

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

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЕСШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

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

на тему:

«Раннє виявлення ожеледно-паморозевих відкладень у розподільних електричних мережах 10 кВ»

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу магістратури, групи ЕЕ-23М

ОПП «Електротехнічні системи

електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Павло РОЗПУТНІЙ

«_____» _____ 2024 р.

Керівник роботи к. т. н., доц.

_____ Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ

«_____» _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

« » 2024 р.

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

Розпутній Павло Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Раннє виявлення ожеледно-паморозевих відкладень у розподільних електричних мережах 10 кВ.

Early detection of ice and frost deposits in 10 kV distribution networks»

2. Керівник роботи Козловський Олександр Антонович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 3.12.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи удосконалення системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на повітряних лініях 10 кВ з неізолюваними проводами

Завдання: 1. Виконати аналіз методів і засобів захисту повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледоутворення. 2. Провести аналітичний огляд систем раннього визначення утворення ОПВ на проводах повітряних ліній та їх первинних вимірювальних перетворювачів. 3. Виконати теоретичне дослідження та розробку первинного вимірювального перетворювача для виявлення ожеледно-паморозевих відкладень. 4. Розробити заходи з ТБ і ОП для електротехнічного персоналу, що обслуговує ПЛ електропередавання розподільних електромереж

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</i>	<i>2.09 – 4.09</i>	
2	<i>Розділ 1. Аналіз методів і засобів захисту повітряних ліній в умовах ожеледоутворення</i>	<i>5.09 – 20.09</i>	
3	<i>Розділ 2. Обґрунтування та розробка первинного вимірювального перетворювача для виявлення ожеледно-паморозевих відкладень</i>	<i>23.09 – 18.10</i>	
4	<i>Розділ 3. Обґрунтування та розробка системи раннього виявлення ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії</i>	<i>21.10 – 8.11</i>	
5.	<i>Розділ 4. Охорона праці в електроустановках</i>	<i>11.11 – 15.11</i>	
6.	<i>Формулювання загальних висновків</i>	<i>18.11 – 22.11</i>	
7.	<i>Оформлення переліку використаних джерел</i>	<i>25.11 – 27.11</i>	
8.	<i>Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді слайдів</i>	<i>28.12 – 2.12</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника

Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ
(ім'я та прізвище)

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача

Павло РОЗПУТНИЙ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 99 с.; 34 рис.; 4 табл.; 39 джерел; 1 дод. на 12 с.

Розпутній П. В. Раннє виявлення ожеледно-паморозевих відкладень у розподільних електричних мережах 10 кВ. – Рукопис.

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

Об'єкт дослідження – процеси утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних лінії розподільних електромереж.

Предмет дослідження – електричні параметри ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії.

Мета кваліфікаційної роботи – удосконалення системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на повітряних лініях 10 кВ з неізолюваними проводами.

У першому розділі кваліфікаційної роботи виконано аналіз методів і засобів захисту повітряних ліній, що працюють в умовах ожеледоутворення. Другий розділ присвячений обґрунтуванню та розробці первинного вимірювального перетворювача для виявлення ожеледно-паморозевих відкладень. У третьому розділі виконано обґрунтування та розробку системи раннього виявлення ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії. У додатку А проведено аналіз заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках, виконано розрахунок контуру заземлення.

Результати досліджень, проведених у даній магістерській роботі можуть бути використані енергопостачальними компаніями при проектуванні, побудові та експлуатації комплексних інформаційних систем моніторингу процесу ожеледоутворення. Зокрема, шляхом включення до їх складу підсистеми раннього виявлення ОПВ на проводах повітряних ліній.

Ключові слова: повітряна лінія електропередавання, розподільні мережі, природні ризики, ожеледно-паморозеві відкладення, комп'ютерне моделювання.

ABSTRACT

Qualification work 99 p.; 34 fig.; 4 tabl.; 39 sources; 1 app. of 12 p.

Rozputnii P. V. Early detection of ice and frost deposits in 10 kV distribution networks. – Manuscript.

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

The object of the study: the processes of formation of ice-frost deposits on the wires of overhead lines in distribution electrical networks.

The subject of the study: the electrical parameters of ice-frost deposits on the wire of an overhead line.

The purpose of the qualification work: improvement of the early detection and identification system for ice-frost deposits on 10 kV overhead lines with non-insulated wires.

The first chapter of the qualification work analyzes methods and tools for protecting overhead lines operating under ice formation conditions. The second chapter is devoted to the justification and development of a primary measuring transducer for detecting ice-frost deposits. The third chapter focuses on the justification and development of an early detection system for ice-frost deposits on overhead line wires. Appendix A includes an analysis of measures ensuring safety in electrical installations and the calculation of the grounding contour.

The research results presented in this master's work can be utilized by energy supply companies during the design, construction, and operation of integrated information systems for monitoring the ice formation process. Specifically, by incorporating a subsystem for early detection of ice-frost deposits on overhead line wires.

Keywords: overhead power transmission line, distribution networks, natural risks, ice-frost deposits, computer modeling

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ В УМОВАХ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ	12
1.1. Методи захисту повітряних ліній від ожеледо-паморозевих відкладень	12
1.2. Комплексні системи інформаційного забезпечення процесу ожеледоутворення.....	20
1.3. Системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на проводах повітряних ліній електропередачі.....	24
1.4. Первинні вимірювальні перетворювачі систем раннього виявлення і ідентифікації ОПВ	26
1.5. Постановка задач подальших досліджень.....	32
1.6. Висновки до розділу 1	34
2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИХ ВІДКЛАДЕНЬ	35
2.1. Теоретичне дослідження електричних параметрів льоду	35
2.2. Розробка первинного вимірювального перетворювача обledenіння проводу повітряної лінії.....	49
2.2.1. Обґрунтування конструкції ПВП	49
2.2.2. Обґрунтування активної довжини електродів ПВП ОПВ	53
2.2.3. Моделювання опору ОПВ на електродах ПВП	55
2.3. Висновки до розділу 2.....	66

3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ РАННЬОГО	
ВІЯВЛЕННЯ ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИХ ВІДКЛАДЕНЬ НА	
ПРОВОДИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ.....	67
3.1. Вимоги до системи.....	67
3.2. Структурна схема системи.....	68
3.3. Алгоритм роботи системи.....	69
3.4. Технічні аспекти реалізації системи.....	73
3.5. Висновки до розділу 3.....	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	84
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ.....	88
A.1. Заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках.....	88
A.1.1. Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках.....	88
A.1.2. Організаційні заходи з безпечної експлуатації електроустановок.....	91
A.1.3. Заходи з безпечної експлуатації пристроїв контролю та релейного захисту і автоматики.....	92
A.2. Розрахунок контуру заземлення.....	95
A.3. Висновки.....	99
A.4. Список літератури.....	99

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВП – вимірювальний перетворювач;
ОВА – ожеледно-вітрова аварія;
ОДС – оперативна диспетчерська служба;
ОЕС – об’єднана енергосистема;
ОПВ – ожеледно-паморозеві відкладення;
ПВП – первинний вимірювальний перетворювач;
ПЛ – повітряна лінія;
ІСКО – інформаційна система контролю ожеледоутворення;
ВН – висока напруга;
СН – середня напруга;
НН – низька напруга;
СРВІ ОПВ – система раннього виявлення та ідентифікації ОПВ;
CAD – Computer Aided Design;
CAE – Computer Aided Engineering;
МКЕ – метод кінцевих елементів;
PDE – Partial Differential Equations;

ВСТУП

Актуальність теми. Боротьба з ожеледдю – одна з найскладніших задач, що виникає при експлуатації повітряних ліній (ПЛ) електропередавання в зимовий період. Періодично виникаючі аномальні погодні умови, у навіть достатньо сприятливих в кліматичному відношенні регіонах України, часто призводять до масових ушкоджень і руйнувань ПЛ. Найбільш катастрофічною в новітній історії України була ожедено-вітрова аварія (ОВА), що відбувалася в листопаді 2000 року. Внаслідок якої в семи областях України було ушкоджено 113060 опор ПЛ 10 кВ і близько 4,5 тис. населених пунктів залишилось на довгий час без електропостачання [1].

У світовій практиці запропоновано достатньо технічних рішень, щодо захисту проводів ПЛ від ожеледо-паморозевих відкладень (ОПВ), серед них найбільш впровадженим і розповсюдженими є плавка ожеледі струмами штучного короткого замикання. Однак її ефективність в значній мірі визначається своєчасністю проведення [2-5].

Для підвищення ефективності плавки ожеледі електропостачальні компанії впроваджують комплексні системи інформаційного забезпечення процесу ожеледоутворення. Однак, ці системи мають значні обмеження, включаючи недосконалі алгоритми прогнозування, невідповідність параметрів вимірювальних перетворювачів характеристикам контрольованих проводів, використання закритих технологій та неповну комплектацію локальними інформаційними підсистемами, такими як системи раннього виявлення ожеледно-паморозевих відкладень на проводах. Вирішення цих проблем можливе шляхом вдосконалення систем моніторингу, які базуються на сучасних методах контролю ожеледно-паморозевих відкладень на лініях електропередавання.

Таким чином, удосконалення систем раннього виявлення ожеледоутворення на повітряних лініях розподільних електромереж є актуальним.

Мета роботи – удосконалення системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на повітряних лініях 10 кВ з неізолюваними проводами.

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

- виконати аналіз методів і засобів захисту повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледоутворення;
- провести аналітичний огляд систем раннього визначення утворення ОПВ на проводах повітряних ліній та їх первинних вимірювальних перетворювачів;
- виконати теоретичне дослідження та розробку первинного вимірювального перетворювача для виявлення ожеледно-паморозевих відкладень;
- обґрунтувати та розробити систему раннього виявлення ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній;
- розробити заходи з ТБ і ОП для електротехнічного персоналу, що обслуговує ПЛ електропередавання розподільних електромереж.

Об'єкт дослідження – процеси утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній розподільних електромереж.

Предмет дослідження – електричні параметри ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії.

Методи досліджень. У процесі виконання кваліфікаційної роботи та вирішення поставлених завдань було застосовано комплекс наукових методів, зокрема:

- методи аналізу та синтезу для розкладу проблеми на складові та подальшого їх об'єднання в цілісну систему;
- метод формалізації для представлення досліджуваних об'єктів у вигляді формальних моделей;
- теорії диференціального та інтегрального числення для математичного опису досліджуваних процесів;
- математичні методи обчислювального експерименту для проведення симуляцій та отримання числових результатів опору ОПВ;

- методи системного підходу для комплексного розгляду досліджуваних об'єктів та процесів.

Наукова цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- обґрунтовано конструкцію первинного вимірювального перетворювача, що необхідний для побудови системи раннього визначення появи ОПВ на проводі ПЛ з неізолюваними проводами;

- отримала подальший розвиток математична модель електричного опору ОПВ на алюмінієвих електродах.

Практична цінність результатів полягає в можливості їх застосування при проектуванні, побудові та експлуатації комплексних інформаційних систем моніторингу процесу ожеледоутворення. Зокрема, шляхом включення до складу цих систем підсистеми раннього виявлення ОПВ на проводах повітряних ліній електропередачі.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ В УМОВАХ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ

1.1 Методи захисту повітряних ліній від ожеледо-паморозевих відкладень

Методи захисту проводів від ожеледно-паморозевих відкладень (ОПВ) доцільно розділити на дві основні групи: активні та пасивні, кожна з яких містить кілька підгруп. Активні методи включають: плавку ожеледі (трифазні схеми плавки, плавка ОПВ високочастотними струмами та ін.); режимні заходи (зміна схеми мережі, метод двох джерел реактивної потужності (ДРП)), механічне руйнування ОПВ (під дією навантаження від власної ваги, вібраційні методи) і електростатичний. Пасивні методів охоплюють: конструктивний (використання обладнання ПЛ нових конструкцій); механічний (механічне руйнування ОПВ), фізико-хімічний та проектний. На рис. 1.1 представлено детальну класифікацію методів захисту повітряних ліній від ожеледно-паморозевих відкладень.

Ефективність практичного застосування того чи іншого методу захисту ПЛ залежить від низки факторів, зокрема: класу напруги мережі, конструкції проводу, потужності силових трансформаторів, наявності та типу засобів автоматизації, кліматичних умов регіону. Однак, навіть за наявності сприятливих умов у конкретній мережі, немає достатніх підстав стверджувати, що будь-який окремий метод буде однозначно ефективним у довгостроковій перспективі. Це пояснюється рядом причин, серед яких: технічні обмеження мережі, складність проведення випробувань в умовах діючих електромереж, необхідність значних інвестицій. Ці фактори ускладнюють всебічну оцінку ефективності різних методів захисту та їх порівняння в реальних умовах експлуатації. Для подолання цих обмежень необхідно проводити більш тривалі та масштабні дослідження, а також розробляти нові підходи до тестування методів захисту від ожеледно-паморозевих відкладень в умовах діючих електромереж.

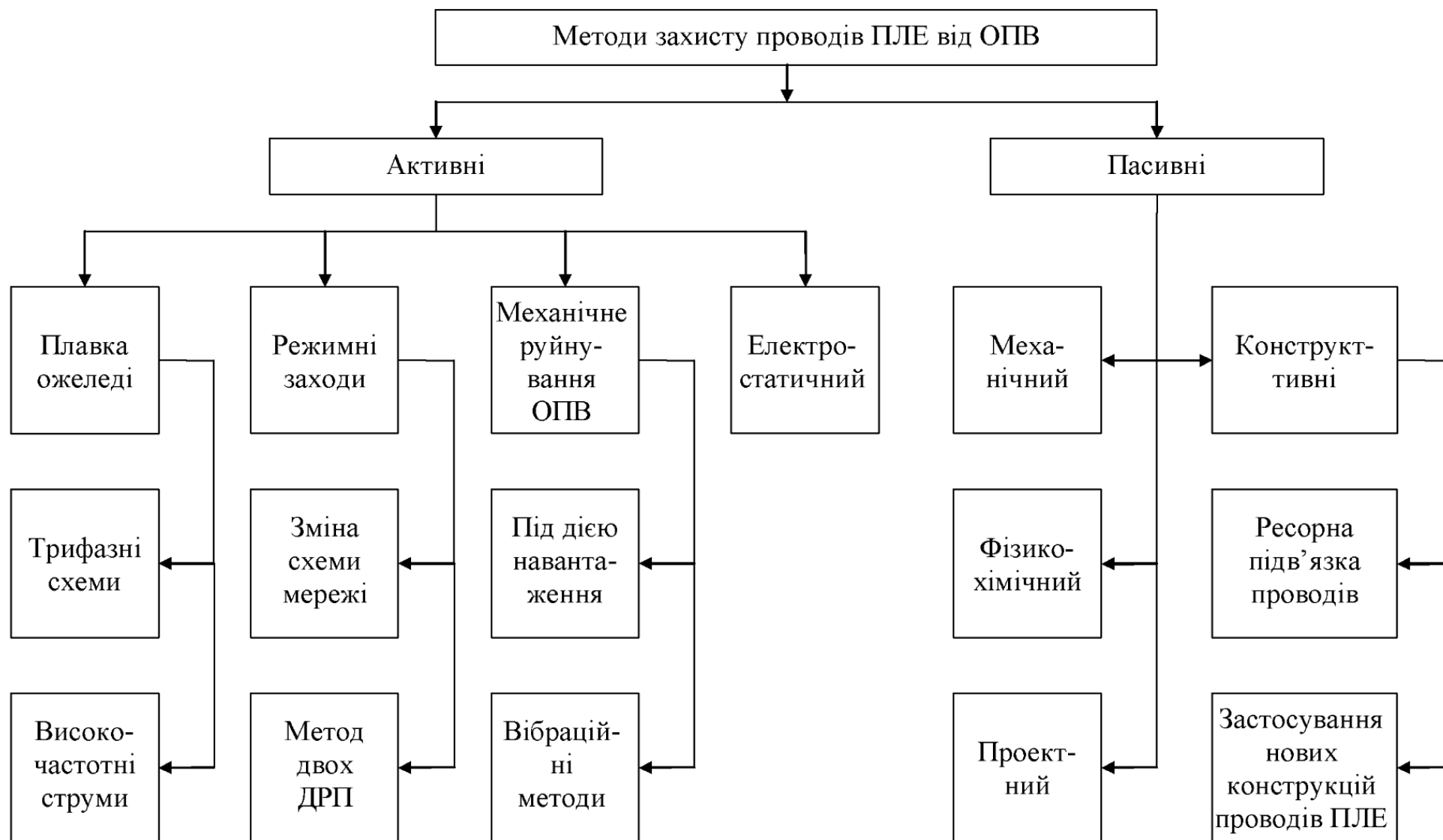


Рисунок 1.1 – Методи захисту ПЛ від ожеледно-паморозевих відкладень

Багаторічний досвід експлуатації повітряних ліній (ПЛ) електропередачі демонструє, що найбільш ефективним методом боротьби з ожеледдю залишається її плавка. Цей метод дозволяє ефективно видаляти відкладення на проводах і грозозахисних тросах, запобігаючи серйозним пошкодженням ПЛ [3, 6-8, 10]. Принцип дії плавки ожеледі базується на створенні спеціальних режимів роботи електричної мережі, за яких через ПЛ, що потребує обігріву, пропускаються струми, значно вищі за робочі. Це дозволяє досить швидко та надійно звільняти протяжні ділянки ПЛ від небезпечних механічних перевантажень, викликаних ожеледно-паморозевими відкладеннями.

Основним рекомендованим методом боротьби з ожеледдю є плавка струмами «гарантованої плавки». Цей метод дозволяє розплавляти ожеледь впродовж 20-30 хвилин (максимум 1 година) [6, 7]. Коли використання струмів гарантованої плавки неможливе через технічні обмеження, доцільно застосовувати наступні допоміжні струмові режими:

- попереджувального нагріву. У цьому режимі проводи нагріваються до температури 1-2 °С, що перешкоджає утворенню ожеледі на їх поверхні. При інтенсивному охолодженні опадами він може бути малоефективним і вимагає тривалого нагріву впродовж всього ожеледного періоду;

- попереджувальної плавки. У цьому режимі відбувається розплавлення незначних ожеледних відкладень (до 2 Н/пог.м) на початковій стадії. Для гарантованого захисту ПЛ необхідно повторення такої плавки 3–5 разів впродовж всього періоду ожеледоутворення;

- ризикованої плавки. У цьому режимі струми менші за величиною, ніж необхідно для плавки впродовж однієї години. Ймовірність успішності такої плавки не перевищує 20%, тому її застосовують лише у випадках, коли неможливо використовувати інші заходи;

- повторно-короткочасний. У цьому режимі струм плавки перевищують гранично допустимі значення за умовою перегріву проводів на ділянках без ожеледі. Провадження цього режиму вимагає наявності комутаційних засобів підвищеного ресурсу та спеціальної системи автоматичного керування.

Зважаючи на тривалість процесу плавки ожеледі, особливо в попереджувальних режимах, раціональним є застосування схем та джерел плавки, які дозволяють проводити обігрів ПЛ без виведення їх з робочої схеми мережі та без відключення споживачів. Такий підхід забезпечує безперервність електропостачання та мінімізує незручності для кінцевих користувачів.

Для плавки ожеледі можливо використовувати як змінний, так і постійний струм. Застосування постійного струму має певні переваги:

- відсутність індуктивного опору дозволяє знизити потужність, необхідну для плавки, при збереженні ефективності процесу;
- альтернативно, при тій самій потужності можливо збільшити довжину ділянки лінії, що обігривається.

Вибір між змінним та постійним струмом залежить від конкретних технічних умов, наявного обладнання та економічних факторів. Кожен метод має свої переваги та обмеження, які слід враховувати при проектуванні системи захисту від ожеледі.

Використання постійного струму для плавки ожеледі вимагає встановлення додаткового обладнання, що значно збільшує вартість та ускладнює систему боротьби з ожеледоутворенням. Через це найбільшого поширення набули симетричні трифазні схеми плавки ожеледі [6, 7]. Їх переваги включають: простоту реалізації, можливість одночасної плавки ожеледі на всіх фазах, відсутність негативних впливів на роботу та ліній зв'язку.

Аналіз випадків аварійних пошкоджень ПЛ, на яких здійснювалася плавка ожеледі, виявив важливу закономірність – їх ефективність, насамперед, залежить від скорочення загального часу їх тривалості [7]:

$$t_{\Sigma} = \Delta t_{\text{ріш}} + \Delta t_{\text{д}} + \Delta t_{\text{зб}} + \Delta t_{\text{пл}} + \Delta t_{\text{пер}} + \Delta t_{\text{розб}}, \quad (1.1)$$

де $\Delta t_{\text{ріш}}$ – інтервал часу від сповіщення про початок утворення ОПВ на проводі ПЛ, до прийняття рішення щодо проведення плавки ожеледі;

Δt_d – час у дорозі до ПС експлуатаційного персоналу електропостачальної компанії;

$\Delta t_{зб}$ – тривалість збирання схеми плавки ожеледі;

$\Delta t_{пл}$ – час дії захисту;

$\Delta t_{пер}$ – тривалість перевірки ефективності плавки ожеледі;

$\Delta t_{розб}$ – час необхідний для розбирання схеми плавки (для тих ПС, де необхідно захищати декілька приєднань).

Аналіз виразу (1.1) показує, що найбільше часу витрачається на прийняття рішення щодо проведення плавки ожеледі до 3,76 год. Головними причинами цього є неточність, ненадійність, запізнілість інформації, що надходить з контрольних постів спостереження та від систем моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення, а також повна відсутність засобів моніторингу ожеледоутворення в деяких електромережах.

Превентивний обігрів проводів ПЛ можливо також здійснювати за допомогою провадження режимних заходів у мережі:

- підвищенням електричного навантаження магістральних ліній;
- зміною конфігурації мережі з перерозподілом навантажень.

Проте, через особливості конструкції розподільних мереж часто неможливо збільшити силу струму вище необхідної для фактичних потреб без встановлення додаткових комутаційних пристроїв.

Недолік запропонованого методу превентивного обігріву ПЛ полягає в тому, що він зазвичай здійснюється шляхом додавання до робочого струму лінії змінного за величиною додаткового струму, при цьому не враховуються поточні метеорологічні параметри (температури повітря, швидкість, напрям вітру і т.п.). Це призводить до значних перевитрат електроенергії та зниження надійності електропостачання.

Метод двох джерел реактивної потужності (ДРП), описаний у [8], полягає в наступному: система захисту ПЛ від обледеніння реалізується за допомогою двох трифазних джерел реактивної потужності, підключених на кінцях ділянки ПЛ, що захищається. Одне з цих джерел генерує реактивну потужність, а інше її споживає.

До переваг методу слід віднести: можливість здійснювати плавку без відключення ПЛ і споживачів; швидке налаштування схеми плавки; легку автоматизація процесу плавлення ожеледі; технічна можливість одночасного захисту кількох ліній (за наявності потужних керованих ДРП).

Недоліками методу є: можливість здійснення захисту лише на ПЛ, де передбачена компенсація реактивної потужності; необхідність встановлення додаткових реакторів. Успішність заходів захисту ПЛ від ОПВ значною мірою залежать від своєчасності їх проведення

Захисти проводи та троси ПЛ, також можливо за допомогою механічного методу, який полягає в прикладенні до них механічних зусиль. Джерелами руйнівних механічних зусиль для ОПВ можуть бути:

- безпосередні механічні удари по проводу з ОПВ, наприклад, жердиною;
- енергія магнітного поля, що запасена в індуктивностях або ємностях, за рахунок якої створюється імпульсна дія, у тому числі і удар по проводу;
- термокомпенсатори з ефектом пам'яті форми, які при протіканні великих струмів відновлюють свою форму, і тим самим струшують провід;
- коливання, що запускаються самим проводом, коли маса проводу перевищить задану критичну величину.

У цілому, до недоліків механічного методу слід віднести: високу вартість; високу ймовірність ушкодження проводів самими пристроями; для проведення таких заходів захисту потребує значну кількість електротехнічного персоналу.

Електростатичний метод полягає в тому, що в електромережу змінної напруги промислової частоти подається напруга випрямленого струму. Джерело випрямленої напруги включається в нейтраль силового трансформатора або штучну так, щоб проводи ПЛ мали одну полярність, а земля – іншу. Подана постійна напруга дозволяє збільшити напруженість електричного поля і створити іонну “шубу” навколо проводу. Пролітаючи її краплини водного аерозолію набувають однойменного заряду з проводом ПЛ, внаслідок чого виникає кулонівська сила, що відштовхує їх від поверхні проводу. При використанні

такого захисту маса відкладень зменшується на 40-80%, а їх густина не перевищує 0,14-0,21 г/см³ на відміну від густини в природних умовах 0,8-0,86 г/см³ [11].

Цей метод має ряд переваг: забезпечує стабільне постачання електроенергії користувачам, характеризується низьким енергоспоживанням, не створює радіоперешкод і дозволяє використовувати стандартні джерела постійного струму малої потужності. Однак, існують і певні обмеження: потреба у джерелі випрямленого струму, необхідність тимчасового роз'єднання кіл «лінія-розрядник-земля» на час дії, а також відключення нульового провідника трансформаторів напруги типу ЗНОМ. Ефективність цього захисного методу значною мірою залежить від розмірів крапель ожеледодонесучого потоку та своєчасності його активації.

Розглянемо пасивні методи захисту повітряних ліній від ожеледо-паморозевих відкладень.

Запобігання обмерзання проводу можливо досягнути за рахунок зміни конструкції. Застосування проводів, на яких не утворюються ожеледо-паморозеві відкладення, засноване на виділенні тепла самим проводом за рахунок зміни характеристик матеріалу, з якого він виготовлений.

Для зниження ожеледних навантажень також розроблено конструктивний метод захисту, який полягає в заміні елементів і вузлів ПЛ на більш досконалі, конструкція яких сприяє зниженню зчеплення з відкладенням. Одним з найбільш дієвих способів цього методу є ресорна в'язка проводів до ізолятора. Вона використовується на ПЛ 6-10 кВ, де відстані між проводами збільшені відносно типових у 1,3-1,5 рази разом із зміною конструкції траверси опори і збільшенням натягу проводів в режимі максимальних зовнішніх навантажень до 60% межі міцності. Пошкоджуваність проводів таких ПЛ знижується у 8-10 разів.

Фізико-хімічний метод полягає в створенні на поверхні проводу тонкого захисного шару за допомогою гідрофобних мастил і твердих гідрофобних плівок. За даними літературних джерел [9] у Франції близько 30% проводів ПЛ СН і НН покриті гідрофобною плівкою. Досвід використання гідрофобних покриттів на проводах ПЛ показує, що вони служать добрим захистом від налипання мокрого

снігу, але при цьому не забезпечується захист від ожеледі. Коли переохолоджені краплі води потрапляють на поверхню, вони швидко замерзають під час скочування, формуючи бурульки. Для спрощення процесу нанесення захисних покриттів на проводи та троси були розроблені спеціальні пристрої, однак ці технічні рішення підвищують вартість методу в цілому. Фізико-хімічний метод захисту можливо застосовувати на ПЛ всіх класів напруги, що є їхньою суттєвою перевагою порівняно з іншими способами.

Проектний метод запобігання ожеледно-вітровим аваріям на ПЛ базується на розробці їх індивідуальних проектів з урахуванням специфічних кліматичних навантажень для кожної конкретної місцевості, без використання єдиних коефіцієнтів перевантаження. Такий підхід дозволив уточнити розрахункові кліматичні навантаження та здійснити більш точне районування територій за ожеледно-вітровими характеристиками в низці регіонів.

Ключова перевага цього методу полягає у визначенні навантажень без застосування коефіцієнтів перевантаження. Експериментальна перевірка продемонструвала підвищення розрахункової надійності конструкцій ПЛ приблизно на 25% порівняно лініями, що були спроектовані за традиційними методами. Загальні витрати на будівництво ПЛ, включаючи витрати на їх відновлення після можливих аварій та компенсації збитків від недоданої електроенергії споживачам, зменшуються на 12%, при цьому потребуючи лише 5% збільшення початкових капіталовкладень.

Обмеженням проектного методу є його придатність виключно до нових або реконструйованих повітряних ліній електропередачі.

Аналіз методів захисту ПЛ електропередачі від ожеледно-вітрових впливів виявив, що активні методи є найбільш розповсюдженими та придатними для застосування. Проте їхня ефективність критично залежить від своєчасності проведення. Це підкреслює важливість оперативного отримання інформації про початок утворення ожеледі на проводах і грозозахисних тросах ПЛ. Відтак, постає нагальна потреба в детальному аналізі існуючих систем моніторингу стану ПЛ в умовах ожеледоутворення.

1.2 Комплексні системи інформаційного забезпечення процесу ожеледоутворення

Для оптимального вибору часу початку проведення заходів захисту ПЛ від ожеледно-паморозевих відкладень необхідна своєчасна та достовірна інформація про початок процесу утворення ОПВ та його розвиток. Тому одним із основних напрямків підвищення ефективності плавки ожеледі є впровадження в електромережах електропостачальних компаній комплексних інформаційних систем контролю ожеледоутворення (ІСКО) [3, 10, 12-15]. Вони входять до складу централізованої автоматизованої системи плавки ожеледі (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Система захисту ПЛ від ожеледоутворення

До складу типової комплексної ІСКО входять наступні системи:

- прогнозування часу початку обледеніння проводу;
- раннього виявлення та ідентифікації ОПВ;
- контролю ожеледного навантаження;
- передачі даних.

Комплексна інформаційна систем контролю ожеледоутворення виконує наступні ключові функції:

- здійснює короткострокові прогнози щодо початку обледеніння проводів повітряних ліній;
- виявляє та підтверджує початок формування ОПВ на проводах;
- ідентифікує тип ОПВ.
- надає диспетчерській службі актуальні дані про інтенсивність зростання ожеледного навантаження;
- відстежує процес завершення плавки ожеледі;
- забезпечує передачу зібраних телеметричних даних до диспетчерського центру електропостачальної компанії.

Досить часто систему короткострокового прогнозування початку обледеніння проводу ПЛ і систему раннього виявлення та ідентифікації ОПВ фізично об'єднують в одному пристрої. Це дозволяє зменшити витрати на обладнання та монтаж і підвищує ефективність роботи ІСКО. Крім того, інтеграція функцій прогнозування і раннього виявлення в одному пристрої забезпечує оперативніше реагування на зміни погодних умов та мінімізує ризики від впливу ожеледно-паморозевих відкладень. Завдяки цьому, диспетчерська служба отримує надійну інформацію в реальному часі, що дозволяє своєчасно приймати рішення щодо захисту повітряних ліній та проведення плавки ожеледі, знижуючи аварійність та витрати на ремонт.

На рис. 1.3 представлено концепцію ІСКО, основою якої є трирівнева ієрархічна структура [10]. Ця структура містить: рівень об'єктів контролю; регіональний рівень; центрального рівня.

Рівень об'єктів контролю складається з множини блоків збору даних (БЗД),

розташованих на контрольованих повітряних лініях. БЗД отримують інформацію про температуру навколишнього повітря, струм навантаження ПЛ та час, необхідний для утворення штучного ожеледі на проводі. Величина струму в ПЛ використовується для контролю процесу плавки ожеледі. Дані з вимірювальних перетворювачів зберігаються в енергонезалежному запам'ятовуючому пристрої. Зв'язок між окремими БЗД та центром збору й обробки інформації реалізований за архітектурою типу "зірка"

Головними перевагами використаної архітектури системи має ряд переваг:

- нечутливість системи до відмови окремого БЗД;
- висока масштабованість;

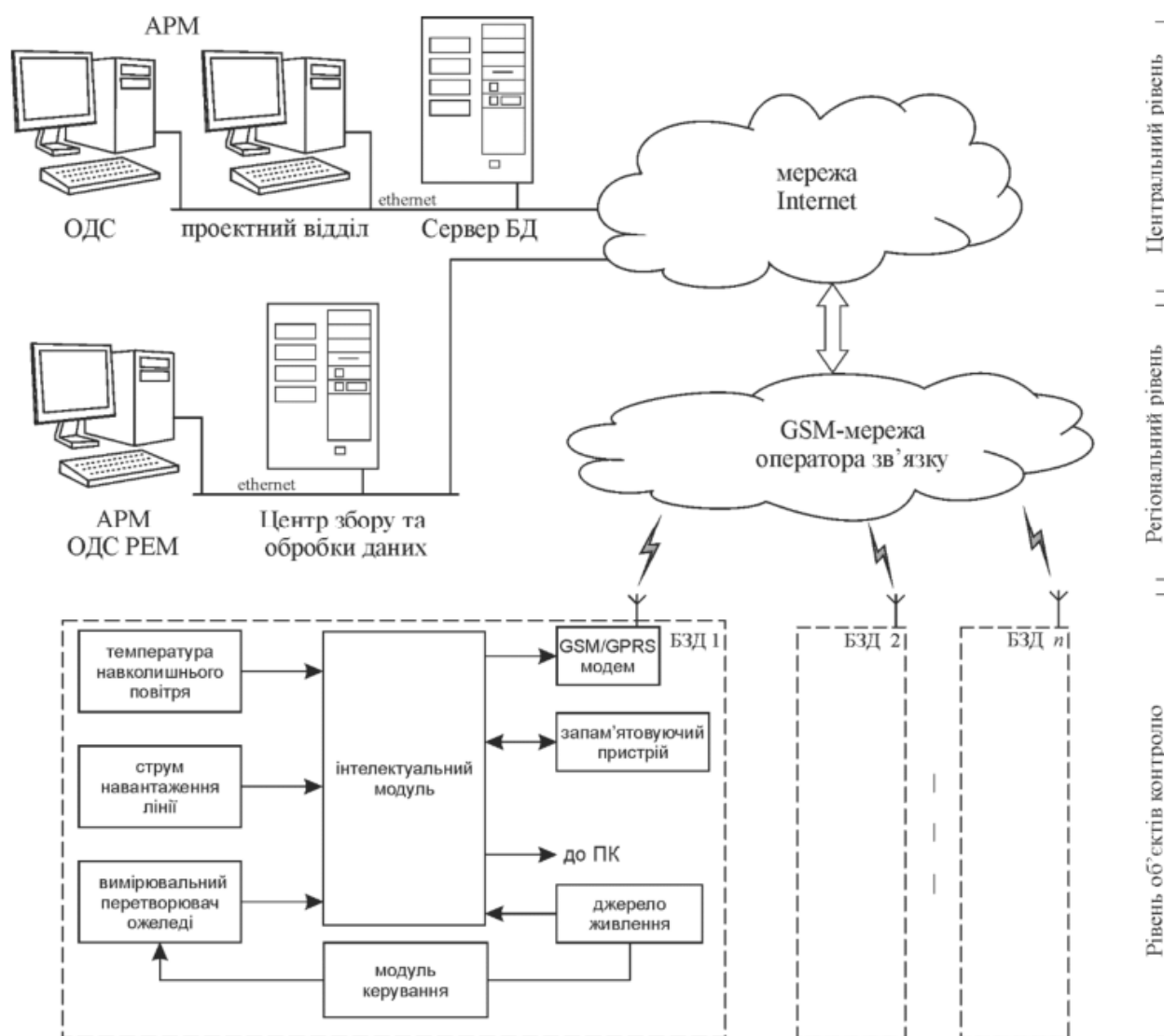


Рисунок 1.3 – Структурна схема ІСКО [33]

- легкість виявлення та усунення несправностей;
- висока продуктивність;
- просте налаштування та адміністрування.

Особливістю даної системи є використання БЗД наявних каналів зв'язку стільникових операторів для передачі даних.

Регіональний рівень системи складається з комунікаційного обладнання, що функціонує як центр збору та обробки даних, розташований в межах районних електричних мереж. Ключовими компонентами цього обладнання є: сервер додатків, сервер баз даних, ядро системи та автоматизоване робоче місце (АРМ) диспетчера.

АРМ диспетчера призначене для візуалізації поточного стану ПЛ, відображення сигналів тривоги від первинних вимірювальних перетворювачів ОПВ, а також для роботи з архівними даними.

Центри збору та обробки даних, а також сервери баз даних реалізуються на стандартному обладнанні з використанням типового програмного забезпечення.

Центральний рівень системи моніторингу стану повітряних ліній електропередачі виконує наступні ключові функції: збір та упорядкування даних з регіональних центрів; консолідація інформації; довготривале зберігання отриманих даних.

Структура центрального рівня складається з: сервера баз даних, АРМ ОДС, комунікаційного обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення.

Всі ці компоненти об'єднані в локальну мережу Ethernet. Актуальна інформація про ожеледну ситуацію в розподільних мережах передається на АРМ центральних диспетчерських пунктів енергокомпанії.

Така ієрархічна організація інформаційної системи контролю ожеледоутворення забезпечує ефективний розподіл функцій контролю та управління між різними рівнями. Це дозволяє оптимізувати обробку та передачу інформації від об'єктів контролю до центрального диспетчерського пункту, підвищуючи загальну ефективність системи моніторингу.

Отже, в структурі ІСКО системи короткострокового прогнозування початку обледеніння та раннього виявлення та ідентифікації ОПВ є ключовими компонентами. Вони мають вирішальний вплив на загальну ефективність захисту повітряних ліній, оскільки саме від їхньої точності та оперативності залежить швидкість реагування на утворення ожеледі. Тому ці системи потребують глибшого аналізу, удосконалення алгоритмів роботи, що дозволить підвищити надійність та точність їх роботи в умовах реальної експлуатації.

1.3 Системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на проводах повітряних ліній електропередачі

Типова структурна схема сучасної системи раннього виявлення та ідентифікації (ОПВ) зображена на рис. 1.4 [12-15]. Основними компонентами цієї системи є розподілена мережа модулів збору інформації (МЗІ) та модуль прийому інформації (МПІ).

Модулі збору інформації встановлюються в точках контролю безпосередньо на ПЛ і забезпечують збір первинної інформації про стан навколишнього середовища на рівні підвісу проводів і про наявність на них ОПВ. З цією метою до

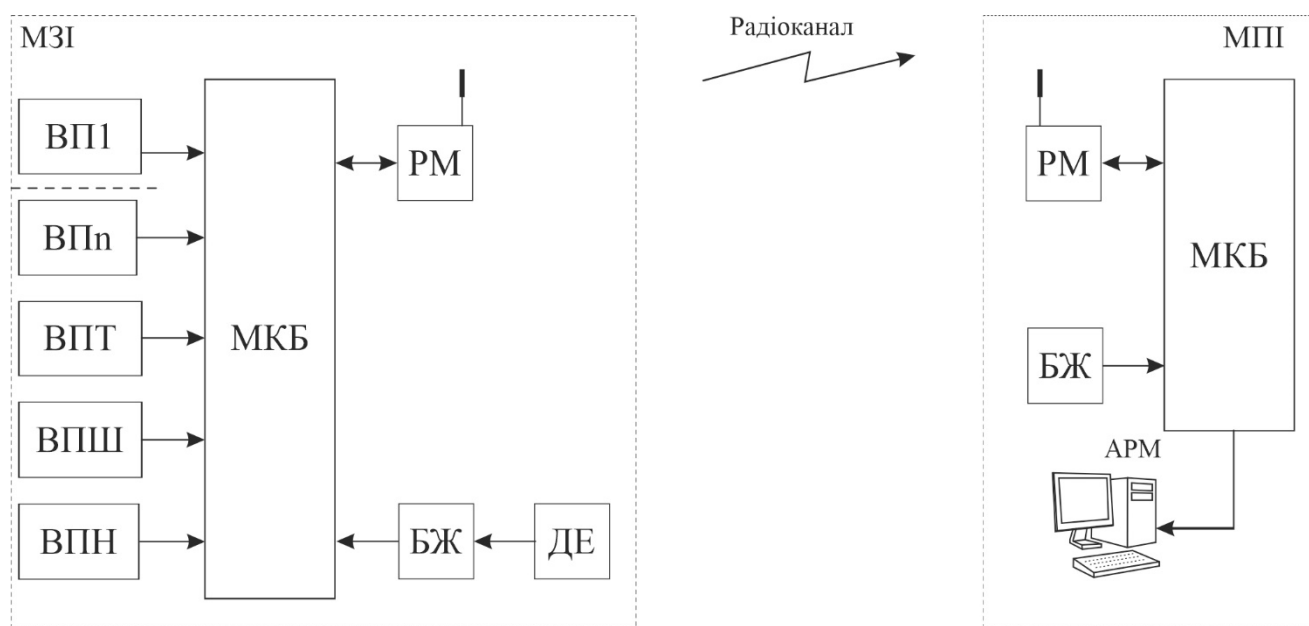


Рисунок 1.4 – Структурна схема СРВІ ОПВ:

їх складу входять вимірювальні перетворювачі: параметрів ПЛ ВПО1-ВПО_n, швидкості вітру (ВПШ), напрямку вітру (ВРН), температури повітря (ВРТ).

Модулі в СРВІ ОПВ зазвичай є однотипними і призначені для виконання специфічних функцій, таких як: моніторинг метеорологічних параметрів навколишнього середовища, раннє визначення появи ОПВ на проводі, вимірювання маси ОПВ на проводі, контроль інтенсивності обледеніння. Вони також проводять первинну обробку та протоколювання отриманих даних із сенсорів. Фізично МЗІ складається з мікроконтролерного блоку (МКБ), набору вимірювальних перетворювачів, що серійно випускаються.

Використання радіоканалу для передачі інформації дозволяє створювати розподілені системи моніторингу, здатні працювати на великих територіях без необхідності використання провідних ліній зв'язку.

Модуль прийому інформації розташовується на диспетчерському пункті енергопостачальної компанії. Він відповідає за прийом, обробку та візуалізацію даних, отриманих від МЗІ. Аналогічно до МЗІ основою цього модулю є мікроконтролерний блок, до якого підключаються радіомодем і персональний комп'ютер.

Отже, СРВІ ОПВ формується з множини МЗІ, що об'єднуються у мережу за допомогою комунікаційного сервера. Який розміщується в ОДС енергопостачальної компанії. Така архітектура має наступні особливості:

- СРВІ ОПВ може бути інтегрована в існуючу інфраструктуру моніторингу енергопостачальної компанії;
- система може функціонувати як автономно, так і в якості підсистеми більш комплексної системи моніторингу;
- можливість легкого розширення системи шляхом додавання нових модулів;
- комунікаційний сервер забезпечує єдину точку збору та обробки даних з усіх модулів;
- здатність взаємодіяти з іншими системами моніторингу, що експлуатуються в енергопостачальній компанії.

Організація системи дозволяє створювати масштабовані та адаптивні системи СРВІ ОПВ, здатні працювати в різних умовах експлуатації.

Аналіз існуючих систем раннього виявлення та ідентифікації ОПВ (СРВІ ОПВ) показав, що їхня структура є досить уніфікованою та відповідає сучасним стандартам систем технічного моніторингу, наближаючись до оптимальної. Основні можливості для подальшого розвитку таких систем полягають у вдосконаленні первинних вимірювальних перетворювачів, які відповідають за виявлення ОПВ на проводах. Покращення чутливості, точності й надійності цих датчиків дозволить підвищити загальну ефективність СРВІ ОПВ.

Отже, необхідно виконати аналітичний огляд первинних вимірювальних перетворювачів появи ОПВ на проводі ПЛ і оцінити можливості їх удосконалення з метою підвищення ефективності роботи СРВІ ОПВ.

1.4. Первинні вимірювальні перетворювачі систем раннього виявлення та ідентифікації ОПВ

На сьогодні розроблену значну кількість ПВП і ВП, що встановлюються в пристрої раннього визначення та ідентифікації ОПВ [10, 16-18].

У роботі [16] представлено сигналізатор початку обмерзання проводів (рис. 1.5). Основою пристрою є відрізок проводу 3 аналогічний до проводу контрольованої ПЛ (рис. 1.6, 7) вздовж в якого вбудовано нагрівальні елементи 4, а по кінцях – термопари 5.

Під час ймовірного утворення ОПВ на нагрівальний елемент періодично подається живлення з інтервалом 0,5-1 год. Якщо на відрізку проводу не утворилися ОПВ, температура його поверхні залишається однаковою з обох сторін, а термоЕРС не виникає. Однак, якщо ОПВ відклалися з навітряного боку відрізка проводу, то вони почнуть танути. Внаслідок цього температура кінця термопари з навітряного боку наближається до 0 °С, тоді як з протилежного боку вона дорівнює температурі нагрітого проводу. Ця різниця температур призводить до виникнення термоЕРС, яка сигналізує про появу ожеледі.

Використання в пристрої горизонтально розташованого відрізка проводу на вертикальній осі, який має такий самий переріз, як і провід ПЛ, дозволяє наблизити умови обмерзання його сенсора до умов обмерзання проводів ПЛ. Це підвищує точність виявлення початку утворення ОПВ на проводі.

Оскільки процес утворення ОПВ починається з появи одностороннього гребінця на навітряному боці проводу, то його розташування перпендикулярно до ожеледונесучого потоку дозволяє отримати відкладення ОПВ на ньому в перші моменти його формування, незалежно від напрямку потоку відносно лінії. Це також підвищує точність визначення моменту початку обмерзання.

Основними недоліками цього пристрою є неможливість визначення типу ОПВ, а також не врахування струму навантаження, що протікає по лінії.

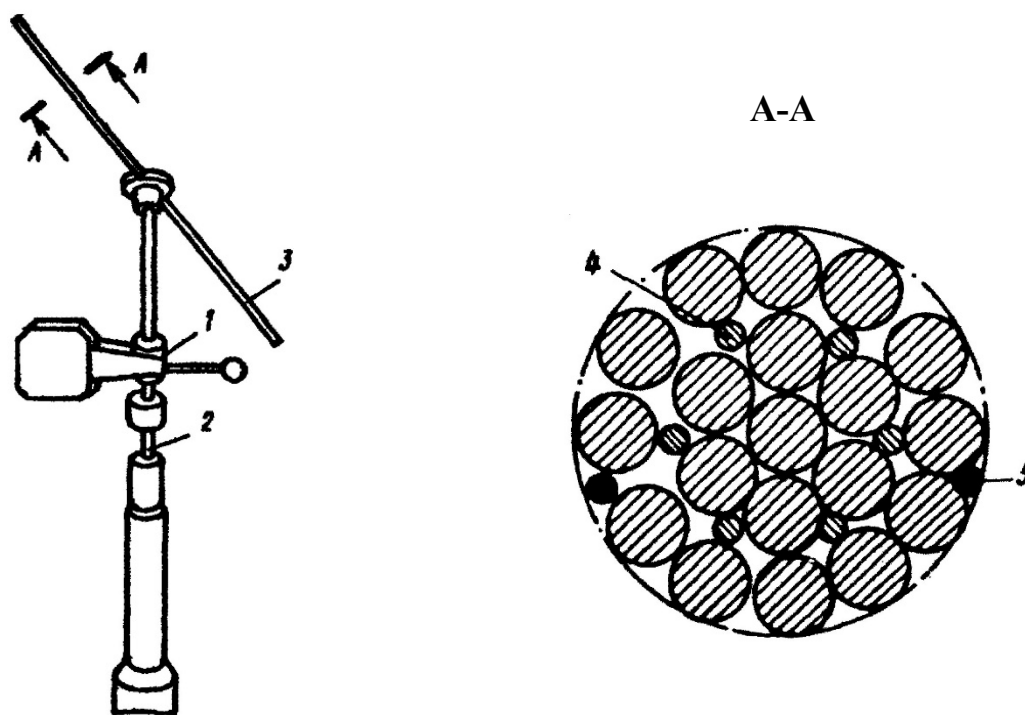


Рисунок 1.5 – Сигналізатор початку обмерзання проводів [16]:

- 1 – установка флюгера; 2 – вертикальна вісь; 3 – відрізок проводу;
4 – нагрівальний елемент; 5 – термопара; 6 – опора ПЛ; 7 – проводи

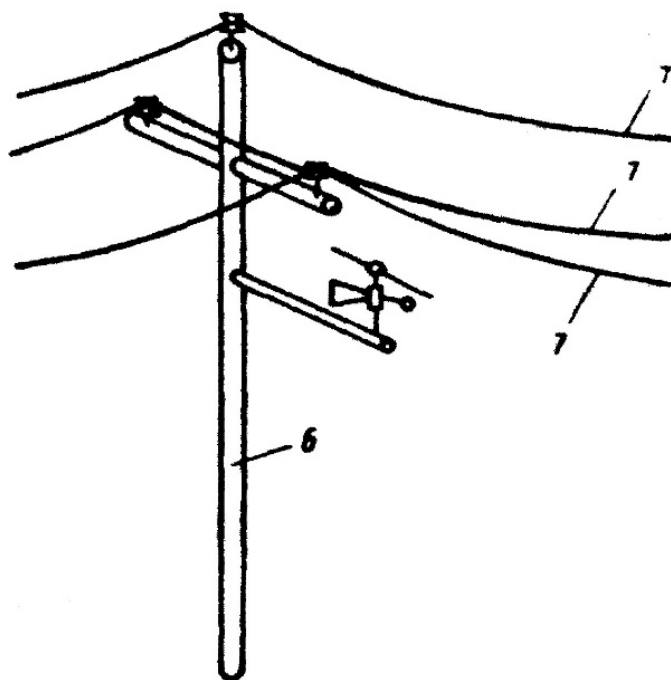


Рисунок 1.6 – Розміщення сигналізатора ожеледі на опорі ПЛ [16]:

6 – опора ПЛ; 7 – проводи ПЛ

У [17] запропоновано пристрій, що містить датчик 1 ожеледі, виконаний у вигляді трубки 2 з прозорого матеріалу на поверхню якої нанесено напівпрозоре дзеркальне металізоване покриття 3, на кінцях якої розташовані металеві наконечники 4, що електрично з'єднані з дзеркальним металізованим покриттям. У середині трубки знаходяться джерело світла 5 і фотоприймач 6. Фотоприймач 6 підключений до входу підсилювача 7, до виходу якого підключена обмотка реле 8, індикатор 9 і стабілітрон 10 (рис. 1.7). Металеві наконечники підключені до джерела живлення 11 через замикаючий контакт із затримкою на розмикання 12 реле 8. Вимірювальний перетворювач ожеледі закріплений на несучій конструкції 13 за допомогою тросів 14.

За відсутності ОПВ на поверхні трубки основна частина світлового потоку від джерела світла проходить крізь неї та розсіюється. Отже, освітленість фотоприймача низька, відповідно вихідний сигнал підсилювача близький до нуля. При появі ожеледно-паморозевих відкладень на поверхні трубки, відбиваюча здатність її поверхні зростає, що приводить до збільшення освітленості фотоприймача, та зростання сигналу на виході фотоприймача і підсилювача.

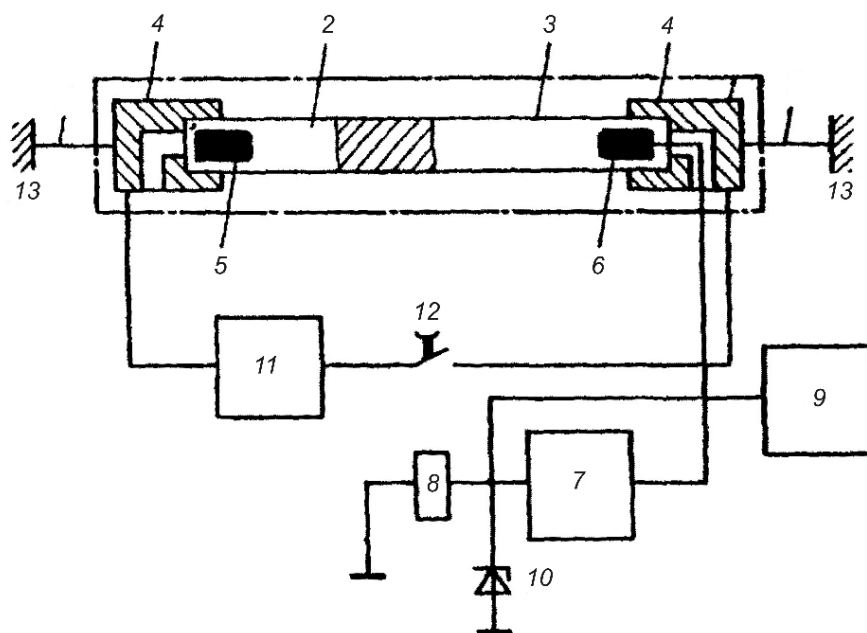


Рисунок 1.7 – Пристрій для виявлення ожеледних відкладень [17]

Про початок ожеледоутворення інформує сигналізатор 9. Оскільки ОПВ утворюється переважно з боку ожеледонесучого потоку, це призводить до аеродинамічної невірноваженості трубки, вона повертається на гнучких тросах, і ожеледь відкладається на наступній частині трубки. Так відбувається до тих пір, поки вся поверхня трубки не покриється ожеледними відкладеннями. При цьому вихідна напруга підсилювача стає достатньою для спрацьовування реле, що підключає джерело живлення до металізованого покриття. Одночасно індикатор інформує про повне обмерзання трубки. Струм, що протікає по металізованому покриттю, починає плавити ожеледні відкладення. У міру видалення ожеледних відкладень вихідна напруга на виході підсилювача знижується, що призводить до руйнування ОПВ та повернення пристрою в початкове положення. Розміщення джерела світла та фотоприймача всередині прозорої трубки з напівпрозорим металізованим покриттям дозволяє забезпечити їх герметизацію і виключити вплив на їх роботу навколишнього середовища.

Недоліком даного пристрою є те, що його вимірювальний перетворювач виконаний з матеріалу фізичні параметри якого відрізняються від параметрів проводу ПЛ. Пристрій буде спрацьовувати при утворенні будь-яких ОПВ, тобто пристрій не дає змоги ідентифікувати тип осаду. Крім того, для його спрацювання необхідне утворення значної кількості ОПВ на ВП, що викличе певну затримку спрацювання індикатора 9.

У [18] описано будову та принцип дії сигналізатора обледеніння проводів ПЛ з більш досконалим вимірювальним перетворювачем (рис. 1.8). Цей пристрій складається з блока живлення 1, обчислювально-керуючого блоку 2 та групи робочих електродів 3, 4. Його особливістю є те, що вимірювальний перетворювач ожеледі виконується з відрізка проводу того ж самого перерізу та марки, що і провід контрольованої ПЛ. При цьому, провідники верхнього повиву проводу використовуються в якості електродів. Один з яких (4) ізолюваний від групи інших електродів 3 за допомогою ізоляційної прокладки 5. Крім того, на вимірювальному перетворювачу встановлено ПВП температури 6.

Пристрій працює наступним чином. Через деякий час після початку процесу ожеледоутворення, з навітряного боку простір між електродами 3, 4 іншими перекриється містком з ОПВ. Також відкладення вкриють частину ПВП температури 6 і обчислювально-керуючий блок 2 зафіксує початок їх утворення, а за значенням температури і електропровідності визначить їх тип. Далі пристрій перейде у режим вимірювання інтенсивності утворення ОПВ, для цього увімкниться нагрів робочих елементів 3, 4. При досягненні електропровідності близько 10^{-15} См/см між елементами 3, 4 обчислювально-керуючий блок 2 вимкне нагрів і почнеться новий цикл утворення ОПВ. За значенням часу плавлення ОПВ, що утворилися на вимірювальному пристрою блок 2 визначить інтенсивність ожеледоутворення.

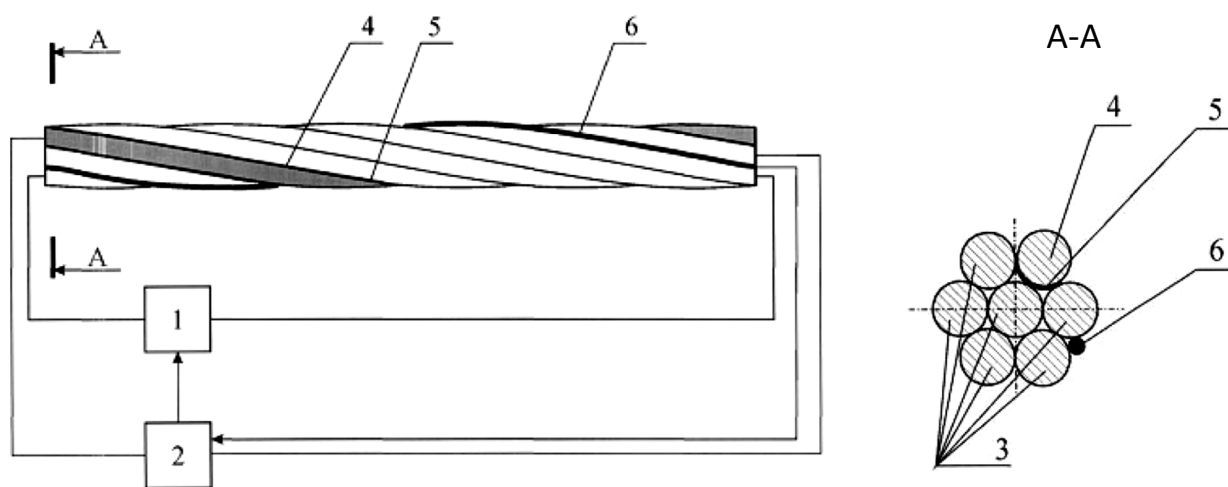


Рисунок 1.8 – Функціональна схема сигналізатора ожеледоутворення [18]

Основним недоліками даного сигналізатора є те, що при контролі процесів утворення ОПВ на магістральних ділянках ПЛ він може давати значну похибку. Коли по проводах повітряної лінії протікають струми, що перевищують 30-50% максимально допустимих значень, їх температура стає дещо вищою за температуру ПВП сигналізатора. Внаслідок чого умови ожеледоутворення на проводі та на вимірювальному перетворювачі сигналізатора будуть відрізнятися, що призведе до виникнення похибки під час контролю процесу ожеледоутворення на проводах повітряної лінії.

Указаного недоліку позбавлений пристрій ранньої ідентифікації типу ОПВ відкладень на проводах ПЛ електропередачі, що запропонований в [19]. Він складається з мікропроцесорного блока 1, блока керування тепловим режимом 5 відрізка проводу 2, блока живлення 3, пристрою зв'язку 4, вимірювального перетворювача струму 5, проводу контрольованої ПЛ 6, відрізка проводу 7, ПВП опору 8 та ВП температури ОПВ 9. Відрізок проводу 7 має той же переріз, що і проводи контрольованої ПЛ 6, з довжиною робочої частини, рівною довжині одного повиву проводу.

Принцип роботи пристрою такий: мікропроцесорний блок 1 отримує сигнал з вимірювального перетворювача струму 5, який пропорційний величині струму в проводі контрольованої ПЛ 6. На основі цього сигналу мікропроцесорний блок 1 формує команду керування для блока управління тепловим режимом 2 відрізка проводу. У результаті через відрізок проводу 7 протікає струм від блока живлення 3 рівний струму в проводі контрольованої ПЛ 6. Одночасно за допомогою ПВП опору 8 здійснюється контроль наявності ОПВ 10 на відрізку проводу 7. При утворенні ОПВ мікропроцесорний блок 1 зафіксує зменшення опору та температуру поверхні відрізка проводу 7 з ОПВ 10. На основі отриманих значень опору та температури ОПВ 10 мікропроцесорний блок 1 ідентифікує тип ОПВ 10. Інформація про тип відкладень на проводі контрольованої ПЛ 6 передається через пристрій зв'язку 4 диспетчеру енергопостачальної компанії.

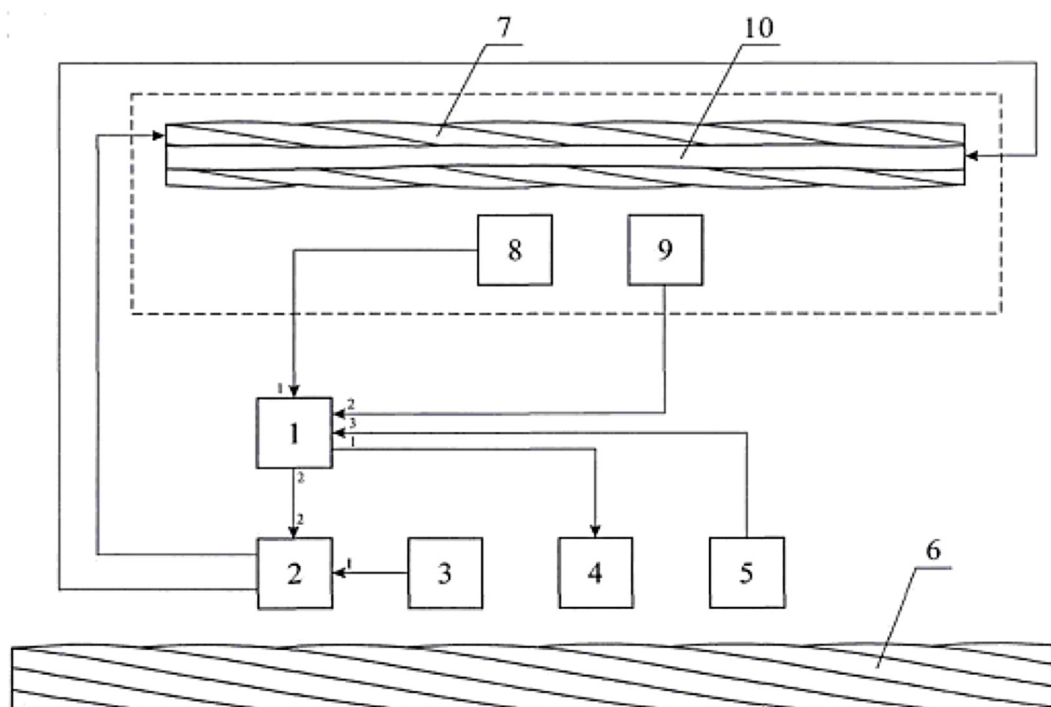


Рисунок 1.7 – Функціональна схема пристрою
ранньої ідентифікації типу ОПВ [19]

Спільним недоліком останніх двох сигналізаторів також є можливість хибного спрацювання внаслідок забруднення їх ПВП іоноутворюючими речовинами, що характерно для ПЛ 10 кВ, що проходять в місцевості з інтенсивним землеробством.

Проведений огляд сигналізаторів об'єднання показує, що для раннього і точного визначення появи ОПВ необхідно виготовляти їх вимірювальні перетворювачі з проводу того ж перетину та марки, що використовується на контрольованій ПЛ, а для магістральних ділянок ще враховувати нагрів ВП внаслідок Джоулевих втрат.

1.5 Постановка задач подальших досліджень

Для підвищення ефективності плавки ожеледі на ПЛ необхідно вдосконалити існуючі системи раннього виявлення та ОПВ. Це дозволить зменшити час прийняття рішення про проведення плавки. Інтеграція такої системи

до комплексної ІСКО забезпечить точне виявлення початку утворення і типу ОПВ на проводі ПЛ.

Для усунення недоліків існуючих СРВІ ОПВ потрібно вдосконалити їхні вимірювальні перетворювачі для виявлення ожеледно-паморозевих відкладень. З цією метою необхідно розробити ПВП для виявлення ОПВ та провести його теоретичне дослідження. Основою такого ВП має стати відрізок проводу контрольованої ПЛ. Для вимірювальних перетворювачів, що встановлюватимуться на магістральних ділянках ПЛ, слід також передбачити можливість досягнення ідентичності температури з температурою проводу ПЛ.

Контроль появи ОПВ на ВП доцільно проводити за допомогою електричного методу. Для цього необхідно провести теоретичне дослідження електричних властивостей містка з ожледено-паморозевих відкладень на первинному вимірювальному перетворювачі. При ідентифікації типу ОПВ необхідно забезпечити врахування можливості його забруднення іоноутворюючими речовинами.

На основі розробленого вимірювального перетворювача необхідно обґрунтувати та створити систему раннього виявлення ОПВ на проводах ПЛ. Ця система повинна легко інтегруватися до комплексних ІСКО, які можуть знаходитися в експлуатації в енергопостачальній компанії.

Виявлення початку утворення ОПВ з випередженням дозволить ефективно використовувати профілактичний підігрів на ПЛ, де це технічно можливо, або ж прискорити процедуру прийняття рішення про проведення плавки ОПВ. Це сприятиме зменшенню часу плавки ожеледі, що, в свою чергу, зменшить втрату механічної міцності проводу внаслідок його нагріву струмами, що значно перевищують робочі. Крім того, це мінімізує ймовірність ожеледно-вітрової аварії та дозволить заощадити електричну енергію.

Загалом, система повинна бути максимально простою, економічно ефективною та універсальною. Вона має легко адаптуватися до використання на ПЛ з різними перерізами сталевалюмінієвих проводів.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що найбільш придатними методами захисту від утворення ОПВ для ПЛ, які знаходяться в експлуатації є активні методи, зокрема плавка ожеледі. Однак, її ефективність і навіть взагалі успішність залежить від своєчасності проведення.

2. Виявлено, що структура комплексних ІСКО є досить уніфікованою та відповідає сучасним стандартам систем технічного моніторингу, наближаючись до оптимальної. Основні можливості для подальшого розвитку таких систем полягають у вдосконаленні первинних вимірювальних перетворювачів виявлення ОПВ. Покращення чутливості, точності й надійності цих датчиків дозволить підвищити загальну ефективність СРВІ ОПВ.

3. Встановлено, що існуючі ПВП систем раннього виявлення і ідентифікації ОПВ не відповідають сучасним вимогам, для їх удосконалення необхідно розробити вимірювальні перетворювачі на базі проводу того ж перетину та марки, що використовується на контрольованих ПЛ. Досягти певного упередження при виявленні на ВП ОПВ можливо шляхом розміщення їх на поворотній флюгарці, з максимально-допустим наближенням до проводу ПЛ.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИХ ВІДКЛАДЕНЬ

2.1 Теоретичне дослідження електричних параметрів льоду

Широкий спектр фізичних параметрів матеріалів складає їхні «електричні властивості». До них належать: провідність постійного струму (DC), провідність змінного струму (AC), діелектрична проникність та ін. Кожна з характеристик має суттєвий вплив на те, як матеріал реагує на дію електричних полів та струмів.

Електропровідність речовини, що виникає в електричному полі:

$$\sigma = \frac{\vec{j}}{\vec{E}}, \quad (2.1)$$

де $\vec{j}$ – густина електричного струму;

$\vec{E}$ – напруженість електричного поля.

Відповідно до принципу суперпозиції зарядів, при перенесенні електричного заряду кількома незалежними носіями загальний переміщений заряд дорівнює сумі зарядів, перенесених кожним окремим носієм:

$$\vec{j} = \sum_{i=1}^k \vec{j}_i = \vec{E} \left(\sum_{i=1}^k \sigma_i \right) = \left(\sum_{i=1}^k |q_i| \mu_i n_i \right) \vec{E}, \quad (2.2)$$

де q – електричний заряд;

μ – рухомість носіїв заряду;

n – концентрація;

$i = 1, 2 \dots k$;

k – кількість типів носіїв заряду.

Підставивши вираз (2.1) у (2.2) отримаємо результуючу провідність, яка рівна сумі часткових провідностей всіх носіїв заряду σ_i

$$\sigma = \frac{\vec{E} \left(\sum_{i=1}^K \sigma_i \right)}{\vec{E}} = \sum_{i=1}^K \sigma_i . \quad (2.3)$$

Залежність електропровідності чистого монокристалічного льоду від частоти при температурі -10°C представлена на рис. 2.1. Ключовою особливістю якої є те, що існує два види електропровідності: низькочастотна – σ_s та високочастотна – σ_∞ , які відрізняються на три порядки.

Характеристична частота переходу $\omega_D = 2\pi f_D$ також відома як дебаєвська частота, залежить від температури. Вона змінюється від 10^5 Гц при 0°C до нуля при дуже низьких температурах. Важливим наслідком цієї частотної залежності є аномальна часова залежність електричного струму $I = f(t)$, що протікає через лід при прикладенні постійного електричного поля. Ця залежність, отримана за тих самих умов, що і залежність $\sigma = f(f)$ на рис. 2.1 і представлена на рис. 2.2.

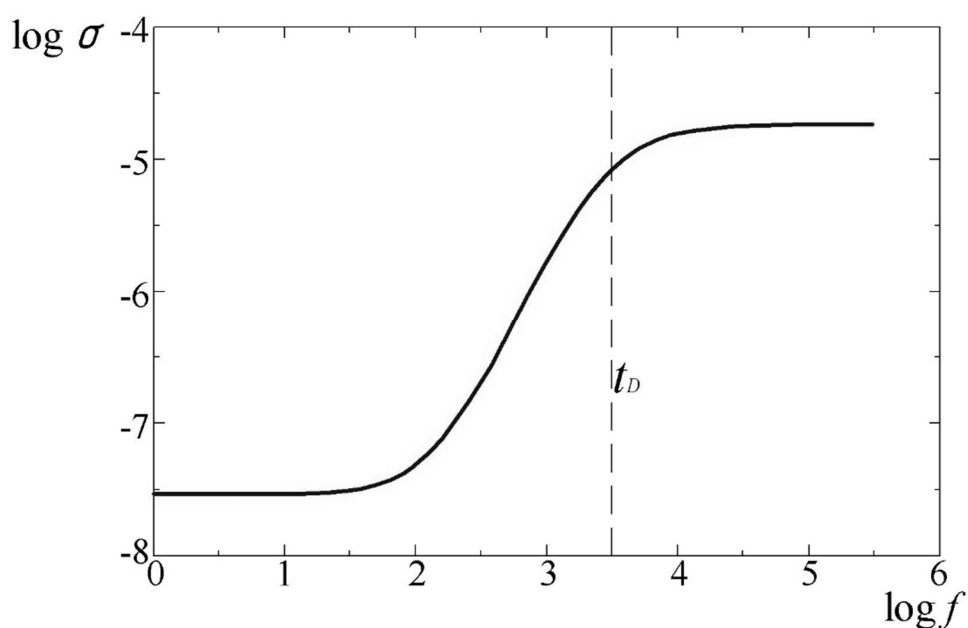


Рисунок 2.1 – Частотна залежність провідності чистого льоду;

σ , $\text{Om}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; f , Гц; $T = -10^\circ\text{C}$ [20]

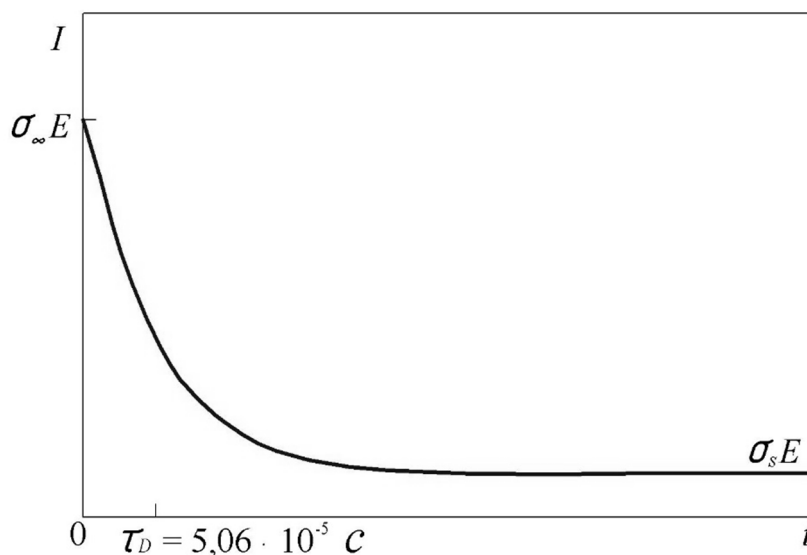


Рисунок 2.2 – Зміна струму в чистому льоді з плином часу [20]:

($E = 0$ для $t < 0$, $E = \text{const}$ для $t \geq 0$, $\sigma_s = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; $\sigma_{\infty} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$)

Залежність електропровідності чистого льоду від температури досить точно описується експоненціальною функцією. Ця залежність стосується як низькочастотної (σ_0), так і високочастотної (σ_{∞}) провідності:

$$\sigma \propto \exp\left(-\frac{E_a}{2k_B T}\right), \quad (2.4)$$

де E_a – енергії активації провідності, ≈ 1 еВ для σ_s та $\approx 1,16$ еВ для σ_{∞} ;

k_B – постійна Больцмана;

T – температура льоду;

Ще однією електричною особливістю льоду є його здатність до поляризації.

У загальному випадку, коли діелектричне середовище знаходиться під впливом зовнішнього електричного поля E , його стан описується вектором поляризації $\vec{P}$:

$$\vec{P} = \sum \vec{p}_i. \quad (2.5)$$

З (2.5) випливає, що вектор поляризації $\vec{P}$ є сумою всіх елементарних електричних диполів $\vec{p}_i$, присутніх в одиниці об'єму діелектрика.

Для глибшого розуміння теорії електричних властивостей льоду, важливо розглянути питання про природу носіїв заряду в льоді.

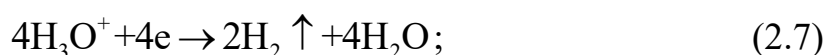
У 1957 році Декроль провів експеримент, який тривалий час вважався вирішальним у доведенні протонної природи провідності льоду [21]. Його основна гіпотеза полягала в наступному:

- якщо у льоді поява носіїв заряду викликана переважно реакцією термоактивації, то можуть відбуватися такі процеси:

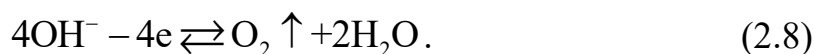


Спираючись на гіпотезу про іонну природу провідності у льоді, Декроль припустив, що при проходженні електричного струму через лід варто очікувати наступні електрохімічні реакції на електродах:

- на катоді виділення водню



- на аноді виділення кисню:



Згідно з реакціями (2.7) і (2.8), у разі іонної провідності, проходження кожних 4-х електронів повинно супроводжуватися утворенням 2-х молекул водню та 1-ї молекули кисню. Це означає, що закон Фарадея для електролізу має виконуватися. Якщо кількість виробленого газу виявиться меншою за теоретично розраховану, то існують інші носії заряду.

Проведення такого експерименту, на постійному струмі, потребує розробки спеціальних електродів. Основна проблема полягає в тому, що сталий електронний обмін між льодом і металевими електродами зазвичай неможливий. При використанні звичайних металевих електродів постійний струм через зразок льоду припиняє протікати після короткого проміжку часу.

Механізм протонної провідності льоду, був підтверджений після проведення експериментів зі спеціальними електродами, що забезпечували вільний обмін зарядами між льодом та металом [22].

Розглянемо модель Джакарда з чотирма видами носіїв зарядів.

Отримаємо математичний опис σ і ϵ як функції частоти для льоду, що містить усі чотири види носіїв зарядів, із зарядом e_i рухливістю μ_i і концентрацією n_i ($i = 1, 2, 3, 4$). Сумарну провідність визначмо, через провідності кожного з носіїв заряду σ_i (часткові провідності):

$$\sigma_i = |e_i| \mu_i n_i, \quad (2.9)$$

де e_i – електричний заряд дефектів.

Головна складність, що обмежує універсальність цього підходу – це вимога однорідності льоду, тобто, зразок льоду має бути нескінченним з однорідним розподілом носіїв заряду

$$\text{grad } n_i = 0. \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) визначає:

- відсутність дифузійних потоків часток, тобто рух носіїв заряду в зразку льоду відбувається лише під впливом електричного поля;
- незалежність функцій від координат, тобто усі функції, що описують систему, не залежать від просторових координат;

- електричну нейтральність льоду, тобто припускається, що в льоді відсутні просторові заряди. Це означає, що загальний заряд у будь-якому макроскопічному об'ємі льоду дорівнює нулю.

Припустимо, що до зразка льоду прикладається змінне електричне поле:

$$\underline{E} = E e^{i\omega t}, \quad (2.11)$$

де ω – циклічна частота, $\omega = 2\pi f$;

i – уявна одиниця;

t – час.

Повна густина електричного струму в комплексній формі:

$$\underline{J} = \underline{J}_{dr} + \underline{J}_{dis}, \quad (2.12)$$

де $\underline{J}_{dr}$ – густина струму дрейфу;

$\underline{J}_{dis}$ – густина струму зміщення:

$$\underline{J}_{dis} = e_0 e_\infty \frac{d\underline{E}}{dt}. \quad (2.13)$$

Результуюча густина струму дрейфу складається з потоків всіх частинок:

$$\underline{J}_{dr} = \sum_{i=1}^4 (e_i \underline{j}_i); \quad (2.14)$$

$$\underline{j}_i = (e_i \underline{E} - n_i \phi \underline{\Omega}) \frac{\sigma_i}{e_i^2}, \quad (2.15)$$

де $n_i = (1, -1, -1, 1)$ де $i = 1, 2, 3, 4$;

ϕ – коефіцієнт, $\phi \equiv 3,85 k_B T r_\infty$;

$\underline{\Omega}$ – конфігураційний вектор

$$\vec{\Omega} = \int_0^t \sum_{i=1}^4 (n_i \underline{j}_i) (n_i \underline{j}_i) dt. \quad (2.16)$$

Система рівнянь (2.12-2.16) з восьми невідомих комплексних функцій $\underline{J}_{dis}, \underline{J}_{dr}, \underline{J}, \underline{\Omega}, \underline{j}_1, \underline{j}_2, \underline{j}_3, \underline{j}_4$ повністю описує поставлену задачу. Знайдемо розв'язок для деякої комплексної функції $\underline{f}(\omega, t)$

$$\underline{f}(\omega, t) = \underline{f}(\omega) e^{\underline{f}\{i\omega t\}} \quad (2.17)$$

де $\underline{f}(\omega)$ – комплексна амплітуда коливань комплексної змінної $\underline{f}$.

Оскільки система (2.12 – 2.16) лінійна, то після виконання заміни в (2.17) і скасування коефіцієнту $e^{\{i\omega t\}}$, отримуємо просту систему алгебраїчних рівнянь. Розв'язавши її отримаємо залежності в комплексній формі [20]:

- провідності льоду

$$\underline{\sigma}(\omega) = \frac{\underline{I}}{\underline{E}} = \sigma_s - \frac{i\omega\tau_D(\sigma_\infty - \sigma_s)}{1 - i\omega\tau_D}; \quad (2.18)$$

- діелектричної проникності льоду:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \frac{\underline{J}}{\varepsilon_0 \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}} = \varepsilon_s + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 - i\omega\tau_D}, \quad (2.19)$$

де $\tau_D = \omega_D^{-1}$ – дебаєвський час релаксації.

Введемо нові позначення:

$$\sigma_{\infty} = \sum_{i=1}^4 \sigma_i, \quad (2.20)$$

$$e^2/\sigma_s = \frac{e_1^2}{\sigma_1 + \sigma_2} + \frac{e_3^2}{\sigma_3 + \sigma_4}, \quad (2.21)$$

$$\tau_D^{-1} = \omega_D = \phi \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{e_1^2} + \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{e_3^2} \right], \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{\infty} + \frac{1}{\varepsilon_0 \phi} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{e_1} - \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{e_3} \right)^2 \bigg/ \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{e_1^2} - \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{e_3^2} \right)^2. \quad (2.23)$$

З рівнянь (2.18) і (2.19) легко отримати дійсні частини σ і ε [20]:

$$\sigma'(\omega) = \operatorname{Re}[\sigma(\omega)] = \sigma_s + \frac{(\sigma_{\infty} - \sigma_s)(\omega\tau_D)^2}{1 + (\omega\tau_D)^2}, \quad (2.24)$$

$$\varepsilon'(\omega) = \operatorname{Re}[\tilde{\varepsilon}(\omega)] = \varepsilon_s + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau_D)^2}. \quad (2.25)$$

Асимптоти для (2.23) і (2.24), відповідно:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \sigma'(\omega) = \sigma_s; \quad \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sigma'(\omega) = \sigma_{\infty}; \quad (2.26)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon'(\omega) = \varepsilon_s; \quad \lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty}; \quad (2.27)$$

Графіки функцій $\sigma'(\omega)$, і $\varepsilon'(\omega)$ зображені на рис. 2.1 і рис. 2.4; побудовані для значень параметрів $\tau_D = 5,06 \cdot 10^{-5}$ с, $\sigma_{\infty} = 1,9 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1} m^{-1}$, $\sigma_s = 3 \cdot 10^{-8} \Omega^{-1} m^{-1}$, $\varepsilon_{\infty} = 3,16$, $\varepsilon_s = 100,8$.

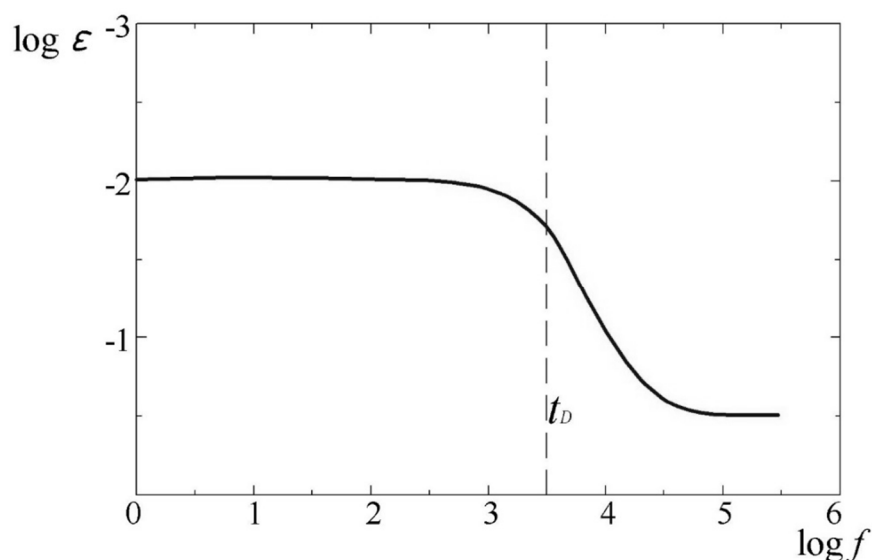


Рисунок 2.3 – Частотна залежність діелектричної постійної чистого льоду при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [20]

Перехід від низькочастотних (s) до високочастотних (∞) значень відбувається поблизу дебаєвської частоти $f_D = \omega_D/2\pi = 1/2\pi\tau_D = 3,14$ кГц (рис. 2.1, рис. 2.3).

З метою кращого розуміння розглянемо еквівалентний електричний ланцюг (схему заміщення), що має ту ж саму частотну характеристику як куб льоду зі сторонами 1 м (рис. 2.4).

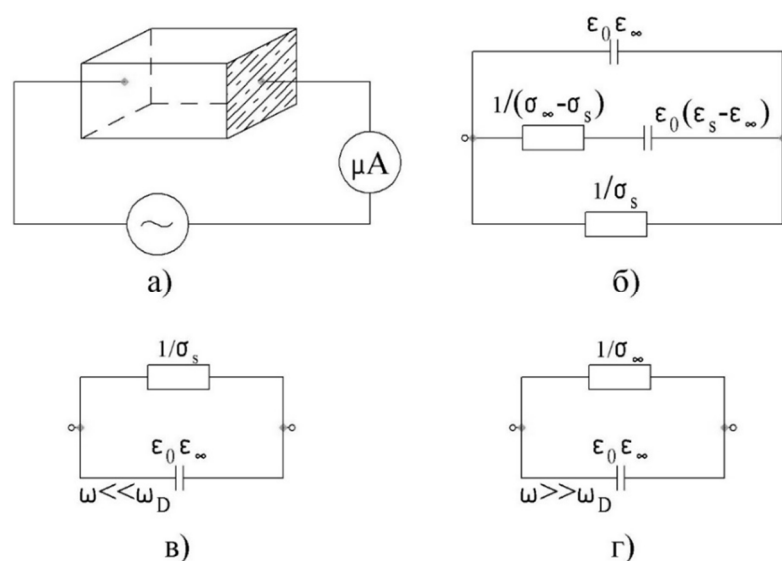


Рисунок 2.4 – Вимірювальний ланцюг зі зразком льоду (а) та його електричні схеми заміщення (б, в, г)

З рівняння (2.19) випливає, що високочастотна провідність σ_∞ визначається найбільшою частковою провідністю серед провідностей σ_i . Зазвичай у чистому льоді при $T \geq -50^\circ\text{C}$ це σ_4 , тобто провідність L -дефектів. Той факт, що σ_∞ включає всі σ_i , означає, що на високих частотах ($\omega \gg \omega_D$) носії заряду переміщуються незалежно один від одного. Це можна представити як паралельне з'єднання (рис. 2.5, а) для частот, набагато менших за ω_D , а також для постійних струмів, де підсумовуються зворотні значення провідностей (опорів).

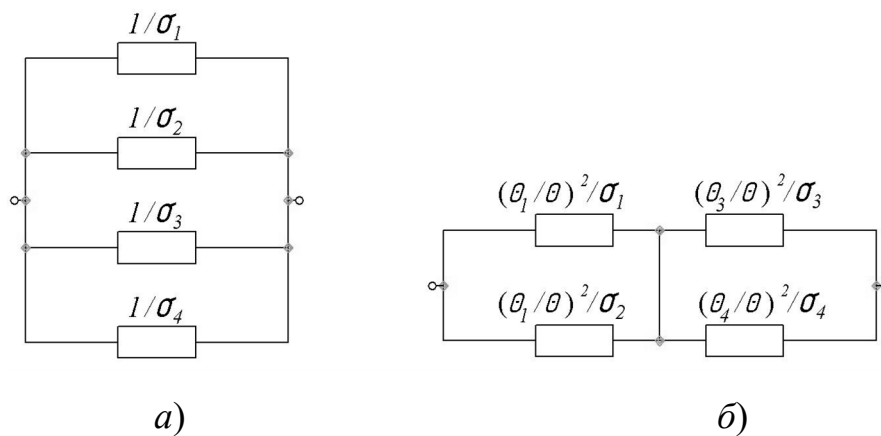


Рисунок 2.5 – Еквівалентний електричний ланцюг для високочастотної провідності σ_∞ (а) і для низькочастотної провідності σ_s (б) льоду

Рівняння (2.20) записано для іонів $\sigma_1 + \sigma_2$ (H_3O^+ і OH^-) і дефектів Бьєррума $\sigma_3 + \sigma_4$ ($D + L$). Це є типовим для послідовних схем (рис. 2.5, б). Таку провідність σ_s контролює менша з двох провідностей: іонна $\sigma_{ions} = \sigma_1 + \sigma_2$ та провідність дефектів Бьєррума $\sigma_B = \sigma_3 + \sigma_4$. У чистому льоді при відносно високих температурах ($T > -50^\circ\text{C}$) це – іонна провідність. Характерно особливістю σ_s є те, що у випадку постійного струму потоки носіїв повинні бути сталими. Так як E постійна, тоді Ω також повинен бути постійним, як можна побачити з (2.15). Це можливо лише за умови:

$$j_1 - j_2 - j_3 + j_4 = 0 \quad (2.28)$$

ввівши позначення іонної провідності

$$J_{ion} = e_1 [j_1 - j_2] \quad (2.29)$$

та провідності дефектів Бьєррума

$$J_B = e_3 [j_3 - j_4], \quad (2.30)$$

отримаємо

$$\frac{J_{ion}}{e_1} = \frac{J_B}{e_3} \quad (2.31)$$

тобто, іонний струм і струм дефектів Бьєррума приблизно однакові. За умови виконання рівності (2.31) всі водневі зв'язки час від часу відновлюють початкове положення. Це відбувається тому, що коли іонний струм «захоплює» ланцюги водневих зв'язків, то струм дефектів Бьєррума «розмикає» їх, і навпаки. Використовуючи еквівалентний електричний ланцюг льоду (рис. 2.5, б), легко отримати часову залежність струму через зразок льоду, коли прикладено прямокутний імпульс напруги ($E = 0$ при $t < 0$; $E = \text{const}$ при $t \geq 0$), як зображено на рис. 2.2.

Для проведення електричних вимірювань провідності льоду зразки мають бути поміщені в специфічні електричні кола. Це неможливо зробити без створення таких видів поверхонь розділу, як *лід/діелектрик*, *лід/метал*, *лід/напівпровідник*, *лід/протонний провідник*. Наявність цих міжфазних поверхонь спричиняє значні зміни в дисперсіях $\sigma(\omega)$ і $\varepsilon(\omega)$ (рис. 2.1 і рис. 2.3). Проте в цих експериментах з'являється додаткове розсіювання, що дозволяє визначити концентрацію і рухливість численних носіїв заряду в льоді. На практиці надзвичайно важко досягти ефективного електричного перенесення заряду між металевими електродами (які є електронними провідниками) і льодом, який є протонним провідником.

Набагато легше повністю запобігти такому обміну, розміщуючи тонку діелектричну плівку між льодом і електродом. Чим тонша плівка, тим менша похибка вимірювання.

Тонкий шар оксиду Al_2O_3 на поверхні алюмінієвого електрода або SiO_2 на поверхні кремнієвого електрода може успішно виконувати роль такої тонкої плівки. Ці електроди відмінно блокують перенесення заряду. Електричні властивості льоду з такими електродами розглянуто в [23].

Експериментально $\varepsilon(\omega)$, визначається з ємності $C(\omega)$ конденсатора в якому зразок льоду досліджується як діелектрик

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{LC(\omega)}{\varepsilon_0 S} \quad (2.32)$$

де ми вважаємо, що прямокутний зразок льоду довжини l , спрямований уздовж координати x і має поперечний переріз S . Два електрода блокування мають ту ж саму область S і розташовані в $x = 0$ і $x = l$. Проблему визначення $\varepsilon'(\omega)$ тоді зводять до визначення $C(\omega)$ площинного конденсатора. Припустимо, що в зразка льоду є ідеальні блокуючі електроди, які пов'язані з каналом постійного струму так, щоб поверхнева густина електричного заряду на блокуючих електродах змінювалася залежно від часу відповідно до гармонійного закону $\propto e^{\{-i\omega t\}}$.

Частотна залежність для речовин різної густини зображена на рис. 2.6.

Вимірювання дисперсійних кривих $\sigma(\omega)$ дозволяє визначити значення низькочастотної (σ_s) і високочастотної (σ_∞) провідностей. За вимірюваннями σ_∞ і σ_s при різних температурах можуть бути розраховані енергії активації $E_{a\infty}$ і E_{as} . Оскільки $\sigma \propto n \cdot \mu$, ці енергії активації повинні бути рівні сумам:

- енергія активації створення носіїв заряду (E_{aB} і E_{ai} для дефектів Б'єррума та іонів, відповідно);
- енергіям активації руху дефектів E_{mi} .

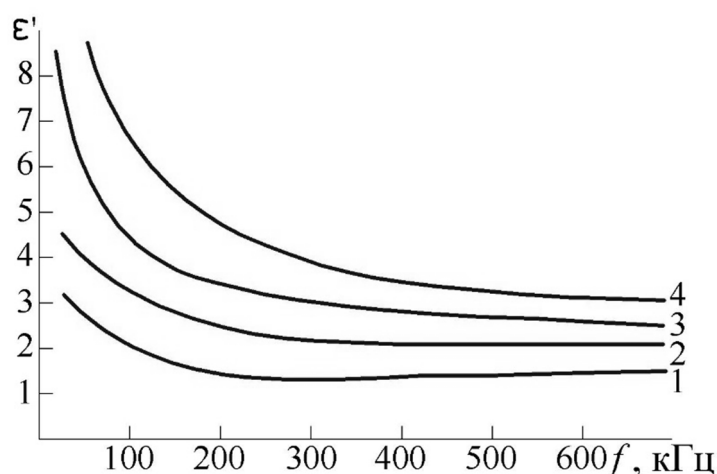


Рисунок 2.6 – Частотна залежність діелектричної проникності льоду:

1 – $\rho = 0,1 \text{ г/см}^3$; 2 – $\rho = 0,3 \text{ г/см}^3$; 3 – $\rho = 0,46 \text{ г/см}^3$; 4 – $\rho = 0,73 \text{ г/см}^3$

Експерименти, проведені з льодом, легованим різними домішками, дозволяють визначити концентрації носіїв заряду i , таким чином, розділити значення n і μ , а також енергії активації утворення та руху носіїв заряду. Результати таких вимірювань наведено в табл. 2.1.

Найкраще встановлені параметри провідності для чистого монокристалічного льоду – високочастотна провідність σ_∞ та її енергія активації $E_{a\infty}$. Хороша відтворюваність цих величин, визначених провідністю більшості носіїв заряду (L -дефектів для $T \geq -50^\circ\text{C}$), пов'язана, по-перше, з високочастотними вимірюваннями незалежно від типу електрода. По-друге, порівняно легко досягти рівня чистоти льоду, коли ці параметри визначаються внутрішніми носіями заряду і не залежать від залишкових домішок. Те ж саме стосується τ_D і E_v , оскільки, згідно з (2.22) і (2.23), $\tau_D \approx \tau_\infty$ завжди, коли $\sigma_\infty \gg \sigma_s$, тобто коли типи більшості носіїв заряду чітко відрізняються. Ці чотири значення при $T = -10^\circ\text{C}$ такі:

$$\left. \begin{aligned} E_{a\infty} &= (0,58 \pm 0,03) \text{ eV}; & E_\tau &= (0,58 \pm 0,01) \text{ eV} \\ \sigma_\infty &= (1,8 \pm 0,2) 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}; & \tau_D &= 5 \cdot 10^{-5} \text{ с} \end{aligned} \right\}. \quad (2.33)$$

Дисперсія Дебая відтворюється дуже добре в чистих однорідних кристалах. У табл. 2.1 представлені чисельні значення провідності льоду.

Таблиця 2.1 – Чисельні значення по високочастотній (σ_{∞}) і статичній (σ_s) провідності льоду

Тип льоду	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\infty}, \text{Ом}\cdot\text{м}^{-1}$	$\sigma_s, \text{Ом}\cdot\text{м}^{-1}$	$E_{a\infty}, \text{eV}$	E_{as}, eV	E_{ai}, eV	E_{ab}, eV	$\tau_D, \text{с}$	Джерело
одиначний кристал	від -4 до -56		$6,4\cdot 10^{-10}$ (при $-10\text{ }^\circ\text{C}$)	$0,53\pm 0,01$	$0,70\pm 0,07$	1,4			[24]
чотиризонне очищення	-10		$4\cdot 10^{-9}$		0,54	1,08			[25]
одиначний кристал			$2,5\cdot 10^{-8}$ (0 до -20) $^\circ\text{C}$		0-0,06	1,1		$5,18\cdot 10^{-5}$ (-10°C)	[26]
одиначний кристал	-10		10^{-7}	0,37					[27]
одиначний кристал				0,624				$5\cdot 10^{-5}$	[28]
одиначний кристал	0		$2,5\cdot 10^{-8}$					$1,8\cdot 10^{-5}$	[29]
чисті моно-кристали	-10	$1,6\cdot 10^{-5}$	$1,1\cdot 10^{-7}$	0,575	0,61	1,22	0,68	$2\cdot 10^{-5}$ (0°C)	[30]
одиначний кристал	-10		$(1,1\pm 0,5)\cdot 10^{-8}$	$0,76\pm 0,06$					[31]
одиначний кристал			$2,3\cdot 10^{-8}$		0,49	0,98			[32]

Значно більший розкид спостерігається в даних вимірювань статичної провідності σ_s і її енергії активації E_{as} . Значення E_{as} знаходяться в діапазоні від 0 до 0,7 еВ і σ_s (при -10°C) коливається в межах від 10^{-6} до $6 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Це пояснюється труднощами очищення льоду до рівня, при якому внутрішні іони переважають над іонами, що надаються домішками. З табл. 2.1. видно, що спостерігається наступна загальна тенденція: чим більш чистіший лід і чим менше σ_s , тим більше E_{as} .

Отже, величина енергії активації для створення електронної пари складає $E_{as} = 0,96 \text{ еВ}$ [33], і її варто розглядати як мінімальну межу цієї величини. За верхню межу можливо прийняти $E_{ai} = 2E_{as} = 1,4 \text{ еВ}$ відповідно до [24].

Проведене дослідження показує, що електричним методом можливо виявляти ОПВ на алюмінієвих електродах ПВП.

2.2 Розробка первинного вимірювального перетворювача обледеніння проводу повітряної лінії

2.2.1. Обґрунтування конструкції ПВП

У 1-му розділі роботи було встановлено, що ефективність плавки ожеледі на повітряних лініях (ПЛ) передусім залежить від якості інформаційного забезпечення. Запропоновані системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на ПЛ 10 кВ розподільних мереж не відповідають актуальним вимогам. Однією з причин цього є чутливість ПВП цих систем до зовнішніх забруднень, як-от пил, сіль чи інші атмосферні частинки.

Відомо, що під час експлуатації ПЛ тверді частинки пилу осідають на їхні конструктивні елементи, формуючи шар забруднення. Основними джерелами техногенних забруднень, небезпечних для ПЛ, є підприємства металургійної, гірничодобувної, хімічної, нафтогазопереробної та електроенергетичної (ТЕС, ТЕЦ) галузей промисловості.

Забруднюючі речовини викидаються підприємствами в різних агрегатних станах, а розміри їхніх частинок варіюються в широкому діапазоні. Рівень

забруднення елементів ПЛ, спричинений діяльністю промислових підприємств, насамперед визначається їхніми технологічними процесами та залежить від відстані до джерел забруднення і рози вітрів. Крім того, важливими факторами є вологість повітря та частота виникнення сприятливих умов для повітряної інверсії.

Особливу небезпеку становлять забруднення від підприємств, ТЕС, ТЕЦ і котелень, які використовують вугілля як паливо. Їхні викиди містять частинки сажі, що відзначаються високою електропровідністю.

У регіонах з інтенсивним сільськогосподарським виробництвом головним джерелом забруднення є пил, що здіймається з ґрунту і осідає на ПЛ 10 кВ. Для цих територій характерне використання значних обсягів мінеральних добрив та пестицидів, а також широке застосування сільськогосподарської техніки. Мінеральні добрива та пестициди суттєво підвищують вміст розчинних електропровідних сполук у ґрунті до 0,3-1,5%, а сільськогосподарська техніка під час обробки ґрунту піднімає ці частинки в повітря. Особливістю таких забруднювачів є відсутність цементації, внаслідок чого поверхня проводів забруднюється нерівномірно: верхня частина дротин виявляється відносно чистою внаслідок очищення дощами та вітром, тоді як у впадинах між ними накопичується основна частина забруднення. У залежності від кліматичного та географічного району на проводах ПЛ може виникати досить стійкий шар забруднення до дії атмосферної вологи.

Наявність сухого шару забруднення практично не впливає на опір ПВП ОПВ. Однак, ситуація різко змінюється, коли іоноутворюючі речовини (кислоти, луги, солі), що входять до складу забруднення звожуються атмосферною вологою. Внаслідок зволоження забруднення на ПВП утворюється електроліт, що призводить до зростання його міжелектродної провідності. Це може помилково імітувати наявність реальних відкладень ожеледі.

Тому ПВП ОПВ слід будувати на основі двох відрізків проводу контрольованої ПЛ, з довжиною вимірювальної частини, що рівна одному повиву проводу [18, 19]. Причому один з них має бути захищеним від природних та техногенних забруднень.

На ПЛ розподільної мережі 10 кВ застосовуються лише багатодровові проводи, що мають конструкцію схожу на канат (рис. 2.7). Такі проводи мають більшу механічну міцність і гнучкість, ніж одножильні аналогічного перерізу.

Шар дротин намотаний навколо центральної жили називається повивом. При виготовленні проводу проводиться скручування дротин у повиві, внаслідок чого вони набувають гвинтоподібної (спіральної) форми. Цим забезпечується його стійкість до розкручування. Відстань по осі проводу між двома точками жил, що знаходяться на одній утворюючій, називається кроком повиву h .

У розподільних мережах використовуються сталевалюмінієві проводи марки АС. У них стальне ядро та алюмінієві дротини мають однаковий переріз (рис. 2.7).

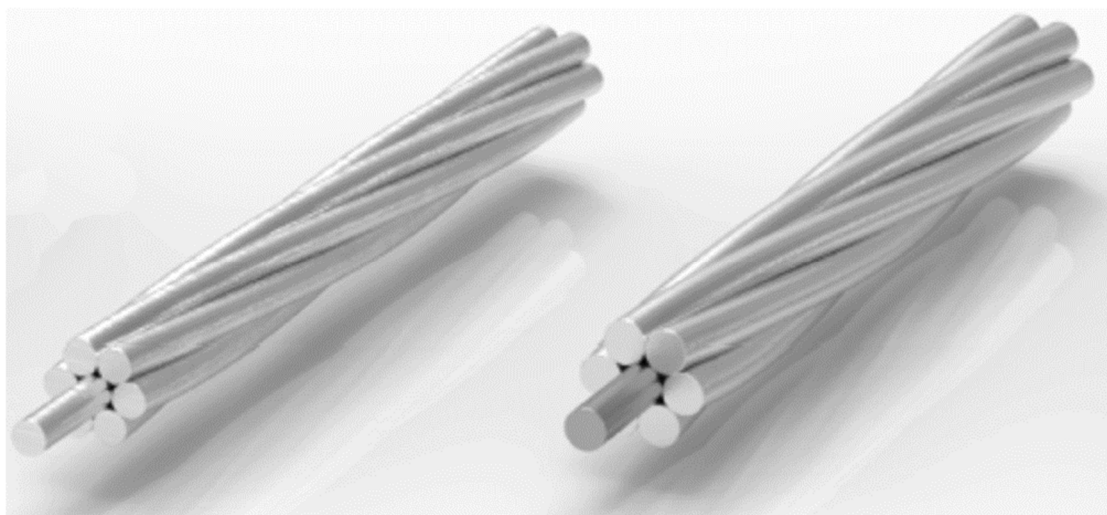


Рисунок 2.7 – Проводи різного перерізу марки АС

Вимірювальний перетворювач ОПВ системи складається з двох однакових відрізків проводу тієї ж марки та перерізу, що і провід контрольованої ПЛ (рис. 2.8). У кожному з відрізків проводу ізолюється одна дротина верхнього повиву 1 (2). Таким чином, утворюються дві пари вимірювальних електродів 1-3, 2-4. Перший відрізок проводу утворює первинний вимірювальний перетворювач ОПВ, який знаходиться просто неба. Другий відрізок проводу розміщується в захисній оболонці зі спеченого металу, яка завдяки пористості має високу повітро- вологопроникність.

Захищений ПВП знаходиться в умовах, де він ізолюваний від зовнішніх впливів, таких як опади, пи́л і сольові відкладення. Це дозволяє використовувати його як еталон для вимірювань, так як його опір буде стабільним і не піддаватиметься зміні внаслідок природного та техногенного забруднення.

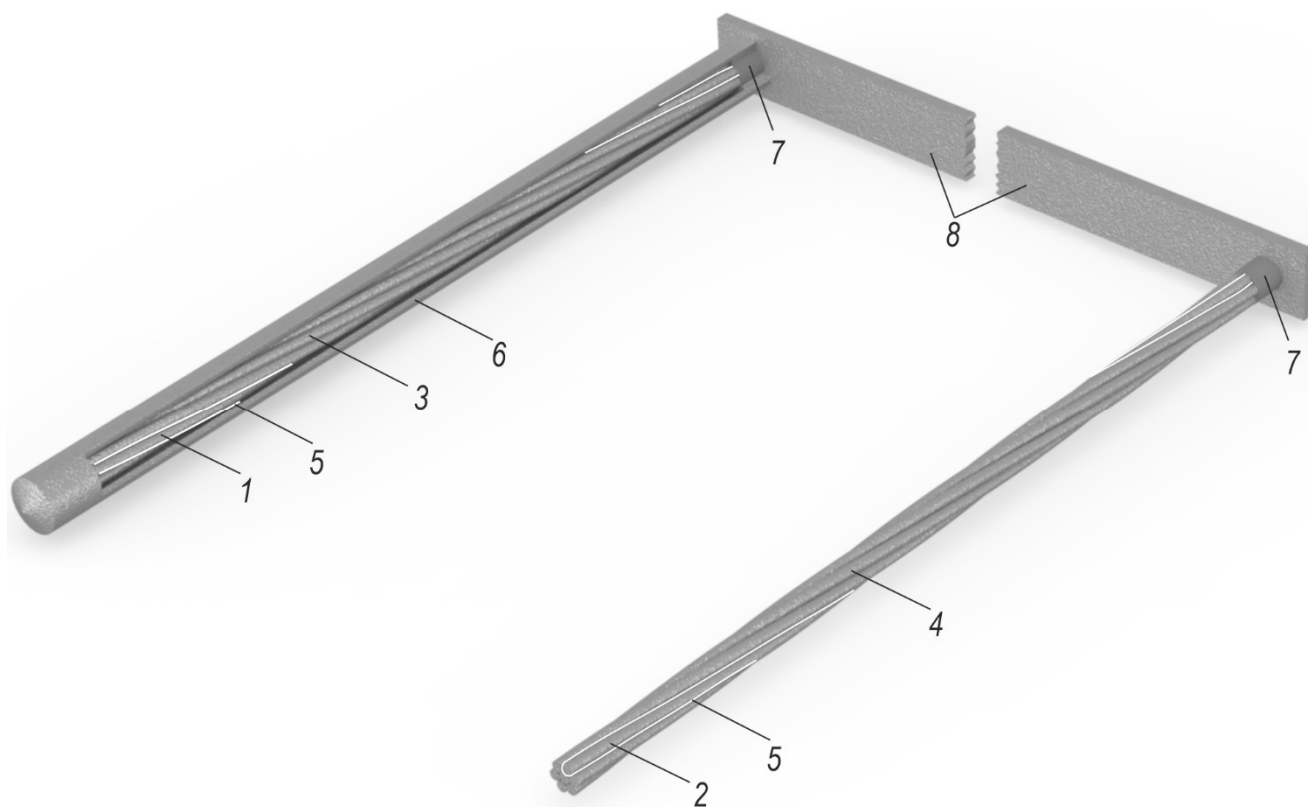


Рисунок 2.8 – Конструкція ПВП ОПВ:

1, (2) – однодротові електроди; 3 (4) – багатодотові електроди;
5 – електроізоляційна прокладка; 6 – захисна оболонка;
7 – ізолятор; 8 – кріпильні планки

Параметри активної частини ПВП ожеледо–паморозевих відкладень для проводів марки АС різного перерізу наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Геометричні розміри ПВП на базі проводів різних перерізів

Марка проводу	Діаметр ПВП, мм	Кратність кроків скручування	Довжина ПВП, мм	Кількість дротин у проводі, шт.	Питомий опір проводу, Ом/м	Опір алюмінієвої частини ПВП, Ом
АС 50	9,6	28	269	7	$6,0298 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
АС 70	11,4	28	319	7	$4,2859 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
АС 90	13,5	28	378	7	$3,0599 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$

2.2.2. Обґрунтування довжини електродів ПВП ОПВ

Необхідну довжину ПВП можливо визначити як довжину гвинтової лінії, що обмежена двограним кутом АОВ (рис. 2.9).

Параметричні рівняння гвинтової лінії:

$$x = R \cos t, \quad (2.34)$$

$$y = R \sin t, \quad (2.35)$$

$$z = \frac{h}{2\pi} t, \quad (2.36)$$

де R – зовнішній радіус дротин верхнього повиву проводу;

h – довжина ПВП;

$$t \in [0; 2\pi].$$

Довжина гвинтової лінії, що лежить між гранями кута АОВ дорівнює куту φ :

$$\begin{aligned} l(\varphi) &= \int_0^{\varphi} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt = \\ &= \int_0^{\varphi} \sqrt{R^2 \cos^2 t + R^2 \sin^2 t + \frac{h^2}{(2\pi)^2}} dt = \\ &= \int_0^{\varphi} \sqrt{R^2 + \frac{h^2}{4\pi^2}} dt = \sqrt{R^2 + \frac{h^2}{4\pi^2}} \varphi \end{aligned} \quad (2.37)$$

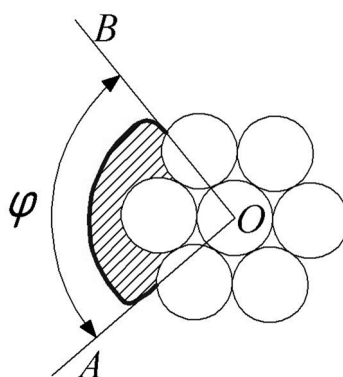


Рисунок 2.9 – Переріз ПВП з ОПВ зі схематичним зображенням кута φ

Таким чином, залежність $l(\varphi)$ є прямою пропорційністю, тому проведемо розрахунки довжини ОПВ для різних перерізів проводу типу АС за двома значеннями кута $\varphi = 0$ та $\varphi = 2\pi$. Результати розрахунків представлені у вигляді табл. 2.3.

За результатами розрахунків табл. 2.3. побудуємо сімейство прямих $l(\varphi)$ для проводів різних перерізів, що зображено рис. 2.10.

Таблиця 2.3 – Розрахунки довжини ОПВ для проводів різних перерізів

Марка проводу	Діаметр ПВП, мм	Довжина ПВП, мм	Довжина електродів при $\varphi = 2\pi$, мм
АС-35	8,4	235	417
АС-50	9,6	269	478
АС-70	11,4	319	566
АС-90	13,5	378	671

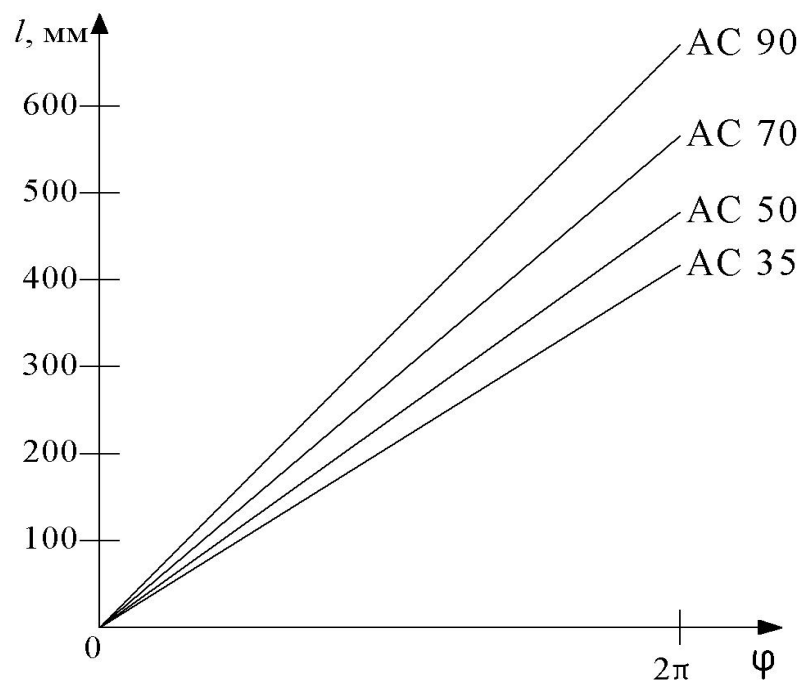


Рисунок 2.10 – Залежність активної довжини електродів ПВП ОПВ для різних значень кута φ

2.2.3. Моделювання опору ОПВ на електродах ПВП

Струм, що протікає через поверхню електроду ПВП:

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{s} = \int_S \sigma \vec{E} d\vec{s}, \quad (2.38)$$

де $\vec{j}$ – вектор густини струму;

$d\vec{s}$ – елемент поверхні;

σ – питома провідність ожеледно-паморозевого відкладення складає: для ожеледі – $10^9 - 10^{10}$ См/см; для паморозі – $10^{10} - 10^{11}$ См/см, для інію – $10^{11} - 10^{13}$ См/см; дощу, туману – 10^{14} См/см [34];

$\vec{E}$ – вектор напруженості електричного поля всередині ОПВ

$$\vec{E} = -grad\varphi. \quad (2.39)$$

Тоді, згідно до закону Ома для постійного струму питома провідність ОПВ на ПВП визначається як:

$$g_0 = \frac{I}{\vec{E}} = \frac{\int_S \sigma (-grad\varphi) d\vec{s}}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad (2.40)$$

де φ_1, φ_2 – значення потенціалів на електродах (за напрямом струму);

φ – потенціал електричного поля у точці ОПВ з координатами (x, y) ;

$d\vec{s}$ – елемент поверхні.

Отримана провідність за виразом (2.40) є провідністю ОПВ довжини.

Провідність ПВП з ОПВ складе:

$$G_{\text{ПВП}} = l_{\text{а.ПВП}} \cdot g_0 = l_{\text{а.ПВП}} \frac{\int \sigma (-\text{grad} \varphi) d\vec{s}}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad (2.41)$$

де $l_{\text{а.ПВП}}$ – активна довжина електродів ПВП, згідно (2.37).

Таким чином, для визначення провідності ОПВ на ПВП ($G_{\text{ПВП}}$) необхідно знайти поле потенціалів у ньому. З цією метою в проведемо комп'ютерне моделювання поля потенціалів в ОПВ за методикою представленою в [34].

На рис. 2.11 зображено 3D-модель первинного вимірювального перетворювача з одностороннім шаром ожеледно-паморозевого відкладення.

Рівняння Лапласа у загальному вигляді для провідного середовища, де відсутня стороння напруженість у полі (потенційне поле):

$$\nabla^2 \varphi = 0, \quad (2.42)$$

де φ – потенціал точки поля.

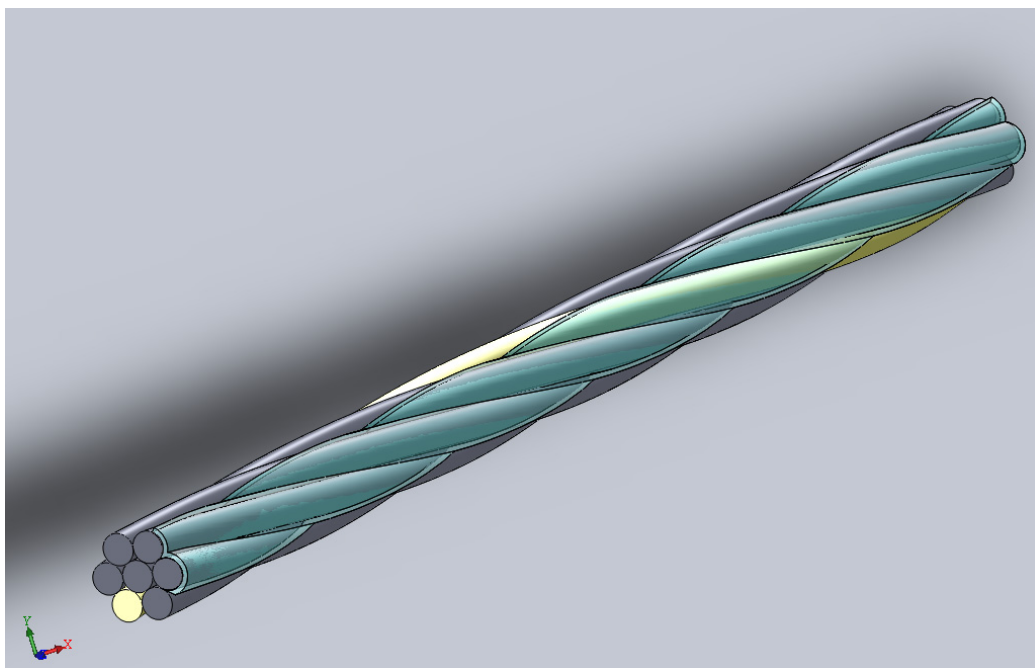


Рисунок 2.11 – 3D-модель ПВП з одностороннім ОПВ

Рівняння Лапласа у декартових координатах матиме вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (2.43)$$

Доріжка з ожеледно-паморозевого відкладення буде обмежена двограним кутом АОВ (рис. 2.12). ПВП має складну просторову структуру, що має вісь симетрії на гвинтовій лінії. З метою спрощення, поставлену задачу представимо в двовимірній постановці (рис. 2.13)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.44)$$

і розглядаємо переріз шару ОПВ гранню двогранного кута рис. 2.13.

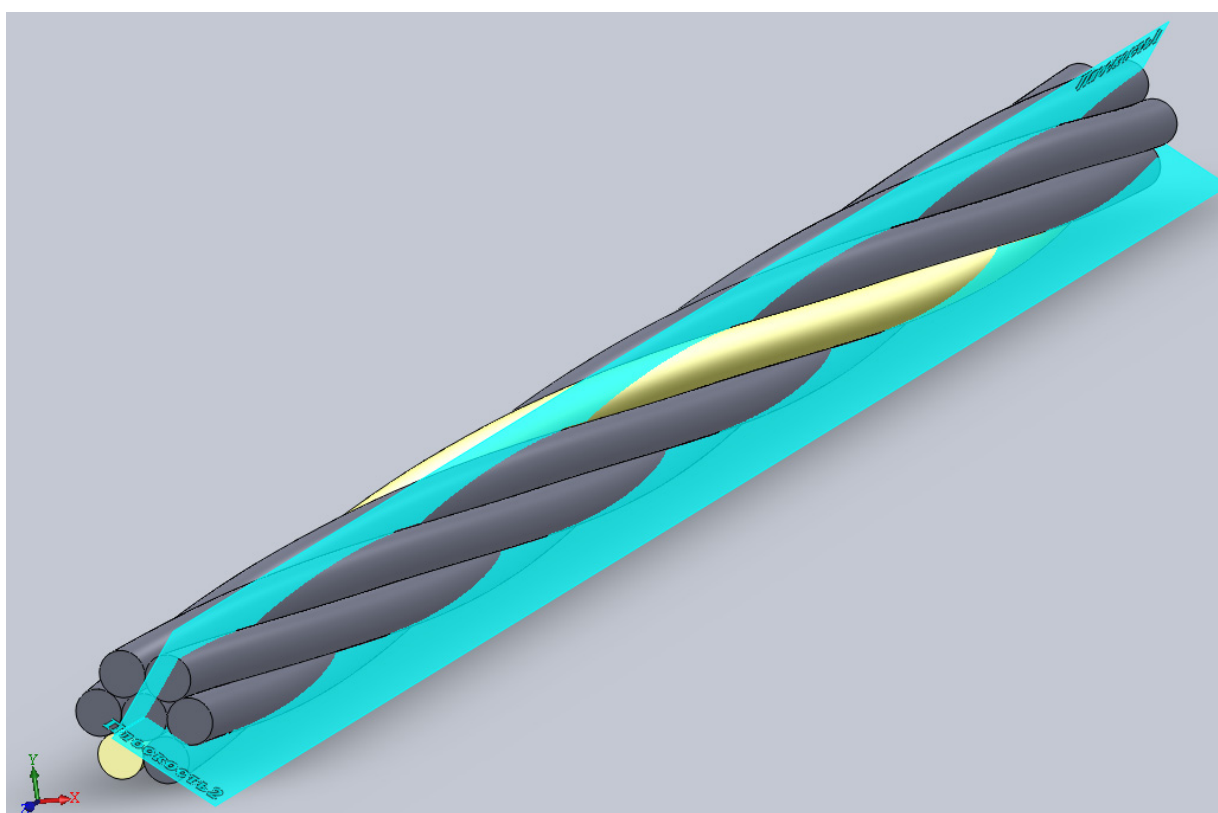


Рисунок 2.12 – 3D-модель ПВП з двограним кутом, що обмежує ОПВ

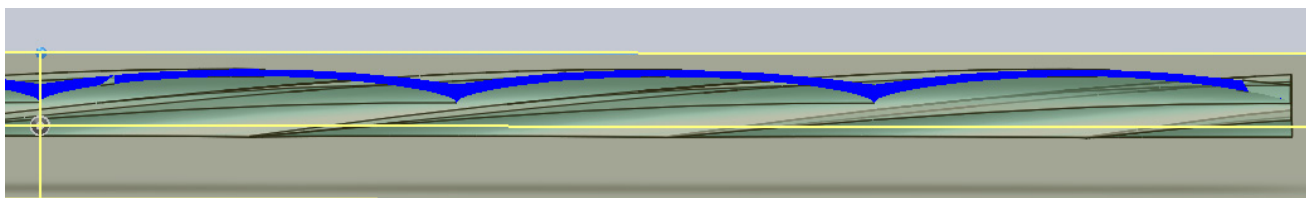


Рисунок 2.13 – Перетин відкладення на ПВП ОПВ

Граничні умови на межах ОПВ, що знаходиться на електродах ПВП (рис. 2.14)

- для меж 2, 6: $\varphi = +\varphi_0$;

- для межі 4: $\varphi = -\varphi_0$,

де для $+\varphi_0$ приймаємо $+50$ В, а $-\varphi_0$ приймаємо -50 В. Більші значення напруги не доцільно брати, щоб уникнути перекриття ізоляційної прокладки між електродами первинного вимірювального перетворювача без ожелених відкладень.

При розрахунку приймаємо, що межі 1, 3, 5, 7-10 є електрично ізольовані, тобто

$$\vec{n}\vec{j} = 0 \quad (2.45)$$

де $\vec{n}$ – нормаль до поверхні.

Розрахунок полів за методом сіток. Метод сіток – це чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь у часткових похідних шляхом зведення їх до рівнянь у скінченних різницях. Його використання дозволяє звести розв'язання диференціальних рівнянь до системи алгебраїчних рівнянь, що значно спрощує чисельні обчислення.

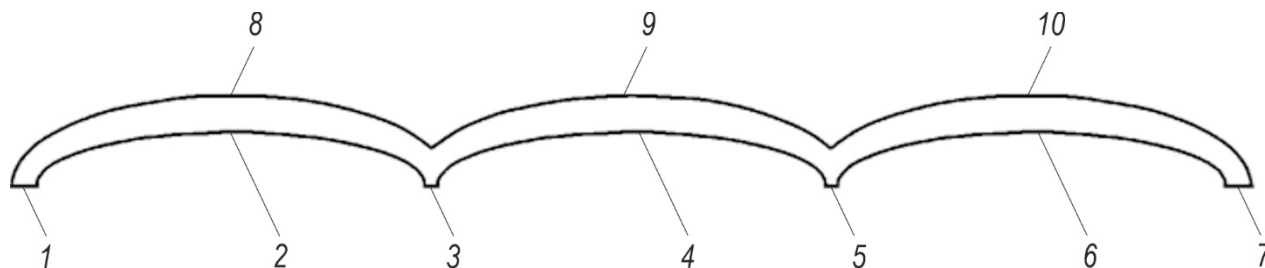


Рисунок 2.14 – Переріз відкладення на ПВП ОПВ

На рис. 2.15 представлено ділянку двовимірного поля. На ньому зображено осі x та y декартової системи координат і квадратну сітку з довжиною сторони b . Вузли сітки позначено цифрами від 0 до 4.

Введемо наступні позначення:

- φ_0 – потенціал точки 0;
- φ_1 – потенціал точки 1;
- φ_2 – потенціал точки 2;
- φ_3 – потенціал точки 3;
- φ_4 – потенціал точки 4.

Виведемо наближене співвідношення між потенціалами $\varphi_0 - \varphi_4$, які визначаються з рівняння Пуассона. Середнє значення першої похідної $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ на

ділянці 1–0 наближено дорівнює $\left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta x}\right)_{1-0} = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{b}$, а на ділянці 0–2 –

$$\left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta x}\right)_{0-2} = \frac{\varphi_0 - \varphi_2}{b}.$$

Друга похідна $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$ у точці 0 приблизно рівна різниці середніх значень перших похідних $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ на ділянках 1–0 і 0–2, віднесених до відстані b між серединами відрізків 1–0 і 0–2:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta^2 \varphi}{\Delta x^2} = \frac{\left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta x}\right)_{1-0} - \left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta x}\right)_{0-2}}{b} = \frac{\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{b} - \frac{\varphi_0 - \varphi_2}{b}}{b} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_0}{b^2}. \quad (2.46)$$

Аналогічно

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \approx \frac{\varphi_3 + \varphi_4 - 2\varphi_0}{b^2}. \quad (2.47)$$

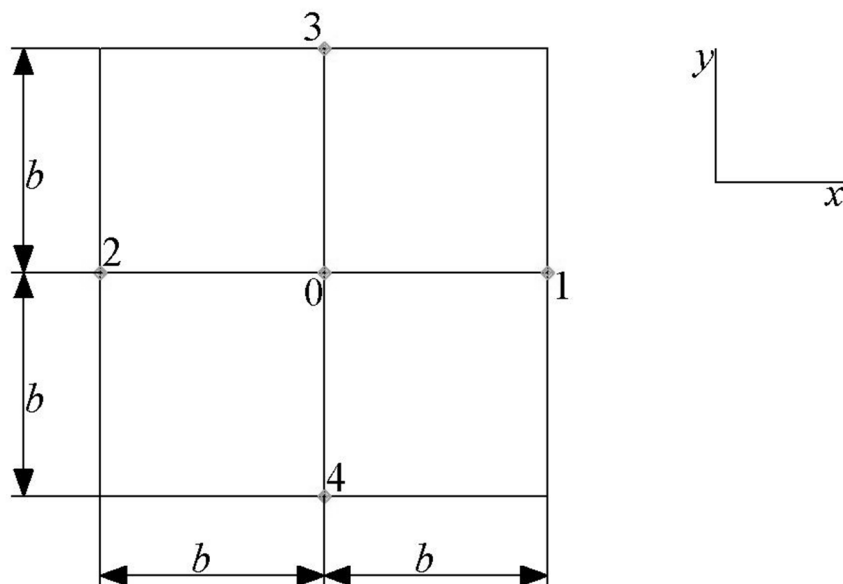


Рисунок 2.15 – Ділянка двомірного поля.

Рівняння Пуассона для двомірного електростатичного поля:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\frac{\rho_{\text{вільн}}}{\epsilon_a}, \quad (2.48)$$

де $\rho_{\text{вільн}}$ – вільний заряд в точці 0.

Підставивши в (2.48) наближені вирази для $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$ і $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}$, отримаємо:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - 4\varphi_0 = -\frac{\rho_{\text{вільн}}}{\epsilon_a} b^2 \quad (2.49)$$

Якщо поле описується рівнянням Лапласа, $\rho_{\text{вільн}} = 0$ і

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - 4\varphi_0 = 0. \quad (2.50)$$

Отримані рівняння (2.49) і (2.50) визначають зв'язок між потенціалами у вузлах квадратної сітки. Вони є основними в методі сіток. Чим менше крок сітки b , тим менше похибка від заміни рівнянь Пуассона або Лапласа відповідно на рівняння (2.49) або (2.50), відповідно. При розрахунку за методом сіток, застосовують не тільки квадратні, але і інші типи сіток, наприклад полярні чи трикутні. Для них існують формули в кінцевих різницях, в загальному випадку відмінні від формул (2.49) і (2.50).

Допустимо, що двомірне поле, яке можна описати рівнянням Лапласа, обмежене певними поверхнями. Розглянемо два типи крайових задач:

- Діріхле: відомі потенціали на граничних поверхнях.
- Неймана: відомі значення похідної від потенціалу по нормалі до кожної граничної поверхні в усіх точках.

Можливі також комбіновані типи задач, коли для однієї частини граничних поверхонь відомі значення потенціалів, а для іншої – значення нормальної похідної від потенціалу.

Геометрія електродів ПВП і ожеледно-паморозевих відкладень на них на початковій стадії утворення має складну форму, тому аналітичний розрахунок опору відкладень на електродах сенсора є досить складним. Виходом із цієї ситуації є використання систем САЕ в поєднанні з геометричними САД. Зазвичай, САД-система використовується для створення дво- або тривимірної моделі об'єкта дослідження, а САЕ – для аналізу МКЕ. У даній роботі для створення двовимірної моделі об'єкта дослідження використано AutoCAD, а для аналізу – COMSOL Multiphysics.

COMSOL представляє собою потужний набір інструментів та технологій, призначених для симуляції фізичних явищ у науково-дослідних та інженерних проектах. Ця система охоплює передові числові методи для всіх видів функціонального моделювання (f -моделювання), яке застосовується до статичних і динамічних об'єктів із просторово розподіленими характеристиками. Ключовою перевагою COMSOL є її інтуїтивно зрозумілий, адаптивний та зручний підхід до налаштування та аналізу обчислювальних моделей, що базуються на диференціальних рівняннях у частинних похідних (PDE).

COMSOL оперує переважно системами диференціальних рівнянь у частинних похідних. Платформа пропонує два основні способи представлення PDE-систем:

- коефіцієнтна форма, оптимальна для лінійних або близьких до лінійних завдань;
- загальна форма, що застосовується для нелінійних проблем.

Функціонал COMSOL дозволяє розробляти як стаціонарні, так і нестаціонарні моделі, а також лінійні чи нелінійні системи. Ці моделі можуть відповідати скалярним або багатокomпонентним крайовим задачам, що значно розширює сферу застосування програмного комплексу.

COMSOL використовує МКЕ для розв'язання диференціальних рівнянь у частинних похідних (PDE), які лежать в основі моделювання. Програмне забезпечення COMSOL інтегрує технологію скінченних елементів із передовими функціями, такими як адаптивна генерація сітки та системи контролю похибок. Ці інструменти працюють у тандемі з різноманітними чисельними алгоритмами розв'язання (Solvers), що дозволяє ефективно обробляти широкий спектр математичних моделей.

Розрахункова сітка. У COMSOL для двовимірних задач за замовчуванням будується трикутна сітка. Проте, для об'єктів, форма яких близька до прямокутної, доцільно використовувати квадратну сітку. Чим щільніша сітка, тим точнішими будуть результати розрахунку, однак це призводить до збільшення часу обчислень.

При встановленні параметрів сітки важливо дотримуватися вимоги: розмір кінцевого елемента повинен бути в кілька разів меншим за товщину граничного шару. Якщо ця умова не буде виконана, розрахунок не матиме збіжності.

У даній моделі використовувалася прямокутна сітка з параметрами в режимі "Normal" [35]. Ділянка сітки, що охоплює простір між електродами представлено на рис. 2.16.

Вибір розв'язувача та його параметрів є надзвичайно важливим, оскільки від нього значною мірою залежить точність обчислень. Неправильне налаштування може призвести до суттєвих похибок при розв'язанні задачі, які можуть бути складними для виявлення.

Для двовимірних задач рекомендується використовувати режим "Auto solver select". У цьому режимі програма автоматично підбирає найбільш відповідний розв'язувач залежно від специфіки задачі.

При моделюванні електричного поля використовувався режим "Auto solver select", який вибрав розв'язувач "Direct (UmFPACK)" [35]. Цей розв'язувач забезпечує оптимальне співвідношення між точністю та швидкістю розрахунків для цього типу задач.

Результати моделювання. На рис. 2.17 представлено поле потенціалів у міжелектродному просторі ПВП, на рис. 2.18 поле густини струмів у ожеледному відкладенні. З картини розподілу густини струмів видно, що основний вклад в провідність створюють зони, які безпосередньо розташовані між різнойменними електродами ПВП

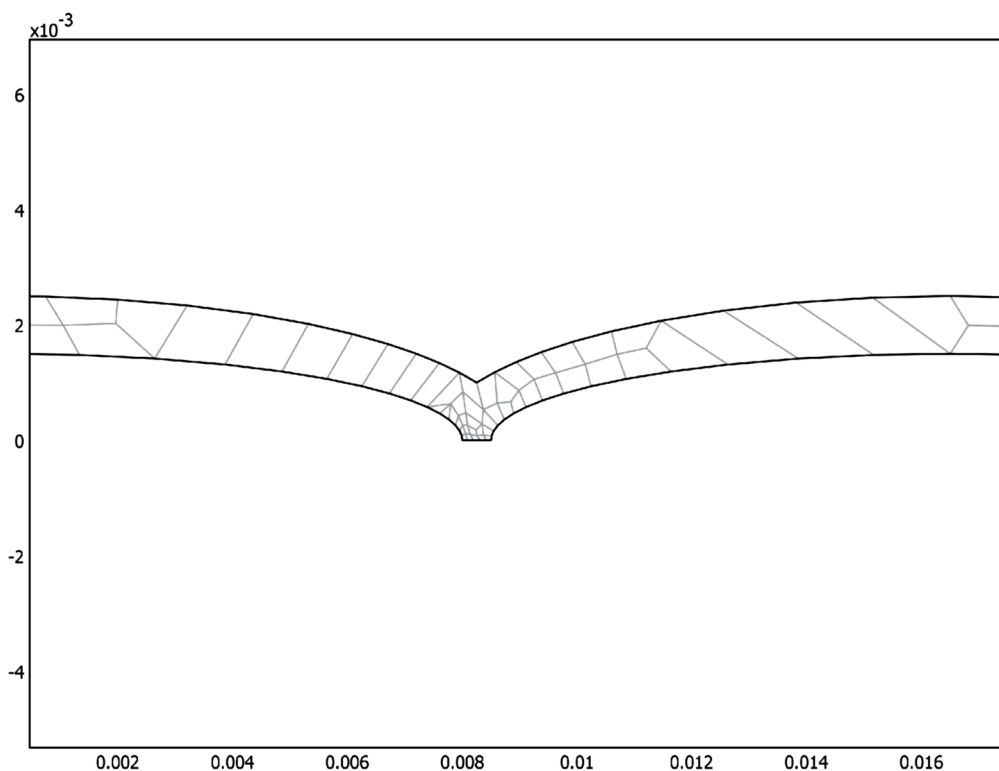


Рисунок 2.16 – Ділянка розрахункової сітки в міжелектродному просторі

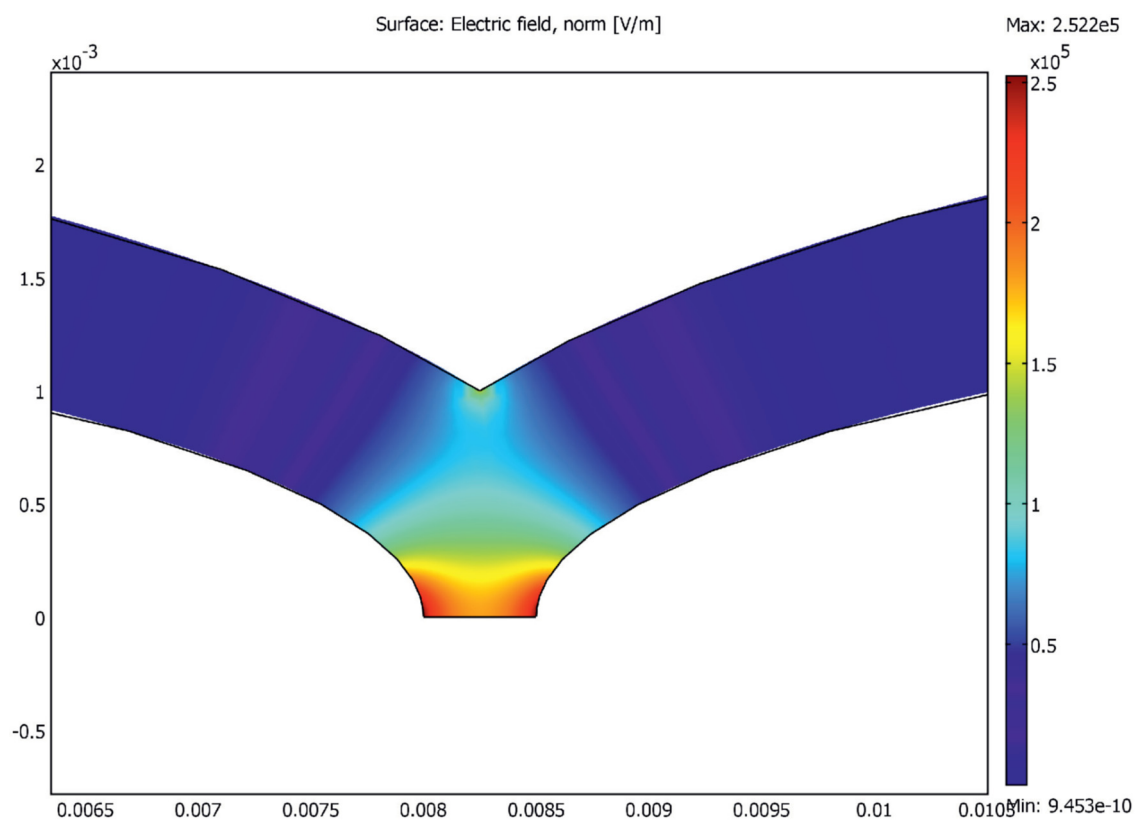


Рисунок 2.17 – Електричне поле потенціалів у міжелектродному просторі ПВП

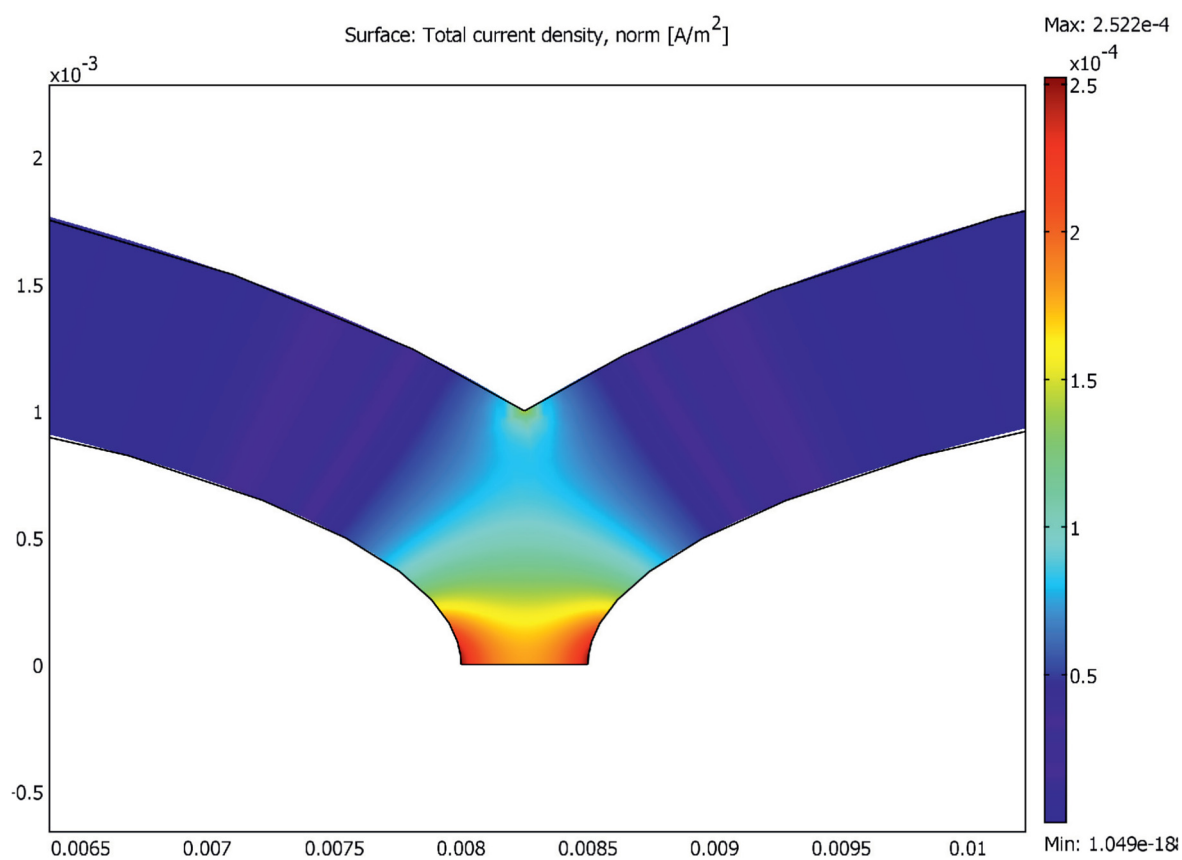


Рисунок 2.18 – Поле густини струмів у ожеледному відкладенні

Отже, опір ОПВ на активних електродах ПВП складе:

$$R_{\text{ПВП}} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) l_{\text{а.ПВП}}}{\int_S \sigma (-grad \varphi) d\vec{s}}. \quad (2.51)$$

Результати розрахунку опорів для різних видів ОПВ неведено на рис. 2.19.

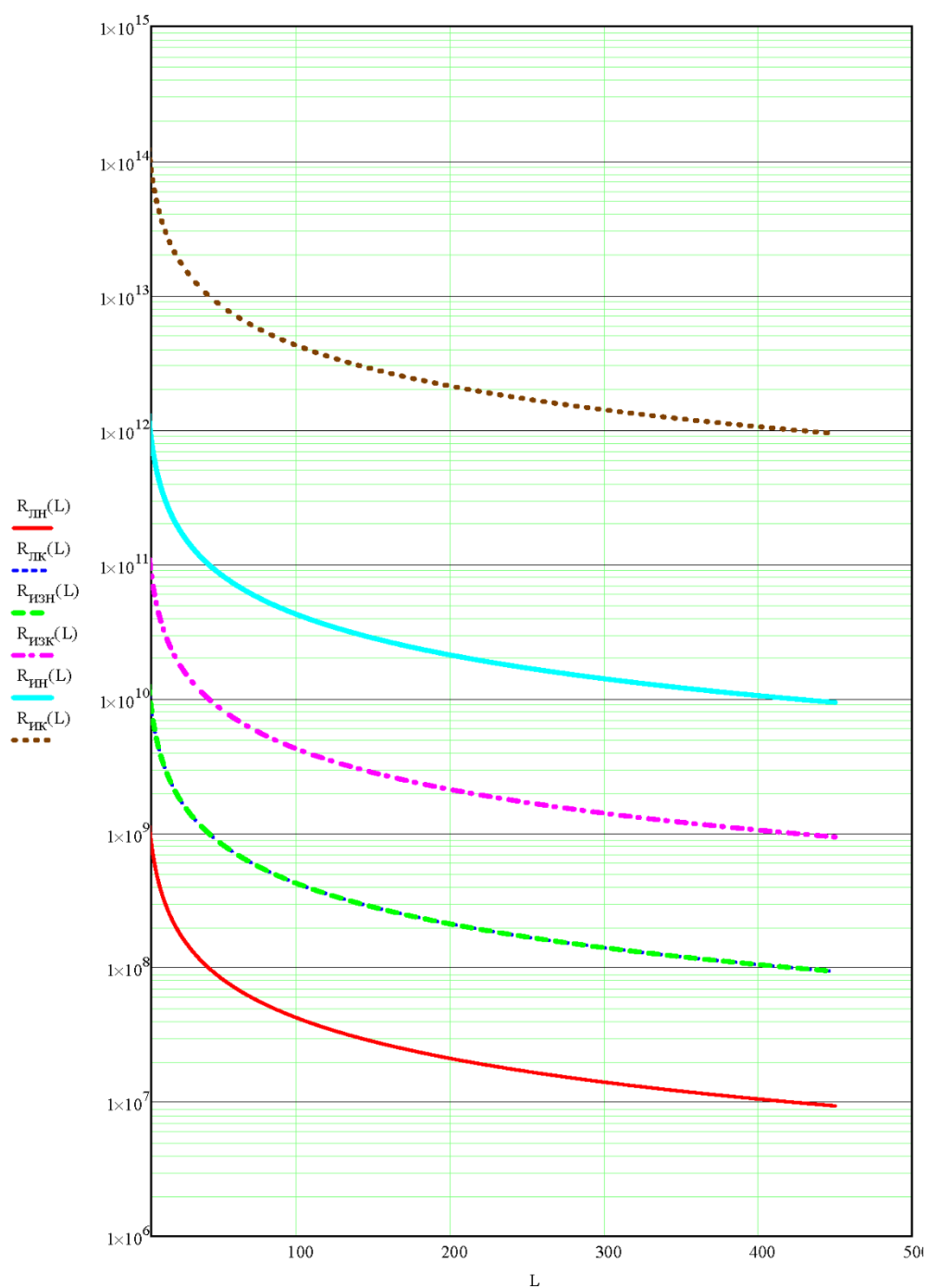


Рисунок 2.19 – Залежність $R_{\text{ПВП}} = f(l_{\text{ПВП}})$ для різних видів ОПВ

2.3 Висновки до розділу 2

1. На основі моделі Джакарда та експериментальних даних встановлено, що лід відкладення характеризуються низько- та високочастотною провідністю, причому низькочастотна провідність льоду вища на три порядки від високочастотної.

2. Обґрунтовано, що для визначення утворення ОПВ на проводі ПЛ первинний вимірювальний перетворювач ОПВ повинен складатися з двох однакових відрізків проводу тієї ж марки та перерізу, що і контрольований провід ПЛ, довжиною, що відповідає довжині одного повиву. Причому, в кожному відрізку проводу ізолюється одна з дротин верхнього повиву, утворюючи дві пари вимірювальних електродів. Перший відрізок виконує функцію первинного вимірювального перетворювача ОПВ, який розміщується на відкритому повітрі для забезпечення гарантованого перекриття його ожеледною доріжкою незалежно від напрямку потоку. Другий відрізок проводу розміщується в захисній оболонці, що має високу повітро- та вологопроникність і використовується його як еталон для вимірювань.

3. Визначено опори ОПВ у міжелектродному просторі ПВП в залежності від їх типу та активної довжини електродів, що дозволить провести ідентифікацію типу осаду.

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ РАННЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИХ ВІДКЛАДЕНЬ НА ПРОВОДІ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

3.1 Вимоги до системи

Особливості конструкції та експлуатації проводів ПЛ обумовлюють наступні вимоги, що висуваються до системи раннього виявлення та ідентифікації ожеледно-паморозевих відкладень на них:

- автоматизований контроль початку та закінчення процесу утворення відкладень;
- здійснення контролю в зоні, найбільш ймовірного максимального обледеніння проводу ПЛ;
- компактність конструкції ПВП з метою мінімізації впливу на аеродинамічні характеристики проводу;
- стабільна робота при коливаннях напруги в електромережі;
- легка інтеграція до комплексної ІСКО, що може знаходитися в експлуатації енергопостачальної компанії;
- енергоефективність для забезпечення тривалої автономної роботи.

Функціональні вимоги до системи включають:

- вимірювання опору осаду на ПВП у діапазоні від 0 до 2 ГОм з точністю не менше 90%;
- аналогово-цифрове перетворення даних з ПВП;
- проведення розрахунків згідно з розробленим алгоритмом ідентифікації ОПВ;
- забезпечення дистанційної передачі даних у відділ диспетчера електромереж для оперативного моніторингу стану ПЛ;
- можливість інтеграції з існуючими системами управління електромережею.

- стійкість до екстремальних погодних умов та електромагнітних завад.

На основі викладених вище вимог була розроблена структурна схема системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на проводах ПЛ.

3.2 Структурна схема системи

На рис. 3.1. представлено структурну схему системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на проводі ПЛ, що була розроблена з урахуванням досвіду розробки та експлуатації аналогічних систем [12-15].

У мінімальній конфігурації система складається з двох частин: модуля збору інформації (МЗІ) та модулю прийому та обробки інформації (МПОІ). Зв'язок між модулями здійснюється по радіоканалу.

Основою системи є множина модулів МЗІ, що встановлюються на контрольованих ПЛ. Головним елементом модулю є мікроконтролерний блок (МКБ) до якого підключено наступні сенсори: температури проводу контрольованої ПЛ (ВПТПР), температури ВПТ-1 і температури ВПТ-2, а також первинні вимірювальні перетворювачі опору ОПВ, відповідно, ВПТ-1 і ВПТ-2.

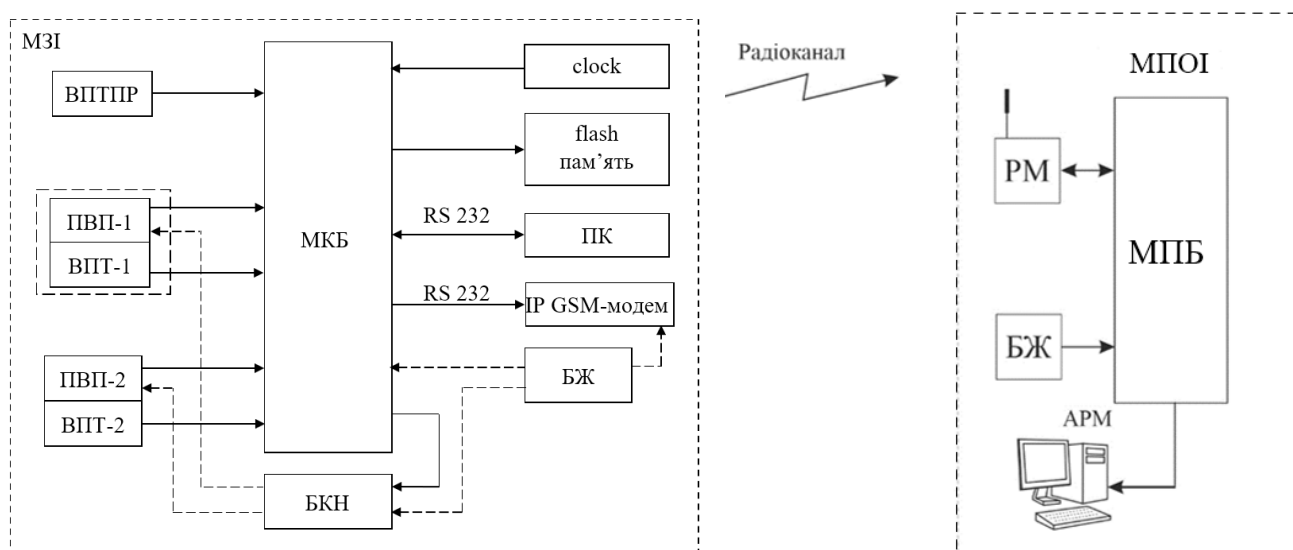


Рисунок 3.1 – Структурна схема СРВІ ОПВ

Для забезпечення роботи МКБ до нього також підключено ряд допоміжних блоків: годинник реального часу (clock), flash–пам'ять, блок контролю нагріву (БКН) ПВП-1 і ПВП-2, радіомодем (IP GSM-модем). Живлення МКБ і всіх інших блоків МЗІ здійснюється від блоку живлення (БЖ). Підключення до МЗІ персонального комп'ютера (ПК) і IP GSM-модема здійснюється за допомогою інтерфейсу RS232.

Модуль прийому та обробки інформації, аналогічно до МЗІ складається з мікропроцесорного блоку (МПБ) до якого підключаються радіомодем (РМ), блок живлення (БЖ) та автоматизоване робоче місце (АРМ).

3.3 Алгоритм роботи системи

Конструктивно система складається з множини однакових модулів збору інформації, що встановлюються на контрольних ділянках ПЛ розподільної електромережі та модулю прийому та обробки інформації.

Розглянемо детально алгоритм роботи МЗІ, блок-схема якого представлена на рис. 3.2. Модуль збору інформації працює в автоматичному режимі. Перед наближенням ожеледного періоду року, пристрій вмикається і після завантаження з EEPROM мікроконтролера необхідних констант у циклі починається опитування ВП температури проводу ПЛ (блок 2) та ВП. Якщо вона потрапляє у межі $[t_{y1}, t_{y2}]$ характерні для утворення ОПВ на проводі ПЛ (блок 3) то далі вимірюється температура ПВП-1 та ПВП-2 МЗІ (блок 4). Якщо температура ПВП-1 відрізняється від температури проводу ПЛ: $t_{\text{пвп-1}} \neq t_{\text{пр}}$ (блок 5), то вмикається нагрів ПВП-1 (блок 6). Далі виконується аналогічна перевірка температури ПВП-2 і якщо його температура відрізняється від температури ПЛ: $t_{\text{пвп-2}} \neq t_{\text{пр}}$ (блок 8), то вмикається його нагрів (блок 9). У цьому режимі пристрій працює до тих пір, поки температури ПВП-1 та ПВП-2 не стануть рівними температурі ПЛ, тобто виконуються умови:

$$t_{\text{пвп-1}} = t_{\text{пр}};$$

$$t_{\text{пвп-2}} = t_{\text{пр}}.$$

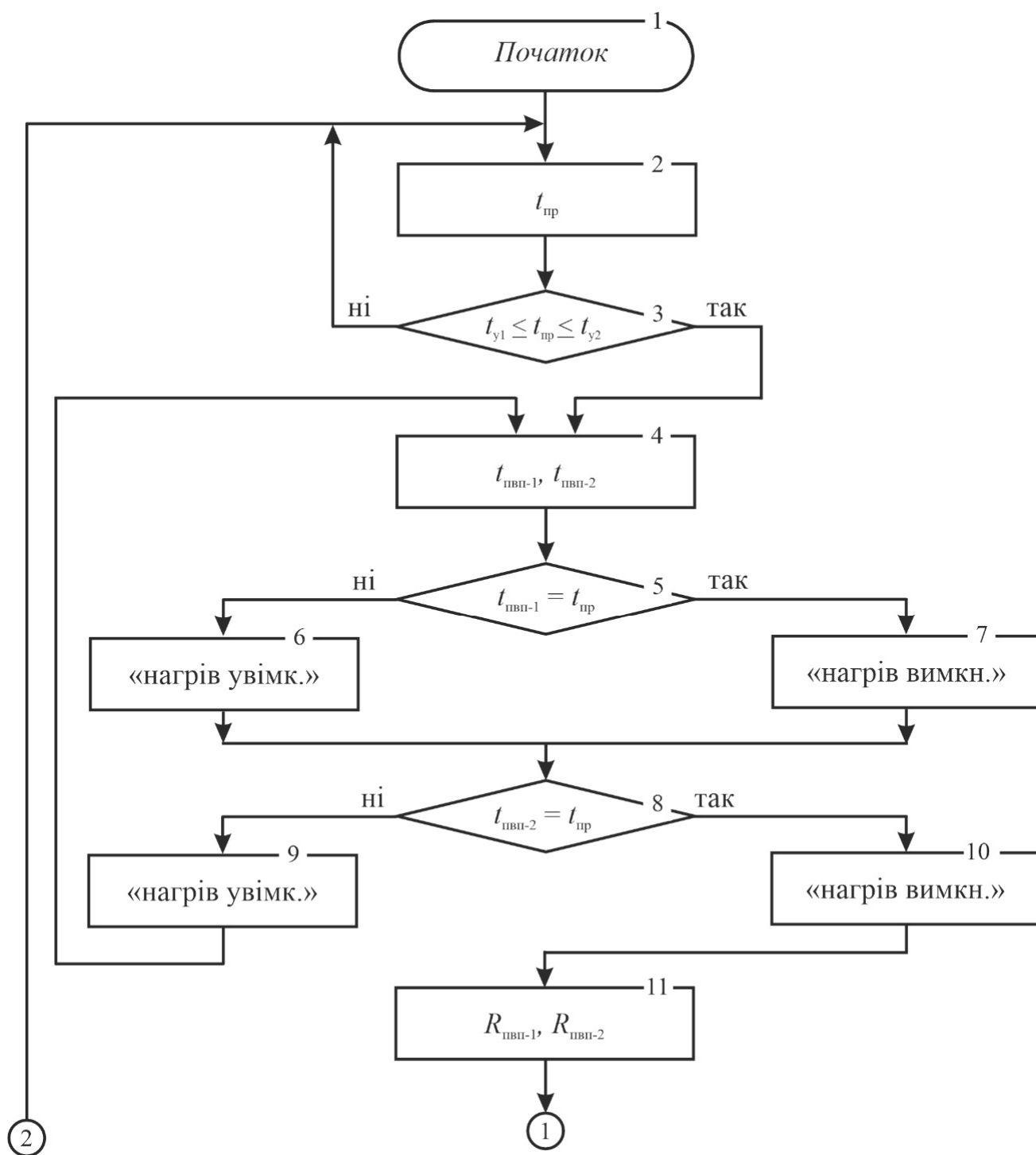


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму роботи МЗІ

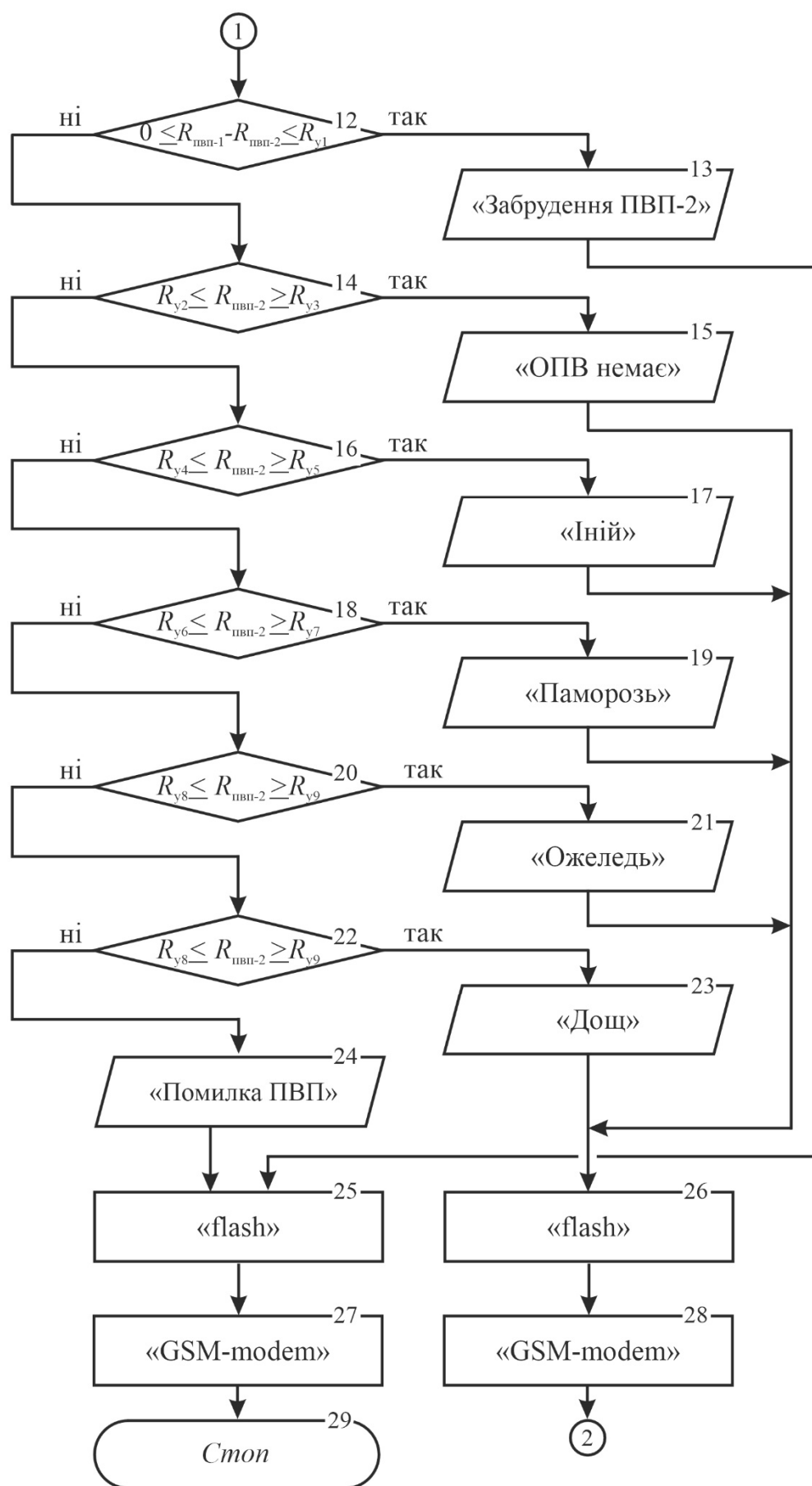


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму роботи МЗІ
(продовження)

Після виконання умов (блоки 5, 8) підігрів ПВП-1 і ПВП-2 вимикається, відповідно, блоки (9, 10). Далі проводиться вимірювання опору між електродами ПВП-1 і ПВП-2, відповідно, $R_{\text{ПВП-1}}$ та $R_{\text{ПВП-2}}$ (блок 11). Якщо виявиться, що різниця між опорами первинних вимірювальних перетворювачів ОПВ $R_{\text{ПВП-1}}$ і $R_{\text{ПВП-2}}$ більше величини, що обмежується діапазоном $[0; R_{y2}]$ (блок 12) то пристрій видає повідомлення «Забруднення ПВП 2» (блок 13), ця інформація заноситься до flash-пам'яті пристрою (блок 25), далі повідомлення передається за допомогою GSM-модема (блок 27) диспетчеру електромережі та пристрій вимикається (блок 29).

Якщо на ПВП-2 відсутнє забруднення ($R_{\text{ПВП-1}} = R_{\text{ПВП-2}}$) або знаходиться в допустимих межах $R_{\text{ПВП-1}} \approx R_{\text{ПВП-2}}$, то виконується перевірка наявності та ідентифікація ОПВ на ПВП-2. Для цього опір ПВП-2 порівнюється з діапазонами типових опорів ожеледно-паморозевих відкладень (блоки 14, 16, 18, 20). Якщо виявиться, що опір ПВП відповідає діапазону певного відкладення то генерується повідомлення про вид ОПВ на проводі (блоки 15, 17, 19, 21). Далі отримана інформація заноситься до flash-пам'яті пристрою (блок 26) і за допомогою GSM-модема (блок 28) диспетчеру електромережі. Якщо опір ПВП-2 близький до 0 Ом/см то видається сигнал «Доц» і виконуються команди блоків 26, 28.

Далі цикл ідентифікації типу ожеледно-паморозевих відкладень повторюється аналогічно описаному вище.

Отримана інформація по радіоканалу з сукупності МЗІ за допомогою радіомодему оброблюється модулем прийому та обробки інформації (МЗОІ). Алгоритм роботи якого полягає в аналізі отриманих даних, ідентифікації їх приналежності до конкретної ПЛ, перетворенні у формат зручний для використання електротехнічним персоналом, що працює за автоматизованими робочими місцями, а також у архівуванні. Програмне забезпечення, що встановлюється на МЗОІ також повинне допомагати експлуатаційному персоналу формувати стратегії проведення плавок ожеледі на контрольованих ПЛ розподільної мережі.

3.4 Технічні аспекти реалізації системи

Повітряні лінії розподільчих електричних мереж на напругу 10 кВ мають такі особливості:

- розгалужену топологію,
- віддаленість від основної інфраструктури
- відсутність комунікаційних засобів.

У зв'язку з цим модулі збору інформації, що розміщуються на цих лініях, знаходяться на значній відстані як від диспетчерської служби електропостачальної компанії, так і один від одного. За таких умов найефективнішим рішенням для збору телеметричної інформації з МЗІ є використання радіоканалів і об'єднання всіх блоків в єдину інформаційну систему моніторингу.

Взаємодія між окремими модулями та МЗОІ реалізується за топологією "зірка". Цей підхід має ряд значних переваг порівняно з іншими мережевими структурами:

- надійність, так вихід з ладу одного МЗІ не порушує функціонування всієї системи;
- гнучкість, систему легко розширювати шляхом додавання нових модулів;
- обслуговування, системи побудовані за подібною концепцією мають спрощений процес виявлення та усунення несправностей;
- ефективність, система забезпечує високу швидкодію обробки інформації;
- простота, налаштування та керування системою не вимагає складних процедур.

У якості первинних вимірювальних перетворювачів температури ПВП ОПВ можуть бути використані будь-які малогабаритні сенсори, що мають необхідну точність. Наприклад, прецизійні платинові тонкоплівкові первинні вимірювальні перетворювачі марки M222 (ф. Heraeus, рис. 3.3). Вони мають номінальну статичну характеристику Pt100, клас допуску F 0,15 у діапазоні температур - 50÷0°C і F 0,1 у діапазоні 0÷150°C (згідно DIN EN 60751 2009-05). Сенсори мають наступні розміри $d \times ш \times в$ – 2,3 × 2,1 × 0,9 мм.



Рисунок 3.3 – Термометр опору M222 (Heraeus)

На рис. 3.4 показано принципову електричну схему підключення термометру опору до мікроконтролера за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). У цій схемі використано малошумний 24-розрядний сигма-дельта АЦП MAX11201В, який забезпечує високу точність вимірювань. Завдяки цьому АЦП термометр опору M222 можна підключити без використання прецизійних джерел струму або напруги. Використання АЦП з диференціальним підключенням як джерела вхідного сигналу, так і джерела опорної напруги дає змогу отримати на виході цифровий сигнал, який можна одразу подати до мікроконтролера. Такий підхід не тільки забезпечує простоту обробки даних, а й полегшує підключення термометра опору. Для цього достатньо використати малошумний стабілізатор, наприклад, MAX8510 [36, 37].

Уведення до схеми прецизійного «струмового дзеркала» на основі операційного підсилювача MAX9617 і транзистора ММВТА14 дозволяє виконати підключення термометра опору за трипровідною схемою. Крім того, таке технічне рішення дозволяє покращити точність вимірювань і знижує вплив завад.

Узгоджена пара резисторів PRAHR182I2-750RFW забезпечує рівність струмів I_1 та I_2 з точністю 0,05%. Це допомагає компенсувати падіння напруги на з'єднувальних проводах [38]. При цьому ці проводи повинні бути однотипними, а також однакової довжини та перерізу, щоб уникнути додаткових похибок.

На сьогодні існують різні спеціалізовані екрановані кабелі для підключення термометрів опору, які підтримують 3-провідні схеми. Такі кабелі забезпечують стабільність і точність вимірювань, особливо в промислових умовах.

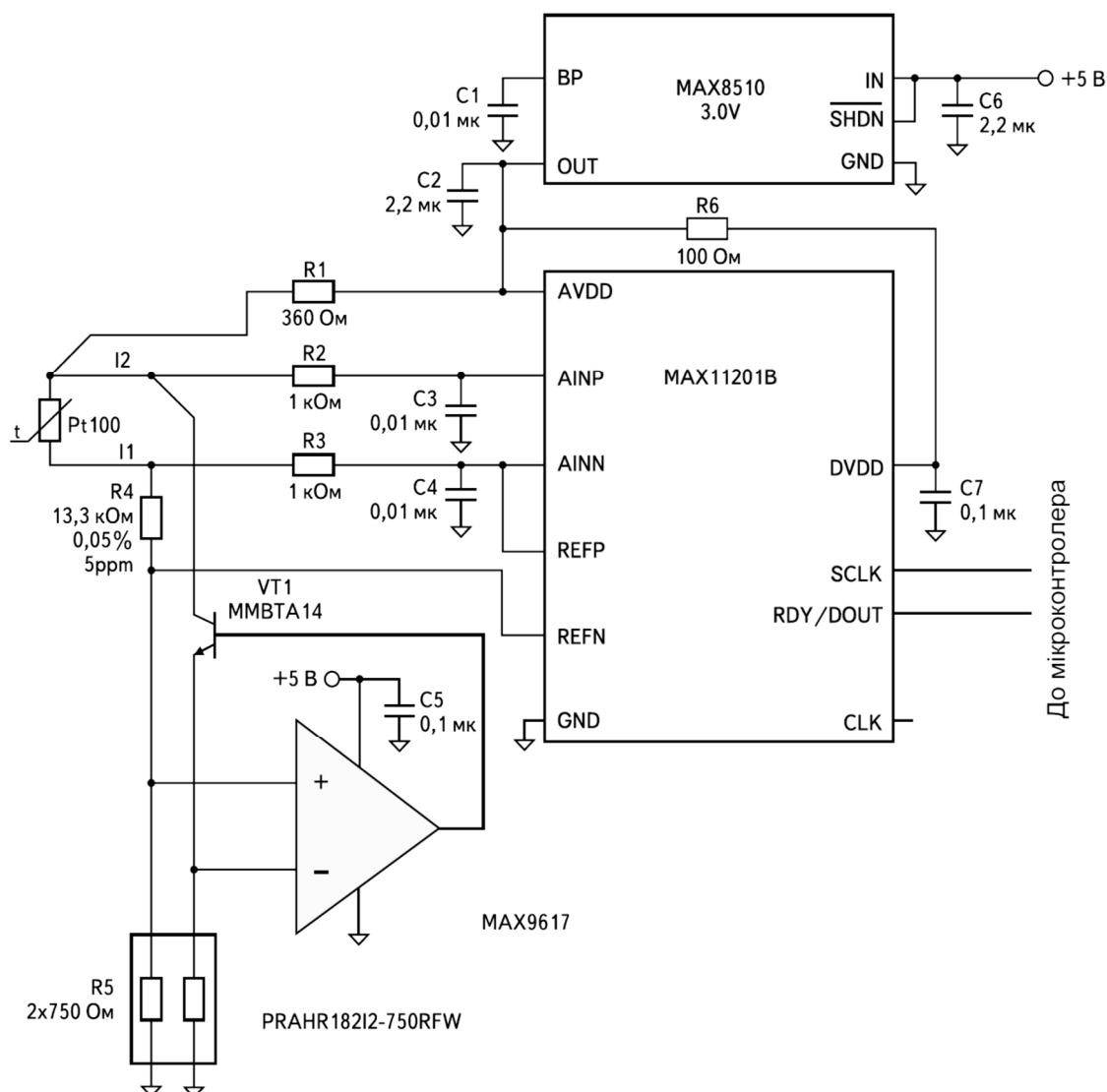


Рисунок 3.4 – Принципова електрична схема підключення термометра опору до мікроконтролера

Вимірювання температури проводу ПЛ можливо реалізувати контактним і безконтактним способами.

Контактне вимірювання дає змогу точно вимірювати температуру лише тоді, коли провід і ПВП досягнуть теплової рівноваги. Це може збільшувати час відгуку і викликати похибки через вплив температури навколишнього середовища. Крім того, додатковою технічною проблемою є потреба в гальванічній розв'язці ВП і проводу ПЛ, оскільки останній перебуває під високим потенціалом.

Натомість безконтактний метод не потребує безпосереднього дотику ВП до проводу ПЛ і дозволяє швидко та точно отримувати результати вимірювання. Серед безконтактних методів найбільш поширеним є метод, заснований на аналізі інтенсивності інфрачервоного випромінювання об'єкта та розрахунку температури його поверхні. Такий підхід мінімізує затримки у вимірюванні та дозволяє проводити моніторинг навіть за високих потенціалів проводу, що є важливим для безпечної експлуатації МЗІ.

Промисловість серійно випускає інфрачервоні вимірювальні перетворювачі призначені здійснення ефективного контролю температури в широкому діапазоні. Основними виробниками яких є Melexis, Omron і Texas Instrument. Багато моделей ВП температури, наприклад, MLX90614 (Melexis) оснащені вбудованим АЦП, що забезпечує стабільну роботу навіть при різких змінах температури навколишнього середовища. Вони підтримують цифровий інтерфейс (наприклад, I2C або SMBus), що полегшує інтеграцію з мікроконтролерами та іншими електронними системами. До переваг таких сенсорів належить низьке енергоспоживання, завдяки чому їх можна використовувати в бездротових системах моніторингу. Крім того, більшість сенсорів мають функції автоматичної компенсації емісійності, що дозволяє адаптувати їх до різних типів поверхонь. Для підвищення точності вони також оснащені функціями корекції похибок, спричинених змінами навколишнього середовища. Такі характеристики роблять інфрачервоні перетворювачі незамінними в автоматизованих системах дистанційного контролю температури.

Для вибору ІЧ ВП температури необхідно визначити висоту його встановлення відносно перекладини 2 траверси (рис. 3.5). За приклад візьмемо високовольтну траверсу ТМ-1 проміжної опори ПЛ 10 кВ з неізольованими проводами.

Середню відстань від центру проводу до ВП визначимо за розмірами типових штирових ізоляторів та штирів для їх кріплення (див. табл. 3.1). Розрахунок проводиться для найскладнішого випадку – коли відстань до ІЧ ВП температури – максимальна (див. табл. 3.1).

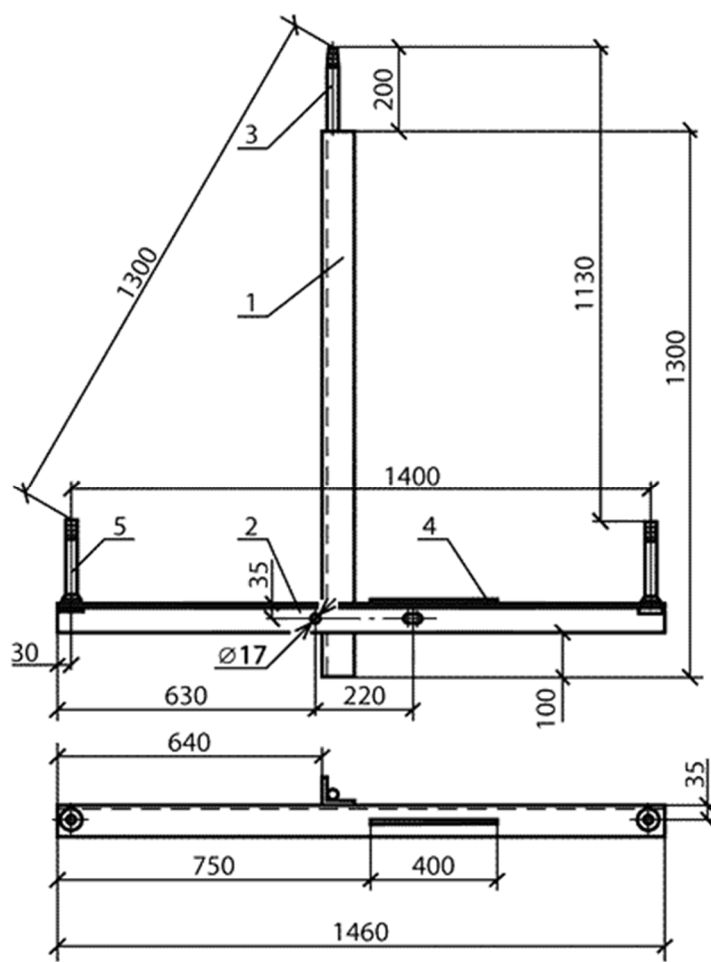


Рисунок 3.5 – Траверса високовольтна ТМ-1:

1 – стояк; 2 – перекладина; 3, 5 – штирі

Таблиця 3.1 – Параметри штирових ізоляторів та штирів для ПЛ 10 кВ

Марки ізолятора	Будівельна висота ізолятора, мм	Тип штиря	Довжина штиря від траверси, мм	Середня відстань від центру проводу до траверси, мм
ШФ-10Б	120	Ш20-1-55	175	195
ШС-10Г	145	Ш20-2-55	195	200

Отже, згідно табл. 3.1 у залежності від марки ізолятора висота установки до ІЧ ВП температури відносно перекладини траверси коливається у межах $l = 195\text{--}200$ мм. Відповідно до креслення представленого на рис. 3.5, від поверхні центру проводу лівої фази до стояка складає 640 мм.

Отже, наступним кроком вибору ІЧ ВП проводу є визначення його кута поля зору (FOV) або співвідношення $D:S$, де D – діаметр ВП; S – діаметр видимої плями.

Кут поля зору інфрачервоного вимірювального перетворювача:

$$FOV = 2 \arctg\left(\frac{S}{2l}\right) \text{ рад.} \quad (3.1)$$

Використовуючи вираз (3.1) для діапазону відстаней $l = 195 \dots 640$ мм отримаємо значення $FOV = 3,5 \dots 1,0^\circ$ або $D : S = 1 : 20$ і $D : S = 1:40$ при яких сенсор збереже точність вимірювання.

Розрахованим значенням відповідає дистанційний безконтактний ВП EX-301-LT-C-05 (Calex EL), який призначений для вимірювання інтенсивності інфрачервоного випромінювання об'єкта та обчислення температури його поверхні без дотику. Вбудована температурна компенсація сенсора значною мірою підвищує точність вимірювання температури. Корпус ВП виготовлений з нержавіючої сталі та має ступінь захисту IP65, що забезпечує його захист від ударів, води, пилу тощо. При робочій температурі від -20°C до 70°C сенсор можливо використовувати для вимірювання температури від -20°C до 100°C . Співвідношення $D:S$ для EX-301-LT-C-05 приведено на рис. 3.6. Спектральний діапазон ВП лежить у межах 8-14 мкм. Вимірювальний перетворювач має стандартний вихідний інтерфейс – 4 - 20 мА. Схема підключення ВП представлена на рис. 3.7.

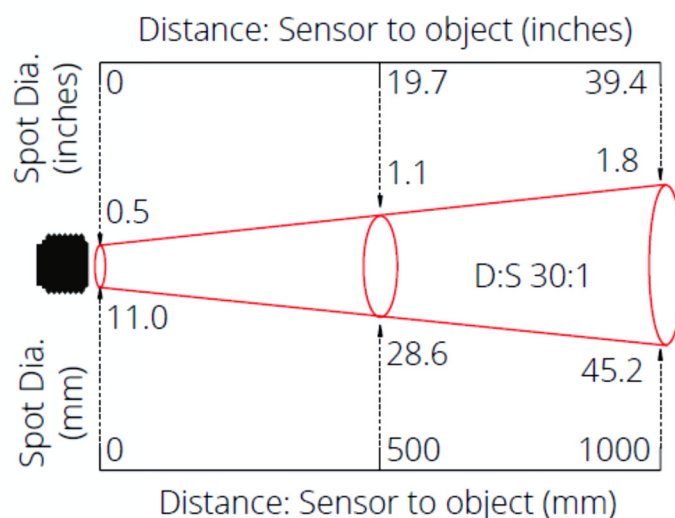


Рисунок 3.6 – Відношення $D:S$ для ВП EX-301-LT-C-05 (90% енергії) [39]

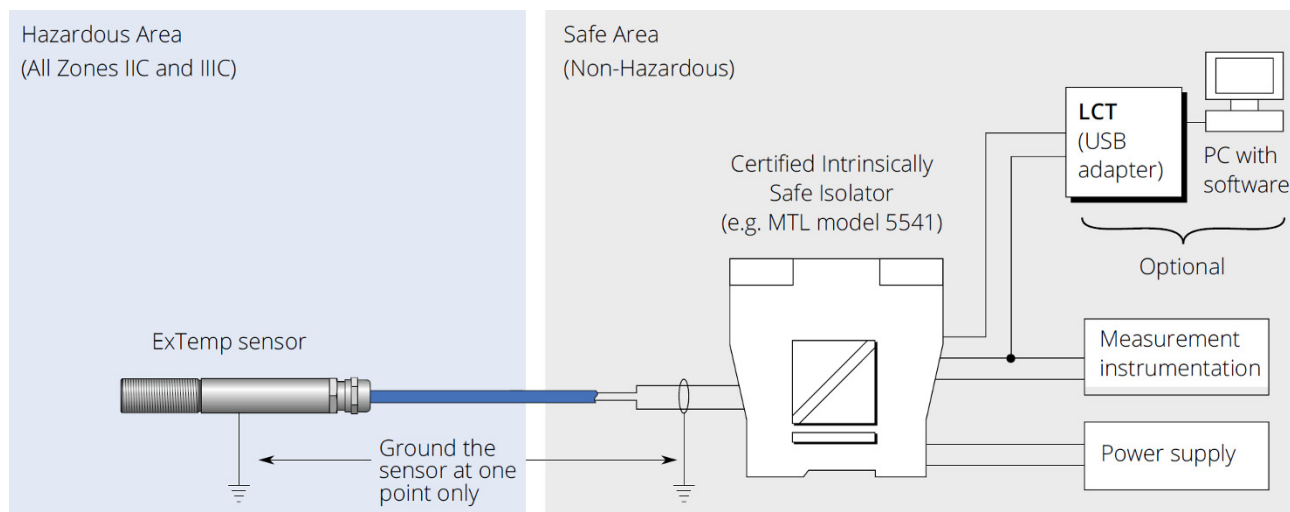


Рисунок 3.7 – Схема підключення ВП EX-301-LT-C-05 [39]

Центральний вузол збору та аналізу даних реалізується на базі персонального комп'ютера, який включає три ключові компоненти:

- сервер додатків;
- сервер баз даних та ядро операційної системи.

Сервер додатків відповідає за встановлення з'єднання з МЗІ, керування доступом користувачів до даних та виконання основної логіки програмного забезпечення. Сервер баз даних займається керуванням і обслуговуванням бази даних, забезпечуючи цілісність та збереження інформації, її стандартизацію та безперервну передачу на робоче місце диспетчера. Ядро операційної системи координує доступ до ресурсів комп'ютера та надає необхідні сервіси файлової системи й мережних протоколів. Автоматизоване робоче місце диспетчера виконує ряд важливих функцій, включаючи візуалізацію поточного стану контрольованих ПЛ, відображення сигналів тривоги від датчиків ожеледно-паморозевих відкладень, а також забезпечення зручного доступу до архівів даних та роботи з ними. Така структура системи дозволяє ефективно збирати, обробляти та аналізувати інформацію, забезпечуючи надійний моніторинг та управління мережею.

У рамках прийнятої архітектури інформаційної системи центральний сервер збору даних повинен мати фіксовану IP-адресу, надану Інтернет-провайдером. Цей сервер налаштовується на прийом запитів на з'єднання через виділений канал

доступу до Інтернету. Коли МЗІ ініціює запит на з'єднання, його тимчасова IP-адреса стає відомою серверу додатків, що уможливорює проведення сеансу зв'язку.

Сервер баз даних будується на основі сучасних стандартних апаратних та програмних рішень. Він також може бути інтегрований як підсистема до існуючої комплексної системи технічного моніторингу ПЛ, яка вже функціонує в електропостачальній компанії.

Така організація забезпечує надійну комунікацію між компонентами системи та гнучкість у впровадженні, дозволяючи ефективно використовувати як нові, так і наявні ресурси для моніторингу та управління енергетичною інфраструктурою.

На початку сезону можливого ожеледоутворення МЗІ вмикаються електротехнічним персоналом і проходять процедуру реєстрації в системі. Після цього кожен блок здійснює постійний моніторинг наявності ОВП на проводі контрольованої повітряної лінії електропередавання.

При виявленні потенційно небезпечної ситуації щодо утворення ожеледі, кожний модуль збору інформації виконує наступні дії:

- активує вбудований GSM/GPRS-модем;
- ініціює GPRS-сеанс зв'язку з інфраструктурою мобільного оператора;
- отримує тимчасову IP-адресу від оператора
- встановлює TCP/IP з'єднання з центром збору та обробки інформації, який має постійну IP-адресу.

У результаті цього процесу, інформація про наявність і вид ОВП на проводі ПЛ оперативно надходить до диспетчера районних електричних мереж енергетичної компанії.

Така система забезпечує своєчасне виявлення та реагування на потенційно небезпечні ситуації, пов'язані з утворенням ожеледі на ПЛ, що підвищує надійність електропостачання та зменшує ризик аварійних ситуацій.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Сформульовано загальні та функціональні вимоги до системи раннього виявлення та ідентифікації ОПВ на проводі ПЛ з урахуванням конструкції проводів ПЛ, а також несприятливих умов навколишнього середовища.

2. На основі сформульованих вимог, розроблено структурну схему системи, основними елементами якої є множина модулів збору інформації, що встановлюються на контрольованих повітряних лініях і модуль збору інформації, що встановлюється в диспетчерській службі енергопостачальної компанії.

3. На базі сформульованих вимог та структурної схеми, розроблено алгоритм роботи модуля, який включає циклічний режим роботи та самодіагностування первинних вимірювальних перетворювачів ожеледно-паморозевих відкладень.

4. Виконано вибір первинних вимірювальних перетворювачів і вимірювальних перетворювачів, що доводить можливість технічної реалізації системи раннього виявлення та ідентифікації ожедено-паморозевих відкладень на проводів повітряної лінії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі розв'язано науково-прикладне завдання, спрямоване на удосконалення системи раннього виявлення і ідентифікації ОПВ на повітряних лініях 10 кВ з неізолюваними проводами.

Ключові результати роботи полягають у наступному:

1. Встановлено, що для захисту ПЛ від ожеледно-паморозевих відкладень, що знаходяться в експлуатації найбільш ефективними є активні методи захисту, зокрема, плавка ожеледі, за умови її своєчасного проведення.

2. Виявлено, що існуючі комплексні інформаційні системи контролю ожеледоутворення, хоча й відповідають сучасним вимогам технічного моніторингу та дозволяють покращити ефективність плавлення ожеледі, однак потребують вдосконалення їх чутливості, точності та швидкості виявлення ожеледних відкладень, що можливо досягти за допомогою розробки для них нових вимірювальних перетворювачів, які мають конструкцію аналогічну до проводів контрольованих повітряних ліній.

3. Встановлено, що для раннього виявлення наявності та типу ожеледно-паморозевих відкладень первинний вимірювальний перетворювач повинен складатися з двох відрізків проводу тієї ж марки та перерізу, що й провід контрольованої ПЛ з довжиною рівною одному повиву, при цьому один із відрізків виконує функцію вимірювання ОПВ і розташовується просто неба, тоді як інший знаходиться в повітропроникній оболонці для контрольних вимірювань.

4. Визначено, що опір ожеледно-паморозевих відкладень у міжелектродному просторі первинного вимірювального перетворювача канатоподібної конструкції залежить від типу відкладень та активної довжини електродів, що дає змогу ідентифікувати тип осаду.

5. Розроблено загальні та функціональні вимоги до системи раннього виявлення та ідентифікації ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії з урахуванням конструкції проводів і несприятливих умов навколишнього середовища, на основі яких розроблено структурну схему системи, що включає множину модулів збору інформації, які розміщуються на контрольованих повітряних лініях, та модуль збору даних, який встановлюється у диспетчерській службі енергопостачальної компанії.

6. На базі сформульованих вимог та структурної схеми розроблено алгоритм роботи системи з циклічним режимом роботи та функцією самодіагностування первинних вимірювальних перетворювачів ожеледно-паморозевих відкладень, а також здійснено вибір відповідних перетворювачів, що підтверджує технічну можливість реалізації системи раннього виявлення та ідентифікації цих відкладень на проводах повітряної лінії.

7. На основі сформульованих вимог та структурної схеми, розроблено алгоритм роботи системи, який включає циклічний режим роботи та самодіагностування первинних вимірювальних перетворювачів ожеледно-паморозевих відкладень.

8. Розроблені конструктивні рішення первинного вимірювального перетворювача ожеледно-паморозевих відкладень і виконаний вибір сенсорів температури, що серійно випускаються, доводить можливість технічної реалізації запропонованої системи раннього виявлення та ідентифікації ожеледно-паморозевих відкладень на повітряних лініях з неізолюваними проводами.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Паливно-енергетичний комплекс України. Про масові аварії в електричних мережах України. URL: <http://energo.net.ua-2002-27-01>.

2. Козловський О. А. Удосконалення первинного вимірювального перетворювача ожеледоутворення для повітряних ліній електропередачі // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць, Кіровоград: Кіровоградський національний технічний університет, 2015. Вип. 28. С. 290–294.

3. Черемісін Н. М., Зубко В. М., Пархоменко О. В. До питання про контроль стану ожеледно-паморозевих відкладень на ВЛ 0,38-110 кВ та планування ремонтних робіт на них // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2010. Вип. 101. С. 16–18. (Серія «Технічні науки»).

4. 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.

5. 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>).

6. Жарков В. Я. Плавка ожеледі на проводах – дієвий засіб підвищення надійності ПЛ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ. Харків, 2010. Вип. 101. С. 41-42.

7. Дьяков А. Ф., Засипкін А. С., Левченко І. І. Запобігання та ліквідація ожеледних аварій в електричних мережах енергосистем. П-к: РП Південенергонагляд, 2000. 284 с.

8. Дмитриев К.С., Гоник Я.Е. Новый способ плавки гололёда на проводах ВЛ // Электричество. 1997. №1. С. 11–17.
9. Leblond A. and A. Côté, “Atmospheric Icing of OPGW: Monitoring and De-Icing”, Proc. Int’l OPGW Symposium , Montréal, May 3-5, 2004.
10. 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.
11. А. с. СССР 1275615 H02G7/16. Способ предупреждения образования гололеда на проводах воздушных линий электропередачи 35 кВ.
12. 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.
13. Савченко О. А., Дюбко С. В. Перспективні шляхи вдосконалення автоматизованих систем контролю утворення ожеледі на ПЛ. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Вип. 175 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». 2016. С. 20-22.
14. Ефективність моніторингу повітряних ліній електропередавання в ожеледних районах / М. М. Черемісін, С. В. Попов, О. А. Савченко, К. О. Шкуро, О. В. Пархоменко // Наукові праці Донецького національного технічного університету, № 2 (15) 2013. Донецьк: ДНТУ, 2013. С. 261-264.
15. Білаш І. П. Задачі моніторингу повітряних ліній електропередавання в ожеледних районах / І. П. Білаш, О. А. Савченко, О. В. Пархоменко // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2011. Вип. 117. С.13-15
16. Патент №1042118 СССР. Сигнализатор начала обледенения проводов воздушных линий. Р. М. Рудакова, М. Б. Гузаиров. 15.09.1983.

17. Патент №1497678 СССР. Устройство для обнаружения гололедных отложений. Р. М. Рудакова, Г. А. Зинов. 30.07.1989.
18. 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.
19. 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.
20. Petrenko V. F. Electrical Properties of ice. Thayer School of Engineering Dartmouth College. 69 p.
21. Decroly, J.C., H.V. Granicher and C. Jaccard (1957) Caractere de la conductivite electrique de la glace. *Helvetica Physica Acta*, 30: 465-467 p.
22. Petrenko, V.F. and V.A. Chesnakov (1990a) On a nature of charge carriers in ice. *Soviet Physics - Solid State*, 32: 2368 – 2373.
23. Petrenko, V.F. and I.A. Ryzhkin (1984a) Dielectric properties of ice in the presence of space charge. *Physica Status Solidi(b)*, 121: 421-427 p.
24. Petrenko, V.F., R.W. Whitworth and J.W. Glen (1983) Effect of proton injection on electrical properties of ice. *Philosophical Magazine B*, 47(3): 259 – 78.
25. Wore, O. and R.H. Cole (1969) Dielectric properties of ice Ih. *Journal of Chemistry and Physics*, 51: 1546 – 1551.
26. Maidique, M.A., A. von Hippel and W.B. Westphal (1970) Transfer of protons through pure ice in single crystals, Part III. The Dielectric Relaxation Spectra of Water, Ice, and Aqueous Solutions and Their Interpretation. Laboratory for Insulation Research, Massachusetts Institute of Technology, Technical Report 8.
27. Bullemer, B. and N. Riehl (1966) Bulk and surface conductivity of ice. *Solide State Com.*, 4: 447 – 448.
28. Camplin, G.C., J.W. Glen and J.G. Paren (1978) Theoretical models for interpreting the dielectric behavior of HF-doped ice. *Journal of Glaciology*, 21(N85): 123 – 141.
29. Von Hippel, A., D.B. Knoll and W.B. Westphal (1971) Transfer of protons through pure ice Ih single crystals. I. Polarization spectra of ice Ih. *Journal of Chemistry and Physics*, 54: 134 – 144.

30. Jaccard, C. (1959) Etude theorique et experimentale des proprietes electriques de la glace. *Helvetica Physico Acta*, 32, pp. 89-128.
31. Bullemer, B., H. Engelhardt and N. Riehl (1969) Protonic conduction of ice. *Physics of Ice* (N. Riehl, B. Bullemer and H. Engelhardt, Ed.). New York: Plenum Press, p. 416-442.
32. Maeno, N. (1973) Measurement of surface and volume conductivities of single ice crystals. In *Physics and Chemistry of Ice* (E. Whalley, S.J. Jones and L.W. Gold, Ed.). Ottawa: Royal Society of Canada, p. 140 – 143.
33. Eigen, M., L De Mayer and H. Spatz (1964) "Uber das Kinetische Verhalten von Protonen and Deuteronen in Eiskristallen. *Z. Electrochem.*, 68: pp.19-29.
34. Козловський О. А., Кубкін М.В., Гришук І.С. Розробка та комп'ютерне моделювання режимів роботи первинного вимірювального перетворювача ожеледоутворення. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць*, Кіровоград: Кіровоградський державний технічний університет, 2011. Вип. 24. Ч. 1. С. 309-315.
35. COMSOL Multiphysics. Reference Manual, 2019. 1742 p.
36. MAX11201:24-bit, Single-Channel, Ultra-Low-Power, Delta Sigma ADC with 2-Wire Serial Interface. Technical Datasheet, Rev.0, 06.2010. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX11201.pdf>.
37. MAX8510: Ultra-Low-Noise, High PSRR, Low-Dropout, 120 mA Linear Regulators. Technical Datasheet, Rev.3, 05.2006. URL: MAX8510: Ultra-Low-Noise, High PSRR, Low-Dropout, 120 mA LinearRegulators. Technical Datasheet, Rev.5, 05.2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX8510-MAX8512.pdf>.
38. PRA HR (CNW HR) Series. ESCC 4001/025 Qualified High Precision Thin Film Chip Resistor Arrays. Technical Datasheet, Rev. 04.10.2010. URL: <https://www.vishay.com/docs/53043/prahr.pdf>.
39. Datasheet. Intrinsically Safe Infrared Temperature Sensor. URL: <https://docs.rs-online.com/4025/A700000007712198.pdf>.

ДОДАТОК А.

ОХОРОНА ПРАЦІ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

А.1 Заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках

А.1.1 Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках

Безпека експлуатації електроустановок досягається використанням наступних заходів: захисного заземлення; занулення; захисного відключення; електричного розділення мереж різної напруги; застосування малої напруги, ізоляцією струмоведучих частин, вирівнювання потенціалів [А.1].

У електроустановках напругою до 1000 В з ізолюованою нейтраллю застосовують захисне заземлення в поєднанні з контролем ізоляції або захисне відключення.

У цих електроустановках мережу напругою до 1000 В, зв'язану з мережею напругою вище 1000 В через трансформатор, захищають від появи у ній високої напруги при пошкодженні ізоляції між обмотками нижчої і вищої напруги пробивним запобіжником, який може встановлюватися в кожній фазі на стороні НН трансформатора.

У електроустановках напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю застосовується занулення або захисне відключення. У цих ЕУ заземлення корпусів електроприймачів без їх заземлення забороняється.

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

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

Захисне заземлення призначене для усунення небезпеки ураження людини електричним струмом під час дотику до не струмоведучих частин, що знаходяться

під напругою. Це досягається шляхом зниження до безпечних меж напруги дотику і кроку за рахунок малого опору заземлювача.

Не вимагають захисного заземлення електроустановки змінного струму напругою до 42 В.

При перевірці стану заземлюючого пристрою періодично проводяться: огляд його видимої частини; перевірка стану ланцюга між заземлювачем і елементами, що заземляються; вимірювання опору заземлюючого пристрою; вибіркове розкопування ґрунту для огляду елементів, що знаходяться в землі.

Занулення передбачає глухе заземлення нейтралі трифазного трансформатора, одного виводу джерела однофазного струму, наявність нульового проводу та його повторного заземлення.

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

Нульовий захисний провідник призначений для збільшення струму короткого замикання з метою дії цього струму на захист. Збільшення струму короткого замикання відбувається за рахунок зменшення опору струму за наявності нульового проводу в порівнянні з тим, якби струм йшов через землю.

Повторне заземлення нульового проводу призначене для зниження напруги на корпусах устаткування при замиканні фази на корпус як при справному, так і при обірваному нульовому проводі.

Електричне розділення мереж здійснюється через спеціальний роздільний трансформатор, що відокремлює мережу з ізолюваною або глухозаземленою нейтраллю від ділянки мережі, що живить електроприймач. При цьому зв'язок між живлячою мережею і мережею приймача здійснюється через магнітне поле. Роздільний трансформатор має коефіцієнт трансформації 1, а напругу обмоток не вище 380 В, з підвищеною надійністю конструкції і ізоляції. Від трансформатора здійснюється живлення не більш одного приймача із струмом до 15 А.

Низька напруга (до 42 В між фазами і відносно до землі) застосовується для ручного інструменту, переносного і місцевого освітлення в будь-яких приміщеннях і поза ними.

Вирівнювання потенціалів корпусів електроустаткування та пов'язаних з ним конструкцій здійснюється пристроєм контурного заземлення, електроди якого розташовуються навколо будівлі або споруди із заземленим чи зануленим устаткуванням. Усередині контурного заземлювача під підлогою приміщення або майданчика прокладаються горизонтальні повздовжні і поперечні електроди, з'єднані зварюванням з електродами контуру. Вирівнювання потенціалів корпусів обладнання та конструкцій здійснюється приєднанням конструкцій і всіх корпусів до мережі занулення або заземлення. Вирівнювання потенціалів застосовується як додатковий технічний спосіб захисту при наявності занулення або заземлення в приміщеннях з підвищеною небезпекою або особливо небезпечних.

Персонал, що обслуговує електроустановки, повинен мати всі необхідні електрозахистні засоби, що забезпечують безпеку обслуговування цих електроустановок. Засоби захисту діляться на дві категорії: колективні та індивідуального захисту. Вони служать для захисту людей від ураження електричним струмом, від дії електричної дуги і електромагнітного поля

Розрізняють основні і додаткові електрозахистні засоби. Основними називають такі засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу установки. Додаткові захисні засоби самі по собі не можуть запобігати ураження електричним струмом. Вони лише підсилюють дію основного захисного.

До основних ізолюючих захисних засобів при обслуговуванні електроустановок напругою вище 1000 В відносять: оперативні і вимірювальні штанги; ізолюючі і струмовимірювальні кліщі; вказівники напруги; ізолюючі пристрої та пристосування для ремонтних робіт.

Основні захисні засоби виготовляють із ізоляційних матеріалів з достатньо стійкими діелектричними характеристиками (фарфор, бакеліт, гетинакс і т. ін.).

До додаткових захисних ізолюючих засобів, що застосовуються в електроустановках напругою вище 1000 В, відносять: діелектричні рукавички,

діелектричні боти, діелектричні резинові килимки; ізолюючі підставки, переносні заземлення, огорожуючі пристрої, плакати знаки безпеки.

До основних захисних ізолюючих засобів, що використовуються в установках до 1000 В, відносять: діелектричні печатки; інструмент з ізольованими рукоятками; ізолюючі штанги.

Для перевірки наявності напруги у мережі або електроустановках застосовують спеціальні вказівники напруги, що працюють за принципом протікання активного струму.

А.1.2 Організаційні заходи з безпечної експлуатації електроустановок

Організаційні заходи з безпечної експлуатації електроустановок включають: оперативне обслуговування діючих електроустановок, що в свою чергу передбачає періодичні і позачергові огляди системи електропостачання і електроприймачів; контроль та облік електроенергії; оперативні перемикання у електричних мережах, що забезпечує безперебійне живлення електроенергією. Оперативне обслуговування електроустановок проводиться інженерно-технічним, черговим і оперативно ремонтним електротехнічним персоналом згідно.

Обов'язки закріплені за даною електроустановкою чергового персоналу визначаються місцевими інструкціями, у яких повинні бути викладені також основні конкретні міри по електробезпеці і пожежній небезпеці стосовно до експлуатованого електрообладнання.

Оперативне обслуговування електроустановок може здійснюватися як однією особою так і декількома. Чисельність персоналу для кожного цеху, ділянки, підстанції визначається головним енергетиком підприємства.

При обслуговуванні електроустановок напругою вище 1000 В старший у зміні (бригадир) або черговий повинні мати кваліфікаційну групу з ТБ не нижче, IV групи, а у електроустановках до 1000 В – не нижче групи III.

Організаційними заходами, що забезпечують безпеку проведення робіт у електроустановках є такі: оформлення роботи нарядом чи розпорядженням, оформлення наряду-допуску робітників до роботи, нагляд під час роботи,

оформлення нарядом перерв у роботі і переходів бригади на інше робоче місце, оформлення нарядом закінчення робіт, закриття наряду.

Оформлення наряду потрібно на ті роботи, які проводяться з повним або частковим зняттям напруги з ремонтуваної електроустановки. Ці роботи потребують, як правило, підготовки робочого місця і виконання ряду технічних заходів по забезпеченню безпечного їх виконання.

Організаційними заходами по забезпеченню безпеки робіт, що проводяться, в порядку поточної експлуатації, являються наступні: складання переліку робіт особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства, з урахуванням конкретних місцевих умов виробництва, що затверджує головний механік підприємства; визначення необхідності тої чи іншої роботи виконувачем робіт і можливості безпечного виконання.

Ці роботи вважаються постійно дозволеними і не потребують оформлення будь-якими додатковими розпорядженнями.

А.1.3. Заходи з безпечної експлуатації

пристроїв контролю та релейного захисту і автоматики

Роботи з технічного обслуговування пристроїв контролю та релейного захисту та автоматики (РЗА) і допоміжних ланцюгів в діючих електроустановках, проводяться за нарядами або розпорядженнями згідно вимог, Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів [А.2], Правила експлуатації електрозахисних засобів [А.3].

Роботи підвищеної небезпеки, які виконуються на виділеній ділянці поза діючими електроустановками, також повинні виконуватися за нарядом.

Кожен працівник, що бере безпосередню участь в роботах, зобов'язаний пройти медичний огляд і перевірку знань правил техніки безпеки, отримати ввідний інструктаж і інструктаж на робочому місці по техніці безпеки, освоїти методику проведення відповідних робіт з урахуванням вимог правил техніки безпеки при необхідності пройти стажування під керівництвом досвідченого працівника.

Під час виконання робіт необхідно користуватися спеціальним електротехнічним інструментом з ізольованими ручками; металевий стрижень викруток повинен бути ізольований від ручки до жала викрутки.

Роботи в ланцюгах модулів збору інформації та модулю прийому інформації СРВІ ОПВ повинні проводитися за виконавчими схемами. Робота без схем, по пам'яті, забороняється.

Дистанційне включення та відключення первинних комутаційних апаратів для випробування мають проводити працівник, який проводить технічне обслуговування, з дозволу чергового персоналу (а в електроустановках без місцевого оперативного персоналу – без отримання такого дозволу).

При виконанні робіт по техобслуговуванню пристроїв РЗА слід звернути особливу увагу на наступне:

- тимчасові схеми, що збираються для наладки устаткування (зняття характеристик, осцилографування і т.п.), повинні виконуватися на спеціальних столах. Забороняється застосовувати столи з металевою робочою поверхнею або з металевим обрамленням;

- тимчасові живлячі лінії повинні бути виконані ізольованим проводом, надійно закріплені, а в місцях проходження людей повинні бути підняті на висоту не менше 2,5 м;

- живлення тимчасових схем для перевірок і випробувань повинне виконуватися через автоматичний вимикач з позначенням включеного і відключеного положень. Послідовно з вимикачем в ланцюг живлення встановлюється комутаційний пристрій з видимим розривом ланцюга (штепсельний роз'єм). При знятті напруги з схеми першим вимикається вимикач, а потім штепсельний роз'єм;

- збирання тимчасових схем для електричних випробувань перемикання проводів у схемі, перестановка приладів і апаратів забороняється проводити без зняття напруги та створення видимого розриву живлячої мережі;

- при перервах і закінченні робіт по технічному обслуговуванню персонал, що проводив роботи, повинен відключити лінію тимчасового живлення із створенням видимого розриву;

- металеві корпуси переносних приладів, апаратів повинні бути заземлені;
- перед подачею оперативного струму для наладки і випробування схем комутаційних апаратів, управління якими проводиться з декількох місць, повинна бути усунена можливість управління ними з інших місць (відключені ланцюги, вивішені плакати “Не вмикати”, “Працюють люди!”);
- всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму (ТС) і трансформаторів напруги (ТН) повинні мати постійне заземлення;
- при роботах у ланцюгах вторинних обмоток ТН з подачею напруги від стороннього джерела необхідно відключати автоматичні вимикачі і рубильники, що встановлені в ланцюгах вторинних обмоток ТН;
- забороняється знімати заземлення вторинних обмоток ТН, якщо вони знаходяться під робочою напругою. Забороняється знімати заземлення металевих корпусів пристроїв контролю та РЗА, що знаходяться в роботі;
- при необхідності перемикань у ланцюгах вторинних обмоток ТС при протіканні струму через його первинну обмотку вторинна обмотка повинна бути заздалегідь закорочена на спеціальних виводах або на контрольних штекерах випробувальних блоків;
- вторинні струмові ланцюги необхідно під'єднувати до виводів вторинних обмоток ТС лише після повного закінчення монтажу всіх ланцюгів;
- при проведенні робіт слід строго стежити, щоб ліва і права руки не торкалися одночасно до елементів або точок схеми, що знаходиться під напругою 36 В і більше, і заземленим предметам і апаратам;
- за наявності в схемах пристроїв РЗА конденсаторів і в разі потреби роботи в цих ланцюгах конденсатори повинні бути розряджені.

Нижня обкладка конденсатора зв'язку повинна бути заземлена по нормальній схемі через лінійну котушку фільтру приєднання або заземлюючий дросель з розрядником, що включений між нижньою обкладкою конденсатора зв'язку і землею. Підключати і відключати прилади в ланцюзі між конденсатором зв'язку і фільтром приєднання і в шафі відбору напруги дозволяється тільки при наглухо заземленій за допомогою заземлюючого ножа обкладки конденсатора зв'язку.

А.2 Розрахунок контуру заземлення

Одним із можливих джерел живлення МЗІ СРВІ ОПВ може бути однофазний трансформатор ОМ–0,63/10–0,23. Згідно [4], опір заземлюючого пристрою до якого приєднані виводи джерела однофазного струму в будь-яку пору року повинен складати не більше 4 Ом за вторинної напруги 220 В.

Для виконання цієї вимоги виконаємо розрахунок рядного заземлюючого пристрою. У якості вертикальних заземлювачів приймаються сталі стержні діаметром 12 мм і довжиною 2,5 м. Верхні кінці електродів розташовують на глибині 0,5 м від поверхні землі. До них приварюють горизонтальні електроди із сталіної полоси. Земля двошарова див. рис. А.1.

Для сторони ВН згідно [А.1] опір заземлюючого пристрою визначається:

$$R_3 \leq \frac{U_p}{I_3} = \frac{125}{8,3} = 15,1 \text{ Ом}, \quad (\text{А.1})$$

де $U_p = 125$ В, так як заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок до 1000 В і вище;

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

$$I_3 = \frac{U \cdot (35 \cdot l_{\text{кл}} + l_{\text{пл}})}{350} = \frac{10 \cdot (35 \cdot 0 + 23,7)}{350} = 0,68 \text{ А}, \quad (\text{А.2})$$

де $l_{\text{пл}}$ – середня довжина однієї лінії ПЛ 10 кВ.

Опір заземлюючого пристрою для електроустановок напругою до 1 кВ не повинен перевищувати 4 Ом [А.4], тому за розрахунковий опір приймаємо $R_3 = 4$ Ом.

Опір штучного заземлювача $R_i = 4$ Ом, так як природних заземлювачів немає.

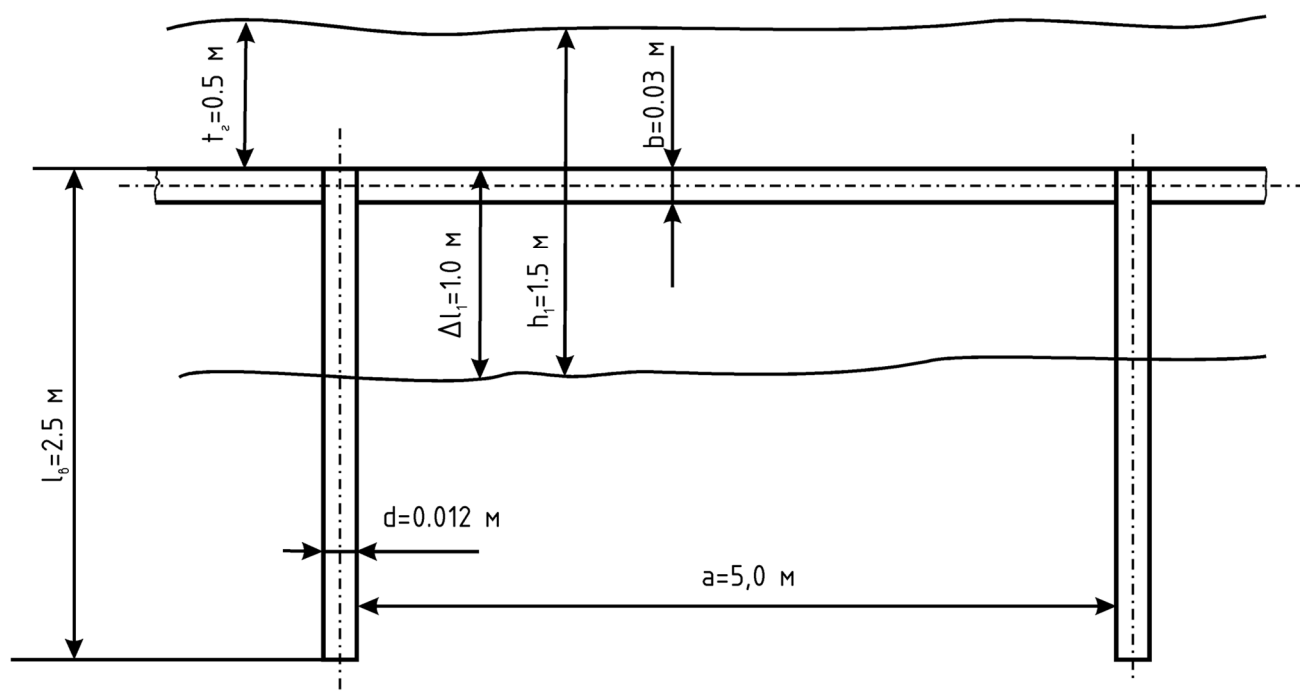


Рисунок А.1 – Розрахункова схема заземлювача у двошаровій землі

Розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних та горизонтальних заземлювачів:

$$\rho_{p.g} = \rho_{п} \cdot K_{п.г} = 50 \cdot 3,5 = 175 \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad (\text{A.3})$$

$$\rho_{p.в} = \rho_{п} \cdot K_{п.в} = 220 \cdot 1,5 = 330 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (\text{A.4})$$

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

$K_{п.г}$, $K_{п.в}$ – коефіцієнти, відповідно, для горизонтальних та вертикальних електродів для кліматичної зони 2.

Еквівалентний питомий опір двошарової землі для вертикального стрижневого електрода

$$\rho_{p.в.е} = \frac{l}{\frac{\Delta l_1}{\rho_{p.g}} + \frac{\Delta l_2}{\rho_{p.в}}} = \frac{2,5}{\frac{1}{50} + \frac{1,5}{220}} = 72,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (\text{A.5})$$

Опір розтіканню одного вертикального електроду стрижневого типу:

$$R_{\text{в.о}} = \frac{\rho_{\text{п.в.с}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot l}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4t_1 + 1}{4t_1 - 1} \right] =$$

$$= \frac{72,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot 2,5}{12 \cdot 10^{-3}} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,75 + 1}{4 \cdot 1,75 - 1} \right] = 28,5 \text{ Ом}, \quad (\text{A.6})$$

де t_1 – відстань від поверхні землі до середини вертикального електроду:

$$t_1 = t_r + 0,5 \cdot l = 0,5 + 0,5 \cdot 2,5 = 1,75 \text{ м.} \quad (\text{A.7})$$

Приблизна кількість вертикальних електродів при попередньо прийнятому коефіцієнту використання $K_{\text{i.в}} = 0,56$

$$N = \frac{R_{\text{в.о}}}{K_{\text{i.в}} \cdot R_i} = \frac{28,5}{0,56 \cdot 4} = 13 \text{ шт.} \quad (\text{A.8})$$

Розрахунковий опір розтіканню горизонтальних заземлювачів:

$$R_r = \frac{\rho_{\text{р.г}}}{2 \cdot \pi \cdot l_r \cdot K_{\text{i.г}}} \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot l_r^2}{2 \cdot b \cdot t_r} \right] = \frac{175}{2 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 0,5} \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot 40^2}{2 \cdot 0,03 \cdot 0,5} \right] = 13,0 \text{ Ом}, \quad (\text{A.9})$$

де $K_{\text{i.г}}$ – коефіцієнт використання горизонтальних заземлювачів, прийнятий згідно;

Уточнюємо необхідний опір вертикальних електродів:

$$R_{\text{в}} = \frac{R_r \cdot R_i}{R_r - R_i} = \frac{13,0 \cdot 4}{13,0 - 4} = 5,8 \text{ Ом.} \quad (\text{A.10})$$

Кількість вертикальних електродів при коефіцієнті використання $K_{i.B.c} = 0,5$:

$$N = \frac{R_{B.o}}{K_{i.B.c} \cdot R_B} = \frac{28,5}{0,5 \cdot 5,8} = 9,8 \text{ шт.} \quad (\text{A.11})$$

Для виконання умови $l/a = \text{const}$ остаточно приймаємо до установки 10 вертикальних заземлювачів.

Тоді опір вертикальних електродів складе:

$$R_B = \frac{R_{B.o}}{K_{i.B} \cdot N} = \frac{28,5}{0,78 \cdot 10} = 3,65 \text{ Ом.} \quad (\text{A.12})$$

Сумарний опір контуру заземлення

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_T}} = \frac{1}{\frac{1}{5,8} + \frac{1}{13}} = 3,99 \text{ Ом.} \quad (\text{A.13})$$

Перевірка

$$3,99 \leq 4 \text{ Ом.}$$

Отже, визначені розміри та кількість вертикальних і горизонтальних електродів дозволяють виконати контур заземлення з опором, що задовольняє вибраним вихідним даним.

А.3 Висновки

1. Встановлено, що безпечна експлуатація електроустановок досягається застосуванням наступних технічних заходів: захисного заземлення; занулення; захисного відключення; електричного розділення мереж різної напруги; застосування малої напруги; ізоляцією струмоведучих частин, вирівнювання потенціалів, відключенням комутаційних апаратів.

2. Виявлено, що безпечна експлуатація електроустановок досягається дотриманням таких організаційних заходів: оперативного обслуговування діючих електроустановок; контролю та обліку електроенергії; оперативних перемикачів у електричних мережах; виконання робіт за нарядом-допуском чи розпорядженням; правильним оформленням нарядів; застосування електрозахисних засобів; проведенням інструктажів з ТБ; наглядом під час виконання робіт; вивішуванням попереджувальних плакатів; проведенням робіт в ланцюгах РЗА лише за схемами.

3. Розраховано, що для спорудження контуру заземлення у двошаровому ґрунті з еквівалентним питомим опором 72,5 Ом·м достатньо використати 10-ть вертикальних електродів довжиною 2,5 м і 1-н горизонтальний довжиною 40 м.

А.4 Список літератури

А.1. Основи охорони праці / 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. Харків: Форт, 2018. 370 с.

А.3. НПАОП 40.1-1.07-01 (ДНАОП 1.1.10-1.07-01) Правила експлуатації електрозахисних засобів. Наказ Міністерство праці та соціальної політики України від 05.06.2001 № 253.

А.4. Правила улаштування електроустановок. Х.: Вид-во «Форт», 2017. 760 с.