантаження із загального.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ

Для розв'язання поставлених задач, у першу чергу необхідно проаналізувати механізми утворення, види та параметри опадів у холодну пору року. Це дозволить зосередитись на лише на небезпечних для проводів і грозозахисних тросів ПЛЕ опадах і правильно вибрати параметри контролю та первинні вимірювальні перетворюючі для системи моніторингу ожеледоутворення.

2.1 Інтегральні параметри ожеледно-паморозевих відкладень

На ПЛЕ найбільший вплив негативний чинять кристалічна паморозь, зерниста паморозь і ожеледь тому розглянемо їх інтегральні параметри детально.

Опади у вигляді кристалічної (рис. 2.1, *а*) та зернистої паморозі (рис. 2.1, *б*), а також ожеледі, хоч і відрізняються один від одного, за механізмом утворення загальноприйнято називати одним терміном – ожеледно-паморозеві відкладення (ОПВ) [37].

Об'єднання трьох видів опадів, що утворюються на конструктивних елементах ПЛЕ під одним терміном зумовлено, тим, що їх властивості залежать від одних і тих самих параметрів; при зміні метеорологічних умов може відбуватися утворення складного опаду – суміші, тобто чергування шарів опадів різного виду.

До основних інтегральних параметрів ожеледно-паморозевих відкладень відносяться :

- форма та розміри опаду на проводі;
- густина;
- сума відкладень (маса) на проводі.



а)



б)

Рисунок 2.1 –Паморозь:

а – кристалічна голкоподібна;

б – зерниста віялоподібна.

Форми та розміри ОПВ залежать як від метрологічних умов, так і орієнтацією проводу та його розмірами. За різних метеоумов ОПВ на проводах будуть мати різну конфігурацію: від циліндра, що рівномірно охоплює провід, до окремих довгих голкових утворень, що хаотично розташовані на ньому та орієнтовані довільним чином. На рис. 2.2 представлені, найбільш поширені види відкладень на проводах. Зазвичай профіль відкладень характеризується максимальною довжиною та шириною, але для складних відкладень, що утворюються при вітру поняття довжини та ширини можуть бути лише умовними.

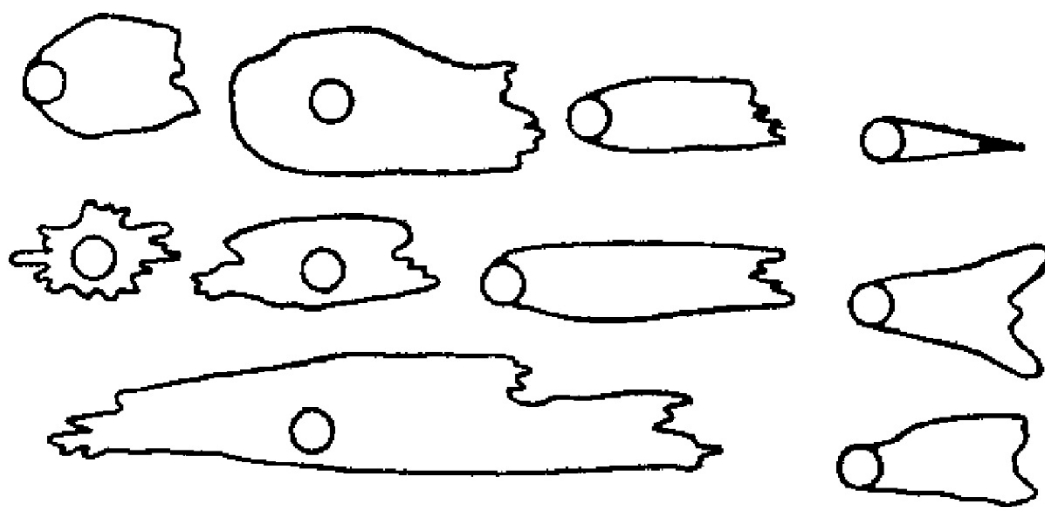


Рисунок 2.2– Найбільш поширені форми ОПВ на проводі

Складні (змішані) ожеледні відкладення (рис. 2.3) складаються з паморозі густиною та шарів льоду та мають густину $0,15-0,33 \text{ г/см}^3$. Це відкладення найчастіше утворюється при швидкості вітру від 2 м/с до 4 м/с у діапазоні температур від 0 до $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ [38].

Якщо провід має високу крутильну жорсткість, а відкладення низьку густину то відбувається його ріст на зустріч набігаючому потоку з одного боку. Якщо ОПВ, що утворюється має достатню густину то з часом, одностороннє відкладення створить крутильний момент, внаслідок якого провід ПЛЕ почне провертатися навколо своєї повздовжньої осі (рис. 2.4). Це призведе до відкладення ОПВ на чистій ділянці проводу та збільшення крутного моменту і, як наслідок, більшого закручування проводу. У результаті при тривалому процесі ожеледоутворення провід виявиться повністю покритий дуже міцною ожеледною муфтою.

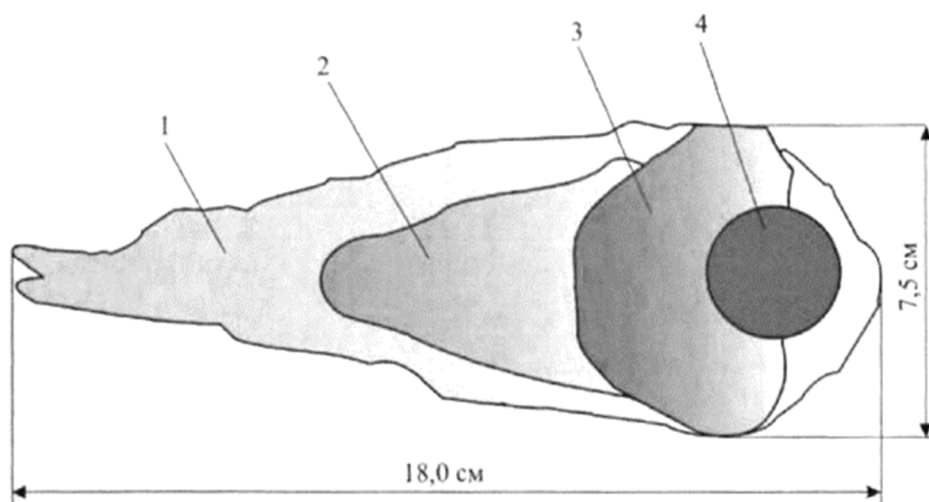


Рисунок 2.3 – Складне ожеледне відкладення :

- 1 – зерниста паморозь;
- 2 – пластинчаста зерниста паморозь;
- 3 – гребенеподібна ожеледь;
- 4 – провід



Рисунок 2.4 – Процес утворення ожеледної муфти на проводі ПЛЕ

Спостереження за процесом закручування проводу з ОПВ показують, що навіть за невеликих кутів ($60-80^\circ$) переріз опаду стає овалоподібним, а при закручуванні на кут 180° практично круглим. На повітряних лініях електропередавання в центральній частині прогону кут закручування проводів може сягати до 500° [37].

Особливістю процесу закручування проводів ПЛЕ є його нерівномірність вздовж прогону, тобто в центрі прогону воно буде максимальним, а по кінцях (біля ізоляторів) навпаки, відсутнім. Це пов'язано з тим, що на відстані 5-10 м від ізоляторів стійкі ОПВ практично відсутні. Тут з'являються односторонні відкладення, що сягають 40-60 мм, однак вони відпадають під дією сили тяжіння та вітру. Причому їх відпадання відбувається не одночасно по всій ділянці проводу. З віддаленням від ізоляторів починає формуватися ОПВ у вигляді еліпсоїдних відкладень і муфт.

Для всіх видів рельєфу на території України густина кристалічної паморозі складає $0,05 \text{ г/см}^3$. Якщо вона утворюється на проводах ПЛЕ, що знаходиться під напругою, то утворюється опад з густиною до $0,09 \text{ г/см}^3$ [37]. Густина кристалічної паморозі також залежить від розміру предмету на якому утворюється. Так, було встановлено, що при зміні діаметру стержня з 5 мм до 35 мм середня густина опаду змінюється в середньому від 0,18 до $0,3 \text{ г/см}^3$.

Зерниста паморозь складається із окремих конгломератів замерзлих крапель. Зазвичай, густина опаду знаходиться в широкому діапазоні значень від $0,1 \text{ г/см}^3$ до $0,6 \text{ г/см}^3$. Для регіону Донбасу густина зернистої паморозі лежить в межах від $0,4 \text{ г/см}^3$ до $0,6 \text{ г/см}^3$. Порівняно невеликі значення густини зернистої паморозі зумовлені двома причинами: наявністю пустот між різними ланцюгами крапель і наявністю бульбашок повітря у краплях, що утворюють їх ланцюги.

Однак, дрібні бульбашки повітря в краплях не можуть істотно змінити густини опаду. Утворення бульбашок зумовлено виділенням при замерзанні крапель розчиненого в них повітря, кількість якого за температури від 0 до -20°C складає 3-4%. Формування опаду невеликої густини пов'язано з утворенням рихлої структури, що складається з мало деформованих, крапель, що змерзлися. Густина опаду також залежить від діаметра крапель, швидкості їх співударяння, температури повітря, чим вищі ці параметри тим вища його густина (табл. 2.1). На рис. 2.5 представлено експериментальні залежності густини кристалічної паморозі від температури повітря (підкладки) за різних швидкостей вітру.

Таблиця 2.1 – Залежність густини відкладень на проводах від швидкості вітру

Вид опаду	$u_0, \text{ м/с}$			
	0-4,0	4,1-8,0	8,1-12,0	12,1-16,0
Зерниста паморозь	0,15	0,20	0,23	0,25
Змішане відкладення	0,15	0,21	0,27	0,33
Ожеледь	0,52	0,55	0,57	0,57

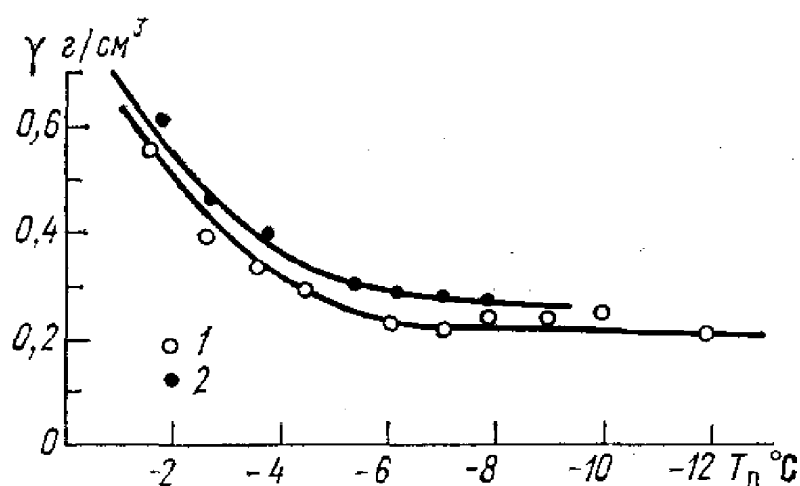


Рисунок 2.5 – Експериментальна залежність $\gamma = f(u, T_s)$ [37]:

1 – $u \leq 6 \text{ м/с}$;

2 – $7 \leq u \leq 6 \text{ м/с}$.

Густина ожеледі на території України знаходиться в діапазоні значень від 0,6 до 0,9 г/см³. При ожеледоутворенні основною причиною рихлої структури опадів є утворення замкнутих і незамкнутих порожнин, що заповнені повітрям. На відміну від зернистої паморозі густина ожеледі практично не залежить від швидкості вітру. При зміні швидкості вітру майже на порядок густина ожеледі змінюється лише на 10% [37]. Густина ожеледі також мало залежить від розмірів предмета, на якому відбувається осідання крапель. При зміні діаметра проводу від 5 до 30 мм густина ожеледі змінюється від 0,36 до 0,38 г/м³. Незначна зміна густини ожеледі зумовлена тим, що її формування відбувається крупними краплями, які повністю розплющуються та не утворюють ланцюгів крапель, а плівка води, рухаючись по поверхні і замерзаючи, не утворює великих повітряних порожнин, на відміну від утворення зернистої паморозі.

Проведений аналіз показує, що кристалічна паморозь має малу густину 0,05-0,08 г/м³ у порівнянні з ожеледдю. Однак, на проводах ПЛЕ товщина шару цього виду опадів може сягати до декількох сантиметрів. Оскільки маса кристалічної паморозі незначна, то безпосередньо за рахунок збільшення маси, провід і лінійна арматура ПЛЕ не ушкоджуються. Проте зміна аеродинамічного профілю проводу сприяє появі таких небезпечного явища як вібрація проводу, що прискорює його знос у місцях кріплення.

Зерниста паморозь має набагато більшу густину до 0,6 г/см³ ніж кристалічна тому її осідання може призводити до значних ушкоджень ПЛЕ.

Ожеледь має густину до 0,9 г/см³ і тому є найбільш небезпечним природним явищем для повітряних ліній. При досягненні ожеледної стінки на проводі критичної товщини виникають масові обриви проводів та злам стояків проміжних опор. Крім збільшення маси проводу, ожеледь викликає інтенсивне скручування проводів вздовж повздовжньої осі та значні їх вібрації, а іноді – галопування.

Сума ОПВ є основним параметром, що характеризує вплив відкладення на господарську діяльність людини. Для проводів ПЛЕ суми ОПВ прийнято виражати на одиницю довжини. Сума відкладень суттєво залежить від висоти розташування проводу над рівнем підстильної поверхні. Проте такий вплив

висоти на суму опадів є опосередкованим – впливає не сама висота, а пов’язані з нею зміна швидкості та водності ожеледонесучого потоку. Зі збільшенням діаметру проводу ПЛЕ зменшується коефіцієнт захвату E . У результаті внаслідок цього кількість опадів на висоті до опадів на ожеледному верстаті спрочатку збільшується а потім зменшується (рис. 2.6)

Сума ОПВ на проводі залежить від його орієнтації відносно вектора швидкості вітру. Очевидно, що найбільша кількість опадів буде коли вітер направлений перпендикулярно до осі проводу. З ростом кута між вектором швидкості вітру та віссю проводу кількість вологи, що осідає буде зменшуватися пропорційно його синусу. Якщо вісь проводу буде орієнтовано паралельно вектору швидкості вітра ($\alpha = 0$), то осідання крапель взагалі не буде.

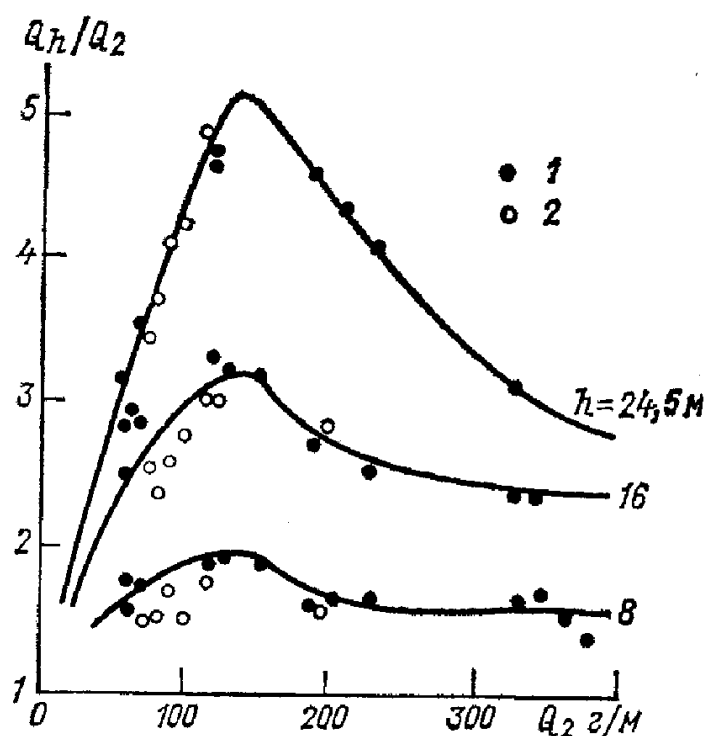


Рисунок 2.6 – Відношення суми опадів Q_h на проводі $d = 5$ мм, що розміщений на висоті h , до суми опадів Q_2 на такому ж проводі на висоті 2 м [37]

На гладких предметах, таких як проводи ПЛЕ, опади у вигляді зернистої паморозі та ожеледі досить сильно примерзають до їх поверхні. При цьому необхідно розрізняти два види зчеплення: зчеплення проводу з льодяними кристалами та зчеплення кристалів один з одним. Згідно проведених експериментів було встановлено, що з ростом шорсткості сила зчеплення збільшувалася, але починаючи з нерівностей 20 мкм зчеплення не залежало від шорсткості. У цілому, чим вища швидкість зіткнення крапель з поверхнею проводу та нижча температура повітря, тим сила зчеплення вища. Для проводів ПЛЕ діаметром 30 мм відносна кількість вологи залежить від структури їх поверхні (табл. 2.2). Для витої поверхні неізолюваних проводів, що утворена з окремих дротин кількість опаду є найбільшою. На проводах, які покриті захисним шаром з полімеру опаду утворюється до 2-х разів менше. Це пов'язано зі значно меншою силою зчеплення опаду з полімерами ніж чистим алюмінієм.

Таблиця 2.2 – Відносна кількість зернистої паморозі і та ожеледі проводах і циліндрах діаметром 30 мм [37]

№ п/п	Вид зразка та його поверхні	Відносна кількість опаду, %
1	Алюмінієвий провід типу А, АС	100
	Алюмінієвий циліндр, гладкий	75
2	Алюмінієвий провід покритий плівкою з неоперну (хлоропреновий каучук)	78
	Алюмінієвий провід покритий плівкою з полівінілхлориду	61
3	Циліндр, покритий плівкою з полівінілхлориду	52

У табл. 2.3 представлено узагальнені основні характеристики ОПВ та ступінь їх небезпеки для конструктивних елементів ПЛЕ при їх утворенні.

Таблиця 2.3 – Узагальнені основні характеристики ОПВ

Вид опаду	γ , г/см ³	Маса відкладення на 1 м проводу $\varnothing 10$ мм, кг ¹⁾	Ступінь небезпеки для ПЛЕ
Кристалічна паморозь	0,05 – 0,09	0,1 – 0,15	низький
Зерниста паморозь	0,1 – 0,6	0,2 – 1,2	високий
Суміш	0,15 – 0,33	0,25 – 0,86	середній
Ожеледь	0,6 – 0,9	1,0 – 1,7	найвищий

Примітка. Стінка ОПВ 20 мм.

Отже, з вище викладеного слідує, що небезпечним для проводів ПЛЕ є утворення кристалічної паморозі, зернистої паморозі, ожеледі та їх суміші, тому нижче приводиться розгляд механізмів їх утворення з метою виявлення фізичних параметрів для ранньої ідентифікації їх утворення на проводі.

2.2 Механізми утворення ожеледно-паморозевих відкладень

2.2.1 Утворення кристалічної паморозі

На проводах ПЛЕ кристалічна паморозь утворюється за рахунок трьох механізмів, що відбуваються одночасно: десублімації, гравітаційного осідання переохолоджених крапель і дії електричних сил.

Десублімація – це процес перетворення водяної пари безпосередньо у тверду речовину (льодяні кристали). Щоб відбулася десублімація, парціальний тиск водяної пари у повітрі має бути вищим за тиск насиченої пари над поверхнею, на якій утворюються кристали.

У природних умовах за плюсових температур повітря та відсутності його радіаційного вихолоджування, краплі хмар, туману, та ті, що знаходяться на елементах підстильної поверхні мають приблизно однакову температуру.

За від'ємних температур повітря ці краплі також можуть перебувати в рідкому стані, тобто бути переохолодженими. Відомо, що тиск насиченої пари над рідкою водою за певної від'ємної температури T_a вищий, ніж тиск пари над льодом E_i за тієї ж температури, тобто $T_i = T_a < 0$ у всіх випадках $E_i < E_a$ і $\Delta E = E_a - E_i > 0$ (рис. 2.7). Отже, якщо в одиниці об'єму простору присутня вода в різних агрегатних станах, то її переохолоджені краплі будуть випаровуватися, а льодяні кристали рости – за рахунок процесу десублімації пари, що виділяється під час випаровування крапель.

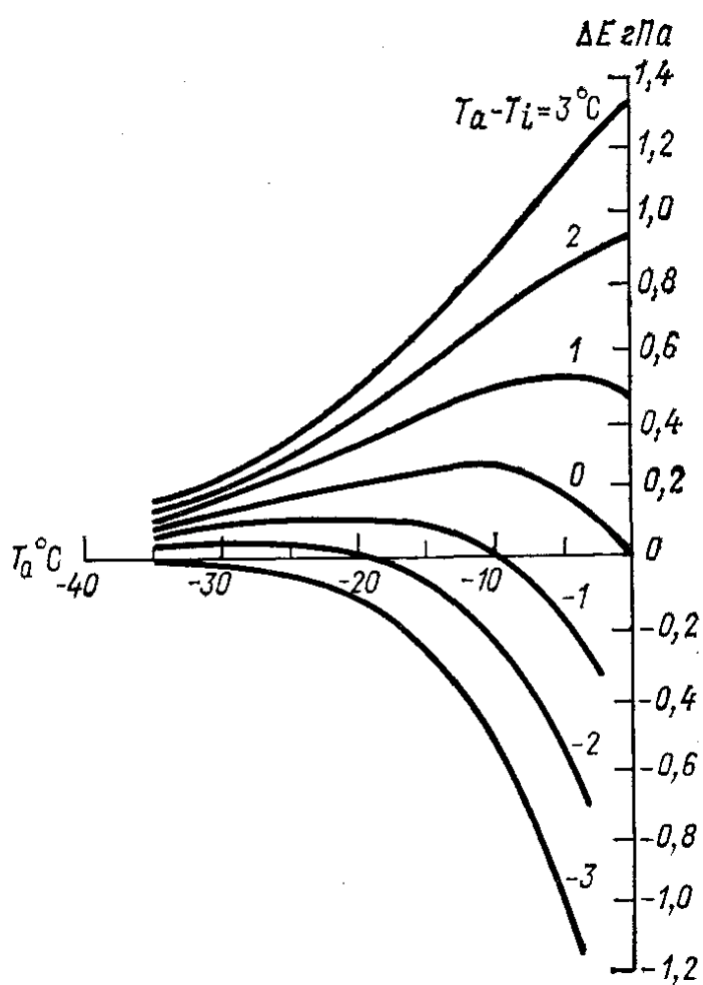


Рисунок 2.7 – Різниця тисків насичення водяної пари ΔE над поверхнею переохолоджених крапель і поверхнею льоду ($\Delta E = \Delta E_w - \Delta E_i$) у залежності від температури повітря T_a за різних значень між температурою поверхні крапель, рівною температурі повітря, і температурою поверхні льоду (провід) T_i [37]

Із аналізу залежностей на рис. 2.7 слідує, якщо температура кристалів льоду з якій-небудь причини стане вищою за температуру навколишнього повітря ($\Delta T_a > 0^\circ\text{C}$), то різниця у значеннях парціального тиску зменшується і при $\Delta T_a = -3^\circ\text{C}$ у діапазоні температур від 0 до -35°C вона змінить свій знак на протилежний. У такому разі замість процесу десублімації буде відбуватися випаровування льодяних кристалів на підкладці.

З іншого боку, якщо в результаті вихолоджування температура льодяної підкладки виявиться також і нижчою за температуру повітря, то різниця між парціальним тиском водяної пари над підкладкою та в повітрі істотно зросте.

Вплив електростатичних сил на осідання крапель має місце на проводах і лінійній арматурі ПЛЕ. Механізм електростатичного осадження базується на тому, що краплі хмар і туманів, що виявилися поблизу конструктивних елементів ПЛЕ під їх напругою поляризуються. Поляризовані краплі притягуються до конструктивних елементів ПЛЕ із силою:

$$F = 2\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} r^3 \text{grad} E_e^2,$$

де ϵ_0 – відносна діелектрична постійна;

ϵ – діелектрична проникність краплі;

r – радіус краплі;

E_e – напруженість електричного поля в даній точці.

Під впливом сили F краплі рухаються до проводу та осідають на ньому. Цей механізм має місце як при гравітаційному, так і при інерційному осіданні крапель, його дія виражається в збільшенні коефіцієнта захвату. Якщо крапля за вітряної погоди набуває направленої руху, та неї крім електростатичних сил діють ще ф аеродинамічні.

Згідно досліджень було встановлено, що відношення маси осівшої вологи на провід під напругою до маси осаду на проводі без напруги, може сягати досить високих значень, причому тим більших, чим менший діаметр крапель. Так у

лабораторному експерименті для крапель штучно створеного туману з розмірами $\bar{r} = 1...2$ мкм за градієнта електричного поля 20 кВ/см, це відношення сягало 30 [37]. Проте, у польових умовах основний вклад в опади вносять більш крупні краплі. Для природних туманів з краплями, що мають розміри $\bar{r} = 4...5$ мкм маса ОПВ на проводах діаметром 30 мм ПЛЕ напругою 400 кВ, в середньому виявляється більшою в 1,3 рази, ніж на проводах без напруги.

2.2.2 Утворення зернистої паморозі

Зерниста паморозь (ЗП) утворюється внаслідок осідання та замерзання переохолоджених крапель туману чи мряки на поверхні проводу. Для її утворення потрібен вітер. Визначальну роль має інерційне осідання крапель, проте для проводів ПЛЕ, що знаходяться під напругою також важливу роль починають відігравати електростатичні сили.

Процес починається з осідання перших крапель безпосередньо на поверхню проводу. Характер осідання на початковому етапі залежить від матеріалу проводу та властивостей його поверхні, зокрема шорсткості та теплопровідності. Під шорсткістю розуміються середні розміри нерівностей та виступів поверхні. Рівень впливу шорсткості поверхні проводу на процеси осідання крапель буде залежати від їх розмірів. Умовно можливо вважати, що поверхня гладка, якщо розміри її нерівностей менші за мінімальний розмір крапель хмарного діапазону розмірів, і шорстка – якщо більші.

Вважається, що краплі хмарного діапазону розмірів мають найменший розмір з діаметром 2 мкм [37]. У техніці неоднорідності такого розміру притаманні шліфованим поверхням. Тоді лід, що утворюється в результаті замерзання плівки води на рівній поверхні, слід вважати гладкою поверхнею, а поверхні, які творенні внаслідок осідання на шар раніше замерзлих крапель, – шорсткою.

Експерименти в аеродинамічній трубі показали, що при утворенні опаду зернистої паморозі на циліндрах зі збільшенням їх діаметра інтенсивність опадоутворення знижується 20-40% порівняно з інтенсивністю опадоутворення на неозерненому круглому циліндрі.

Механізм утворення ЗП за фізикою процесу можливо розбити на наступні фази:

- досягнення краплями поверхні проводу;
- співзйткнення і деформація крапель;
- замерзання крапель, що осіли з утворенням льоду на проводі.

Перша фаза при осіданні крапель з хмар і туманів аналогічна процесу інерційного осідання при утворенні наморозі. Інтенсивність осідання визначається формою, розмірами та орієнтацією предмета, розмірами крапель хмар і туманів, швидкістю повітряного потоку.

Утворення ЗП можливо лише в тому випадку коли температура повітря T_a , температура крапель T_d , що знаходяться в ньому та температура поверхні проводу T_w від'ємні. За відсутності будь-яких фазових переходів $T_a = T_d = T_w$. Проте, за наявності фазових переходів температура поверхні проводу може змінитися. Внаслідок виділення теплоти кристалізації при замерзанні крапель води на проводі температура його поверхні підвищується і може досягти 0°C . Підвищення температури має вирішальний вплив на характер замерзання наступних крапель, що осідають на лід, що знаходиться на проводі.

Температура поверхні проводу визначається швидкістю надходження тепла внаслідок виділення теплоти кристалізації та його відтоку в повітря та провід, при цьому суттєву суттєвий вклад у теплову рівновагу проводу вносять електричні втрати в самому проводі. На основі відомих рівнянь теплового балансу циліндру, що розміщений у потоці водного аерозолію [40-42], запишемо рівняння для проводу ПЛЕ

$$EWu \left(IL_f + c_w T_a - c_i T_w \right) + \frac{I^2 R \Delta s}{\pi d} = \frac{0,24\pi (\text{Re})^{0,6}}{d} \theta \left(k_a (T_w - T_a) + L_v D \Delta \rho \right), \quad (2.1)$$

де E – інтегральний коефіцієнт захвату;

W – водність туману;

u – швидкість повітряного потоку;

I – відношення кількості замерзлої води до тієї, що залишилась на проводі;

L_f і L_v – теплота плавлення льоду і випаровування води;

T_a – температура повітря;

T_w – температура проводу;

c_w і c_i – питома теплоємність, відповідно, води та льоду;

I – сила струму, що протікає в проводі;

R – активний опір ділянки проводу;

Re – число Рейнольдса;

Δs – одиниця поверхні циліндра;

d – діаметр циліндра;

θ – діаметр, що враховує неоднорідність поверхні циліндра, для гладких поверхонь рівний 1, а для шорстких – ≈ 2 .

k_a – коефіцієнт теплопровідності повітря;

D – коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі;

Δp – різниця парціального тиску водяно-пари біля поверхні циліндра і за його межами.

Ліва частина рівняння (2.1) – це тепло, що надходить до циліндру, а права – тепло, що він втрачає за рахунок теплопровідності та випаровування.

Якщо температура поверхні проводу $T_w < 0$ °С, то утворення шару опадів на ній відбувається внаслідок «сухого» росту, тобто осідання крапель відбувається на кристали льоду, що утворилися раніше з крапель хмар і туманів.

За деякого критичного значення водності температура поверхні проводу за рахунок виділення теплоти кристалізації може підвищитися до $T_w = 0$ °С, тоді на ній утворюється плівка води і подальше замерзання вологи за рахунок осідаючих крапель буде відбуватися на цій плівці завдяки механізму «мокрого» росту. У холодну пору року водність туманів і низьких хмар не перевищує 1 г/м³. Істотний вплив на значення критичної водності чинить швидкість вітру.

Аналіз даних табл. 2.4 показує, що для умов рівнинного рельєфу України швидкість вітру рідко буває вищою 10-15 м/с, тому в природних умовах критична водність не може бути досягнута.

За мокрого росту кількість вологи, що залишилася на проводі може бути розрахована за допомогою (2.1). Однак, при цьому незначна частина вологи, перш ніж замерзне, буде здута з поверхні проводу ПЛЕ, тому її можливо не враховувати.

У табл. 2.4 приведені значення швидкості вітру та температури повітря при утворенні ЗП. Згідно цих даних зерниста паморозь утворюється за рахунок інерційного і гравітаційного осідання крапель туману, в порівняно широкому діапазоні температур.

За низької вогдості повітря утворення опаду відбувається в основному за рахунок десублімації водяної пари. Оскільки, окремі краплі туману при замерзанні виділяють незначну кількість тепла, яка недостатня для істотного підвищення температури поверхні проводу. В результаті температура повітря і проводу виявляються приблизно однаковими. У цьому випадку закристалізовані краплі, які осіли можуть рости за рахунок десублімації, що зумовлена різницею парціального тиску над водою і над льодом.

За високої вогдості повітря температура поверхні проводу підвищується за рахунок виділення теплоти замерзання переохолоджених крапель, які осіли і це призводить до того, що різниця між парціальним тиском водяної пари над переохолодженою краплею і нагрітою поверхнею проводу знижується або навіть приймає зворотній знак. У результаті десублімації ріст крапель, що замерзли зменшується або навіть змінюється випаровуванням.

У табл. 2.5 представлено метеорологічні умови утворення паморозі двох видів: віялоподібної та пластинчастої.

Таблиця 2.4 – Розрахункові значення критично вогдості г/м^3 [37]

$d, \text{мм}$	$T_a, ^\circ\text{C}$	$u, \text{м/с}$				
		1	4	8	14	24
10	-2	13,3	0,94	0,38	0,10	0,11
	-4	27,4	1,94	0,79	0,43	0,25
	-6	40,6	2,87	1,17	0,64	0,38

Таблиця 2.5 – Метеорологічні умови утворення паморозі [37, 38]

Різновид паморозі	$T_a, ^\circ\text{C}$	$u, \text{м/с}$	Атмосферне явище
Віялоподібна	-9,6	≤ 2	Туман
	-10,0	≤ 1	
	-9,9	≈ 5	
	-7,8	≤ 7	Димка, туман
	-6,4	≤ 10	Туман
	-7,4	≤ 5	
	-6,0	≤ 3	
	-4,2	≤ 5	
	-5,4	≤ 7	
Пластинчата	-2,0	≤ 5	Густий туман
	-4,0	≤ 10	
	-3,6	≤ 15	Туман

2.2.3 Утворення ожеледі

Ожеледь утворюється в результаті двох різних процесів: *інерційного* та *гравітаційного* осадження переохолоджених крапель туману, мряки, дощу (табл. 2.6). Утворення ожеледі лише за рахунок інерційного осадження крапель туману, мряки та дощу може відбуватися при сильному вітру та приводить до утворення шару осаду з навітренної сторони предметів.

На території України утворення ожеледі відбувається за невеликих від'ємних температурах повітря (табл. 2.6). Процес ожеледоутворення в основному зумовлений осіданням переохолоджених крапель мряки та дощу. Ці краплі завдяки своїй великій масі перед замерзанням встигають повністю розплющитися, перетворитися на плівку води, розтектися по поверхні проводу і вже потім замерзнути. Цим пояснюються форми ожеледі, що зустрічаються в природних умовах. Згідно загальноприйнятої класифікації ожеледь ділиться на гребенеподібну, овалоподібну, футляроподібну та хвилястоподібну [37].

Гребенеподібна ожеледь в основному зумовлена осіданням крупних крапель туману та мряки. Час замерзання цих крапель досить малий, тому вони фактично замерзають біля свого місця осідання. Виникнення виступів, що звужуються на зустріч ожеледоносному потоку зумовлено переважно послідовним осіданням дрібних крапель на навітряному боці проводу за рахунок зростання коефіцієнта захоплення.

Таблиця 2.6 – Метеорологічні параметри характерні для утворення ожеледі

Різновид ожеледі	T_a , °C	u , м/с	Атмосферне явище
Гребенеподібна	-1,0	3	Туман, мряка
	-2,0	<7	
	-1,0		
	-2,4	<3	Густий туман
	-0,6	12	Туман, мряка
Овалоподібна	-3,7	5	Льодяний дощ
	-2,0	<5	Дощ, мряка
	-2,6	<7	Туман, мряка
Футляроподібна	-4,2	<2	Дощ, туман
	-0,7	5	Дощ
	-0,4	<4	
	-0,5	<3	
Хвилястоподібна	-0,5	<3	
	-0,4	<14	
	-0,6	<12	
	-0,7	14	

Інші види ожеледі утворюються за рахунок осідання переохолоджених крапель дощу під дією гравітаційних сил, які при цьому розтікаються та замерзають. Час розтікання є прямопропорційним розміру крапель. Осідаючи на верхній частині проводу краплі дощу стікають по його поверхні, обгортають і таким чином утворюють футлярподібну або хвилястоподібну ожеледь. Овалоподібна ожеледь є проміжною стадією між гребнеподібною і футляроподібною. Зі зміною умов осідання відбувається плавний перехід від одного виду ожеледі до іншого.

Утворення ожеледі за рахунок крапель мряки та дощу може відбуватися також і при штилі. Вітер збільшує інтенсивність утворення опаду за рахунок зростання швидкості нахождення «будівельного матеріалу», при цьому виникає деяке зміщення в товщі опаду на навітряну сторону.

Характерною особливістю механізму утворення ожеледі є те, що краплі туманів, які потрапили на провід до свого замерзання встигають розплющитися та перетворитися на плівку води. У результаті при замерзанні утворюється опад у вигляді змерзлих кристалів льоду, що має велику густину. Інтенсивність осідання мряки на проводах ожеледного верстата сягає до $2,5 \text{ г}/(\text{м}\cdot\text{год})$, а дрібного дощу – до $50 \text{ г}/(\text{м}\cdot\text{год})$.

2.3 Вибір параметрів контролю ОПВ на ПЛЕ

Моніторинг ожеледоутворення на ПЛЕ проводиться для інформаційного забезпечення процесу плавки ожеледі з метою покращення її успішності. Тому використання первинних вимірювальних перетворювачів повинно бути направленим на вирішення цієї задачі.

Утворення ОПВ на проводі ПЛЕ пов'язано зі зміною ряду фізичних, геометричних і інших параметрів її конструктивних елементів. Контролюючи зміну цих параметрів можливо отримати інформацію про час початку утворення ОПВ на проводі, його вагу, вид і т.п.

Основними руйнівними чинниками, що діють на ПЛЕ є збільшення маси та парусності проводу внаслідок утворення на ньому ОПВ, а також вітрові навантаження. Для проведення плавки ожеледі важливе місце має інформація про кожен вид навантаження. Вона дозволить правильно визначати силу струму та тривалість плавки ожеледі і, як наслідок, не перегрівати провід ПЛЕ. Тому ожеледне та вітрове навантаження повинні контролюватися в першу чергу. Як зазначалося вище, вітрове навантаження на провід залежить синуса кута між вектором швидкості вітру та повздовжньою віссю проводу, тому крім швидкості вітру також необхідно контролювати його напрям.

Для раннього виявлення часу початку ожеледоутворення на проводі ПЛЕ необхідно використовувати високочутливі первинні вимірювальні перетворювачі. Розміщення таких перетворювачів безпосередньо на проводі ПЛЕ – це складна задача, оскільки він знаходиться під високим потенціалом – 110 кВ. Крім того, необхідно вирішити проблему живлення вимірювальних перетворювачів і передачі інформації до приймального блоку, що розташований на електроопорі. Тому доцільно розробити такий вимірювальний перетворювач, чутливий елемент якого буде мати ті ж параметри, що їх провід ПЛЕ (геометричні розміри, масу, матеріал, шорсткість поверхні, температуру і т. п.); і бути заземленим. Для досягнення цієї мети найкраще підходить відрізок того ж проводу, яким виконані проводи контрольованої ПЛЕ. Крім того, він повинен бути орієнтованим паралельно проводам і розташований на висоті їх установки.

Оскільки вимірювальні перетворювачі систем моніторингу розміщуються на ПЛЕ і отримують живлення від акумуляторних батарей, що заряджаються від сонячних панелей доцільно обмежувати час роботи системи. Для цього необхідно вимірювати температуру та відносну вологість повітря.

Отже, для раннього визначення початку ожеледоутворення необхідно використовувати первинний вимірювальний перетворювач, чутливим елементом якого є відрізок проводу контрольованої ПЛЕ. Після початку процесу утворення ожеледі на проводі необхідно контролювати маса осаду, швидкість та напрям вітру.

2.4 Висновки до 2-ого розділу

1. Встановлено, що для проводів ПЛ найбільшу небезпеку представляють зерниста паморозь і ожеледь та їх суміш, а чітких природних меж відділяючих один вид відкладень від іншого, що базуються інтегральних параметрах цих опадів не існує. Зерниста паморозь і ожеледь мають густину, відповідно, $0,1 - 0,6 \text{ г/см}^3$ та $0,6 - 0,9 \text{ г/см}^3$.

2. Встановлено, що визначальним механізмом утворення поморозі є інерційне осідання та замерзання переохолоджених крапель туману чи мряки на поверхні проводу, а також електростатичні сили в інтервалі температур від $-2,0$ до $-10,0^\circ\text{C}$, при швидкості вітру $1-16 \text{ м/с}$. Ожеледь утворюється в результаті інерційного та гравітаційного осадження переохолоджених крапель туману, мряки, дощу в більшості випадків при температурах повітря від $-0,1$ до $-4,0^\circ\text{C}$, при швидкості вітру $2-12 \text{ м/с}$.

4. Обґрунтовано, що система моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ повинна контролювати масу опадів на проводі, швидкість та напрям вітру, а для раннього визначення початку ожеледоутворення мати ПВП, чутливим елементом якого є відрізок проводу контрольованої ПЛЕ.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОЖЕЛЕДО-УТВОРЕННЯ НА ПЛЕ 110 кВ

У результаті проведеного аналізу інтегральних параметрів ОПВ і механізмів їх утворення на проводах ПЛЕ було встановлено які саме параметри необхідно вимірювати для здійснення моніторингу проміжного прольоту ПЛЕ. Наступною задачею є розробка підсистем раннього визначення початку ожеледоутворення та п вимірювання навантаження на провід, які є основою системи моніторингу ожеледоутворення ПЛЕ.

3.1 Система моніторингу ожеледоуворення

Основними вимогами до СМО є наступні:

- раннє визначення початку процесу ожеледоутворення на проводі;
- окремий контроль ожеледного та вітрового навантаження на провід ПЛЕ;
- можливість роботи в складних погодних умовах:

діапазон робочих температур від -10 до +10 °С; діапазон температур зберігання -30 +50°С; відносна вологість повітря – 0...100%;

- проста інсталяція в наявні інформаційні системи енергопостачальних компаній;

- робота весь ожеледний сезон без обслуговування;
- робота від автономного джерела живлення робота щодо ПЛЕ;
- малі габарити.

До основних функцій СМО відносяться:

- формування інформаційних та аварійних сигналів;
- створення бази статистичних даних з оперативною інформацією про нормальні та аварійні режими роботи ПЛЕ, реєстрація подій і дій оперативного персоналу;

- передача телеметричної інформації до оперативно-диспетчерського диспетчерської служби енергопостачальної компанії;
- прогнозування схемно-режимних ситуацій і дій диспетчера (радник диспетчера)
- передача телеметричної інформації до оперативно-інформаційного комплексу вищого рівня.

Цінність інформації про стан ПЛЕ та впливи на її елементи безпосередньо залежить від часу між реєстрацією події системою та індикацією інформації про неї в диспетчерському пункті. Тому система моніторингу має працювати в режимі реального часу та використовувати автоматичні швидкодіючі канали передачі даних.

Серед доступних існуючих бездротових технологій передачі даних найбільш перспективною є організація каналів зв'язку за допомогою мереж стандарту GSM. У рамках технології GSM можлива передача даних трьома основними способами:

- через службу коротких повідомлень SMS;
- по голосовому каналу;
- з використанням пакетної передачі GPRS.

Ця технологія оптимально підходить для застосування в системах квазінеперервного моніторингу виробничих процесів, моніторингу мобільних і стаціонарних об'єктів, а також для вирішення задач, де ключову роль відіграє низька вартість трафіку. Максимально можлива швидкість обміну даними за допомогою GPRS сягає 21,3 кбайт/с. Особливістю GPRS є наявність віртуального активного каналу зв'язку. Для передачі пакета абоненту надається реальний радіоканал, який в інший час використовується для пакетів інших користувачів. Тому організацію каналів зв'язку між пристроями та центром обробки даних у ОДС електропостачальної компанії доцільно створити саме на основі технології GPRS.

На основі існуючих систем моніторингу [27, 32-35] була розроблена структура система моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ представлена на рис 3.1. Система моніторингу ожеледоутворення складається з трьох структурних рівнів, що підпорядковані один одному: рівня об'єктів контролю, регіонального рівня та центрального.

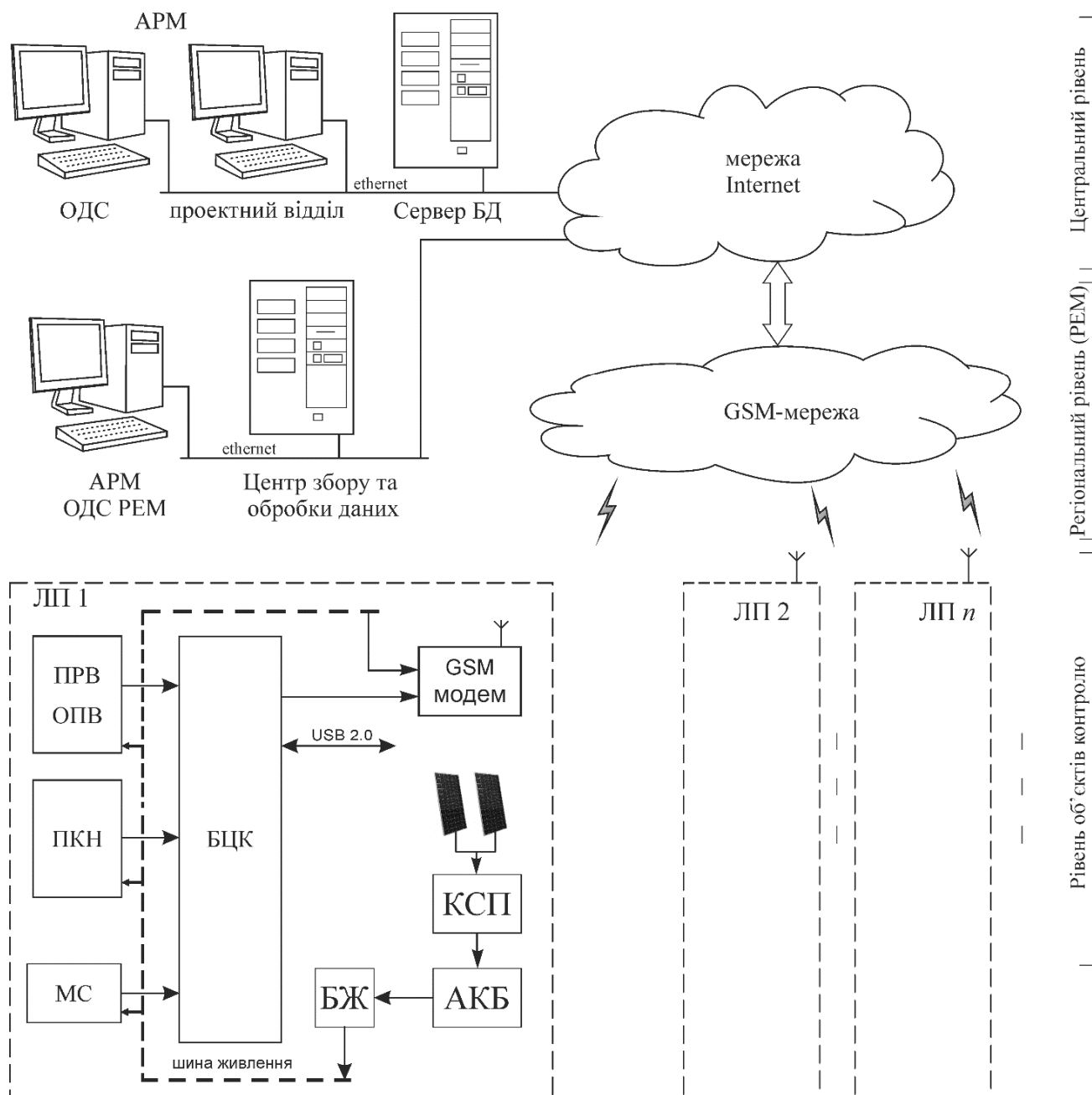


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи моніторингу оржеледоутвонення

Рівень об'єктів контролю утворює множина лінійних постів, що встановлюються на контрольованих повітряних лініях. Зв'язок окремих блоків з вузлом збору та обробки інформації організовується за допомогою наявних GSM-каналів зв'язку мобільних операторів.

До складу кожного лінійного посту (ЛП) входять: підсистема раннього визначення утворення ожеледно-паморозевих відкладень (ПРВ ОПВ), підсистема контролю навантаження на провід (ПКН), метеостанція (МС), блок центрального контролера (БЦК), фотоелектричні панелі, контролер сонячних панелей (КСП), акумуляторна батарея (АКБ 24 V), блок живлення (БЖ).

Основним завданням ЛП є самодіагностування технологічного обладнання, збір даних з підключених вимірювальних перетворювачів, первинна обробка інформації та обмін телеметричною інформацією з центром збору та обробки даних.

Живлення всіх підсистем та блоків ЛП здійснюється від шини живлення, що підключена до блоку живлення. Джерелом електричної енергії для ЛП є дві послідовно з'єднані акумуляторні батареї (АКБ), що не обслуговуються. Їх заряд здійснюється від КСП до якого приєднані дві фотоелектричні панелі. ЛП монтується на проміжній металевій опорі ПЛЕ 110 кВ.

Типовий сценарій роботи лінійного посту наступний. Перед початком ожеледного сезону обладнання ЛП тестується та залишається увімкненим. БЦК вмикає метеостанцію, яка починає контролювати наступні метеорологічні параметри: температуру та відносну вологість навколишнього повітря, швидкість і напрям вітру на рівні підвісу проводів ПЛЕ. Якщо метеорологічні параметри наближаються до граничних ($T_a \leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_a \geq 80\%$) за яких можливе утворення ОПВ, то на БЦК вмикає ПРВ ОПВ, яка починає контролювати наявність і вид відкладення на проводі. При появі ожеледно-паморозевого відкладення на проводі ПРВ, БЦК передає сигнал «поява ОПВ на проводі» за допомогою GSM-модема до ОДС і вмикає ПКН. Після накопичення певної кількості ОПВ і перевищення встановлених уставок навантажень на провід ПЛЕ, починається вимірювання

ожеледного та вітрового навантаження та передавання цієї інформації оперативному персоналу ОДС. Передавання телеметричної інформації здійснюється переважно в режимі on-line. Далі оперативний персонал оцінює метеорологічну ситуацію, та контролює через певні проміжки часу інтенсивність ожеледоутворення на проводі. За отриманою телеметричною інформацією приймається рішення про необхідність проведення плавки ожеледі на тій чи іншій ПЛЕ.

За необхідності, наприклад, для контролю вітрових навантажень ЛПП може працювати і теплий період року.

Телеметрична інформація з лінійних постів циклічно надходить до центру збору даних регіонального рівня.

Регіональний рівень системи складається з центру збору та обробки даних, що розміщується у районній філії електропостачальної компанії. Основними компонентами центру є такі: сервер додатків, сервер баз даних та операційна система. Сервер додатків забезпечує зв'язок з лінійними постами, управління та доступ користувачів до даних і виконання прикладної логіки. Сервер баз даних відповідає за збереження та цілісність інформації, а також її передачу на автоматизоване робоче місце диспетчера для візуалізації поточного стану повітряних ліній, відображення тривожних сповіщень і роботу з архівами. Операційна система координує доступ до ресурсів комп'ютера та надає файлові й мережеві сервіси. Сервер центру збору даних регіонального рівня має статичну IP-адресу та налаштований на прийом запитів на з'єднання виділеним каналом для сеансів передачі телеметричної інформації з лінійних постів. Центр створюється на основі сучасних апаратно-програмних засобів або як підсистема існуючої системи моніторингу повітряних ліній електropостачальної компанії. Через мережу Internet інформація з регіональних центрів збору даних передається до найвищого рівня системи – центрального.

Центральний рівень інформаційної СМО на ПЛЕ призначений для збору, систематизації, накопичення, об'єднання та тривалого зберігання упорядкованих даних з усіх регіональних центрів. До його складу входять: робочі станції автоматизованих робочих місць (АРМ), комунікаційне обладнання, сервер баз даних (СБД), спеціалізоване програмне забезпечення. Ці засоби забезпечують функціонування оперативного персоналу, об'єднані в локальну мережу Ethernet. Поточна інформація про ожеледну ситуацію передається на АРМ центральних диспетчерських пунктів електропостачальної компанії. Проектний відділ компанії має доступ до сервера бази даних для аналізу накопиченої інформації.

3.2 Підсистема раннього виявлення ОПВ

Призначенням даної підсистеми є фіксація моменту початку утворення опадів на проводі ПЛЕ та визначення його типу. До складу підсистеми входять: ІР-термометр, мікроконтролерний блок (МКБ), твердотільне реле (ТТР), блок живлення (БЖ), первинний вимірювальний перетворювач температури (ПВПТ) (рис. 3.2). У даній підсистемі реалізоване побічне вимірювання наявності ОПВ на проводі ПЛЕ за допомогою пристрою-аналогу проводу. Який представляє собою відрізок проводу, тієї ж марки, що провід контрольованої ПЛЕ, з довжиною вимірювальної частини, що дорівнює не менше одного повиву проводу, причому одна з дротин верхнього повиву проводу електрично ізольована від інших [43, 44]. Пристрій аналог-проводу розміщується на тій же висоті та паралельно проводу контрольованої ПЛЕ.

Підсистема працює наступним чином. Після отримання сигналу від БЦК мікроконтролерний блок вимірює за допомогою ПВПТ температуру пристрою-аналогу T_w та температуру проводу ПЛЕ $T_{a.w}$ за допомогою ІР-термометра. Якщо виявиться, що між цими температурами наявна різниця, більша за попередньо прийняту похибку

$$T_w - T_{a.w} \geq \varepsilon, \quad (3.1)$$

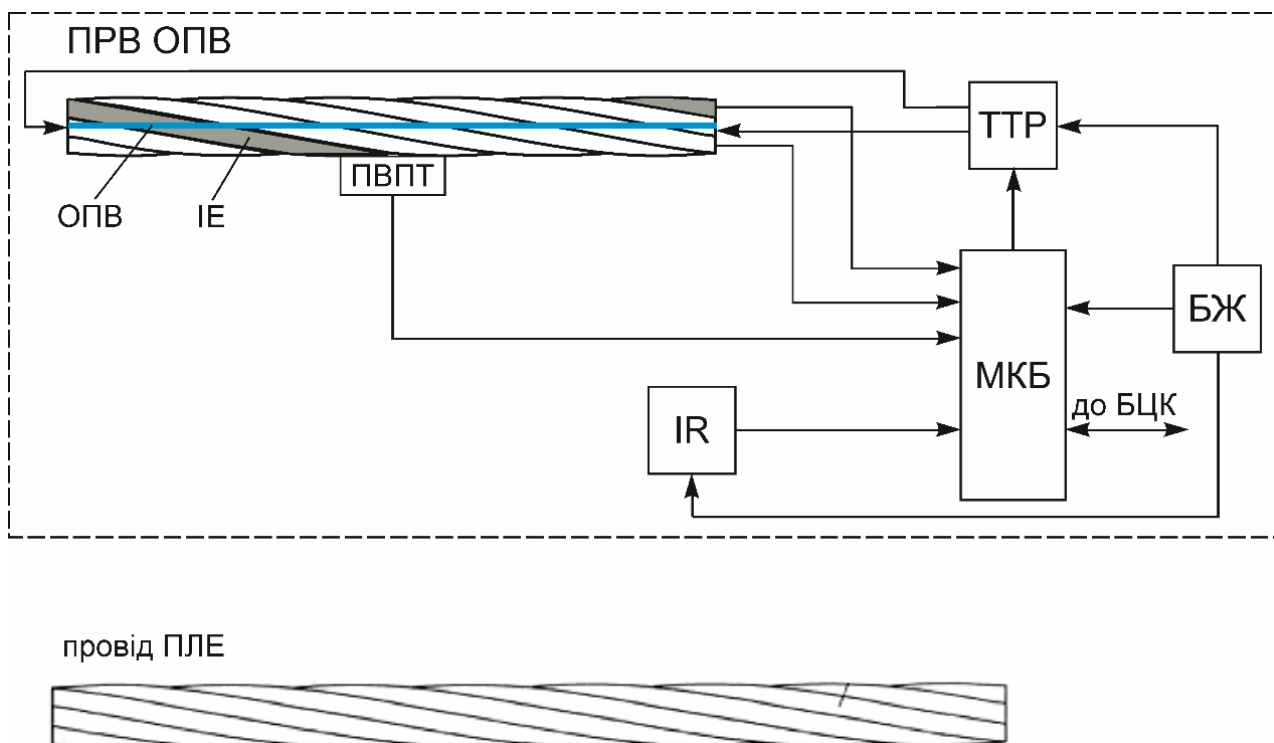


Рисунок 3.2 – Підсистема раннього визначення ОПВ на проводі ПЛЕ

то МКБ увімкне через ТТР нагрів пристрою-аналогу проводу. Рівень його нагріву МКБ контролює за допомогою ПВПТ. Коли умова (3.1) перестане виконуватися МКБ вимкне нагрів пристрою-аналогу проводу. Підтримання температури пристрою-аналогу проводу рівній температурі проводу ПЛЕ МКБ здійснює за алгоритмом на основі за пропорційно-інтегрально-диференціального закону:

$$u(\tau) = k_p \varepsilon(\tau) + k_i \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau + k_d \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau},$$

де k_p – коефіцієнт пропорційної складової;

k_i – коефіцієнт інтегральної складової;

k_d – коефіцієнт диференційної складової;

$d\tau$ – період обчислення та регулювання;

ε – похибка регулювання.

Таким чином досягається ідентичність умов утворення ОПВ на проводі та його аналогу, так як вони знаходяться в однакових умовах теплообміну, виготовлені з одних і тих же матеріалів, мають однаковий переріз і розташовуються на максимально близькій відстані один від одного за умовами техніки безпеки. Виконання всіх цих умов дозволяє реалізувати безпечний контроль утворення ОПВ на проводі ПЛЕ 110 кВ.

Після встановлення температури пристрою-аналогу проводу рівній температурі проводу ПЛЕ (з деякою похибкою) проводиться опитування первинного вимірювального перетворювача провідності. Якщо на ньому наявні ОПВ, то вони перекривають ізолюваний і робочий електроди містком (рис. 3.2). У залежності від наявності того чи іншого опаду електропровідність прийматиме одне із можливих значень[43]:

- опади відсутні – 10^{-15} См/см;
- лід $10^{-9} - 10^{-10}$ См/см;
- іній $10^{-11} - 10^{-13}$ См/см;
- дощ, туман – 10^{-4} См/см.

На основі отриманого значення рівня провідності ПВП МКБ, за наявності ОПВ, ідентифікує його вид або ж підтвердить його відсутність. Отримана інформація передається до БЦК. БЦК передає до ОДС одне із можливих повідомлень «Ожеледь на проводі», «Іній на проводі».

Запропонована підсистема також дозволяє визначати час закінчення плавки ожеледі на ПЛЕ. Характерними ознаками цього процесу будуть:

- підвищення температури пристрою-аналогу проводу;
- різке підвищення провідності ПВП внаслідок початку плавлення ОПВ;
- зниження провідності ПВП внаслідок його висушування.

Отже, запропонована підсистема дозволяє визначати на ранній стадії початок процесу утворення ОПВ та визначати його різновид.

3.3 Підсистема контролю навантаження на провід

Розробка подібних систем стала можливою після розробки Y-подібної підвіски проводу (грозозахисного тросу), що дозволило підвищити завадозахищеність вимірювальних перетворювачів ожеледного навантаження [45] і визначати окремо ожеледну та вітрову складові механічного навантаження на провід ПЛЕ.

Підсистема контролю навантаження на провід ПЛЕ (рис. 3.3) складається з: вимірювального перетворювача швидкості вітру 1; вимірювального перетворювача напрямку вітру 2; двох тензометричних вимірювальних перетворювачів, відповідно 3 та 4; мікроконтролерного блоку (МКБ) та блоку живлення (БЖ). Вимірювальні перетворювачі 1 та 2 входять до складу метеостанції (див. рис. 3.1).

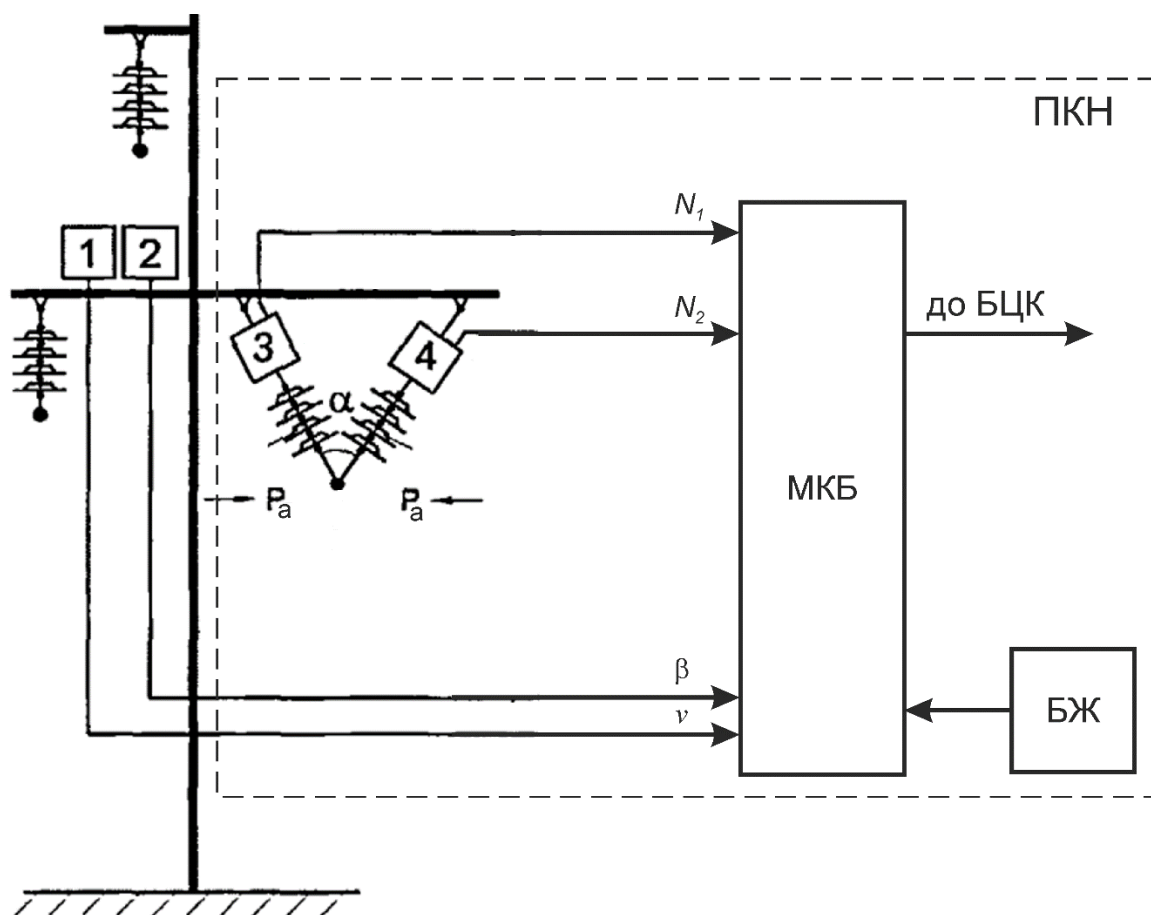


Рисунок 3.3 – Підсистема контролю навантаження на провід

Головним завдання підсистеми є визначення гравітаційної та аеродинамічної складових повного механічного навантаження, що діє на провід. Одночасно на провід ПЛЕ може діяти три незалежні механічні сили (рис 3.4):

- вага 2-х гірлянд ізоляторів і проводу проміжного прогону з лінійною арматурою – V_0 ;
- вага ОПВ, що утворилося на проводі – V' ;
- вітрове навантаження – P_a .

Причому, якщо ПЛЕ знаходиться в справному стані, завжди буде виконуватися умова:

$$V_0 \neq 0. \quad (3.2)$$

Виходячи з кількості сил, що діють на провід ПЛЕ, що знаходиться на Y-подібній підвісці та умови (3.2) можливі шість випадків комбінацій цих сил [46], два останні з яких відрізняються лише протилежним напрямом вітру. Тому розглянемо лише 4-ри перші комбінації (рис. 3.4).

1. ОПВ на проводі відсутні $V'=0$, вітру немає $P_a=0$, тоді ВП 3, 4 вимірюють вагу лише гірлянд ізоляторів з відповідною лінійною арматурою та вагу проводу проміжного прогону. Тоді сили, що діють ПВ 3, 4, відповідно, N_1 та N_2 однакові, тобто $N_1 = N_2$, а $V = V_0$ тоді сумарне навантаження складе (рис. 3.4, а):

$$N_{\Sigma} = V_0. \quad (3.3)$$

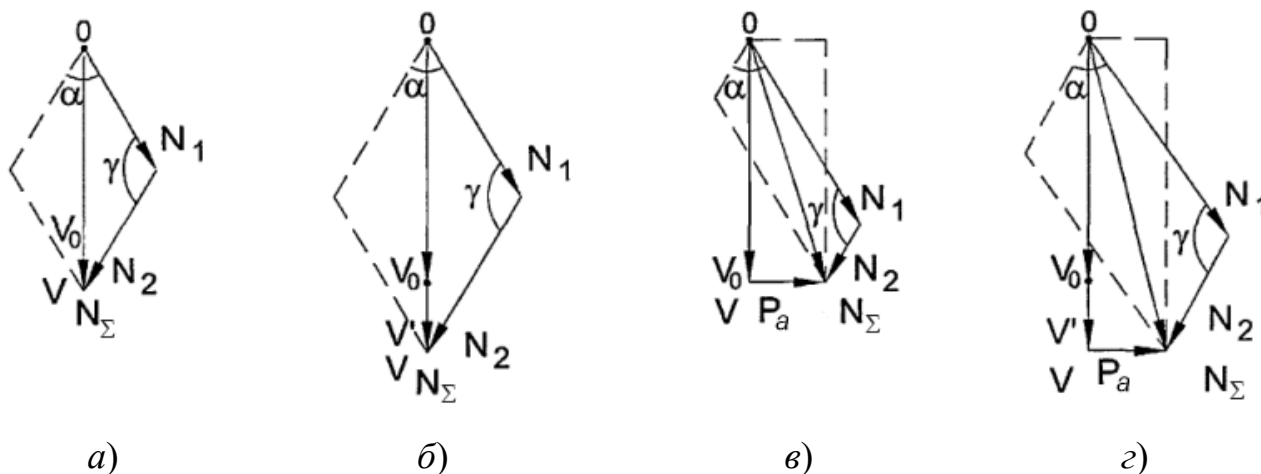


Рисунок 3.4 – Векторні діаграми роботи тензометричних ВП

2. ОПВ на проводі присутні $V' > 0$, вітру немає $P_a = 0$, тоді ВП 3, 4 вимірюють вагу гірлянд ізоляторів з відповідною лінійною арматурою, вагу проводу проміжного прогону та вагу ОПВ, що утворилося на проводі. Тоді сили, що діють ПВ 3, 4, відповідно, N_1 та N_2 однакові, тобто $N_1 = N_2$, а $V = V_0 + V'$ тоді

$$N_{\Sigma} = V = V_0 + V'. \quad (3.4)$$

3. ОПВ на проводі відсутні $V' = 0$, є вітер, що має напрям «зліва на право» $P_a > 0$. Тоді до складової навантаження V_0 перпендикулярно додається складова вітрового навантаження P_a , а вихідні сигнали з тензометричних ВП не рівні між собою $N_1 > N_2$. У цьому випадку сумарне навантаження на провід ПЛЕ складе

$$N_{\Sigma} = \sqrt{V_0^2 + P_a^2}. \quad (3.5)$$

Якщо вітер має протилежний напрям тоді $N_1 < N_2$, а векторна діаграма представлятиме дзеркальне відображення векторної діаграми на рис. 3.4, в).

4. ОПВ на проводі присутні $V' > 0$, є вітер, що має напрям «зліва на право» $P_a > 0$. Тоді до складової навантаження V_0 додаються складові вітрового P_a та ожеледного навантаження V' . Сигнали з тензометричних ВП не рівні між собою $N_1 > N_2$, тоді гравітаційна складова навантаження визначається за виразом (3.5), а ожедно-вітрове навантаження складе

$$N_{\Sigma} = \sqrt{(V_0 + V')^2 + P_a^2}. \quad (3.6)$$

Аналогічно до 3-го випадку, якщо вітер має протилежний напрям тоді $N_1 < N_2$, а векторна діаграма представлятиме дзеркальне відображення векторної діаграми на рис. 3.4, з).

Підсистема працює наступним чином. Після отримання сигналу з БЦК мікроконтролерний блок з певною частотою дискретизації починає в циклі опитувати вимірювальні перетворювачі 1-4 (рис. 3.3) та отримує сигнали, відповідно, N_1, N_2, v, β , що пропорційні вимірювальним величинам. Після кожного циклу опитування проводиться розрахунок складових механічних навантажень на провід згідно можливих комбінацій цих складових.

Ожеледно-вітрове навантаження на провід за умов $N_1 > N_2, P_a > 0, V' > 0$ складе:

$$N_{\Sigma} = \sqrt{N_1^2 + N_2^2 - 2N_1 \cdot N_2 \cos(180 - \alpha)}. \quad (3.7)$$

де N_1, N_2 – сигнали, відповідно, з 1-го та 2-го тензометричних ВП;

α – кут між тензометричними ВП (див. рис. 3.3).

Ожеледне навантаження на ПВП з врахуванням ваги проводу та лінійної арматури

$$V = N_1 + N_2 \cdot \sin(180 - \alpha). \quad (3.8)$$

Тоді фактичне вітрове навантаження провід складе

$$P = \sqrt{N_{\Sigma}^2 - V^2}. \quad (3.9)$$

На рис. 3.5 представлено типову динаміку ожеледно-вітрового навантаження на ПЛЕ 110 кВ. З 0 год до 11 год 50 хв відбувався процес наростання ожеледі на проводі. У даному випадку цей процес носить практично лінійний характер, дрібні коливання на графіку пов'язані з дією вітру на провід. З 12 год 10 хв відбулося різке зниження навантаження на провід – скидання ожеледної муфти. Таке очищення проводів від ОПВ може бути небезпечним, оскільки часто призводить до сплітання проводів фаз.

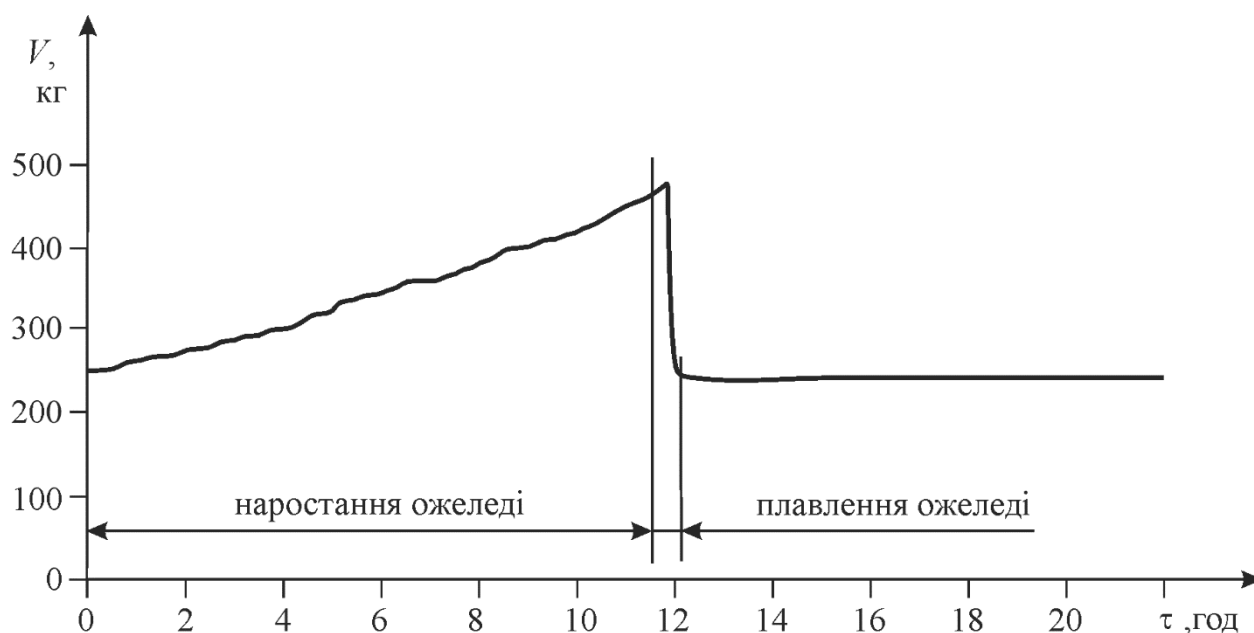


Рисунок 3.5 – Динаміка ожелено-вітрового навантаження на ПЛЕ 110 кВ

З метою підвищення ефективності плавки ожеледі для електротехнічного персоналу ОДС електропостачальної компанії важливо отримувати поточну інформацію про очікувані навантаження на ПЛЕ в залежності від метеорологічних умов. При цьому можливі наступні основні випадки роботи проводу ПЛЕ:

- навантаження відсутнє;
- наявне вітрове навантаження;
- наявне навантаження від ОПВ;
- наявне ожеледно-вітрове навантаження.

Розглянемо ці випадки детально.

1. Вітрове та ожеледне навантаження відсутні, на тяжіння проводу ПЛЕ впливає лише температура повітря.

Повне тяжіння проводу ПЛЕ [48]:

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} \text{ кгс}, \quad (3.10)$$

де H – горизонтальна складова тяжіння, кгс

$$H_t = \frac{m_0 l_{\text{роз}}^2 \cdot 10^{-3}}{8 f_t}. \quad (3.11)$$

$l_{\text{роз}}$ – розрахункова довжина прогону, приймаємо 185 м;

m_0 – маса 1 км проводу, кг/км, для проводу АС-120/19 – 466 кг/км;

f_t – стріла провисання проводу, м

$$f = \frac{\gamma_1 \cdot l_{\text{роз}}^2}{8 \sigma_t}. \quad (3.12)$$

$l_{\text{роз}}$ – розрахункова довжина прогону, приймаємо 185 м;

γ_1 – питоме навантаження від ваги проводу, Н/(м·мм²):

$$\gamma_1 = \frac{g m_0 \cdot 10^{-3}}{F}. \quad (3.13)$$

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

F – повний поперечний переріз проводу, мм²;

σ_t – механічне напруження в проводі, знаходимо із рівняння стану проводу

$$\sigma_t - \frac{\gamma_1^2 \cdot E \cdot l_{\text{роз}}^2}{24 \sigma_t^2} = \sigma_{\text{доп}} - \alpha_{\text{л.р}} E (t_{\text{п}} - t_{\text{екс}}) - \frac{\gamma_7^2 \cdot E \cdot l_{\text{роз}}^2}{24 \sigma_{\text{доп}}^2}, \quad (3.14)$$

$\sigma_{\text{доп}}$ – нормативне механічне напруження (тяжіння) проводу, кгс;

$\alpha_{\text{л.р}}$ – лінійний коефіцієнт температурного розширення, 10⁻¹ °С;

E – модуль пружності проводу, Н/мм². Для проводу АС-120/19 приймаємо 82,5·10³ Н·м;

$t_{\text{п}}$ – поточна температура проводу, °С;

$t_{\text{екс}}$ – експлуатаційна температура проводу, °С.

γ_7 – результуюче питоме навантаження від ваги проводу з ОПВ і тиском вітру на нього

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_3^2 + \gamma_5^2}, \quad (3.15)$$

γ_3 – питоме навантаження від ваги проводу та ОПВ на ньому, Н/(м·мм²):

$$\gamma_3 = \frac{g}{F} \left[m_0 \cdot 10^{-3} + \pi g_{\text{опв}} b_{\text{опв}} (d_{\text{пр}} + b_{\text{г}}) \cdot 10^{-6} \right]. \quad (3.16)$$

γ_5 – питоме навантаження від тиску вітру на провід з ОПВ на ньому, Н/(м·мм²):

$$\gamma_5 = \frac{1}{F} \left[\alpha \cdot C_x \cdot q_w (d_{\text{пр}} + 2b_{\text{опв}}) \right] \cdot 10^{-3}. \quad (3.17)$$

q_w – розрахунковий швидкісний напір вітру, складає 525 Н/м²;

α – коефіцієнт нерівномірності швидкісного напору в прогоні, так як $q_w = 525$ Н/м² приймаємо рівним 0,75;

C_x – аеродинамічний коефіцієнт, для проводів діаметром до 20 мм приймається рівним 1,2;

$d_{\text{пр}}$ – діаметр проводу, мм. Для проводу АС-120/19 становить $d_{\text{пр}} = 15,1$ мм;

$b_{\text{опв}}$ – розрахункова товщина стінки відкладень, мм:

За визами (3.10)-(3.14) були розраховані значення тяжіння для проводу АС-120/19 в діапазоні температур -30...+35 °С і побудовані залежності (рис. 3.6).

Аналіз отриманих залежностей (рис. 3.6) показує, що вертикальна складова тяжіння V не залежить від температури проводу, а горизонтальна збільшується на 11% (для всього діапазону температур) при зменшенні температури. У даному випадку, повне тяжіння проводу T значно менше $T_{\text{екс}}$ і $T_{\text{доп}}$, тому температурні впливи на провід ПЛЕ не можуть викликати в ньому появу аварійних дефектів.

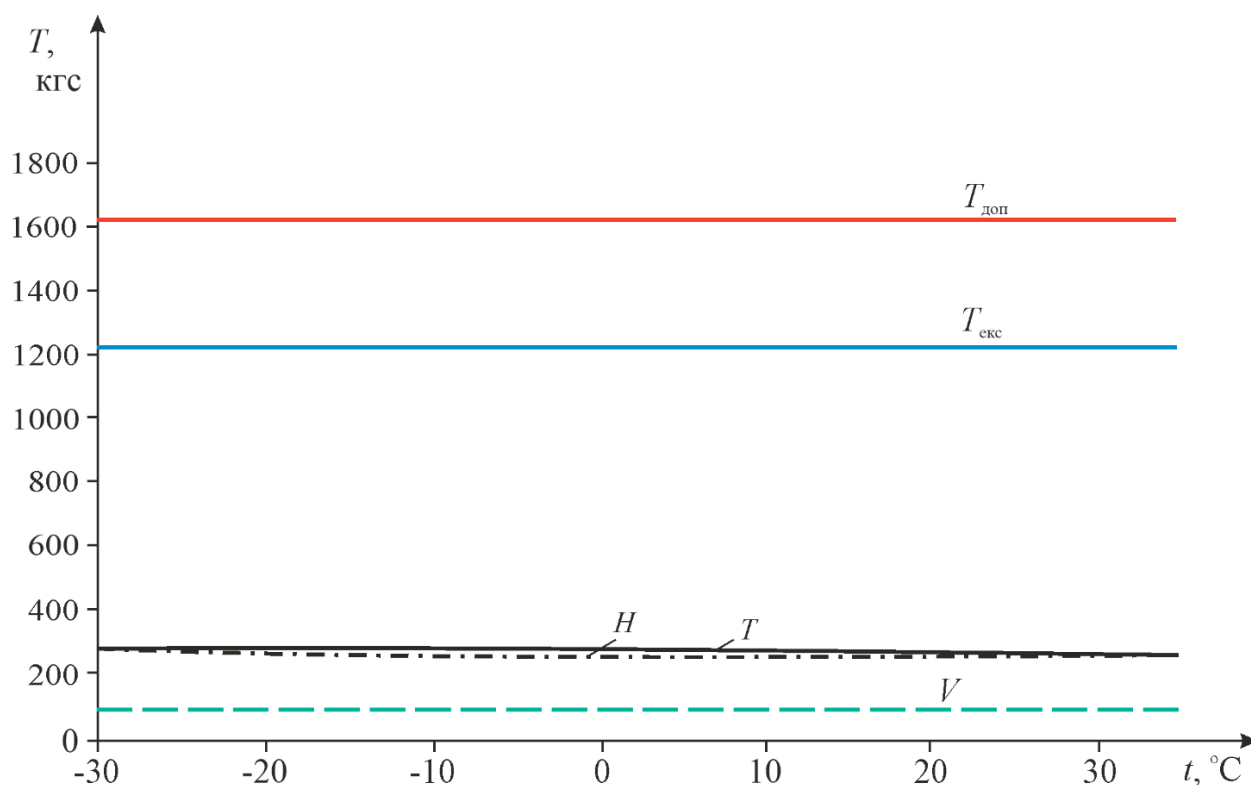


Рисунок 3.6 – Залежність тяжіння проводу АС-120/19 від температури

2. На тяжіння проводу ПЛЕ впливає вітрове навантаження за незмінної температури повітря.

Горизонтальна складова тяжіння, кгс:

$$H_w = \frac{\sqrt{(m_0 \cdot 10^{-3})^2 + (P_w \cdot l_{\text{роз}})^2}}{8f_w}. \quad (3.18)$$

де P_w – очікуване вітрове навантаження на провід без відкладень ОПВ:

$$P_w = 0,5C_x \cdot S \cdot \rho_a \cdot v_a^2 \cdot \sin \varphi, \quad (3.19)$$

S – площа проекції поверхні проводу;

φ – кут між поверхнею, що обдувається та напрямом вітру (кут атаки вітру);

ρ_a – густина повітря;

v_a – швидкість вітру.

Площа поверхні, що утворює проекція відрізка проводу з довжиною:

$$S = d_{\text{пр}} \cdot l_{\text{роз}} \cdot 10^{-3}, \quad (3.20)$$

де f_w – стріла провисання проводу, м

$$f_w = \frac{\gamma_6 \cdot l_{\text{роз}}^2}{8\sigma_w}, \quad (3.21)$$

γ_6 – результуюче питоме навантаження від ваги проводу та від вітру, Н/(м·мм²)

$$\gamma_6 = \sqrt{\frac{1}{F} (gm_0 + \alpha C_x q_w d_{\text{пр}})} 10^{-3}, \quad (3.22)$$

σ_w – механічне напруження в проводі, знаходимо із рівняння стану проводу

$$\sigma_w - \frac{\gamma_6^2 \cdot E \cdot l_{\text{роз}}^2}{24\sigma_w^2} = \sigma_{\text{доп}} - \alpha_{\text{л.р}} E (t_{\text{п}} - t_{\text{екс}}) - \frac{\gamma_7^2 \cdot E \cdot l_{\text{роз}}^2}{24\sigma_{\text{доп}}^2}. \quad (3.23)$$

V – вертикальна складова тяжіння, кгс

$$V_w = \sqrt{l_{\text{роз}}^2 \left[(m_0 \cdot 10^{-3})^2 + P_w^2 \right]}. \quad (3.24)$$

Повне тяжіння проводу знаходимо за (3.10).

Аналіз отриманих залежностей (рис. 3.7) за формулами (3.18)-(3.24) та (3.10) показує, що аналогічно температурним впливам (рис. 3.6), вітрові навантаження, за швидкості вітру до 35 м/с, також не приводять до аварійних ушкоджень ПЛЕ.

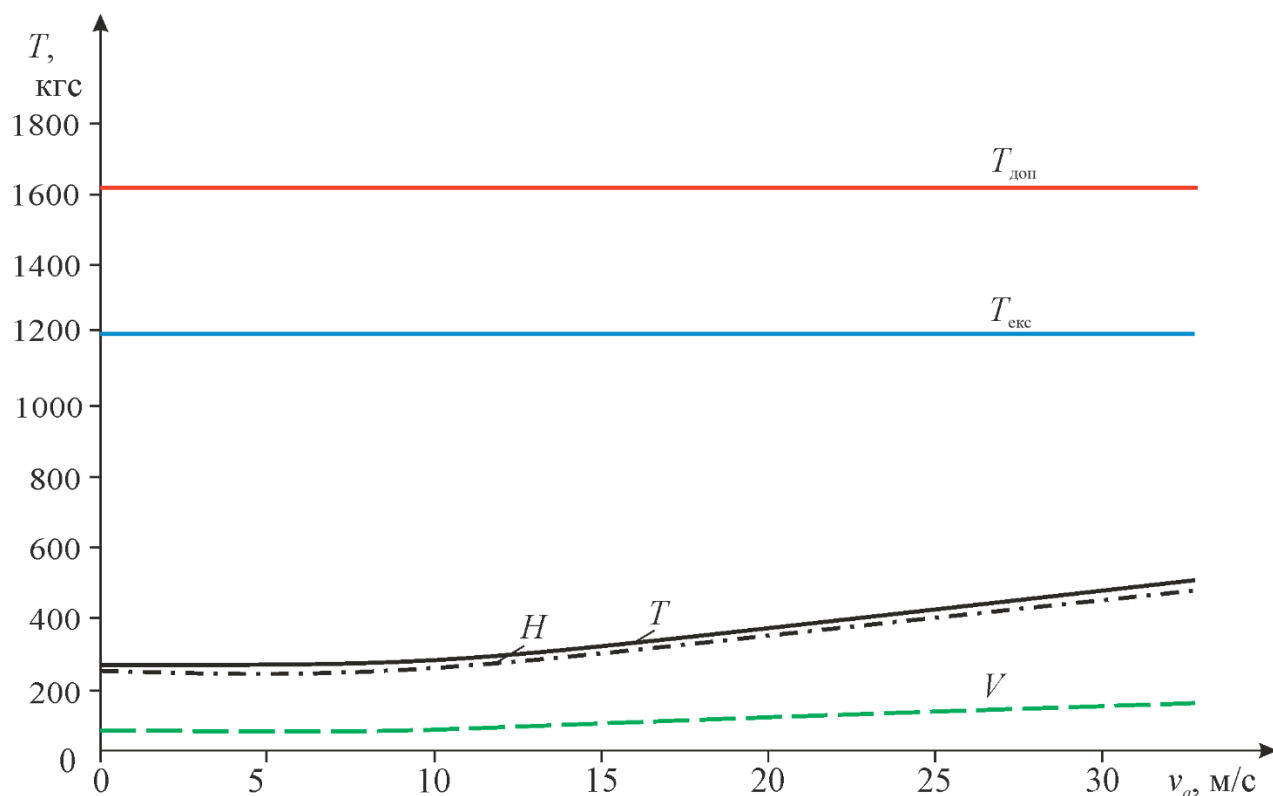


Рисунок 3.7 – Залежність тяжіння проводу АС-120/19 від швидкості вітру

3. На тяжіння проводу ПЛЕ впливає навантаження від ОПВ за відсутності вітру та при сталій температурі.

Горизонтальна складова тяжіння, кгс

$$H_{\text{опв}} = \frac{l_{\text{роз}}^2 (m_0 \cdot 10^{-3} + F_{\text{опв}} \cdot \rho_{\text{опв}} \cdot 10^{-6})}{8f_{\text{опв}}}, \quad (3.25)$$

$F_{\text{опв}}$ – розрахунковий переріз ОПВ, м²;

$\rho_{\text{опв}}$ – густина ОПВ, кг/м³. Приймаємо для ожеледі $\rho_{\text{ож}} = 900$ кг/м³, для зернистої паморозі $\rho_{\text{пам}} = 450$ кг/м³ і для суміші $\rho_{\text{сум}} = 225$ кг/м³.

$f_{\text{опв}}$ – стріла провисання проводу, м; якщо на проводі присутнє ОПВ, тоді

$$f_{\text{опв}} = \frac{\gamma_3 \cdot l_{\text{роз}}^2}{8\sigma_{\text{опв}}}. \quad (3.26)$$

γ_3 – питоме навантаження від сумарної ваги проводу і ОПВ на ньому

$$\gamma_3 = \frac{g}{F} \left[m_0 \cdot 10^{-3} + \pi \rho_{\text{опв}} b_{\text{опв}} (d_{\text{пр}} + b_{\text{г}}) \cdot 10^{-6} \right]. \quad (3.27)$$

$b_{\text{опв}}$ – розрахункова товщина стінки відкладень, мм:

$$b_{\text{опв}} = k_d k_h b_{\text{ож.н}}. \quad (3.28)$$

k_d – коефіцієнт, що враховує дійсний діаметр проводу, для проводу АС-120/19:

$$k_d = \frac{0,83}{\sqrt[4]{0,1 d_{\text{пр}}}} + 0,17 = \frac{0,83}{\sqrt[4]{0,1 \cdot 15,1}} + 0,17 = 0,919. \quad (3.29)$$

k_h – коефіцієнт, що враховує висоту розташування центру тяжіння проводів, з урахуванням того, що висота ділянки менше 15 м, приймаємо рівним 1;

$b_{\text{ож.н}}$ – нормативна товщина стінки ожеледі, мм, становить 20 мм;

$\sigma_{\text{опв}}$ – механічне напруження в проводі, знаходимо із рівняння стану проводу

$$\sigma_{\text{опв}} - \frac{\gamma_3^2 \cdot E \cdot l_{\text{роз}}^2}{24 \sigma_{\text{опв}}^2} = \sigma_{\text{доп}} - \alpha_{\text{л.р}} E (t_{\text{п}} - t_{\text{екс}}) - \frac{\gamma_7^2 \cdot E \cdot l_{\text{роз}}^2}{24 \sigma_{\text{доп}}^2}. \quad (3.30)$$

$V_{\text{опв}}$ – вертикальна складова тяжіння, кгс

$$V_{\text{опв}} = (m_0 \cdot 10^{-3} + F_{\text{опв}} g_0 \cdot 10^{-6}) l_{\text{роз}}. \quad (3.31)$$

Повне тяжіння проводу знаходимо за (3.10).

За виразами (3.25) - (3.31) і (3.10), було побудоване сімейство характеристик $H = f(b)$, $T = f(b)$, $V = f(b)$ для трьох видів ОПВ: ожеледі, зернистої паморозі та суміші низької щільності на (рис. 3.8).

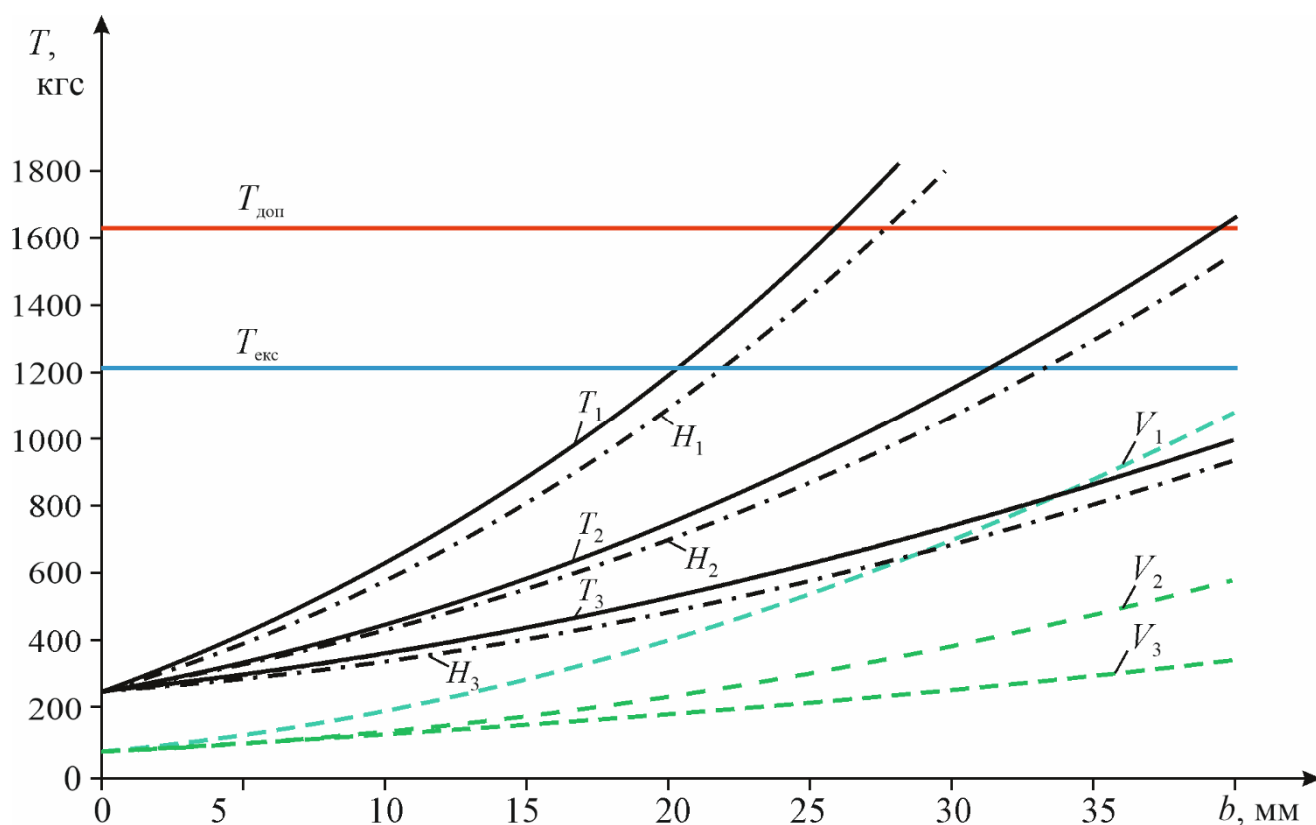


Рисунок 3.8 – Залежність тяжіння проводу АС-120/19 від густини ОПВ:

1 – ожеледь ($\rho_{\text{ож}} = 900 \text{ кг/м}^3$);

2 – зерниста паморозь ($\rho_{\text{пам}} = 450 \text{ кг/м}^3$);

3 – суміш ($\rho_{\text{сум}} = 225 \text{ кг/м}^3$)

Аналіз залежностей на рис. 3.8 показує, що при утворенні ожеледі з товщиною стінки $b = 20 \text{ мм}$ тяжіння проводу T_1 досягає критичного значення експлуатаційного тяжіння $T_{\text{екс}}$, а з товщиною стінки $b = 26 \text{ мм}$ нормативного допустимого тяжіння $T_{\text{доп}}$. Для досягнення критичних значень експлуатаційного тяжіння $T_{\text{екс}}$ і нормативного тяжіння $T_{\text{доп}}$ необхідне утворення зернистої паморозі на проводі з товщиною стінки, відповідно, 32 мм і 40 мм. Утворення суміші на проводі ПЛЕ порівняно низької густини ($\rho_{\text{сум}} = 225 \text{ кг/м}^3$) з товщиною стінки до 45 мм не викликає перевищення як експлуатаційного, так і нормативного тяжінь проводу. Зі збільшенням густини та товщини стінки ожеледного відкладення ймовірність ушкодження проводу стрімко наближається до 1.

4. На тяжіння проводу ПЛЕ впливає ожеледно-вітрове навантаження за швидкості вітру $v_w = 20$ м/с і сталій температурі проводу (-5 °C).

Горизонтальна складова тяжіння, кгс:

$$H_{g-w} = \frac{\sqrt{\left(m_0 \cdot 10^{-3} + \rho_{\text{опв}} F_{\text{опв}} \cdot 10^{-6}\right)^2 \cdot \left(P_w \cdot l_{\text{роз}}\right)^2}}{8f_{g-w}}. \quad (3.32)$$

де f_{g-w} – стріла провисання проводу, м

$$f_{g-w} = \frac{\gamma_7 \cdot l_{\text{роз}}^2}{8\sigma_{g-w}}. \quad (3.33)$$

σ_{g-w} – механічне напруження в проводі, знаходимо із рівняння стану проводу

$$\sigma_{g-w} - \frac{\gamma_7^2 \cdot E \cdot l_{\text{роз}}^2}{24\sigma_{g-w}^2} = \sigma_{\text{доп}} - \alpha_{\text{л.р}} E (t_{\text{п}} - t_{\text{екс}}) - \frac{\gamma_7^2 \cdot E \cdot l_{\text{роз}}^2}{24\sigma_{\text{доп}}^2}, \quad (3.34)$$

$V_{\text{опв}}$ – вертикальна складова тяжіння, кгс

$$V_{g-w} = \sqrt{\left[l_{\text{роз}} \left(m_0 \cdot 10^{-3} + \rho_{\text{опв}} F_{\text{опв}} \cdot 10^{-6}\right)\right]^2 \left[l_{\text{роз}} P_w^2\right]}. \quad (3.35)$$

Повне тяжіння проводу знаходимо за (3.10).

Залежність $T = f(b, v_w)$ була побудована за допомогою рівнянь (3.32) - (3.35) і (3.10) за фіксованої швидкості вітру $v_w = 20$ м/с і густини ОПВ $\rho_{\text{ож}} = 900$ кг/м³ і представлена на рис. 3.9. Отриманий графік підтверджує той факт, що при одночасному впливу ожеледі та вітру зі швидкістю 20 м/с на ПЛЕ, повне тяжіння проводу T досягне критичних значень $T_{\text{екс}}$ і $T_{\text{доп}}$ за меншої стінки ожеледі. Яка становить 16 мм для $T_{\text{екс}}$ —, а для $T_{\text{доп}}$ — 22 мм.

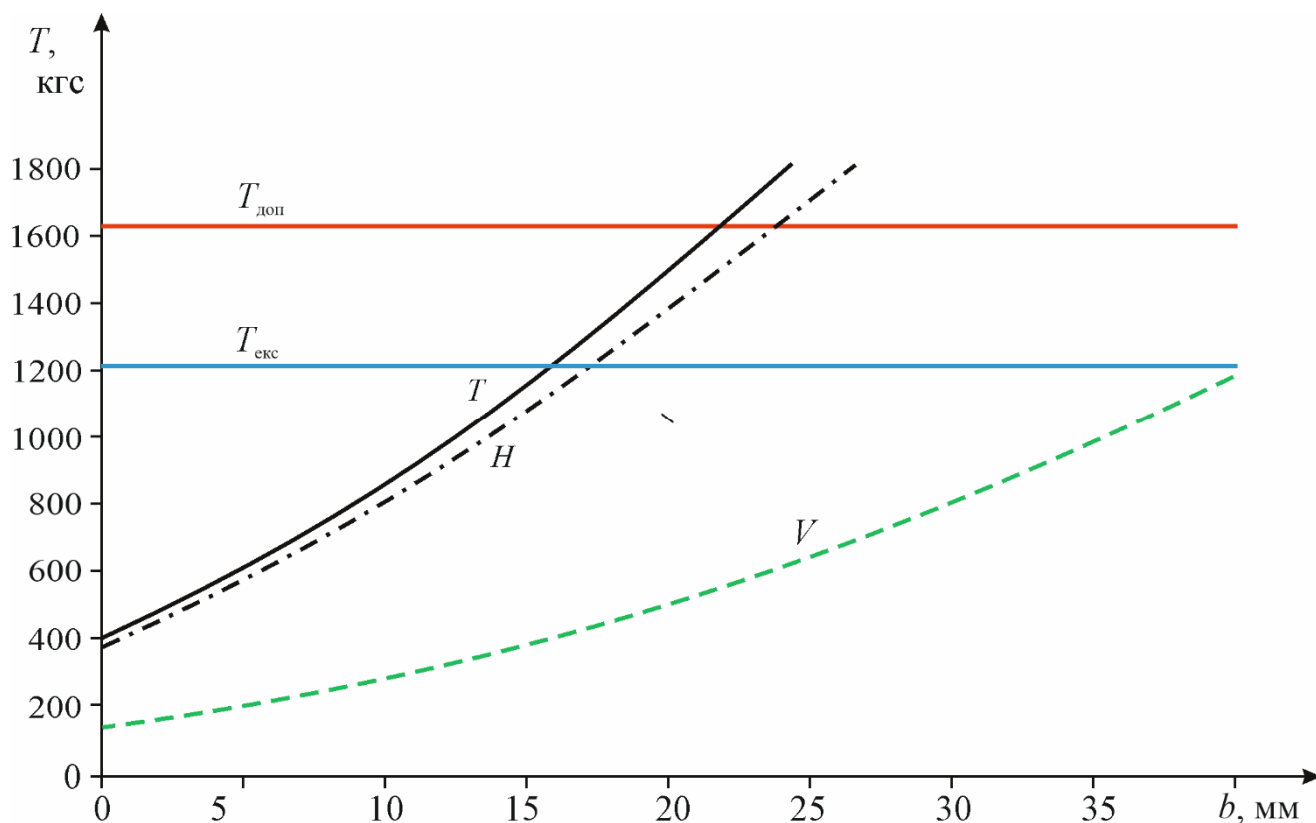


Рисунок 3.9 – Залежність тяжіння проводу АС-120/19 від дії ожеледі та вітру

У всіх розглянутих випадках тяжіння має лінійну залежність лише від дії температури на провід, від інших чинників: швидкості вітру, густини ОПВ і від ожеледно-вітрових впливів ця залежність нелінійна.

Враховуючи зміну повного тяжіння на провід і швидкість його збільшення можливо визначити ділянку мережі з повітряними лініями на яких необхідно проводити плавку ожеледі в першу чергу.

3.4 Рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній 110 кВ в умовах ожеледоутворення за рахунок впровадження системи моніторингу

За результатами проведених досліджень розроблено ряд рекомендацій щодо більш ефективного використання запропонованої системи моніторингу:

1. Перед монтажем системи моніторингу необхідно перевірити: відсутність ушкоджень кожного із блоків системи та акумуляторної батареї; працездатність

всіх підсистем системи та відповідність параметрів пристрою-аналогу проводу до проводу контрольованої ПЛЕ.

2. Пристрій-аналог проводу необхідно розміщувати на мінімально допустимій відстані до фазного проводу ПЛЕ згідно правил техніки безпеки, причому поздовжні осі пристрою аналогу та фазного проводу ПЛЕ повинні бути співвісні.

3. Якщо тензометричними ВП обладнується лише одна фаза ПЛЕ 110 кВ, то Y-подібний підвіс встановлюється в її середній фазі (рис. 3.10)

4. Всі функціональні блоки системи моніторингу, фотоелектричні панелі, а також акумуляторні батареї розміщуються на електроопорі на рівні підвісу нижнього проводу ПЛЕ.



Рисунок 3.10 – Y-подібний підвіс проводу ПЛЕ 110 кВ

5. Після монтажу всіх підсистем системи проводиться налаштування БЦК за допомогою персонального ПК: протокол зв'язку; *ip*-адреса; параметри GPRS-оператора стільникового зв'язку. Проводиться внесення параметрів реального прогону ПЛЕ до пам'яті БЦК і калібрування тензометричних перетворювачів за допомогою еталонного вантажу.

6. З метою енергозаощадження та подовження терміну експлуатації системи моніторингу робота підсистеми раннього визначення ОПВ доцільна лише в ожеледний період року.

7. Технічний огляд пристрою-аналогу проводу та вимірювальних перетворювачів метеорологічних параметрів на предмет забруднення повинен проводитись одночасно з іншими регламентними роботами на контрольованій ПЛЕ, щорічно, перед початком ожеледного сезону.

8. З метою зниження експлуатаційних витрат на систему моніторингу рекомендовано провести її інтеграцію з існуючими комплексними інформаційними системами енергопостачальної компанії.

9. Для ефективного використання системи моніторингу ожеледоутворення необхідно забезпечити навчання та підвищення кваліфікації технічного персоналу.

10. З метою удосконалення системи моніторингу ожеледоутворення та організаційних заходів доцільно фіксувати відмови повітряних ліній електропередавання з врахуванням погодних умов.

11. Максимальний економічний ефект від використання системи моніторингу досягається за улаштування лінійних постів на тих ділянках ПЛЕ, де поява ожеледно-паморозевих відкладень спостерігається з максимальною частотою.

3.5 Висновки до 3-ого розділу

1. Встановлено, що система моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ повинна складатися з трьох структурних рівнів, що підпорядковані один одному: рівня об'єктів контролю, регіонального рівня та центрального; головним елементом системи є множина лінійних постів, що встановлюються на контрольованих повітряних лініях.

2. Розроблено підсистему раннього виявлення утворення ОПВ і його різновиду на проводі ПЛЕ, на основі побічного вимірювання наявності ОПВ за допомогою пристрою-аналогу проводу.

3. Встановлено, що найкращою реалізацією підсистеми контролю навантаження на провід ПЛЕ є Y-подібний підвіс проводу та використання двох тензометричних ВП, що дозволяє підвищити завадозахищеність вимірювальних перетворювачів і визначати окремо ожеледну та вітрову складові механічного навантаження на провід ПЛЕ.

Досліджено, що повне тяжіння проводу досягає критичного значення при утворенні ожеледі з товщиною стінки 26 мм або зернистої паморозі з товщиною стінки 40 мм за відсутності вітру, а при поєднанні вітру зі швидкістю 20 м/с, відповідно, 16 мм для ожеледі, та 22 мм для зернистої паморозі.

4. Розроблено ряд рекомендацій, що дозволять більш ефективного використовувати запропоновану систему моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ шляхом підвищення її безвідмовності та стабільності роботи впродовж ожеледного сезону року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання, що направлене на удосконалення систем моніторингу ожеледоутворення повітряних ліній електропередавання 110 кВ:

Головні результати роботи полягають у наступному:

1. Виявлено, що ПЛЕ 110 кВ системи передачі та системи розподілу мають істотний знос і знижену механічну міцність при цьому вони піддаються впливу аномальних атмосферних явищ, у сукупності з обмеженим фінансуванням капітальних ремонтів, це призводить раз 12-15 років до значних ожеледно-вітрових аварій.

2. Встановлено, що для захисту ПЛЕ 110 кВ від ожеледно-паморозевих відкладень найбільш придатним методом є плавка ожеледі електрострумами, що значно перевищують номінальні, однак для її успішного проведення необхідно застосовувати системи моніторингу ожеледоутворення, однак існуючі системи потребують удосконалення, шляхом додавання підсистеми ранньої фіксації початку утворення ОПВ і визначення його типу.

3. Встановлено, що для проводів ПЛЕ найбільшу небезпеку представляють зерниста паморозь, ожеледь і їх суміш, однак чітких меж на основі інтегральних характеристик, що дозволили б по них визначити тип ОПВ не існує.

4. Виявлено, що визначальним механізмом утворення поморозі є інерційне осідання та замерзання переохолоджених крапель туману або мряки на поверхні проводу ПЛЕ, а також електростатичні сили в інтервалі температур повітря від -2,0 до -10,0 °C за швидкості вітру 1-16 м/с. Ожеледь утворюється в результаті інерційного та гравітаційного осадження переохолоджених крапель туману, мряки, дощу в більшості випадків, за температури повітря від -0,1 до -4,0 °C, при швидкості вітру 2-12 м/с.

5. Обґрунтовано, що параметрами контролю системи моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ повинні бути ожеледне та вітрове навантаження на провід, швидкість та напрям вітру, температура та вологість повітря, а для раннього визначення початку електричний опір ОПВ.

6. Встановлено, що система моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ повинна складатися з трьох структурних рівнів, що підпорядковані один одному: рівня об'єктів контролю, регіонального рівня та центрального, а головним її елементом є множина лінійних постів, що встановлюються на контрольованих повітряних лініях.

7. Виявлено, що найкращою реалізацією підсистеми контролю навантаження на провід ПЛЕ є Y-подібний підвіс проводу та використання двох тензометричних ВП, що дозволяє підвищити завадозахищеність вимірювальних перетворювачів і визначати окремо ожеледну та вітрову складові механічного навантаження на провід ПЛЕ.

8. Досліджено, що повне тяжіння проводу досягає критичного значення при утворенні ожеледі з товщиною стінки 26 мм або зернистої паморозі з товщиною стінки 40 мм за відсутності вітру, а при поєднанні вітру зі швидкістю 20 м/с, відповідно, 16 мм для ожеледі, та 22 мм для зернистої паморозі.

9. Розроблено ряд рекомендацій, що дозволять більш ефективного використовувати запропоновану систему моніторингу ожеледоутворення на ПЛЕ 110 кВ шляхом підвищення її безвідмовності та стабільності роботи впродовж ожеледного сезону року.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Protecting Electricity Networks from Natural Hazards. – Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE): [Електронний ресурс]. URL: <https://www.osce.org/ru/secretariat/293556>.
2. CIGRE. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires. 2010.
3. Савченко О. А. Перспективні шляхи вдосконалення автоматизованих систем контролю утворення ожеледі на ПЛ / О. А. Савченко, С. В. Дюбко // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка Випуск 175 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". Харків: ХНТУСГ, 2016. С. 20-22.
4. Kozlovskiy O., Trushakov D., Rendzinyak S. Temperature influence of load current of overhead electrical distribution net-works in difficult weather conditions. Acta Technica. 2018. Vol. 63. Num. 5. P. 701-708.
5. Рубаненко О. О., Явдик В. В. Проблема ожеледі в розподільчих електричних мережах. Сучасні моделі розвитку агропромислового виробництва: Виклики та перспективи: Матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції, 27 вересня 2018 року, м. Глухів. Збірник статей і тез. Вип. 1. С. 255-257.
6. Пясецька С.І. Особливості та характер просторово-часового розподілу числа днів із відкладеннями ожеледі на території України на початку ХХІ століття (за даними стандартного ожеледного станка). Фізична географія та геоморфологія. Вип. 4. С. 127-136.
7. Удод Е. И. Методы повышения устойчивости ВЛ 10 кВ к гололедно-ветровым воздействиям на территории Украины / Е. И. Удод, Г. П. Крызов, В. Б. Нарожный и др. // Энергетика и электрификация. 1989. № 1. С. 30–33.

8. Інформація про відкладення сильної ожеледі в Україні 27-28 листопаду 2000 р.: Лист Українського гідрометеорологічного центру від 1 грудня 2000 р. № 13-20/486.

9. Малиновская Т. В., Левит А., Трибушная Л. В Винницкой области объявлено чрезвычайное положение, а в Одесской и Херсонской парализовано движение автотранспорта // Факты и комментарии. 2000. 29 ноября. С. 1–2.

10. Козловский А. А., Орлович А. Е., Серебренников С. В. Автоматизированная система прогнозирования разрушающих атмосферных нагрузок на элементы конструкций воздушных линий электропередач // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2002. №2. С. 46–48.

11. Крыжов Г. П., Нарожный В. Б., Княжевская С. Я. К вопросу автоматизации анализа гололедно-ветровых повреждений ВЛ 0,38-35 кВ // Энергетика и электрификация. 1995. № 3. С. 21–24.

12. Борцов А. В., Кузнецова Е. И. Гололедные нагрузки на воздушные линии электропередач // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ». 2013. № 60. С. 38–43. (Серія «Техніка та електрофізика високих напруг»).

13. Заїка О. В. Фактори, що впливають на виникнення пошкоджень ліній електропередач, та методи їх виявлення. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах» 5-6 листопада 2020 р. м. Харків, Україна. С. 135-139.

14. План розвитку системи передачі на 2022-2031 роки. Укренерго. 422 с.

15. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2020 році. Затверджено Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг 26 травня 2021 року №893.

16. Стрелкова Г. Г. Технічний стан та перспективи розвитку розподільних електричних мереж України / Г. Г. Стрелкова, А. М. Пустовойтов //

Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку: зб. наук. пр., Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2018. – С. 50-51.

17. Бургсдорф В. В. Плавка гололеда в энергетических системах как средство эффективного повышения надежности электрических сетей // Материалы II Всесоюзного совещания «Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи». Уфа, 1975. С. 6-10.

18. Дмитриев К. С., Гоник Я. С. Новый способ плавки гололёда на проводах ВЛ // Электричество. 1997. № 1. С. 11-17.

19. Крыжов Г. П., Нарожный В. Б. Плавка гололеда на проводах и тросах ВЛ // Энергетика и электрификация. 1996. № 3. С. 16-18.

20. Никитина Л. Г., Рудакова Р. М. О выборе тока плавки гололёда // Электрические станции. 1992. № 4. С. 46-49.

21. А. с. 1275615 СССР, МКИ 4 Н 02 G 7/16. Способ предупреждения образования гололёда на проводах воздушных линий электропередачи 35 кВ / Ю. И. Баранников, Н. Я. Николаев (СССР). № 3736757/24-07; заявл 04.05.84; опубл. 07.12.84, Бюл. № 45.

22. Гончар М. И., Белаш И. П. Защита проводов от гололёдоизморозевых отложений // Энергетика и электрификация. 1995. №4. С. 26-28.

23. Leblond A. and A. Côté, “Atmospheric Icing of OPGW: Monitoring and De-Icing”, Proc. Int’l OPGW Symposium, Montréal, May 3-5, 2004.

24. Pat. 5411121 USA, ICI 6 Н 02 G 7/16, В 60 1/13. Deicing device for cable / LaForte J. L., Allaire M. A., Farzeneh M.; applicants and owners LaForte J. L., Allaire M. A., Farzeneh M. № 08/215704; fil. 22.03.94; pub. 2.05.95.

25. Пат. 2166826, МКИ ⁷ Н 02 G 7/16, В 60 М 1/12. Способ удаления гололеда с проводов контактной сети и линий электропередачи / № 99114706/09; заявл. 05.07.99; опубл. 10.05.01.

26. Дьяков А. Ф., Засыпкин А. С., Левченко И. И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. Пятигорск: из-во РП «Южэнергонадзор», 2000. 284 с.26

27. Черемісін Н. М., Зубко В. М., Пархоменко О. В. До питання про контроль стану ожелелно-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»).

28. Дьяков А. Ф., Левченко И. И. Опыт борьбы с гололёдом на линиях электропередачи. Электрические станции. 1982. № 3. С. 50–54.

29. Система телеизмерения гололедных нагрузок на воздушных линиях электропередачи 6-35 кВ / И. И. Левченко, А. А. Аллилуев, А. В. Лубенец, Ф. А. Дьяков // Электрические станции. 1999. № 8. С. 43–47.

30. Левченко И. И. Система телеизмерения гололедных нагрузок на воздушных линиях электропередачи 330-500 кВ. Электрические станции. 1999. №12. С. 39-43.

31. Левченко И. И., Сацук Е. И. Программное обеспечение информационной системы контроля голодообразования. Электрические станции. 2004. № 10. С. 15–18.

32. Козловський О. А., Серебренніков С. В., Кубкін М. В. Комп'ютеризована система контролю за станом повітряних ліній електропередач при ожеледо-утворенні // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: зб. праць. Маріуполь: Приазовський державний технічний університет. 2005. С. 327–329.

33. Козловський О. А. Підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній розподільних електричних мереж в умовах ожеледоутворення. автореф. дис. к-да техн. наук: 05.14.02 / Нац. техн. ун-т. «Харківський політехнічний інститут» Харків, 2017. 20 с.

34. Reliability and real time transmission line ratings / Tapani O. Seppa // The Valley Group – A Nexans Company, 2007.

35. Description of state of the art methods to determine thermal ratings of lines in real-time and their application in optimizing power flow / R. Stephen // CIGRE SC22 WG12, 2000.

36. Настанова з метеорологічного прогнозування. Наказ №234 Укр ГМЦ від 11.12.2018 р.

37. Литвинов И.В. Формирование и преобразование атмосферных осадков на подстилающей поверхности. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
38. Електричні мережі з відновлювальними джерелами енергії. Добровольська Л.Н. та ін. / Під ред. Добровольської Л.Н. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2016. – 352 с.
39. Wischmeier W.A. Smith D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. Amer. Geophys. Union, 1958, v. 39, N2, p. 285-291.
40. List R. The accretion of ice on rotating cylinder. Quart. Journ. Roy. Meteorol Soc. 1963. v. 89. N382. - Pp. 551-554.
41. Macklin W.C. The density and structure of ice formed by accretion // Quart. Journ. Roy. Meteorol. Soc. 1962. v. 88. N375. pp. 30-50.
42. Draganoiu G., Lamarche L., McComber P. A computer model of glaze accretion on wires. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1996, may. V. 118. p. 148–157.
43. Сигналізатор обледеніння дротів повітряних ліній електропередачі: пат. 49394 Україна: МПК H02 G 7/16. № u 2009 11992; заявл. 23.11.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.
44. Пристрій ранньої ідентифікації типу ожеледо-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній електропередачі: пат. 74251 Україна: МПК H02 G 7/16. № u 2012 03322; заявл. 20.03.2012; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.
45. Линия электропередачи: а. с. 519806 СРСР: МПК H02 G 7/16. № 2087006/07; заявл. 30.12.1974; опубл. 20.07.1976, Бюл. № 24.
46. Аеродинамічний спосіб визначення відкладень на проводі: пат. 2273933: МПК H02 G 7/16. № 2004 117885/09; заявл. 10.06.2004; опубл. 10.04.2006.
47. Правила улаштування електроустановок. Х.: Вид-во «Форт», 2017. 760 с.
48. Кацадзе Е. Т. Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. 333 с.

ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів в електроустановках загального призначення

Розрізняють наступні шкідливі та небезпечні виробничі фактори [А.1]:

– електромагнітні поля і випромінювання. Електромагнітна хвиля – це коливальний процес, пов'язаний з мінливими в просторі і в часі взаємопов'язаними електричними і магнітними полями. Область поширення електромагнітних хвиль називається електромагнітним полем (ЕМП).

До джерел ЕМП у електроустановках відносяться пристрої, що не призначені для випромінювання електромагнітної енергії в простір, але в яких при роботі протікає електричний струм і при цьому відбувається паразитне випромінювання електромагнітних хвиль. Це системи передачі і розподілу електроенергії (лінії електропередавання, силові трансформатори, розподільні пристрої високої напруги) та всі інші електроапарати та прилади, що споживають електроенергію.

Електромагнітні поля біологічно активні, тобто живі істоти реагують на їх дію. Однак у людини немає спеціального органу чуття для визначення ЕМП (за винятком оптичного діапазону). Найбільш чутливі до електромагнітних полів центральна нервова система, серцево-судинна, гормональна і репродуктивна системи. Тривала дія на людину електромагнітних полів промислової частоти (50 Гц) призводить до розладів, які суб'єктивно виражаються скаргами на головний біль у скроневій і потиличній області, млявість, розлад сну, зниження пам'яті, підвищену дратівливість, апатію, болі в серці. Можуть спостерігатися функціональні порушення в центральній нервовій системі, а також зміни у складі крові.

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

Ураження електричним струмом може відбутися при дотику до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, відключеним струмоведучих частин, на яких залишився заряд або з'явилося напругу в результаті випадкового включення в мережу, до неструмоведучих частин, виконаним з проводить електричний струм матеріалу, після переходу на них напруги з струмоведучих частин.

Крім того, можливе ураження людини електричним струмом під впливом напруги кроку при знаходженні людини в зоні розтікання струму на землю; електричною дугою, що виникає при коротких замиканнях; при наближенні людини до частин високовольтних установок, що під напругою, на неприпустимо малу відстань.

Електричний струм надає на людину термічне, електролітичне, біологічне і механічний вплив.

Термічний вплив струму проявляється опіками окремих ділянок тіла, нагріванням до високої температури органів, що викликає в них значні функціональні розлади.

Електролітичне вплив в розкладанні різних рідин організму (води, крові, лімфи) на іони, в результаті чого відбувається порушення їх фізико-хімічного складу і властивостей.

Біологічна дія струму проявляється у вигляді подразнення і збудження живих тканин організму, судомного скорочення м'язів, а також порушення внутрішніх біологічних процесів.

Дія електричного струму на людину призводить до травм або загибелі людей.

Найбільшу небезпеку становлять електричні удари. Електричний удар - це збудження живих тканин проходять через людини електричним струмом, що супроводжується судорожними скороченнями м'язів. Крім зупинки серця і припинення дихання причиною смерті може бути електричний шок - важка

нервово-рефлекторна реакція організму на сильне роздратування електричним струмом. Шоковий стан триває від декількох десятків хвилин до доби, після чого може настати загибель або одужання внаслідок інтенсивних лікувальних заходів.

– рухоме обладнання, рухомі частини. Джерелом механічних травм можуть бути: рухомі машини, гострі кромки, задирки і шорсткості на поверхні виробів, інструментів та обладнання, підйомно-транспортне обладнання, а також падіння предметів з висоти, а також дії, пов'язані з корозією металів, що є причиною ослаблення міцності конструкцій і сприяє раптовому її руйнуванню; дія ємностей, що працюють під тиском, які у випадку руйнування впливають на навколишнє середовище і людей.

– віброакустичні коливання. Віброакустичні коливання – це пружні коливання твердих тіл, газів і рідин, що виникають в робочій зоні при роботі технологічного обладнання, виконанні різноманітних технологічних операцій. Вібрацією у свою чергу називають малі механічні коливання у пружних тілах.

– акустичні коливання. Шумом прийнято називати аперіодичні звуки різної інтенсивності і частоти. З фізіологічної точки зору шум – це всілякий несприятливо сприймається людиною звук.

Джерелом шуму в електроустановках є технологічне обладнання (трансформатори, реактори), системи вентиляції. Шум є одним з найбільш істотних негативних факторів повітряного середовища. Шум звукового діапазону на виробництві призводить до зниження уваги і збільшення помилок при виконанні роботи, уповільнення реакції людини на сигнали, що надходять від технічних об'єктів, що може бути причиною нещасних випадків.

У процесі обслуговування технологічного обладнання електроустановок (підстанцій, повітряних ліній електропередавання) працівники піддаються впливу комплексу шкідливих факторів, серед яких: підвищені рівні шуму, несприятливі параметри мікроклімату, відсутність природного світла, недостатня штучна освітленість робочих зон, електромагнітні випромінювання промислової частоти, низькочастотний шум на окремих електроустановках.

Із аналізу небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації електроустановок слідує, що основною небезпекою є можливість ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом, внаслідок дотику до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, а також при попаданні під крокові напругу і напругу дотику. Додаткові ризики становлять:

- висотні роботи (виконуються на висоті 1,3 м і більше);
- шум;
- метеорологічні умови (робота просто неба);
- незадовільне освітлення.

Отже, для забезпечення безпеки експлуатації електричного обладнання електроустановок необхідно застосовувати захисні заходи.

A.2 Заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках

A.2.1 Організаційні заходи

Забезпечення безпечної експлуатації електроустановок здійснюється проведенням всіх робіт згідно з обов'язковими, для всіх споживачів електроенергії, незалежно від їх відомчої приналежності, Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів [A.2] та Правилами безпечної експлуатації електроустановок [A.3]. Обслуговування діючих електроустановок, проведення в них оперативних перемикань, організація та виконання ремонтних, монтажних, налагоджувальних робіт і випробувань здійснюються спеціально підготовленим електротехнічним персоналом.

До організаційних заходів відносяться:

- оформлення роботи по наряду-допуску, розпорядженню або за переліком робіт, виконуваних в порядку поточної експлуатації;
- допуск до роботи;
- нагляд під час роботи;
- оформлення перерви під час роботи;
- переводи на інше робоче місце.

Наряд-допуск – це завдання на безпечне виконання роботи, оформлене на спеціальному бланку встановленої форми. Він визначає зміст, місце виконання роботи, час її початку та закінчення, умови її безпечного виконання, склад бригади та осіб, відповідальних за безпечне виконання роботи. Відповідальними за безпечне виконання робіт є: особа, що видала наряд; котра дає розпорядження; особа, що допускає до роботи; керівник роботи; виконавець роботи; спостережник; член бригади.

Всі роботи, які виконуються в електроустановках без наряду, виконуються:

- за розпорядженням осіб, що уповноважені на це, з оформленням в оперативному журналі;
- у порядку поточної експлуатації з подальшим записом в оперативному журналі.

Розпорядження – це завдання на виконання роботи, що визначає її зміст, місце, час, заходи безпеки. Воно має разовий характер, видається на один вид роботи і діє протягом однієї зміни.

За розпорядженням можуть виконуватись:

- позапланові роботи, викликані виробничою необхідністю, тривалістю до 1 год.;
- роботи без зняття напруги на віддалі від струмоведучих частин, котрі знаходяться під напругою, тривалістю не більше однієї зміни;
- роботи зі зняттям напруги з електроустановок напругою до 1000 В тривалістю не більше однієї зміни.

Поточна експлуатація – це проведення оперативним персоналом самостійно на закріпленій за ним ділянці протягом однієї зміни робіт за спеціальним переліком.

До організаційних заходів в цьому випадку відноситься складання, відповідальним за електрогосподарство, переліку робіт стосовно конкретних умов.

А.3.1 Технічні заходи

Роботи в діючих електроустановках з врахуванням заходів безпеки поділяються на ті, що виконуються: зі зняттям напруги, без зняття напруги на струмоведучих частинах і поблизу них, без зняття напруги на віддалі від струмоведучих частин, котрі знаходяться під напругою. До робіт, що виконуються зі зняттям напруги, відносяться роботи, що виконуються в електроустановці, в якій зі всіх струмоведучих частин знята напруга та вхід в приміщення сусідньої електроустановки, яка знаходиться під напругою, закритий. До робіт, що виконуються без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них, відносяться роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах.

До технічних заходів, що забезпечують безпеку робіт, виконуваних зі зняттям напруги, відносяться:

- вимкнення та вжиття заходів, які запобігають подачі напруги до місця роботи внаслідок помилкового або довільного ввімкнення комутаційної апаратури;
- вивішування на приводах ручного та на ключах дистанційного керування комунікаційної апаратури (автомати, рубильники, вимикачі) забороняючих плакатів;
- перевірка відсутності напруги на струмоведучих частинах;
- накладання заземлення;
- вивішування попереджувальних та приписувальних плакатів, огороження, при необхідності, робочих місць та струмоведучих частин, які залишилися під напругою.

Для безпечного виконання перемикань в розподільчих пристроях електроустановок персонал повинен строго дотримуватися наступного порядку операцій:

- відключити струмоведучі частини, на яких передбачається проводити роботи;
- відключити струмоведучі частини, до яких не виключений випадковий дотик або наближення на небезпечну відстань;
- вжити заходи, що перешкоджають помилковій подачі напруги до місця робіт;

- установити попереджувальні плакати;
- установити тимчасові огорожі з ізолюючих матеріалів;
- перевірити всіх затискачі відключеного устаткування і всі виводи вимикача на відсутність напруги;
- виконати заземлення і закорочування відключених струмоведучих частин з усіх боків, звідки може бути подана напруга;
- установка на місці роботи плакат «Працювати тут!».

Відключення потрібно зробити так, щоб між тими, що відключаються і струмоведучими частинами під напругою, були розриви з обох боків.

Особливу увагу необхідно звертати на можливість зворотної трансформації нижчої напруги через трансформатори. Щоб цього не трапилося, всі трансформатори, що відносяться до устаткування, що відключається, відключають також і з боку нижчої напруги. З метою попередження випадкового включення вимикачів і роз'єднувачів в силових ланцюгах дистанційних приводів відключених роз'єднувачів виймають запобіжники на обох полюсах. Всі приводи роз'єднувачів, доступні стороннім особам, замикають на замок.

На всіх ключах управління та приводах вимикачів і роз'єднувачів, за допомогою яких може бути подана напруга до місця робіт, що виконує відключення вивішує плакати: «Не включати – працюють люди!». При роботах на лінії на приводах роз'єднувачів вішають плакати: «Не включати – робота на лінії!».

На схемі диспетчера, що керує відключенням, вивішують стільки плакатів, скільки працює бригад.

На тимчасових огорожах вивішують плакати: «Стій – висока напруга!».

Після установки попереджувальних плакатів й тимчасових огорож персонал готує комплект переносних заземлень, приєднує їх до заземлюючої проводки і потім перевіряє частини установки, призначеної для роботи, на відсутність напруги.

Для перевірки на відсутність напруги застосовують покажчик напруги. Заземлення встановлюють безпосередньо після перевірки на відсутність напруги. При цьому не допускається накладати заземлення, заздалегідь не приєднавши

його до заземлюючого пристрою. Затиски переносного заземлення накладають за допомогою штанги з ізоляційного матеріалу на струмоведучі частини всіх фаз, що заземляються, потім затиски надійно приєднують цією ж штангою або безпосередньо руками в діелектричних рукавичках. Після накладення заземлення на місці робіт вивішують плакат: «Працювати тут!»..

При знятті заземлення його спочатку знімають з струмопровідних частин, а потім відокремлюють від заземлюючого контуру. Наряд на роботу закривають після огляду устаткування і місця, де проводилася робота. Тільки після закриття наряду включають устаткування в роботу, заздалегідь виконавши наступні операції:

- відключення заземлюючих ножів або зняття переносних заземлень;
- перевірку ізоляції;
- видалення тимчасових огорож і застережних плакатів;
- місцеположення і зняття всіх плакатів, вивішених до початку робіт, постійних огорож.

Якщо на відключеній установці працювало декілька бригад, то включати її можна тільки після закриття всіх нарядів.

Справність ізоляції устаткування, що включається після ремонту, перевіряють мегомметром.

Якщо виявлено замикання на землю, то до відключення пошкодженої ділянки в закритих розподільних установках не можна наближатися до місця пошкодження на відстань менше 5 м, а на відкритих підстанціях — на відстань 10 м.

У комплектних розподільних пристроях струмопровідні частини повинні бути закриті суцільними металевими огорожами. При цьому втичні контакти, за допомогою яких здійснюється підключення візків до шин РП, закриваються автоматичними шторками, як тільки візок починають викочувати, або дверцями.

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

А.3 Висновки

1. Встановлено, що найбільш небезпечними та шкідливими факторами при експлуатації електроустановок загального призначення є електричний струм, електромагнітні поля, акустичні та віброакустичні коливання та рухомий транспорт.

2. Виявлено, що заходи, які забезпечують безпеку робіт в електроустановках поділяються на організаційні та технічні. До організаційних відносяться: оформлення роботи за нарядом-допуском, розпорядженням або за переліком робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації, допуск до роботи, нагляд під час роботи, оформлення перерви під час роботи, переводи на інше робоче місце, а до технічних – вимкнення та вжиття заходів, що запобігають подачі напруги до місця роботи, вивішування на приводах ручного та на ключах дистанційного керування комунікаційної апаратури забороняючих плакатів; перевірка відсутності напруги на струмоведучих частинах; накладання заземлення; вивішування попереджувальних плакатів, огороження, струмоведучих частин, які залишились під напругою.

А.4 Перелік використаних джерел

А.1. Основи охорони праці: Підручник. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний та ін. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. К.: Основа, 2006. 448 с.

А.2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Х.: Форт, 2017. 376 с.

А.3. Правила безпечної експлуатації електроустановок. НПАОП 40.1-1.01-97. Зі змінами 2000 р. Х.: 2016, 152 с.