

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

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

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

на тему:

«Моніторинг пропускної здатності повітряних ліній електропередавання в режимі реального часу»

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу магістратури, групи ЕЕ-22М

ОПП «Електротехнічні системи

електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Олександр ПІТЕЛЬ

«_____» _____ 2023 р.

Керівник роботи к. т. н., доц.

_____ Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ

«_____» _____ 2023 р.

Рецензент к. т. н., доц. _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2023 р.

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

Пітелю Олександр Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моніторинг пропускної здатності повітряних ліній
електропередавання в режимі реального часу.

Real-time monitoring of overhead power line capacity»

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 26.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи підвищення пропускної здатності
повітряних ліній, на основі удосконалення їх систем моніторингу

Завдання: 1. Виконати огляд існуючих систем моніторингу пропускної здатності
повітряних ліній. 2. Виконати аналіз математичних моделей стандарту IEEE
“Standard 738-2006” і CIGRE “Technical Brochure 601”. 3. Розробити
математичну модель теплового режиму неізолюваного проводу ПЛ. 4. Виконати дослідження впливу параметрів навколишнього середовища на
пропускну здатність проводу ПЛ. 5. Розробити систему моніторингу пропускної
здатності ПЛ. 6. Розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці при
експлуатації повітряних ліній електропередавання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ. Обґрунтування актуальності дослідження</i>	<i>4.09 – 8.09</i>	
2	<i>Розділ 1. Огляд систем моніторингу пропускної здатності повітряних ліній</i>	<i>11.09 – 22.09</i>	
3	<i>Розділ 2. Дослідження впливу кліматичних факторів на пропускну здатність повітряних ліній</i>	<i>25.09 – 27.10</i>	
4	<i>Розділ 3. Розробка системи моніторингу пропускної здатності повітряної лінії</i>	<i>1.11 – 24.11</i>	
5.	<i>Розділ 4. Охорона праці</i>	<i>27.11 – 1.12</i>	
6.	<i>Формулювання загальних висновків</i>	<i>4.12-7.12</i>	
7.	<i>Оформлення списку використаних джерел</i>	<i>6.12 – 11.12</i>	
8.	<i>Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді слайдів</i>	<i>12.12 – 20.12</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника

Козловський О. А.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача

Пітель О. А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 85 с.; 31 рис.; 1 табл.; 32 дж.

Пітель О. А. Моніторинг пропускної здатності повітряних ліній електропередавання в режимі реального часу. – Рукопис.

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

Об'єктом дослідження є процес передавання електричної енергії за допомогою повітряної лінії.

Предметом дослідження є електричні та теплові параметри проводу повітряної лінії.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення пропускної здатності повітряних ліній, на основі удосконалення їх систем моніторингу.

У першому розділі роботи виконано критичний аналіз існуючих систем моніторингу пропускної здатності повітряних ліній і сформульовані часткові задачі дослідження. Другий розділ присвячений розробці математичної моделі теплового режиму неізолюваного проводу та дослідженню впливу кліматичних факторів на його пропускну здатність. У третьому розділі проведено розробку системи моніторингу пропускної здатності повітряної лінії та всіх її підсистем. У четвертому розділі розроблено заходи безпеки при експлуатації повітряних ліній. За результатами роботи зроблено висновки.

Ключові слова: повітряна лінія, система моніторингу пропускної здатності, DLR, OTLM, температура проводу, вимірювальний перетворювач

ABSTRACT

Qualification work 85 p.; 31 Fig.; 1 table; 32 sources.

Pitel O. A. Real-time monitoring of overhead power line capacity. – Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrotechnical systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of the study is the process of transmitting electrical energy through an overhead line.

The subject of the study is the electrical and thermal parameters of the overhead line wire.

The purpose of the qualification work is to increase the capacity of overhead lines by improving their monitoring systems.

In the first chapter of the work, a critical analysis of existing overhead line capacity monitoring systems was performed and partial research objectives were formulated. The second chapter is devoted to the development of a mathematical model of the thermal regime of a bare wire and the study of the influence of climatic factors on its throughput. In the third chapter, the development of a monitoring system for the capacity of the overhead line and all its subsystems was carried out. The fourth chapter develops safety measures for the operation of overhead lines. Based on the results of the work, conclusions were drawn..

Keywords: overhead power line, ampacity monitoring system, DLR, OTLM, temperature wire, measuring transducer.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
Розділ 1. ОГЛЯД СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПРОПУСКНОЇ	
ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ.....	12
1.1. Пропускна здатність повітряної лінії.....	12
1.2. Аналіз систем моніторингу	17
1.2.1. Вимірювальні перетворювачі температури проводу.....	26
1.2.2. Вимірювальні перетворювачі тяжіння проводу.....	31
1.3. Постановка задач дослідження	32
1.4. Висновки до 1-ого розділу	33
Розділ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ	
НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ	34
2.1. Аналіз математичних моделей систем моніторингу пропускної	
здатності ПЛ	34
2.2. Математична модель теплового режиму проводу ПЛ	39
2.3. Дослідження впливу кліматичних факторів на температуру проводу	51
2.4. Висновки до 2-ого розділу	56
Розділ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПРОПУСКНОЇ	
ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ	57
3.1. Вимоги та основні функції системи моніторингу	57
3.2. Система моніторингу пропускної здатності	59
3.3. Система збору даних.....	61
3.4. Підсистема контролю параметрів проводу	66

3.5. Підсистема контролю параметрів навколишнього середовища	67
3.5. Висновки до 3-ого розділу	70
Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	71
4.1. Заходи безпеки при роботі на електроопорах.....	71
4.2. Заходи безпеки при виконанні робіт на ПЛ під наведеною напругою	72
4.3. Заходи безпеки при виконанні робіт на ПЛ під робочою напругою...	75
4.4. Заходи безпеки під час обходів та оглядів ПЛ.....	77
4.5. Заходи безпеки при розчищенні траси ПЛ.....	78
4.6. Висновки до 4-ого розділу	79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	80
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВП – вимірювальний перетворювач;

ОДС – оперативна диспетчерська служба;

ПВП – первинний вимірювальний перетворювач;

ПЛ – повітряна лінія;

СМПЗ – система моніторингу пропускної здатності;

ТС – трансформатор струму;

DLR – dynamic line rating;

DTR – dynamic temperature rating;

OTLM – overhead transmission line monitoring system;

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток електроенергетичної галузі пов'язаний з удосконаленням електричних мереж. Найбільш відповідальною та водночас вразливою ланкою електромережі є повітряні лінії, оскільки на їх роботу впливають різні чинники, зокрема зміна метеорологічних параметрів навколишнього середовища, які значною мірою впливають на їх пропускну здатність. У зв'язку з цим, виникає задача підвищення ефективності та регульованості пропускну здатності ліній [1].

Для розв'язання цієї задачі необхідно вдосконалювати наявні та створювати нові ефективні засоби передачі й розподілу електроенергії, застосовувати сучасні технології керування режимами розподільних мереж. Існуюча структура розподільчої мережі близька до оптимальної лише за умови низької вартості електроенергії. Проте з розбудовою міст, підвищенням вимог до якості електроенергії, збільшенням її вартості та витрат розвиток електроенергетичної інфраструктури, стратегія розвитку мережі змінюється. На сьогодні, ефективне керування режимами розподільчої мережі можливе лише завдяки ІТ-технологіям, прогнозним і оперативним моделям керування в реальному часі [2-5].

Однак наявні технічні засоби, зокрема аналоги програмного забезпечення для розрахунку та аналізу режимів роботи мереж мають суттєві недоліки, що пов'язані з невизначеністю вихідних даних. Цю проблему можливо вирішити шляхом оперативного збору інформації про параметри мережі та навколишнього середовища. Одним, із можливих рішень цієї проблеми є моніторинг, який дозволить ефективніше керувати мережею за рахунок контролю поточного стану та реальної пропускну здатності повітряних ліній.

Таким чином, розробка систем моніторингу пропускну здатності повітряних ліній є актуальною.

Мета роботи – підвищення пропускної здатності повітряних ліній, на основі удосконалення їх систем моніторингу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

- виконати огляд існуючих систем моніторингу пропускної здатності повітряних ліній;
- виконати аналіз математичних моделей стандарту IEEE “Standard 738-2006” і CIGRE “Technical Brochure 601”;
- розробити математичну модель теплового режиму неізолюваного проводу ПЛ;
- виконати дослідження впливу параметрів навколишнього середовища на пропускну здатність проводу ПЛ;
- розробити систему моніторингу пропускної здатності ПЛ;
- розробити заходи з ТБ і ОП при експлуатації повітряних ліній електропередавання.

Об’єкт дослідження – процес передавання електричної енергії за допомогою повітряної лінії.

Предмет дослідження – електричні та теплові параметри проводу повітряної лінії.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених у кваліфікаційній роботі завдань дослідження були використані такі методи дослідження: метод аналізу та синтезу, формалізації, теорії диференціального та інтегрального числення, метод моделювання, методи аналізу процесів у електричних колах.

Наукова цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- обґрунтовано параметри контролю, що необхідні для побудови системи моніторингу пропускної здатності ПЛ;
- отримала подальший розвиток математична модель теплового режиму неізолюваного проводу повітряної лінії.

Практична цінність результатів, що були отримані в роботі визначається можливістю їх використання під час проектування, побудови та експлуатації систем моніторингу пропускної здатності повітряних ліній. Запропоновані рішення дозволять прискорити розробку таких систем.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

1.1 Пропускна здатність повітряної лінії

Пропускна здатність ПЛ – це технологічно гранично допустиме значення потужності, що може бути передана з урахуванням умов експлуатації та надійності параметрів функціонування повітряної лінії.

Пропускну здатність ПЛ можливо розглядати з двох точок зору і, відповідно, характеризувати двома параметрами:

- статичним рейтингом лінії (SLR);
- динамічним рейтингом лінії (DLR).

Повітряні лінії електропередавання спроектовані так, що провисання їх проводів під час роботи завжди знаходиться вище критичного рівня, завдяки обмеженню їх нагріву до певної температури. У проектній практиці нагрів проводів ПЛ обмежується максимально допустимим струмом для конкретного перерізу проводу, значення якого регламентує ПУЕ [6]. Допустимі струми проводів ПЛ, визначаються на основі метеорологічних параметрів, що були одержані за тривалий час у даному пункті для погодних умов кожного сезону. Таким чином, тривалий допустимий режим для конкретної лінії визначається її статичним рейтингом (SLR) [7]. Ці метеорологічні параметри характеризують найгірші сценарії комбінацій несприятливих умов роботи ПЛ (як правило, при поєднанні бічного вітру, високої сонячної радіації та високих сезонних температур навколишнього середовища), які більш ніж у 90% часу експлуатації ПЛ не зустрічаються. Однак, цей рейтинг залишається постійним впродовж всього часу роботи ПЛ незалежно від постійної зміни умов навколишнього середовища. Тобто, SLR за у більшості випадків не відображує фактичної пропускної здатності ПЛ. Отже, в повітряної лінії виявляється наявним ресурс пропускання великих потужностей без порушення її технічного регламенту.

DLR – це технологія, що використовується для моніторингу пропускної здатності повітряних ліній електропередавання в режимі реального часу [7]. Дослідження направлені на створення прототипів та пілотних проекти технології DLR були розпочаті в 90-х роках минулого століття. Динамічний рейтинг повітряної лінії на протигагу її статичному рейтингу, постійно встановлює температурний ліміт на основі фактичних умов навколишнього середовища в якому знаходиться ПЛ. Він залежить від метеорологічних факторів і встановлює кореляцію між ними та пропускною заданістю ПЛ. DLR, також відомий як тепловий рейтинг у реального часу (RTTR) і полягає в максимально можливому завантаженні ПЛ, коли це дозволяють умови навколишнього середовища, без шкоди для ПЛ і безпеки.

Технологія DLR забезпечує точнішу оцінку пропускної здатності лінії електропередачі в режимі реального часу. Такий підхід дозволяє використовувати всю потужність лінії без шкоди для безпеки експлуатації. Оскільки більшу частину року спостерігаються менш суворі погодні умови, потужність існуючих ПЛ можливо значно збільшити (до 200%). На рис. 1.1 представлено порівняння пропускної здатності ПЛ при реалізації підходів SLR і DLR.

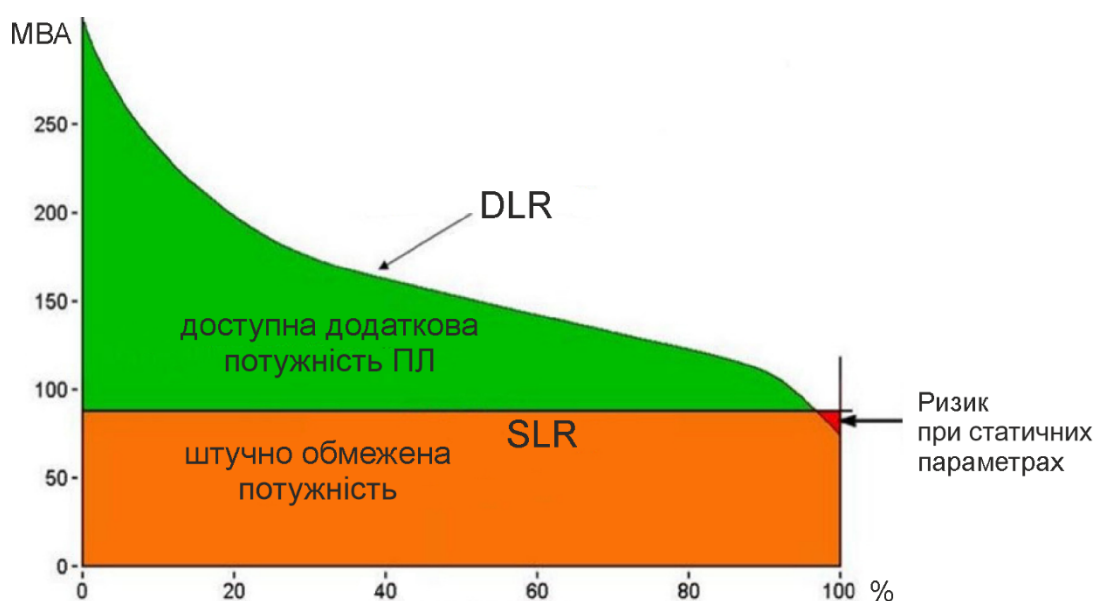


Рис. 1.1 – Порівняння статичного та динамічного рейтингу ПЛ

Таким чином, головне завдання полягає в тому, щоб отримати поточні та прогнозувати майбутні умови навколишнього середовища, розрахувати поточну пропускну спроможність та інтегрувати ці результати в процеси диспетчерського центру, враховуючи адекватні запаси безпеки.

Системи DLR можливо класифікувати за величинами, що контролюються для розрахунку пропускну здатності ПЛ [7]: швидкість і напрям вітру; сонячне випромінювання; температура навколишнього середовища, сила струму; тяжіння або провисання проводу і т. п.

При проведенні теплового розрахунку, пропускну здатність розраховується як значення сили струму, за якого температура проводу має максимальне допустиме значення (рис. 1.2). Цей термічний розрахунок проводиться за математичними моделями, що приведені в стандартах IEEE [9] або CIGRE [10].

Внаслідок невизначеності, що пов'язана зі зміною швидкості вітру, багато систем DLR вимірюють безпосередньо температуру поверхні проводу ПЛ. Ця величина використовується для розрахунку ефективної швидкості вітру, що охолоджує провідник. Ефективна швидкість вітру – це швидкість вітру, яка за вимірної сили струму, температури навколишнього середовища та сонячного випромінювання призводить до вимірної температури проводу. Цей тепловий розрахунок виконується за допомогою моделей [9], [10]. Напрямок вітру вважається перпендикулярним до провідника. Тоді струмове навантаження визначається на основі розрахованої швидкості вітру, що є перпендикулярною до проводу, і вимірних температури повітря та сонячної радіації (рис. 1.3).



Рис. 1.2. Реалізація підходу DLR: «метеорологічні параметри»



Рис. 1.3. Реалізація підходу DLR: «температура проводу та метеорологічні параметри»

Інші системи DLR вимірюють тяжіння або провисання. У цьому випадку необхідний додатковий крок, і температура проводу визначається на основі з цих параметрів (рис. 1.4). Механічна модель повітряної лінії використовується для зв'язку натягу або провисання проводу з його температурою. При підвищенні температури проводу провисання збільшується, а тяжіння зменшується, і навпаки. Після визначення температури проводу, для розрахунку струму виконується та сама процедура, що описана на рис. 1.2.



Рис. 1.4. Реалізація підходу DLR: «тяжіння / провисання проводу та метеорологічні параметри»

Таким чином, можливі три варіанти технічної реалізації технології DLR:

- використання метеостанцій, для моніторингу умов навколишнього середовища, без контролю параметрів ліній;
- використання метеостанцій, для моніторингу умов навколишнього середовища та установка безпосередньо на провід вимірювального перетворювача температури проводу;
- використання метеостанцій, для моніторингу умов навколишнього середовища та установка між ізоляторами та траверсою опори вимірювального перетворювача тяжіння проводу.

У всіх випадках вимірювання метеопараметрів і параметрів ПЛ проводяться в режимі реального часу, а отримана телеметрична інформація, передаються на сервер електропостачальної компанії. Персонал ОДС отримує доступ до даних (температура лінії, швидкість і напрям вітру, прогнози, архівні значення) у псевдореальному часі автоматизованих робочих місць (АРМ).

Головною перевагою другого підходу є наявність поточної інформації в персоналу ОДС про реальну температуру проводу та габарит ПЛ.

Отже, технологія DLR дозволяє електропостачальним компаніям краще керувати своєю інфраструктурою розподільних електромереж, забезпечуючи більш ефективне використання пропускної здатності ПЛ. Моніторинг пропускної здатності ПЛ дозволяє їм оптимізувати використання існуючої електричної інфраструктури та відкласти потребу в її високовартісних реконструкціях. Це також може зменшити ризик перевантажень ПЛ, і тим самим підвищити надійність електропостачання. Застосування контролю навантаження ПЛ, також допоможе запобігти лісовим пожежам. Це особливо актуально для посушливих районів з сильними вітрами.

Таким чином, для технічної реалізації технології DLR при експлуатації ПЛ необхідна система моніторингу. Вона повинна контролювати як параметри проводу, так метеорологічні параметри вздовж ПЛ.

1.2 Аналіз систем моніторингу

Як зазналося вище, системи моніторингу пропускної здатності (СМПЗ) ПЛ вже існують досить довго в різних формах. На сьогодні рівень технологічної готовності цієї технології оцінюється як 9 з 10, що вказує на те, що ці технології є перевіреними та впроваджені на багатьох повітряних лініях в електроенергетичних системах ряду країн [1-5, 8, 11-15].

У Словенії було розроблено та впроваджено на ПЛ 2х110 кВ Дравоград – Словен Градец систему моніторингу ПЛ OTLM (рис. 1.5), що базується на підході DLR [5]. Основою системи є OTLM-device, які одночасно вимірюють температуру проводу, його стрілу провисання та струм. Температура вимірюється безпосередньо в точках кріплення вимірювального перетворювача на фазному проводі ПЛ. Трансформатор струму та блок живлення забезпечують електроенергією вимірювальний перетворювач для роботи без стороннього джерела живлення. Отримані дані передаються в центр управління по доступних

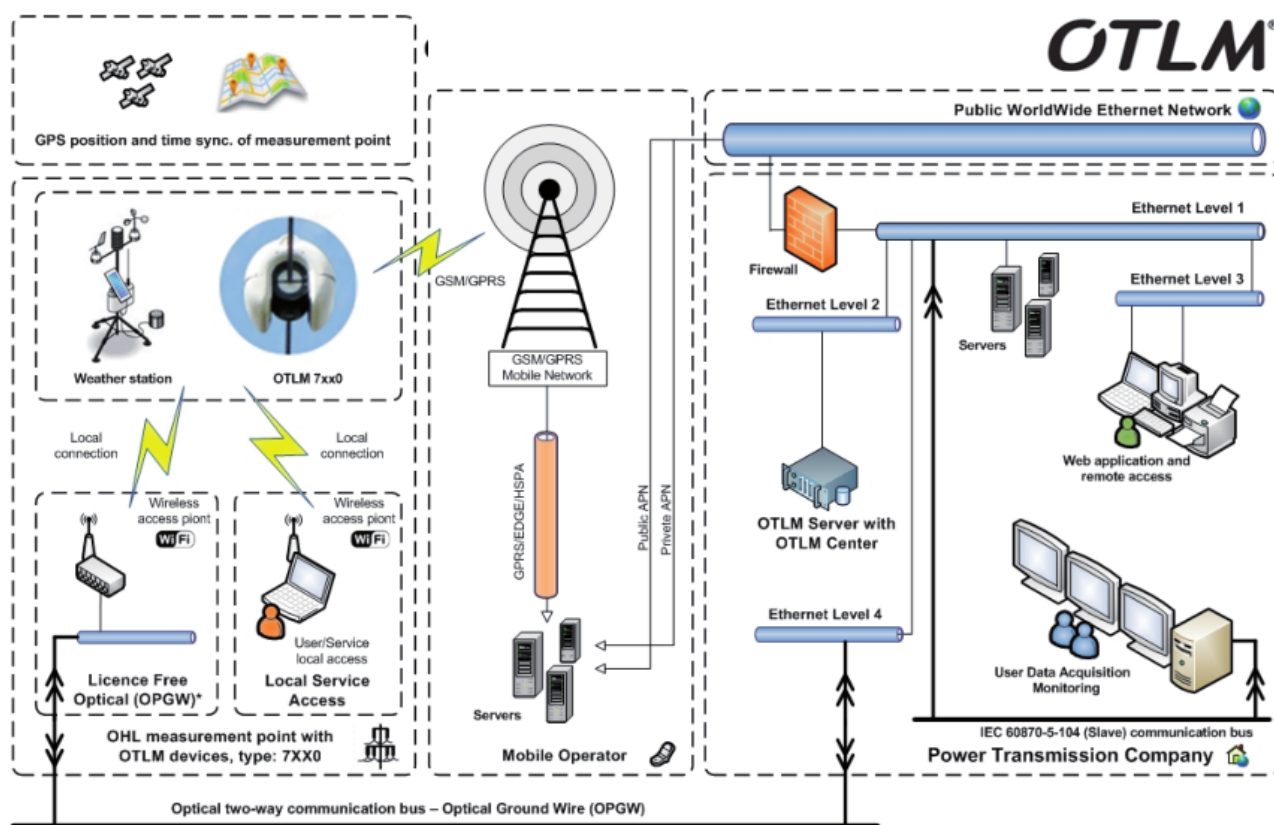


Рис. 1.5. Структурна схема системи OTLM [5]

каналах зв'язку, зазвичай, це канали стільникового зв'язку. Вимірювання та події з високою роздільною здатністю передаються на вибрані комп'ютери та центр керування (SCADA) через стандартні протоколи ІЕС (рис. 1.5). До складу системи також входить метеостанція, що розміщується на опорі ПЛ.

Інформація про температуру ПЛ в реальному часі та її поточні дані в критичних секторах допомагають операторам оперативно впливати на режим роботи ПЛ. При перевищенні поточних критичних значень оператор інформується аварійним сигналом. Сигналізація налаштовується на критичні провисання проводу. Це підвищує надійність, ефективність і безпеку експлуатації ПЛ.

За допомогою вимірювань, отриманих та оброблених ОТЛМ, оператор мережі передачі може оптимізувати та визначити режим роботи ПЛ. Йому доступні програмні рішення, що дозволяють виконувати короткостроковий прогноз температури провідника. Дані про температуру разом із даними, отриманими за допомогою лазерного сканування і діагностики ПЛ, необхідні для покращення проектів ПЛ.

Якщо виникає необхідність, отримані дані з метеостанції дозволяють розраховувати струм ПЛ за формулою CIGRE [10], а за допомогою власної математичної моделі – стрілу провисання проводу в реальному часі. Розроблена математична модель включає механічні та фізичні характеристики проводу ПЛ: масу провідника та рівень його провисання для розрахунку внутрішніх сил. Для підвищення точності розрахунку стріли провисання проводу, проводилось калібрування математичної моделі, шляхом порівняння розрахованих значень з вимірними за допомогою інклінометра [5].

Таким чином, розроблена система дозволяє попередити оператора електропостачальної компанії про наближення стріли провисання проводу ПЛ до критичних меж, що можуть порушити стандарти безпеки чи пошкодити провід. До недоліку запропонованої системи слід віднести відсутність можливості врахування проведення плавок ожеледі на ПЛ і інформації про наявність опадів на проводах.

Для оцінки та оптимального використання пропускної спроможності ПЛ розподільних електромереж на сьогодні розроблено та впроваджено систему моніторингу для РМ 10 кВ [1, 11].

У роботі [11] запропоновано на базі цієї розробленої системи створити систему моніторингу розподільних електромереж 110 кВ, яка додатково забезпечуватиме:

- збір інформації для розрахунку встановлених режимів;
- збір даних у реальному часі для уточнення розрахунку потужності та електричної енергії у мережі з розімкненими та замкнутими контурами;
- уточнення розрахункових значень втрат при перетіканні потужності по лініях електропередачі.

СМПЗ 110 кВ може бути побудована за ієрархічним принципом та включати в себе:

- контролери (автоматизовані виносні блоки АБ), які встановлюються на об'єктах електричних мереж і призначені для вимірювання активного опору ПЛ та інших їх параметрів;
- диспетчерські станції (ДС), що призначені для встановлення на диспетчерських пунктах (підстанціях) розподільної мережі (рис. 1.6).

Між пристроями нижнього рівня АБ і диспетчерської станції встановлено двосторонній бездротовий стільниковий зв'язок стандарту GSM для збору первинних технічних і метеорологічних даних від автоматичних метеостанцій.

Зібрана інформація надходить на сервер ДС, де спеціальне програмне забезпечення формує базу даних для подальшого оперативного керування ділянкою електромережі. Ця база даних також слугує з'єднувальною ланкою з іншими рівнями ієрархії системи керування розподільної мережі.

Використання для передавання даних каналів зв'язку GSM дозволяє автоматично забезпечити наскрізну адресацію всіх вузлів мережі завдяки наданню абонентських номерів. Це, за необхідності, надає можливість доступу до первинної інформації на будь-якому рівні керування, а також створює умови для дублювання каналів прийому даних.

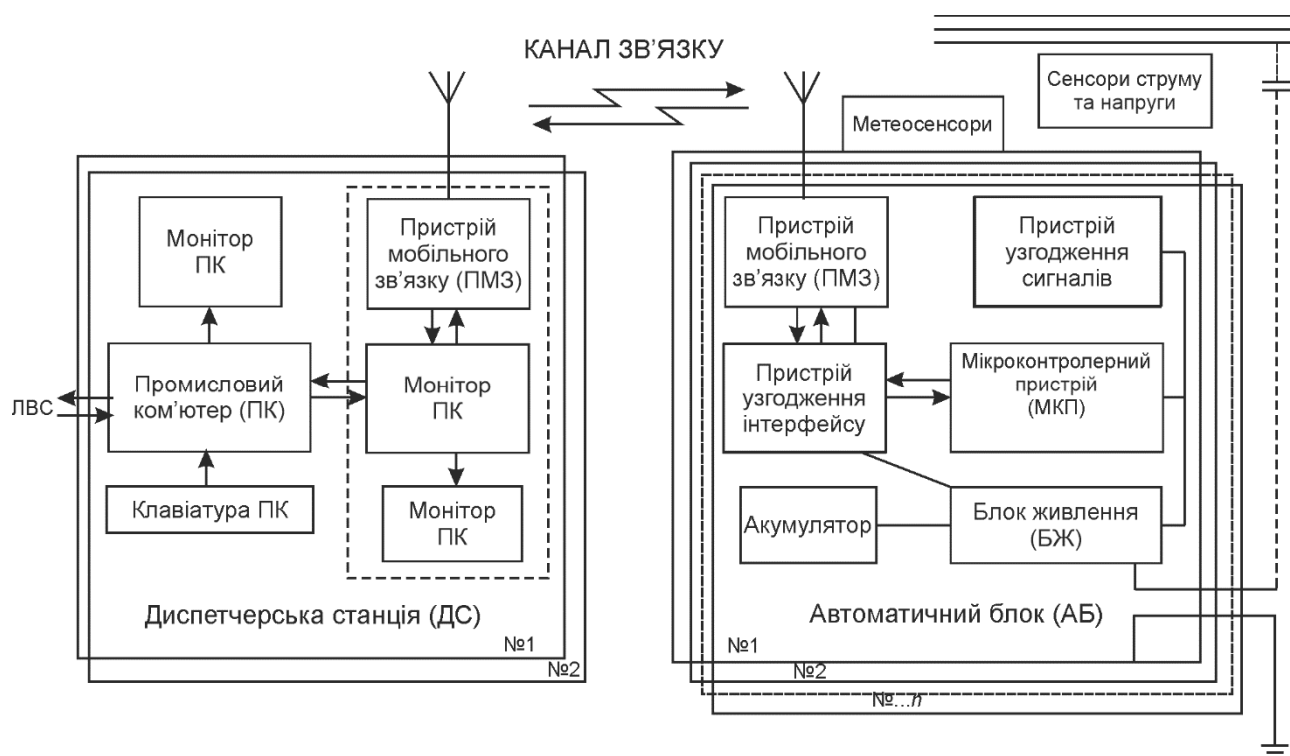


Рис. 1.6. Структурна схема СМПЗ ПЛ і навколишнього середовища розподільної мережі

Система, що розроблена в Sumitomo Electric (Японія) [12], складається з множини терміналів збору даних, що встановлюються безпосередньо на кожному фазному проводі повітряної лінії електропередавання та концентраторів (рис. 1.7). Ці термінали вимірюють температуру проводу, поточне значення струму фази, тяжіння та кут нахилу проводу повітряної лінії. Діапазон струмів, що вимірює блок складає 50-1000 А з точністю $\pm 2\%$, діапазон температур проводу – від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ точність $\pm 2\%$. Інтервал опитування сенсорів – 10 хв.

Кожен термінал збору даних розроблений таким чином, що може самостійно генерувати необхідну потужність за рахунок струму лінії електропередавання. Крім того, термінали збору даних мають функцію ступінчастого перелаштування каналів, яка дозволяє передавати інформацію, що передається від найближчого терміналу збору даних по радіоканалу. За допомогою цієї функції поточні значення параметрів проводу передаються до концентратора за допомогою радіозв'язку на частоті 920 МГц під час

ретрансляції між збиральними терміналами та, нарешті, передаються з концентратора на сервер збору даних за допомогою каналів LTE.

Цей підхід дозволяє отримувати інформацію з ПЛ, що прокладені у важкодоступних районах (наприклад, у гірській місцевості) за межами зони обслуговування мереж LTE загального призначення. Інша можливість маршруту передачі даних по лінії передачі з використанням багатоперехідного зв'язку полягає в тому, що систему можна використовувати як нову інфраструктуру зв'язку.

Концентратори отримують живлення від сонячних панелей та акумуляторної батареї. Споживання потужності концентратора було оптимізовано таким чином, щоб зменшити ємність і вагу сонячної панелі та батареї, що підходить для обладнання, встановленого на електроопорі.

Запропонована система Sumitomo Electric [12] має базові функції, що дозволяють визначати пропускну здатність ПЛ в режимі реального часу і тому потребує їх розширення за рахунок установки метеорологічних станцій на вздовж траси ПЛ.

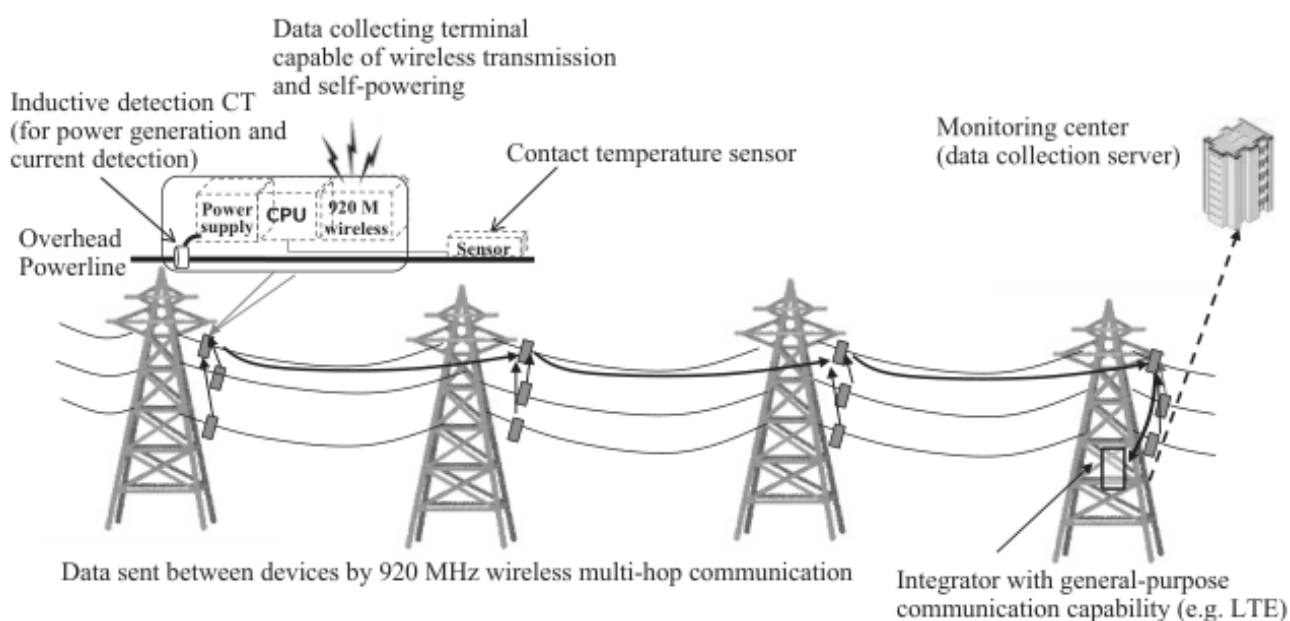


Рис. 1.7. Принципова схема системи [10]

Система динамічного моніторингу пропускної здатності ПЛ CAT-1, розроблена компанією Valley Group із США [13], була встановлена на більш ніж 300 лініях у 18 країнах. Ця система забезпечує моніторинг у режимі реального часу погодних умов і тяжіння проводу в точках кріплення його до опор. Структурна схема системи представлена на рис. 1.8. Укрупнено, система складається з сенсорів тяжіння проводу, основного модуля, підсистеми передачі телеметричної інформації, базової станції CATMaster і програмного комплексу IntelliCAT. На відміну від систем моніторингу OTLM, що визначають розрахунковим (безконтактним) шляхом стрілу провисання проводу, в системі CAT-1 для цієї мети використовуються сенсори тяжіння проводів ПЛ. Які представляють собою тензодатчики в корпусі з нержавіючої сталі з кріпильними отворами і встановлюються між ізолятором і електроопорою.

Основний модуль системи монтується на опорі ПЛ (рис. 1.9). Він складається з вологостійкого алюмінієвого корпусу з блоком електроніки, вбудованого модема, антени для передачі даних і кріпильних елементів.

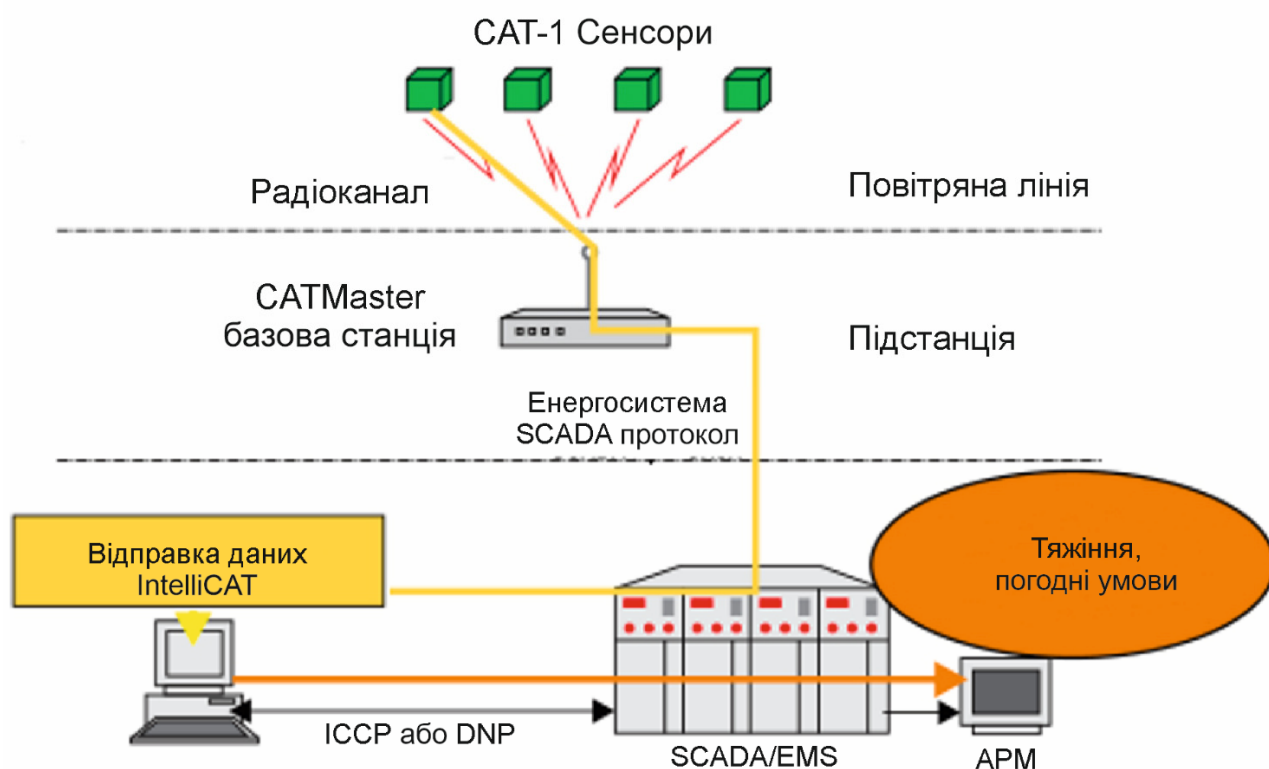


Рис. 1.8. Структурна схема системи CAT-1



Рис. 1.9. Основний модуль САТ-1 та модуль живлення

Джерелом живлення служить акумулятор 12 В, що заряджається від фотоелектричної панелі. Модуль функціонує в діапазоні температур $-40...+60^{\circ}\text{C}$. Все обладнання постачається в герметичних корпусах та встановлюється безпосередньо на опорах повітряних ліній.

Незважаючи на простоту вимірювань, система за допомогою математичних моделей забезпечує виявлення та розрахунок багатьох корисних для експлуатації параметрів ПЛ: стріли провисання проводу, поточної пропускної здатності лінії, наявності ожеледно-паморозевих відкладень на проводах.

У праці [14] представлено систему моніторингу ПЛ реального часу та навколишнього середовища, що реалізує концепцію DLR. Структурна схема СМПЗ ПЛ приведена на рис. 1.10. Аналогічно до системи OTLM основою системи є множина багатофункціональних вимірювальних перетворювачів температури та струму проводу ПЛ. Вони встановлюються безпосередньо на фазні проводи ПЛ. Кожен сенсор температури/струму проводу також може ретранслювати телеметричну інформацію, з інших аналогічних сенсорів і повторювачів (репітерів). За рахунок використання цієї функції вдається забезпечити зв'язок на значних територіях. На одній з опор встановлюється повторювач для ретрансляції даних і метеорологічна станція дані з якої

поступають на цей же повторювач. Отримана ними телеметрична інформація передається на агрегатор даних. У цій системі моніторингу пристрої розташовуються вздовж повітряної лінії. Сенсорна мережа, що з'єднує між собою вимірювальні перетворювачі ретранслятори з агрегатором даних, представляє собою приватну мережу зв'язку, що не використовує лінії загального призначення.

Телеметрична інформація зібрана в агрегаторі передається на хмарний сервер або сервер розрахунку/зберігання, що встановлюють на трансформаторній підстанції. Потім, дані використовуються подальшої математичної обробки, що необхідна для розрахунку та оцінювання допустимого струму. Отримані дані зберігаються на сервері та можуть бути використані для аналізу та інших цілей.

У кожному з розглянутих пристрої системи передбачене дистанційне оновлення програмного забезпечення, що дозволяє покращувати кожний пристрій і додавати до нього нові функції, якщо це потрібно для обслуговування та експлуатації системи.

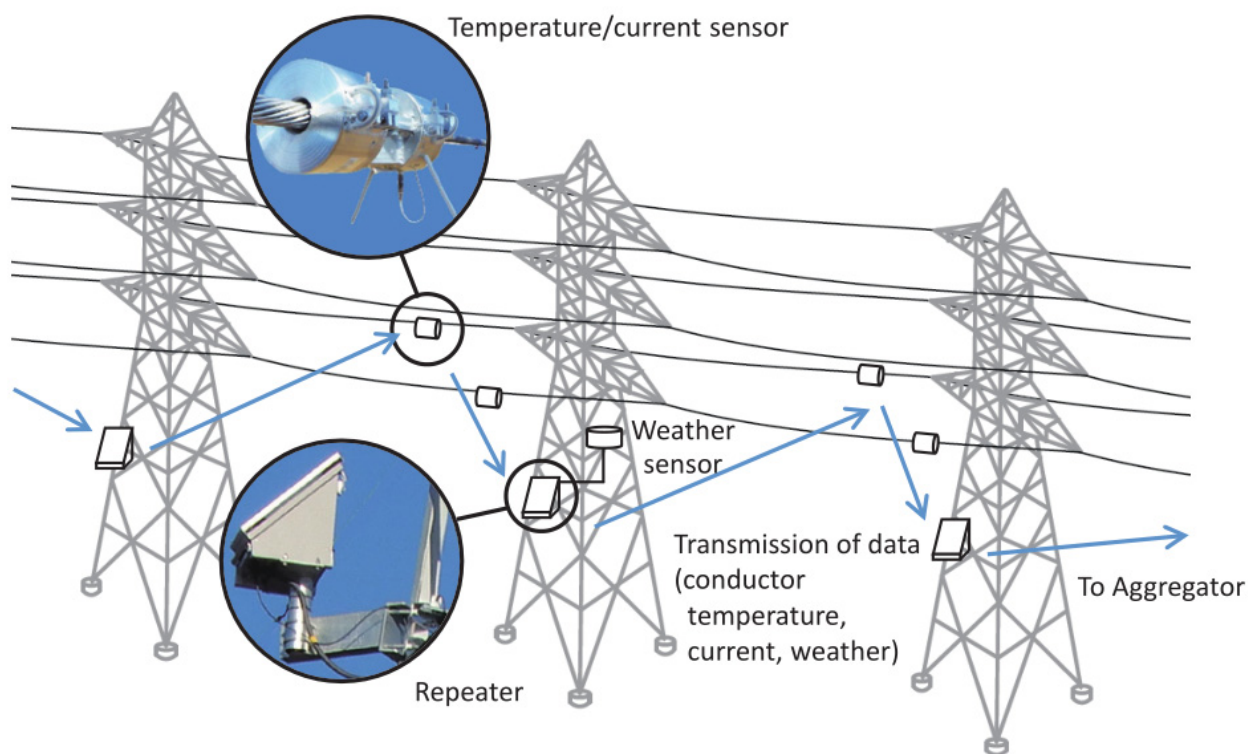


Рис. 1.10. Структурна схема системи моніторингу ПЛ [14]

Комерційна система Sagometer заснована на обробці зображень [15]. У ній в якості вимірювальних перетворювачів провисання проводу використані відеокамери (рис. 1.11). Мішень підключається до провідника в середині прольоту, а відеокамера, що розташована на електроопорі та відстежує її рух. Система фіксує та обробляє зображення і на основі цієї інформації обчислює провисання проводу. Якщо додати в систему вимірювання інтенсивності струму та метеопараметрів, можливо визначити пропускну здатність ПЛ. Повна система називається Span Sentry [15].

При застосуванні подібних систем у країнах з холодним кліматом необхідно захищати камеру та мішень від ожеледоутворення, що значно її ускладнює. Також необхідно забезпечити працездатність камери та мішені в нічний час доби, під час густих туманів. З огляду на ці недоліки, первинні вимірювальні перетворювачі Span Sentry потребують удосконалення.

Характерними рисами всіх розглянутих СМПЗ ПЛ є побудова їх підсистем на основі мікроконтролерів, передавання телеметричної інформації по радіоканалах зв'язку, використання для моніторингу параметрів навколишнього середовища метеостанцій. Перевагою систем ОТЛМ є більш проста інсталяція на ПЛ, однак вони визначають тяжіння проводів на основі математичних моделей. Системи DLR мають вищу точність вимірювання тяжіння проводів внаслідок використання тензометричних вимірювальних перетворювачів, але процедура розгортання такої системи є більш складна.

Оскільки, всі розглянуті СМПЗ ПЛ будуються на основі множини вимірювальних перетворювачів, то необхідно провести їх детальний аналіз.



Рис. 1.11. Камера та мішень системи Sagometer

1.2.1. Вимірювальні перетворювачі температури проводу

Альтернативою зниження невизначеності, що пов'язана з розрахунком температури проводу ПЛ є прямий моніторинг. З цією метою безпосередньо на провід ПЛ встановлюється вимірювальний перетворювач, який вимірює температуру його поверхні. На сьогодні розроблено ряд комерційних систем моніторингу пропускної здатності ПЛ на основі таких вимірювальних перетворювачів [16-20].

Однією з перших систем, заснованих на моніторингу температури провідника була Power Donut [16], розроблена ще на початку 80-х років минулого століття (рис. 1.12). Крім контролю температури провідника, Power Donut вимірює силу струму та кут нахилу провідника. Останній параметр пов'язаний зі стрілою провисання проводу. Конструктивно Power Donut виконаний у вигляді тороїду. Він живиться за рахунок напруги, що індукується магнітним полем струму проводу. Мінімальна сила струму вмикання становить 70 А. Внутрішня батарея забезпечує роботу впродовж однієї години, якщо сила струму нижче цього значення. Power Donut може вимірювати температуру проводу до 150 °С. Для розрахунку струмового навантаження системі необхідні значення температури навколишнього середовища та сонячної радіації. Ці величини отримуються з метеостанції, що встановлюється на електроопорі, найближчій до вимірювального перетворювача температури.



Рис. 1.12. Вимірювальний перетворювач системи Power Donut [16]

Система контролю температури (SMT) [17], у цілому, аналогічна Power Donut (рис. 1.13). Її вимірювальний перетворювач також контролює температуру проводу та силу струму, що протікає по ньому. Він має автономне живлення та мінімальну силу включення 100 А. Він граничне значення контрольованої температури провідника складає до 250 °С.



Рис. 1.13. Вимірювальний перетворювач системи SMT (Arteche) [17]

Вимірювальний перетворювач FMC-T6 є частиною інтелектуальної системи моніторингу ліній Multilin (General Electric) [18]. Він призначений для контролю температури поверхні проводу та сили струму, має автономне живлення (рис. 1.14). Гранична контрольована перетворювачем температура складає до 85 °С.



Рис. 1.14. Вимірювальний перетворювач FMC-T6 [18]

Система моніторингу повітряних ліній електропередавання (OTLM) [5] також аналогічна до Power Donut (рис. 1.15). Крім контролю температури провідника вимірювальні перетворювачі також контролюють силу струму. Вони мають автономне живлення та мінімальну силу включення 65 А. Максимальна температуру проводу, що вони вимірюють складає 125 °С.

Аналогічною, але більш досконалою є система моніторингу ліній електропередавання TLM (Lindsey Systems) [19] (рис. 1.16). Вона базується на вимірювальних блоках, що крім контролю температури проводу здійснюють контроль його провисання за допомогою технології LIDAR, яка дозволяє визначити висоту проводу від положення до землі. Блок також вимірює нахил та крен проводу за допомогою двовісного акселерометра. Він має автономне живлення та мінімальну силу вмикання 50 А. Він може вимірювати температуру провідника до 180 °С [19].



Рис. 1.15. Вимірювальний перетворювач системи OTLM [5]



Рис. 1.16. Вимірювальний перетворювач системи TLM [19]

У системі моніторингу пропускної здатності ПЛ реального часу [14] використовуються сенсори (рис. 1.17), що вимірюють температуру поверхні проводу та силу струму, який протікає по ньому. Для усунення необхідності періодичного відключення електроенергії для заміни батареї, використовується індуктивний блок живлення, який складається з трансформатора струму (ТС), який генерує індуктивний струм від магнітного поля, створюваного навколо фазного проводу лінії та схеми джерела живлення, що видає напругу постійного струму (рис. 1.18). Сенсор містить додатковий трансформатор струму для вимірювання струму, блок вимірювання струму, вимірювальний перетворювач температури, блок вимірювання температури, який обчислює температуру поверхні провідника та комунікаційний пристрій. блок для передачі даних і блок керування, який спільно керує цими пристроями. Розроблено два типи сенсорів на різні струми ПЛ та граничні температури поверхні проводу. Сенсор Type 1 реагує на струм ПЛ від 50...1200 А, а діапазон контрольованих температур складає $-20...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 1.17. Зовнішній вигляд вимірювального перетворювача [14]

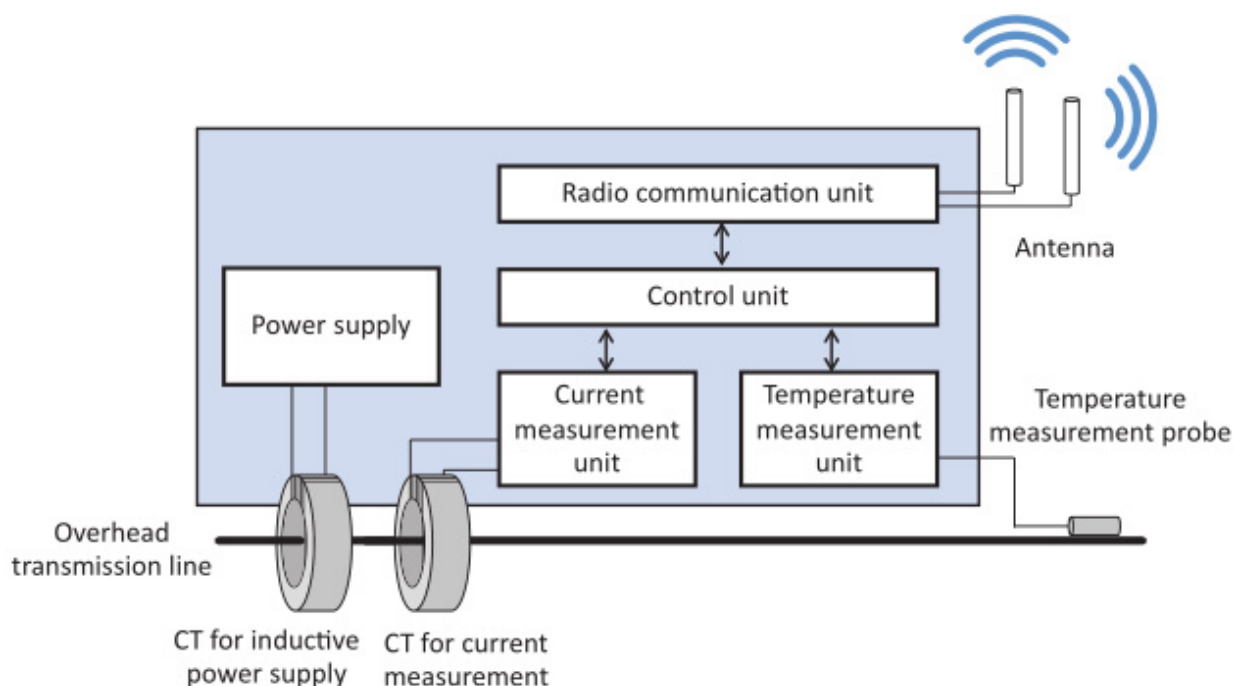


Рис. 1.18. Структурна схема вимірювального перетворювача [14]

Всі розглянуті вимірювальні перетворювачі виконують так зване точкове вимірювання температури проводу, однак зазвичай температура проводу не є постійною вздовж ПЛ внаслідок зміни погодних умов, проходження ПЛ на ділянках з різними висотами, різною рослинністю і т. п. Оскільки тяжіння проводу є функцією середньої температури проводу, то при його розрахунку матимуть певну похибку. Цю похибку можливо зменшити шляхом збільшення кількості вимірювальних перетворювачів на ПЛ. Крім того, провід може мати радіальний градієнт температури, що теж збільшує вказану похибку.

Одним із підходів до усунення вказаних недоліків була розробка системи моніторингу пропускної здатності ПЛ реального часу, яка контролює безпосередньо тяжіння проводів на основі тензометричних вимірювальних перетворювачів.

1.2.2. Вимірювальні перетворювачі тяжіння проводу

Тензометричні вимірювальні перетворювачі використовуються лише однією комерційною системою моніторингу САТ-1 (рис. 1.19). Ці вимірювальні перетворювачі встановлюються між ізолятором та траверсою електроопори (рис. 1.15), отже, є електрично ізольованими від проводу ПЛ [11, 18]. Існує прямий зв'язок між значеннями тяжіння та провисання проводу, і тому моніторинг тяжіння є хорошим індикатором стану ПЛ. Провисання розраховується на основі значення натягу, довжини прольоту та ваги одиницю довжини проводу. У той час коли вимірювання температури провідника є локальним вимірюванням, натяг являє собою середній стан усіх прольотів між двома опорами тяжіння. Ця система відкалібрована, щоб встановити зв'язок між сигналом з тензометричного вимірювального перетворювача та температурою провідника. Для калібрування використовується вимірювальний перетворювач «чистого» випромінювання.



Рис. 1.19. Зовнішній вигляд вимірювального перетворювача [13, 20]

Головними недоліками розглянутої системи є вузький температурний діапазон тензометричних первинних вимірювальних перетворювачів, висока складність монтажу та налагодження системи, що потребує залучення висококваліфікованого персоналу, пропрієтарні алгоритми та програмне забезпечення.

1.3 Постановка задач дослідження

Проведений аналіз відомих систем моніторингу пропускної здатності ПЛ показав, що переважаючою є технологія, що базується на контролі температури поверхні проводу. Її технічна реалізація потребує контролю як метеорологічних параметрів, так і параметрів проводу. Причому, більш нові розробки мають більшу кількість контрольованих параметрів і, як наслідок, вищу функціональність. Такий підхід дозволяє підвищити в певній мірі точність визначення пропускної здатності ПЛ.

Тепловіддача від проводу ПЛ до навколишнього середовища здійснюється всіма можливими механізмами: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. На ці механізми теплообміну впливають різні атмосферні фактори: сонячна радіація, вітер, температура навколишнього повітря, опади.

Для розробки власної СМПЗ ПЛ необхідно розробити математичну модель нагріву/охолодження проводу ПЛ і на її базі дослідити вплив кліматичних факторів на тепловий режим проводу. Отримані результати покласти в основу алгоритм роботи системи моніторингу.

Отже, для вирішення цієї комплексної науково-технічної задачі потрібно розв'язати такі часткові завдання дослідження:

- виконати порівняльний аналіз математичних моделей стандарту IEEE «Standard 738-2006» [9] та CIGRE «Technical Brochure 601 [10];
- розробити математичну модель теплового режиму проводу ПЛ;
- виконати дослідження впливу параметрів навколишнього середовища на пропускну здатність проводу ПЛ;
- розробити систему моніторингу пропускної здатності ПЛ;
- розробити організаційні заходи з ТБ і ОП при експлуатації повітряних ліній електропередавання.

1.4 Висновки до 1-ого розділу

1. Встановлено, що класичні повітряні лінії мають певний ресурс для пропускання більших потужностей без порушення їх технічного регламенту, однак, для використання цього резерву необхідна система моніторингу пропускної здатності ПЛ.

2. Виявлено, що існує два принципово різні підходи до технічної реалізації систем моніторингу пропускної здатності ПЛ, за першого вимірюється температура проводу, за другого – безпосередньо тяжіння проводу в обох випадках, пропускна здатність повітряної лінії визначається за допомогою математичних моделей. Перший підхід серед розробників є переважаючим.

3. На основі проведеного аналізу існуючих систем моніторингу пропускної здатності ПЛ та їх недоліків були сформульовані такі часткові завдання дослідження.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

2.1 Аналіз математичних моделей систем моніторингу пропускної здатності ПЛ

З розвитком технології SmartGrid виникла потреба у визначенні температури проводів повітряних ліній в режимі реального часу. Оперативна інформація про температуру дає уявлення про дійсну пропускну здатність лінії, дозволяє скласти реальну структуру втрат електроенергії та спрогнозувати можливе провисання проводів. Це дає змогу підвищити надійність системи електропостачання та оптимізувати роботу електричних мереж. Тому зусилля науковців спрямовані на розвиток методів визначення температури проводів повітряних ліній за нестационарних умов [9, 10].

Температуру проводу можливо визначити двома шляхами: чисельними методами або аналітичним розв'язком рівняння теплового балансу.

Чисельне моделювання (метод кінцевих елементів) теплових режимів проводу ПЛ [21-25] має ряд суттєвих переваг ніж аналітичний розв'язок рівнянь теплового балансу, однак для його проведення необхідне спеціалізоване програмне забезпечення [21, 24, 25], також технічна реалізація системи моніторингу пропускної здатності ПЛ виявиться невиправдано складною. Тому широке розповсюдження отримали підходи до розрахунку температури проводу на основі рівнянь теплового балансу для неізольованих витих проводів, з рядом припущень. Існує два основні стандарти для теплових розрахунків температури проводів ПЛ: Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) [9] і Міжнародної Ради з великих електричних систем (CIGRE) [10].

За другого підходу до вирішення задачі визначення температури проводу за нестационарних умов, можливі два шляхи:

1) вважається, що для моменту розрахунку температури проводу метеорологічні параметри (температура та водність повітря, швидкість та напрям вітру) не змінюються, а струм у проводі змінюється дискретно від початкового значення I_i до кінцевого I_{ss} (рис. 2.1), тобто, провід переходить з одного усталеного теплового стану в інший [9];

2) вважається, що на елементарному інтервалі часу змінюються як конвективні теплові втрати проводу так і струм, що протікає в ньому, так і його температура (рис. 2.2) [10]. Оскільки $t_w = f(I)$ то в цьому випадку диференціальне рівняння теплового балансу розв'язується чисельним інтегруванням, а з певним ступенем апроксимації розв'язок можливо отримати також і аналітично.

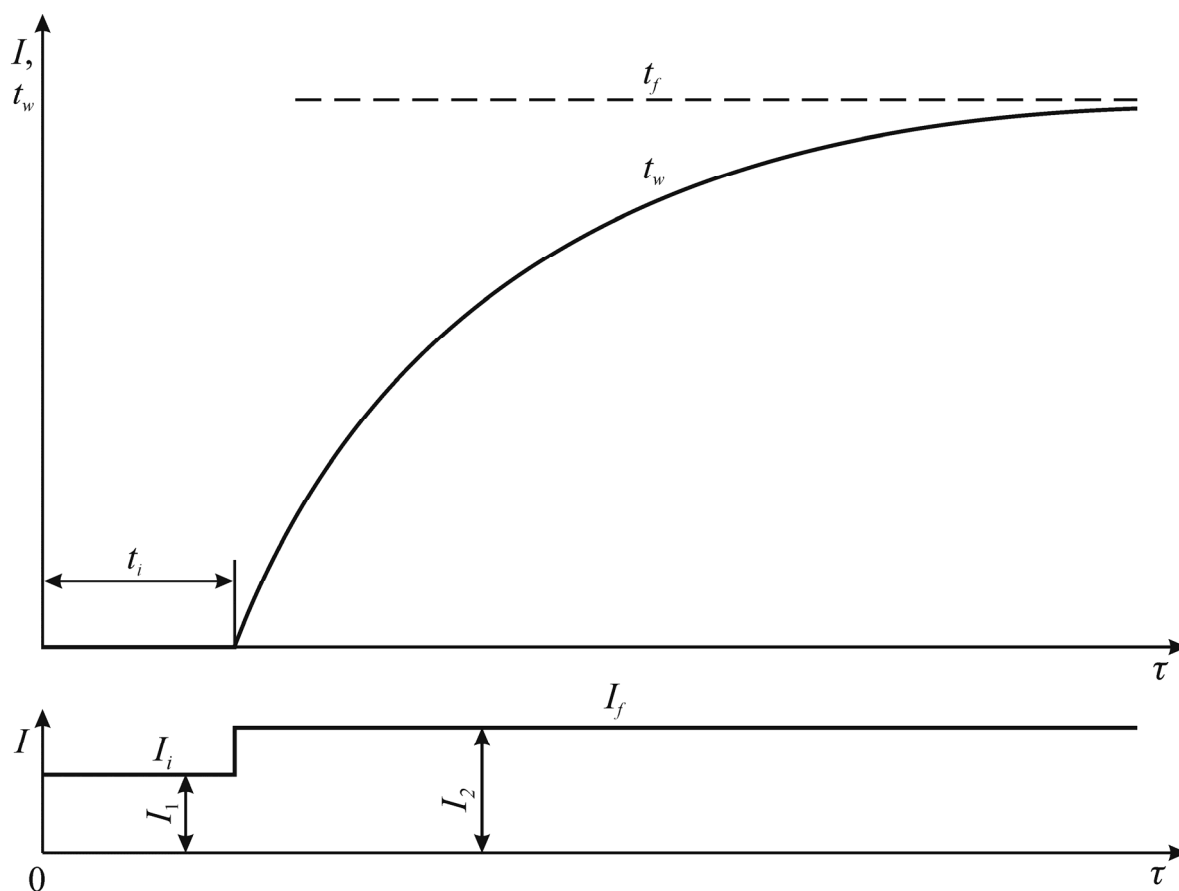


Рис. 2.1. Ступінчаста зміна струму в проводі ПЛ (1-й підхід)

Перший описаний підхід реалізовано в стандарті IEEE [9]. Температура проводу після ступінчастої зміни струму визначається з рівняння теплового балансу

$$m_0 c_w \frac{dt_w}{d\tau} = q_{sun} + q_j(t_w) - q_c - q_r, \quad (2.1)$$

де m_0 – маса одиниці довжини проводу;

c_w – теплоємність проводу;

t_w – температура проводу;

τ – поточний час;

q_c – конвективні втрати тепла проводом;

q_r – втрати тепла проводом внаслідок теплового випромінювання;

q_{sun} – нагрів проводу сонячним випромінюванням;

q_j – нагрів проводу внаслідок протікання електроструму.

Розв'язок рівняння (2.1) за умови лінеаризації має вид:

$$t_w = t_i + (t_{ss} - t_i) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{t_0}} \right)$$

де t_i – температура стаціонарного режиму проводу до ступінчастої зміни струму;

t_{ss} – усталена температура, що набуває провід після проміжку часу;

t_0 – стала часу нагріву проводу

$$t_0 = \frac{(t_{ss} - t_i) m_0 c_w}{R(t_w) (I_{ss}^2 - I_i^2)},$$

де I_i – початкове значення струму в проводі;

I_{ss} – кінцеве, усталене значення струму в проводі.

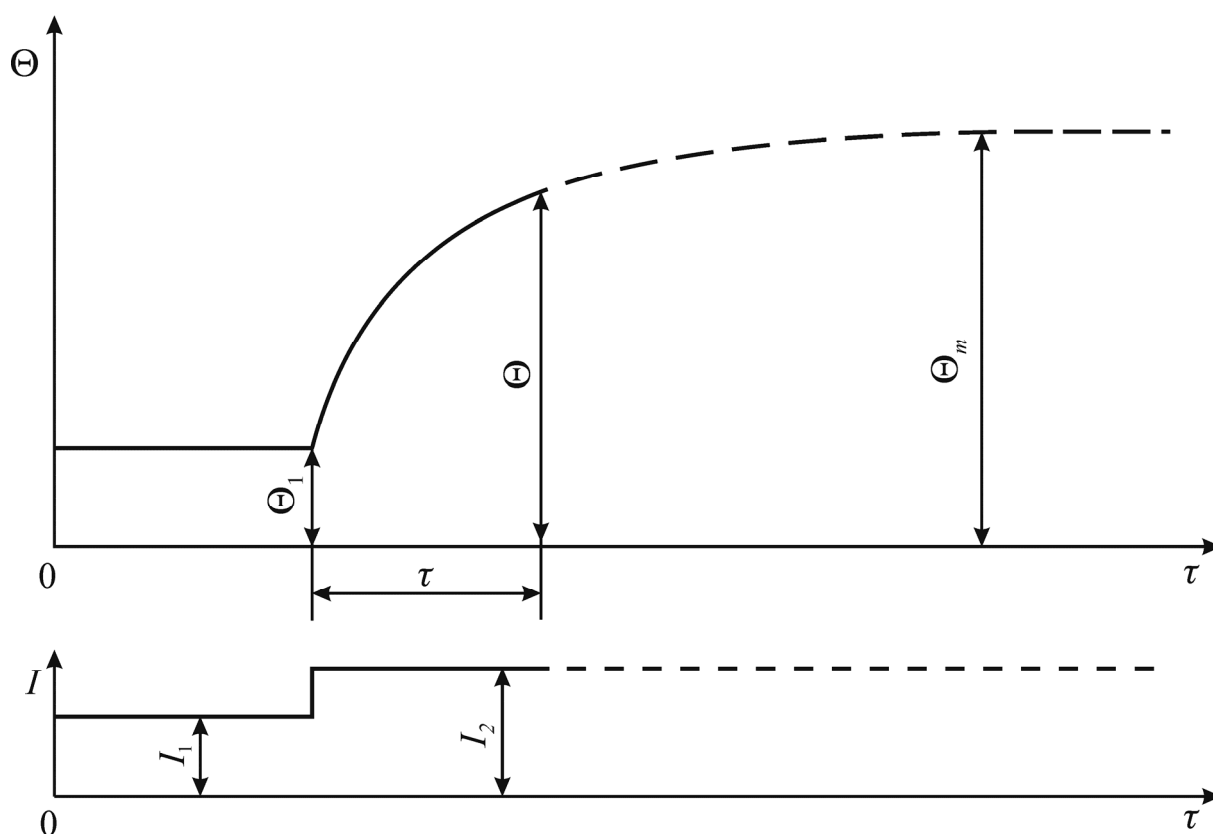


Рис. 2.2. Ступінчаста зміна струму в проводі ПЛ (2-й підхід) [10]

Другий підхід реалізовано у методі запропонованим CIGRE [10]. Температура проводу знаходиться з розв'язку базового рівняння теплового балансу:

$$P_j + P_m + P_{sun} + P_{cor} = P_c + P_r + P_{ev}, \quad (2.2)$$

де P_j – потужність нагріву проводу електричним струмом (електричні втрати);

P_m – потужність нагріву проводу від магнітних втрат;

P_{sun} – потужність нагріву сонячним випромінюванням;

P_{cor} – потужність нагріву проводу внаслідок коронування;

P_c – потужність конвективного охолодження;

P_r – потужність охолодження проводу внаслідок випромінювання;

P_{ev} – охолодження проводу внаслідок випаровування.

Нагрів проводу від корони незначний, особливо для ПЛ середнього класу напруги, крім того його за допомогою приладів досить складно виміряти, тому складовою P_{cor} зазвичай нехтують. Тоді рівняння (2.2) у диференціальній формі матиме вид

$$m_0 c_w \frac{dt_{av}}{d\tau} = P_j + P_m + P_{sun} - P_r - P_c - P_{ev}, \quad (2.3)$$

де t_{av} – середня температура проводу, $t_{av} = 0,5(t_{cor} - t_{sur})$;

t_{cor} – температура ядра проводу;

t_{sur} – температура поверхні проводу.

Якщо в рівнянні (2.3) втрати тепла за рахунок випромінювання представити у лінійному вигляді, а сонячний і магнітний нагрів вважати постійними величинами то його аналітичний розв’язок матиме вигляд [10]

$$t_w = \frac{-mc_w}{I^2 R_w + P_s} \left(\beta(\Theta - \Theta_1) + (1 + \beta\Theta_m) \ln \left(\frac{\Theta_m - \Theta_1}{\Theta_m - \Theta_1} \right) \right), \quad (2.4)$$

а з урахуванням того, що температурний коефіцієнт зміни теплоємності металу β близький до нуля, отримаємо

$$t_w = -t_0 \left(\ln \left(\frac{\Theta_m - \Theta}{\Theta_m - \Theta_1} \right) \right), \quad (2.5)$$

де R_w – опір проводу змінному струму при температурі навколишнього середовища;

Θ – середнє значення перевищення температури проводу, $\Theta = t_{av} - t_a$;

Θ_1 – початкове значення перевищення температури проводу, $\Theta = t_{av} - t_a$;

Θ_m – асимптотичне середнє значення перевищення температури проводу,

$$\Theta_m = t_{avm} - t_a;$$

t_0 – постійна часу нагріву проводу

$$t_0 = \frac{mc_w \Theta_m}{I^2 R_w + P_s}.$$

Таким чином, головна відмінність стандарту CIGRE від IEEE std738-2006 полягає в тому, що модель CIGRE передбачає перетворення змінного струму частотою 60 Гц у постійний струм, а у моделі IEEE подібне перетворення не передбачене.

У денні години доби на температуру проводу суттєвий вплив має інтенсивність сонячного випромінювання. У обох методах цих врахування сонячного нагріву здійснюється за спрощеною методикою, що базується на даних про глобальну сонячну радіацію.

Нагрів проводу за рахунок вихрових струмів у моделі [10] враховується, як частина рівняння корекції, а модель [9] нехтує як поверхневим ефектом так і додатковими втратами від вихрових струмів.

Отже, існуючі моделі теплових режимів проводів повітряних ліній не враховують вплив на провід атмосферних опадів, а тому потребують удосконалення.

2.2 Математична модель теплового режиму проводу ПЛ

У загальному випадку нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності для проводу можливо записати наступним чином [26]:

$$\frac{\partial t_w}{\partial \tau} = \frac{1}{c_w \rho_w} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + \frac{q_v}{c_w \rho_w}, \quad (2.6)$$

де t_w – температура проводу;

τ – час;

ρ_w – густина матеріалів проводу;

c_w – питома теплоємність проводу;

λ_w – коефіцієнт теплопровідності;

q_v – потужність внутрішніх джерел теплоти, що представляє собою кількість теплоти, що виділяється джерелами в одиниці об'єму проводу за одиницю часу.

Якщо $q_v \neq 0$ та $\lambda = \text{const}$ рівня (2.6) набуде вигляду:

$$\frac{\partial t_w}{\partial \tau} = a_w \nabla^2 t_w + \frac{q_v}{c_w \rho_w} = \frac{\lambda_w}{c_w \rho_w} \left[\frac{\partial^2 t_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_w}{\partial z^2} \right] + \frac{q_v}{c_w \rho_w}, \quad (2.7)$$

де a_w – коефіцієнт температуропровідності проводу:

$$a = \frac{\lambda}{(\rho c)};$$

∇^2 – оператор Лапласа для тривимірного простору декартових координат:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

де x, y, z – координати.

З метою визначення режиму теплообміну проводу повітряної лінії виконаємо розрахунок числа Ві за швидкості вітру 0-14 м/с для двох випадків:

- провід сухий;
- на поверхні проводу наявна плівка води.

Число Біо

$$\text{Bi} = \frac{h_c d}{\lambda},$$

де h_c – коефіцієнт конвективного теплообміну проводу, що вкритий плівкою води [28]

$$h_c = \frac{h_{c.d} \cdot h_{c.wr}}{h_{c.d} + h_{c.wr}},$$

$h_{c.d}$ – коефіцієнт конвективного теплообміну сухого проводу [29], Вт/м²К:

- якщо вітер відсутній, тобто $v_a = 0$, тоді:

$$h_{c.d} = 1,287 \left(\frac{\Delta t_w}{d_w} \right)^{0,25}, \quad (2.8)$$

Δt_w – перегрів проводу, °С;

d_w – діаметр проводу, м;

- якщо кут між нормаллю до поверхні проводу та вектором швидкості вітру $\vec{v}_a$, що перетинає цей провід під кутом дорівнює $\psi = 90^\circ$, причому $v_a \neq 0$ м/с (рис. 2.3) тоді коефіцієнт конвективного теплообміну сухого проводу буде рівним:

$$h_{c.d} = \frac{k_a}{d_w} 10^{-0,07043+0,3153 \cdot \log(\text{Re})+0,03553(\log(\text{Re}))^2}, \quad (2.9)$$

k_a – теплопровідність повітря, Вт/м·К;

Re – число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v_a d_w}{\nu_a};$$

ν_a – кінематична в'язкість повітря, м²/с;

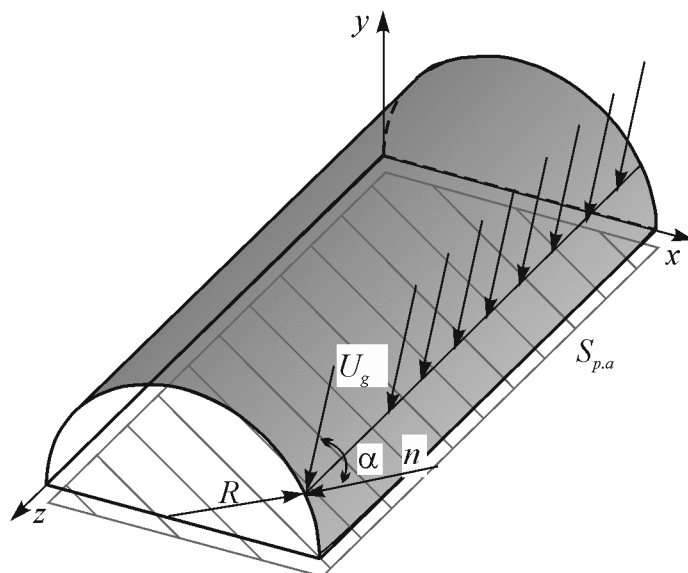


Рис. 2.3. Провід, що знаходиться в повітряно-крапельному потоці [26]

- для випадку $\psi < 90^\circ$, $v_a > 0$ м/с, матимемо:

$$h_{c.d} = \frac{0,0244k}{d} 10^{-0,07043+0,3153 \cdot \log(\text{Re})+0,03553 \cdot (\log(\text{Re}))^2}, \quad (2.10)$$

k – коефіцієнт, що враховує напрям вітру до проводу ПЛ:

$$k = 1,194 - \sin \psi - 0,194 \cos(2\psi) + 0,368 \sin(2\psi);$$

де h_{wr} – коефіцієнт конвективного теплообміну плівки води на проводі, Вт/м²К:

$$h_{wr} = \frac{k_{wr}}{\delta_{wr.f}},$$

k_{wr} – коефіцієнт теплопровідності води, Вт/м·К;

$\delta_{w.f}$ – еквівалентна товщина плівки води, м;

λ_w – коефіцієнт теплопровідності проводу, згідно закону Відемана-Франца, Вт/м·К:

$$\lambda_w = \frac{2,47 \cdot 10^{-8} \cdot (273,15 + t_w)}{r_0},$$

R_w – омичний опір проводу ПЛ приведений до температури t_w °C, Ом/м

$$R_w = r_{20} [1 + \alpha_{eqv} (t_w - 20^\circ)]$$

r_{20} – опір проводу при температурі 20°C, Ом/м

$$r_{20} = r S_{acr.w} \cdot 10^{-9},$$

r – омичний опір 1 км проводу ПЛ, Ом;

$S_{acr.w}$ – повна площа перерізу сталевалюмінієвого проводу, мм²:

$$S_{acr.w} = S_{Al} + S_{Fe},$$

S_{Al}, S_{Fe} – сумарні площі перетину, відповідно, алюмінієвої та сталеві частин проводу. Для алюмінієвих проводів марки «А» – $S_{Fe} = 0$;

α_{eqv} – еквівалентний температурний коефіцієнт, для сталевалюмінієвого проводу марки «АС»:

$$\alpha_{eqv} = k_{Al} \cdot \alpha_{Al} + k_{Fe} \cdot \alpha_{Fe},$$

α_{Al}, α_{Fe} – температурні коефіцієнти, відповідно, для алюмінію та сталі, К⁻¹.

Теплообмін сухого проводу є більш інтенсивним ніж покритого плівкою води (при $\delta_w \rightarrow 0$, $h_c = h_{c.d}$), тому розрахунок числа Ві було проводився для випадку $\delta_w = 0$. Для заданих вихідних параметрів число Біо виявилось менше

0,01 тому провід повітряної лінії в подальшому можливо розглядати як термічно «тонке» тіло

Тоді для проводу повітряної лінії будуть справедливі рівності:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial z} = 0; \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0.$$

З урахуванням (2.8) рівняння (2.7) матиме вигляд:

$$\rho_w c_w \frac{dt_w}{d\tau} = q_V. \quad (2.12)$$

Отримане рівняння (2.9) запишемо з урахуванням потужностей:

- нагріву від протікання електричного струму;
- нагріву від сонячного випромінювання;
- охолодження внаслідок випромінювання;
- нагріву/охолодження від внаслідок впливу дощу на провід:

$$m_w c_{eqv} \frac{dt_w}{d\tau} = q_{V.h} V + q_{sun} S_{sur.w} - h_c S_{sur.w} [t_w - t_a] - m_{wr} c_{wr} [t_w - t_{dr}] S_{p.a} - q_{rad} S_{sur.w}, \quad (2.13)$$

де m_w – маса ділянки сталевалюмінієвого проводу $m_w = m_{Al} + m_{Fe}$;

m_{Al} , m_{Fe} – маси, відповідно, алюмінієвої та сталевій частин проводу марки «АС», для алюмінієвих проводів, відповідно $m_w = m_{Al}$;

c_{eqv} – еквівалентна теплоємність сталевалюмінієвих проводів:

$$c_{eqv} = \frac{m_{Al} c_{Al} + m_{Fe} c_{Fe}}{m_{Al} + m_{Fe}},$$

c_{Al}, c_{Fe} – питомі теплоємності, відповідно, алюмінію та сталі; для алюмінієвих проводів марки «А» – $c_{eqv} = c_{Al}$;

$q_{sun.max}$ – максимальна потужність випромінювання сонця, що може поглинути провід ПЛ

$$q_{sun.max} = W'_{sun} \cdot d_w;$$

W'_{sun} – інтенсивність сонячного випромінювання

$$W'_{sun} = \alpha k_H W_{sun\Sigma} \sin \delta;$$

α – коефіцієнт поглинання проводу, приймаємо $\alpha = 0,6$;

k_H – коефіцієнт, що враховує вплив висоти повітряної лінії відносно рівня моря, для України $150 < H < 1500$ м, тоді

$$k_H = 0,116 \lg H + 0,725;$$

$W_{sun\Sigma}$ – сумарна інтенсивність прямої та відбитої сонячної радіації залежить від прозорості повітря:

- для чистого повітря визначається за виразом

$$W_{sun\Sigma} = 250,874 + 27,637 h_{sun} - 0,3394 h_{sun}^2 + 1,4435 \cdot 10^{-3} h_{sun}^3;$$

- для повітря середньої забрудненості визначається за виразом

$$W_{sun\Sigma} = 134,282 + 26,738 h_{sun} - 0,3134 h_{sun}^2 + 1,2893 \cdot 10^{-3} h_{sun}^3;$$

- для забрудненого повітря визначається за виразом

$$W_{sun\Sigma} = -21,092 + 27,492h_{sun} - 0,318h_{sun}^2 + 1,3357 \cdot 10^{-3}h_{sun}^3 ;$$

δ – активний кут нахилу сонячних променів:

$$\delta = \arccos[\cos(h_{sun}) \cdot \cos(180^\circ - \psi_1)] ;$$

h_{sun} – кутова висота Сонця для північної півкулі Землі

$$h_{sun} = 113,5 - \varphi ;$$

φ – широта місцевості;

ψ_1 – географічний кут повітряної лінії та її орієнтація відносно меридіану в діапазоні 0-180°;

$S_{sur.w}$ – площа поверхні проводу (площею поверхні торців нехтуємо);

t_a – температура навколишнього повітря;

t_{dr} – температура крапель дощу;

c_{wr} – питома теплоємність води;

$S_{p.a}$ – площа проекції поверхні проводу (рис. 2.3):

$$S_{p.a} = 2rad \cdot l_w$$

rad_w – радіус проводу ПЛ ;

l_w – довжина ділянки проводу ПЛ;

m_{wr} – маса води, що потрапляє на одиницю площі проводу за одиницю часу:

$$m_{wr} = Cel \cdot \vec{U}_g$$

Cel – водність дощу, кг/м³ [47]:

$$Cel = 6,7 \cdot 10^{-5} P^{0,846};$$

P – інтенсивність опадів, мм/год.

Приведена товщина плівки води на циліндрі еквівалентного діаметру до проводу:

$$l_{film} = \left(\frac{\mu}{\rho_w^2 \cdot g} \right)^{0,33}$$

де μ_w – коефіцієнт динамічної в'язкості води;

ρ_w – густина води.

Для типових діаметрів крапель, більших за 1 мм, сили інерції більші за сили в'язкості, тому їх траєкторія польоту поблизу проводу буде прямолінійною [30], рівномірна швидкість польоту може бути знайдена з векторної суми швидкості вітру $\vec{v}_a$ та граничної швидкості краплі $\vec{v}_{dr}$:

$$U_g = \sqrt{v^2 + v_{dr}^2}.$$

Гранична швидкість падаючої краплі діаметром 0,5 мм які характерні для дощу в теплий період року лежить у межах 9-30 м/с.

Втрати потужності при теплопередачі випромінюванням визначимо за законом Стефана – Больцмана

$$q_{rad} = \varepsilon C_0 \left[(273 + t_w)^4 - (273 + t_a)^4 \right], \quad (2.14)$$

де ε – ступінь чорноти поверхні проводу, приймаємо як для окисленого алюмінію

$$\varepsilon = 0,13 \text{ відн. од.};$$

C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно-чорного тіла, $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²;

Аналіз конвективного теплообміну проводиться за умови, що температура повітря не встигає змінитися за час нагріву ділянки проводу ПЛ від одного усталеного значення до іншого, тобто $t_a = \text{const}$.

Нехай потужність внутрішніх джерел нагріву дорівнює $P_j = q_{V.h}V$, а зовнішніх – $P_{sun} = q_{V.h}S$ і $P_{rad} = q_{rad}S_{sur.w}$, тоді рівняння (2.13) набуде вигляду:

$$m_w c_{eqv} \frac{dt_w}{d\tau} = P_j + P_{sun} - h_c S_{sur.w} [t_w - t_a] - m_{wr} c_{wr} S_{p.a} [t_w - t_{dr}] - P_{rad};$$

Виконаємо перетворення: поділимо ліву та праву частину останнього рівняння на $m_w c_{eqv}$ та розкриємо дужки в лівій його частині

$$\frac{dt_w}{d\tau} = \frac{1}{m_w c_{eqv}} (P_j + P_{sun} - h_c S_{sur.w} t_w + h_c S_{sur.w} t_a - m_{wr} c_{wr} S_{p.a} t_w + m_{wr} c_{wr} S_{p.a} t_{dr} - P_{rad}).$$

Перегрупуємо доданки рівняння наступним чином

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}}{m_w c_{eqv}} t_w = \frac{1}{m_w c_{eqv}} (P_j + P_{sun} + h_c t_a S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} t_{dr} S_{p.a} - P_{rad}). \quad (2.15)$$

Введемо позначення:

$$A_1 = \frac{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}}{m_w c_{eqv}},$$

$$A_2 = \frac{1}{m c_{eqv}} (P_j + P_{sun} + h_c t_a S_{sur.w} + m_w c_w t_{dr} S_{p.a} - P_{rad}).$$

Тоді (2.15) набуде вигляду

$$\frac{d}{d\tau} t_w + A_1 t_w = A_2. \quad (2.16)$$

Рівняння (2.16) – це диференціальне рівняння I-го порядку і має наступний розв'язок:

$$t = C e^{-A_1 \tau} + \frac{A_2}{A_1},$$

або в розгорнутому вигляді

$$t_w = C \cdot e^{-\frac{S_{sur.w} h_c + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}}{m_w c_{eqv}} \tau} + \frac{P_j + P_{sun} + h_c t_a S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} t_{dr} S_{p.a} - P_{rad}}{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}};$$

де C – стала інтегрування.

При знаходженні сталої інтегрування робимо припущення, що в початковий момент часу ($\tau = 0$) температура проводу дорівнює температурі повітря, тобто $t(0) = t_a$.

Тоді

$$t_a = C + \frac{P_j + P_{sun} + h_c t_a S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} t_{dr} S_{p.a} - P_{rad}}{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}},$$

Отже

$$C = t_a - \frac{P_j + P_{sun} + h_c t_a S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} t_{dr} S_{p.a} - P_{rad}}{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}}.$$

Частковий розв'язок рівняння (2.16):

$$t_w = \frac{P_j + P_{sun} + h_c t_a S_{sur.w} + [P_{fr} + P_{sun} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a} (t_a - t_{dr})] e^{\frac{-\tau}{T_0}} + m_{wr} c_{wr} t_{dr} S_{p.a} - P_{rad}}{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}}, \quad (2.17)$$

спростивши (2.17), отримаємо:

$$t_w = t_a + \frac{P_j + P_{sun} - P_{rad} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a} (t_{dr} - t_a)}{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}} \left(1 - e^{\frac{-\tau}{T_0}} \right),$$

або

$$t_w = t_a + \frac{I_w^2 R_w (1 + \alpha (t_w - 20^\circ)) + P_{sun} - P_{rad} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a} (t_{dr} - t_a)}{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}} \left(1 - e^{\frac{-\tau}{T_0}} \right), \quad (2.18)$$

де T_0 – постійна часу нагріву ділянки проводу

$$T_0 = \frac{m_w c_{eqv}}{h_c S_{sur.w} + m_{wr} c_{wr} S_{p.a}}.$$

Отже, отримано закон змін температури проводу ПЛ який встановлює зв'язок між режимними та кліматичними параметрами.

2.3 Дослідження впливу кліматичних факторів на температуру проводу

З метою дослідження впливу метеорологічних параметрів на температуру проводу повітряної лінії, що виконана сталевалюмінієвим проводом АС-240/56 були проведені розрахунки за метеорологічних умов приведених у табл. 2.1. За параметри, що будуть варіюватися взято такі: температура повітря; швидкість вітру; струм навантаження проводу.

Таблиця 2.1. Параметри навколишнього середовища та проводу ПЛ, що були прийняті при розрахунку

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Чисельне значення
Параметри проводу			
Тип проводу	АС-240/56	-	-
Струм навантаження проводу	$I_{\text{нав}}$	А	50-610
Омічний опір проводу при 20 °С	r_{20}	Ом/м	$0,1197 \cdot 10^{-3}$
Маса алюмінієвої частини	m_{Al}	кг/м	0,665
Маса сталевий частини	m_{Fe}	кг/м	0,441
Діаметр проводу	d_w	м	$22,4 \cdot 10^{-3}$
Питома теплоємність алюмінію	c_{Al}	Дж / кг·К	903
Питома теплоємність сталі	c_{Fe}	Дж / кг·К	477
Висота прокладання ПЛ	H	м	< 150
Параметри навколишнього середовища			
Температура повітря	t_a	°С	від -30 до +30
Швидкість вітру	v_a	м/с	0,6-25
Кут атаки вітру	ψ		90°
Теплопровідність повітря	k_a	Вт/м·К	$(2,2-2,67)10^{-2}$
Кінематична в'язкість повітря	ν_a	м ² /с	$(1,08-1,6)10^{-6}$
Місто	Кропивницький	-	-

Далі проводиться розрахунок для найпростішого способу моделювання змін усіх параметрів – ступінчастої зміни.

Максимальна потужність випромінювання сонця, що поглинає провід:

$$q_{sun.max} = W'_{sun} \cdot d_w = 297,8 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} = 6,7 \text{ Вт/м}; \quad (2.19)$$

де W'_{sun} – інтенсивність сонячного випромінювання

$$W'_{sun} = \alpha k_H W_{sun\Sigma} \sin \delta = 0,6 \cdot 1 \cdot 545,4 \cdot 0,91 = 297,8 \text{ Вт/м}^2; \quad (2.20)$$

$W_{sun\Sigma}$ – сумарна інтенсивність прямої та відбитої сонячної радіації для повітря середньої забрудненості

$$\begin{aligned} W_{sun\Sigma} &= 134,282 + 26,738 h_{sun} - 0,3134 h_{sun}^2 + 1,2893 \cdot 10^{-3} h_{sun}^3 = \\ &= 134,282 + 26,738 \cdot 63,3 - 0,3134 \cdot 63,3^2 + 1,2893 \cdot 63,3 \cdot 10^{-3} = 545,4 \text{ Вт/м}^2; \end{aligned}$$

δ – активний кут нахилу сонячних променів

$$\delta = \arccos(\cos(h_{sun}) \cdot \cos(180 - \psi_1)) = \arccos(\cos(65,2) \cdot \cos(180 - 0)) = 2,0;$$

h_{sun} – кутова висота Сонця для м. Кропивницький:

$$h_{sun} = 113,5 - \varphi = 113,5 - 48,3 = 65,2^\circ.$$

На рис. 2.4-2.6 представлені графічні залежності температури проводу АС-240/56 від його струму навантаження при ступінчастих змінах температури навколишнього середовища (від -30°C до $+30^\circ\text{C}$) і швидкості вітру (від $0,5 \text{ м/с}$ до 15 м/с). При температурі повітря $t_a = -30^\circ\text{C}$, швидкості вітру $v_a = 0,5 \text{ м/с}$.

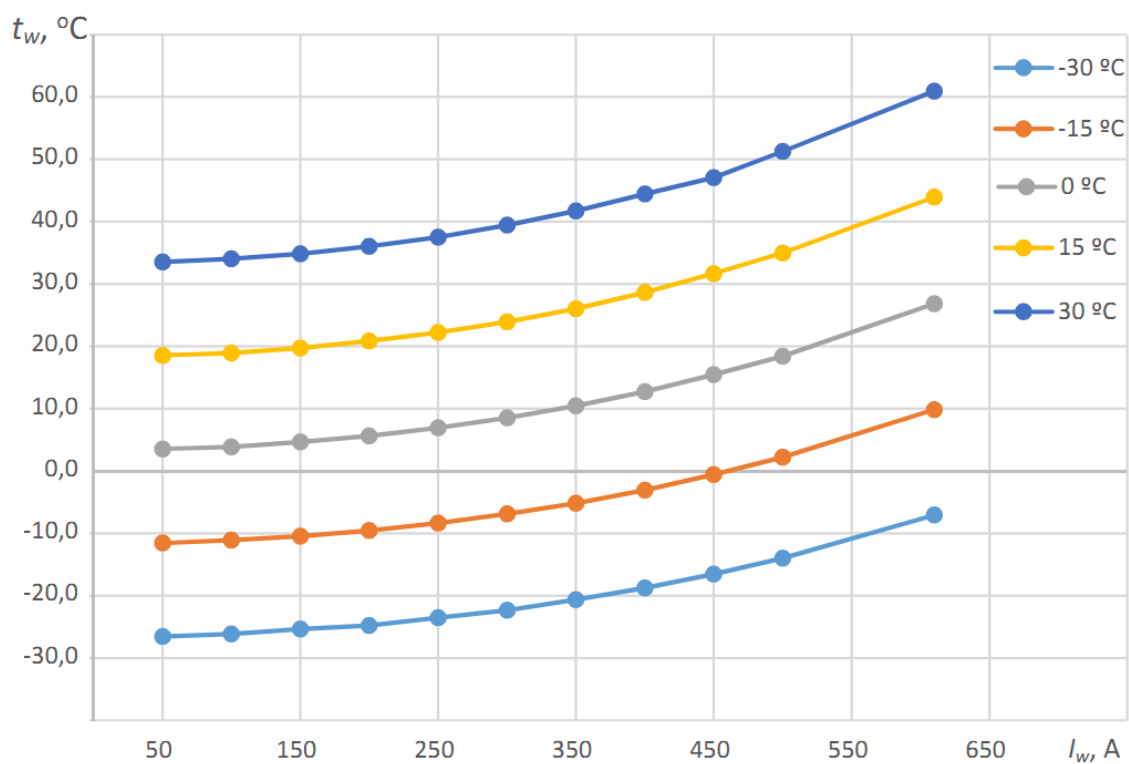


Рис. 2.4. Графіки зміни температури проводу АС-240/56 від струму навантаження при $v_a = 0,5$ м/с, $q_{\text{sun}} = 6,7$ Вт/м

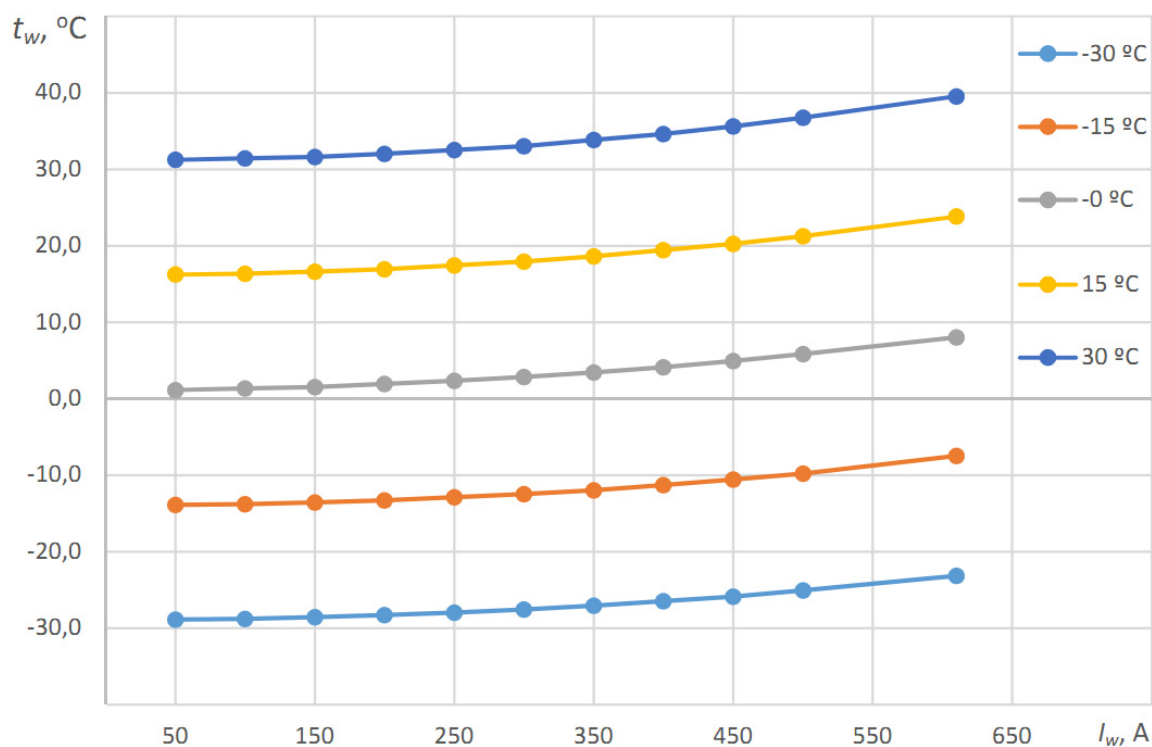


Рис. 2.5. Графіки зміни температури проводу АС-240/56 від струму навантаження при $v_a = 10$ м/с, $q_{\text{sun}} = 6,7$ Вт/м

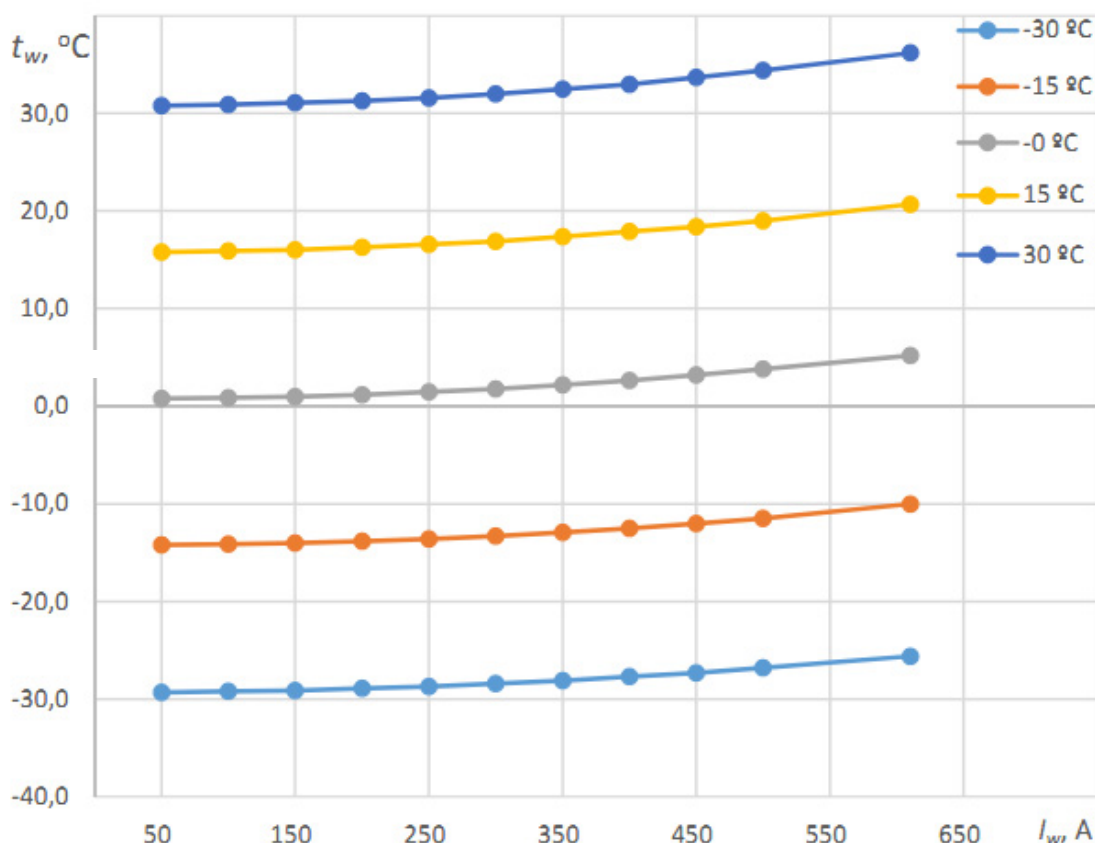


Рис. 2.6. Графіки зміни температури проводу AC-240/56 від струму навантаження при $v_a = 15$ м/с, $q_{\text{sun}} = 6,7$ Вт/м

повному завантаженні ($I_{\text{нав}} = 610$ А) перегрів проводу складає 23 °C, а при швидкості вітру 15 м/с лише $3,5$ °C.

Слід відмітити, що при низькій швидкості вітру ($v_a = 0,5$ м/с) та $t_a = 30$ °C при повному завантаженні проводу його температура наближається до зони критичних значень і досягає значення 61 °C.

На рис. 2.7 представлена графічна залежність допустимого струмового навантаження проводу AC-240/56 від температури навколишнього середовища в діапазоні від -40 °C до $+40$ °C. За критичну температуру проводу, взято згідно ПУЕ [6], температуру 70 °C.

Із рис. 2.7 слідує, що при температурі повітря -40 °C рівень допустимого струму перевищує в $1,5$ рази рівень струму при $+20$ °C. При максимальній температурі повітря $+40$ °C струм навантаження проводу необхідно знизити на 200 А відносно струму навантаження при $+20$ °C.

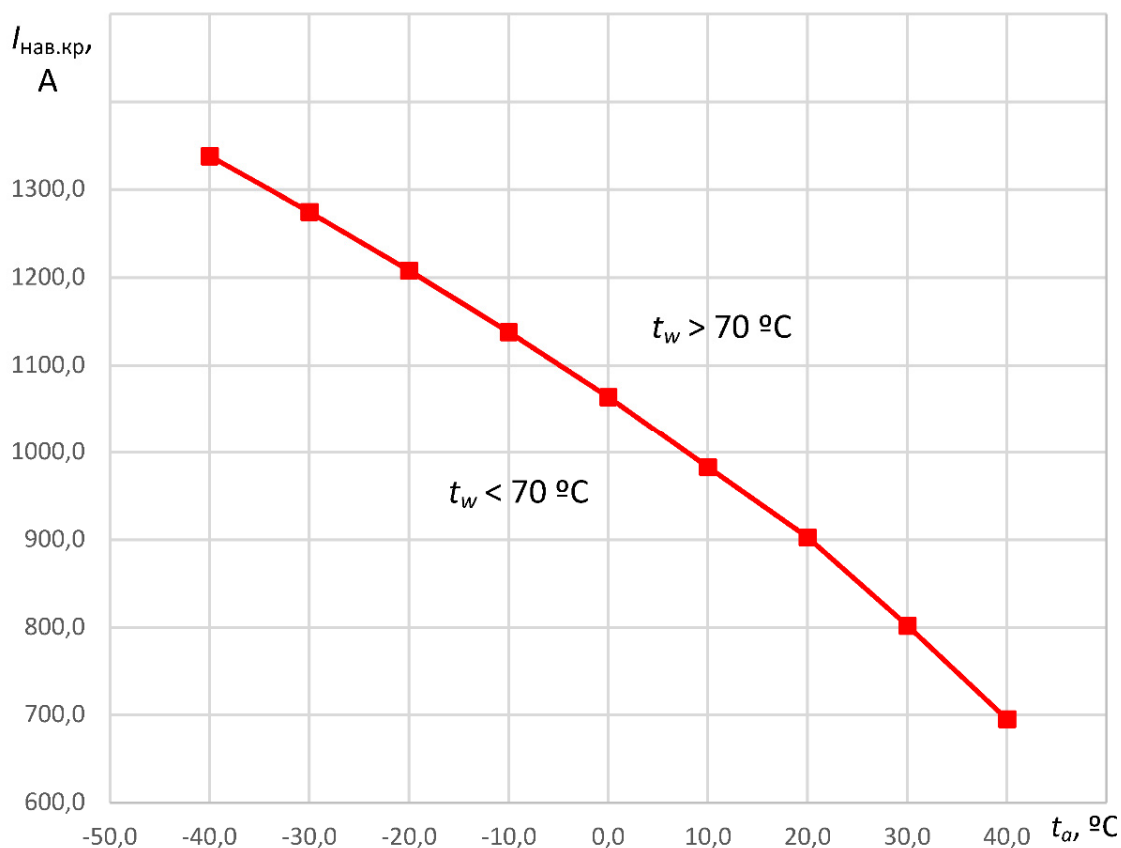


Рис. 2.7. Зв'язок між допустимим струмовим навантаженням і температурою повітря (провід АС-240/56, $v_a = 0,5$ м/с та $q_{\text{sun}} = 0$ Вт/м)

Отже, передавання максимальних потужностей електричної енергії по повітряній лінії без зниження рівня її надійності та терміну служби можливе лише при врахуванні кліматичних факторів таких як температура повітря, швидкість вітру. Також, важливим фактором, що впливає на пропускну здатність ПЛ є інтенсивність сонячного випромінювання. Оскільки врахування цього фактору дозволяє збільшувати навантаження ПЛ у вечірні та ранкові максимуми навантаження.

2.4 Висновки до 2-ого розділу

1. Встановлено, що головна відмінність стандартних математичних моделей розрахунку температури проводу полягає в тому, що модель CIGRE передбачає перетворення змінного струму частотою 60 Гц у постійний струм, а у моделі IEEE подібне перетворення не передбачене.

2. Отримано нестационарне рівняння, що встановлює залежність між температурою проводу, електричним струмом і параметрами навколишнього середовища.

3. Визначено, що найбільший вплив на температуру проводу чинять температура навколишнього середовища та швидкість вітру, а наявність водяної плівки на проводі призводить до зниження коефіцієнту конвективного теплообміну.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

3.1 Вимоги та основні функції системи моніторингу

Основними вимогами до системи моніторингу пропускної здатності повітряної лінії з неізолюваними проводами є такі:

Головні:

- контроль струму навантаження ПЛ;
- контроль температури проводу;
- контроль параметрів навколишнього середовища:
 - a) температури повітря;
 - b) інтенсивності сонячного випромінювання;
 - c) швидкості та напрямку вітру;
 - d) визначення наявності дощу;
- оцінювання пропускної здатності ПЛ на основі отриманих даних в реальному часі;
- робота від автономного джерела живлення щодо ПЛ;
- здатність функціонувати в несприятливих погодних умовах:
 - a) діапазон робочих температур від -40 до +65 °C;
 - b) відносна вологість повітря до 100% включно;
- просте впровадження в існуючі інформаційні системи електропостачальних компаній;
- тривала робота без обслуговування.

Другорядні [1]:

- збір інформації для розрахунку усталених режимів роботи мережі;
- збір інформації для більш точного визначення потужності та електричної в реальному часі для мереж 110 кВ з розімкненими та замкненими контурами;

- уточне визначення розрахункових втрат за наявності перетоків потужності через повітряну лінію.

До основних функцій системи моніторингу пропускної здатності повітряної лінії відносяться:

- контроль реального технічного стану ПЛ;
- максимізація потужності, що передається через ПЛ;
- швидка реакція на нештатні ситуації та зміну погодних умов;
- запобігання зайвим діям диспетчера електромереж;
- безпечна та надійна експлуатація ПЛ в режимах перевищення статичних навантажень;
- оцінка максимальних значень тривалих і короточасних струмів навантаження;
- підвищення експлуатаційної надійності ПЛ;
- формування інформаційних та аварійних сигналів;
- створення архівної бази даних з інформацією про нормальні та аварійні режими роботи ПЛ;
- передача телеметричних даних до ОДС електропостачальної компанії.

Цінність інформації про реальну температуру проводу повітряної лінії та параметри навколишнього середовища в значній мірі залежить від часу вимірювання цих даних системою та індикацією інформації про неї на автоматизованому робочому місці диспетчера. Таким чином система моніторингу повинна працювати в реальному масштабі часу та використовувати наявні автоматичні швидкодіючі канали передачі телеметричної інформації.

Отже на основі викладених вимог, технічна реалізація системи для функціонування якої необхідно проводити вимірювання значної кількості електричних та неелектричних параметрів доцільно виконати за блочним принципом, на основі ідентичних підсистем. Такий підхід дозволить отримати систему моніторингу з високою функціональною гнучкістю.

3.2 Система моніторингу пропускної здатності

Спираючись на досвід створення існуючих систем моніторингу пропускної здатності ПЛ [1, 3, 5, 7, 12-20] була розроблена структурна схема системи моніторингу пропускної здатності повітряних ліній електромережі електропостачального підприємства, яка подана на рис 3.1. Вона складається з 3-х рівнів, що підпорядковані один одному: рівня локальних систем збору даних, районного рівня та головного. Рівень локальних систем збору даних складається з

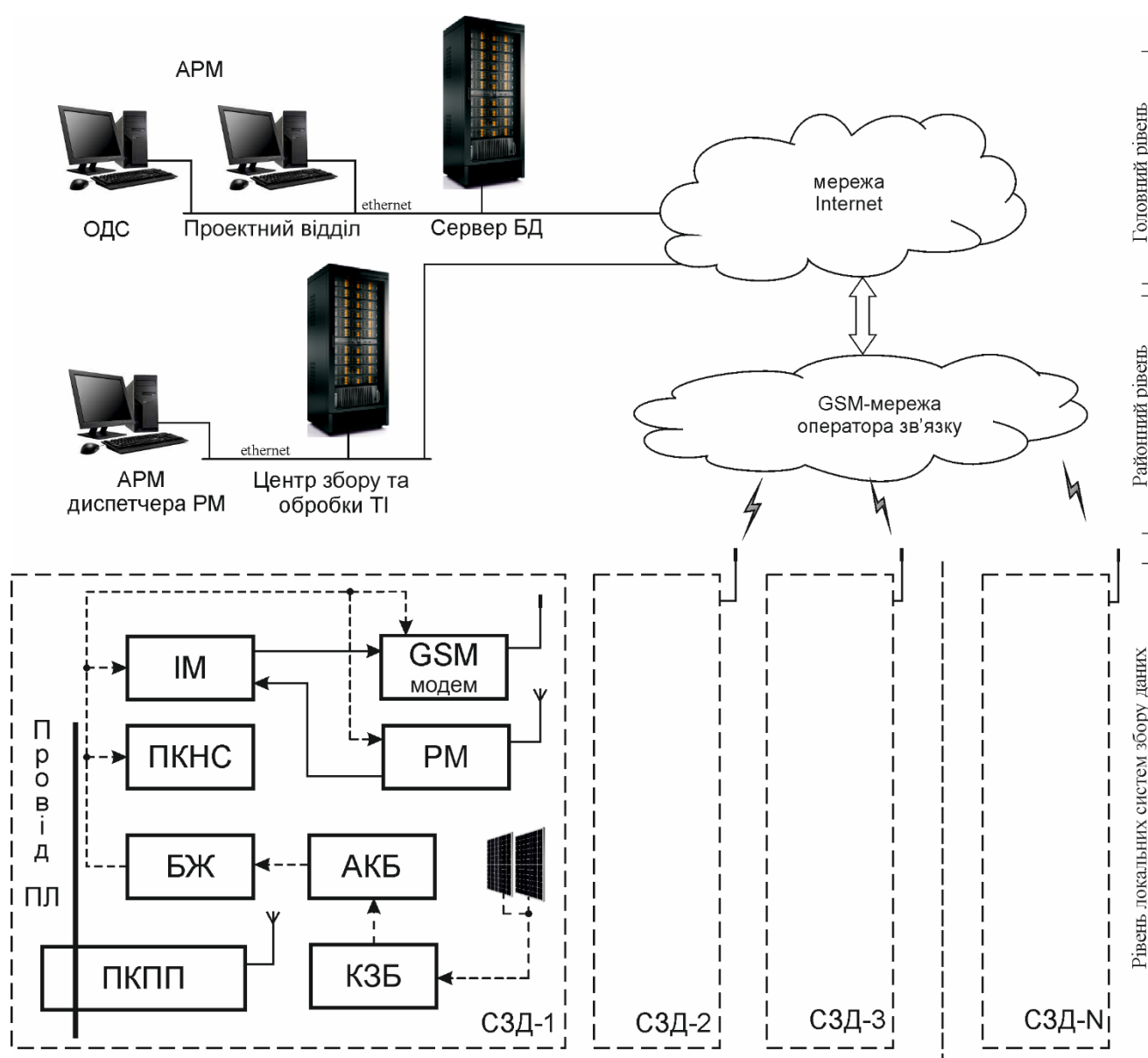


Рис. 3.1. Структурна схема системи моніторингу пропускної здатності ПЛ електромережі

систем збору даних (СЗД), що встановлюються на контрольованих прогонах повітряних ліній. У залежності від складності траси, рельєфу місцевості по якій проходить ПЛ на ній може бути встановлено декілька СЗД. Зв'язок між окремими СЗД та центром збору й обробки даних реалізується через існуючі GSM-канали мобільних операторів.

Районний рівень системи складається з центрів збору та обробки телеметричної інформації, що розміщуються в районних філіях електропостачальних підприємств. Основою кожного з таких центрів є: сервер додатків, сервер баз даних і операційна система. Сервери додатків забезпечують зв'язок з системами збору даних, що розміщуються на контрольованих ділянках повітряних ліній, керування та доступ користувачів до інформації та виконання прикладної логіки. Сервер баз даних відповідає за зберігання, цілісність і передачу інформації на автоматизоване робоче місце (АРМ) диспетчера з метою візуалізації поточного стану проводу ПЛ, відображення тривожних повідомлень і для роботи архівними даними.

Операційна система управляє доступом до ресурсів та надає файлові й мережеві сервіси. Сервер центру має статичну IP-адресу та налаштований на прийом запитів на з'єднання захищеним каналом від СДЗ для передавання телеметричної інформації. Основою центрів є сучасні програмно-апаратні засоби.

Через мережу Інтернет телеметрична інформація з Районних центрів передається на Головний рівень системи.

Головний рівень системи моніторингу пропускної здатності ПЛ виконує ключові функції, такі як збір, систематизація, накопичення, об'єднання та тривале зберігання структурованих даних, які надходять з усіх Районних центрів. Його основою є робочі станції автоматизованих робочих місць (АРМ), комунікаційне обладнання, сервер баз даних (СБД) і спеціалізоване програмне забезпечення. Ці засоби зв'язані за допомогою локальної мережі Ethernet і забезпечують ефективну роботу оперативного персоналу. Актуальна інформація щодо пропускної здатності ПЛ передається на АРМ центральних диспетчерських

пунктів електропостачального підприємства. Крім того, проектний відділ підприємства має прямий доступ до СБД для проведення аналізу структурованих даних і формування висновків.

Для передавання телеметричної інформації від СЗД до Районних центрів збору та обробки даних використовується технологія GPRS (General Packet Radio Service). Вона використовує існуючу GSM-інфраструктуру мобільного зв'язку, але дозволяє передавати дані з більшою швидкістю порівняно з традиційними SMS або CSD. Використання каналів GSM-зв'язку забезпечує безперервний доступ до мережі, що дозволяє ефективно відправляти та отримувати телеметричну інформацію. Використання GPRS дозволяє забезпечити стабільний інтернет-зв'язок для віддалених точок моніторингу. Технологія забезпечує високий рівень безпеки передачі даних, що важливо для конфіденційної телеметричної інформації. Побудова підсистеми зв'язку системи моніторингу на основі GPRS сприяє вдосконаленню ефективності та точності збору та аналізу даних з віддалених СДЗ. Завдяки високій мобільності GPRS ідеально підходить для систем моніторингу з великою кількістю джерел телеметричної інформації.

3.3 Система збору даних

До складу системи збору даних входять (рис. 3.2): підсистема контролю параметрів повітряної лінії (ПКПЛ), підсистема контролю навколишнього середовища (ПКНС), інтелектуальний модуль (ІМ), радіомодем (РМ), GSM-модем, сонячні панелі, контролер заряду акумуляторної батареї (КЗБ), акумуляторні батареї та блок живлення (БЖ).

Основним завданням СДЗ є визначення пропускної здатності та стріли провисання ПЛ на основі отриманої інформації про поточну температуру та струм проводу, даних про метеорологічну обстановку середовища поблизу проводу ПЛ, первина обробка отриманої інформації, самодіагностика всіх підсистем і передавання цієї інформації до центру збору та обробки даних.

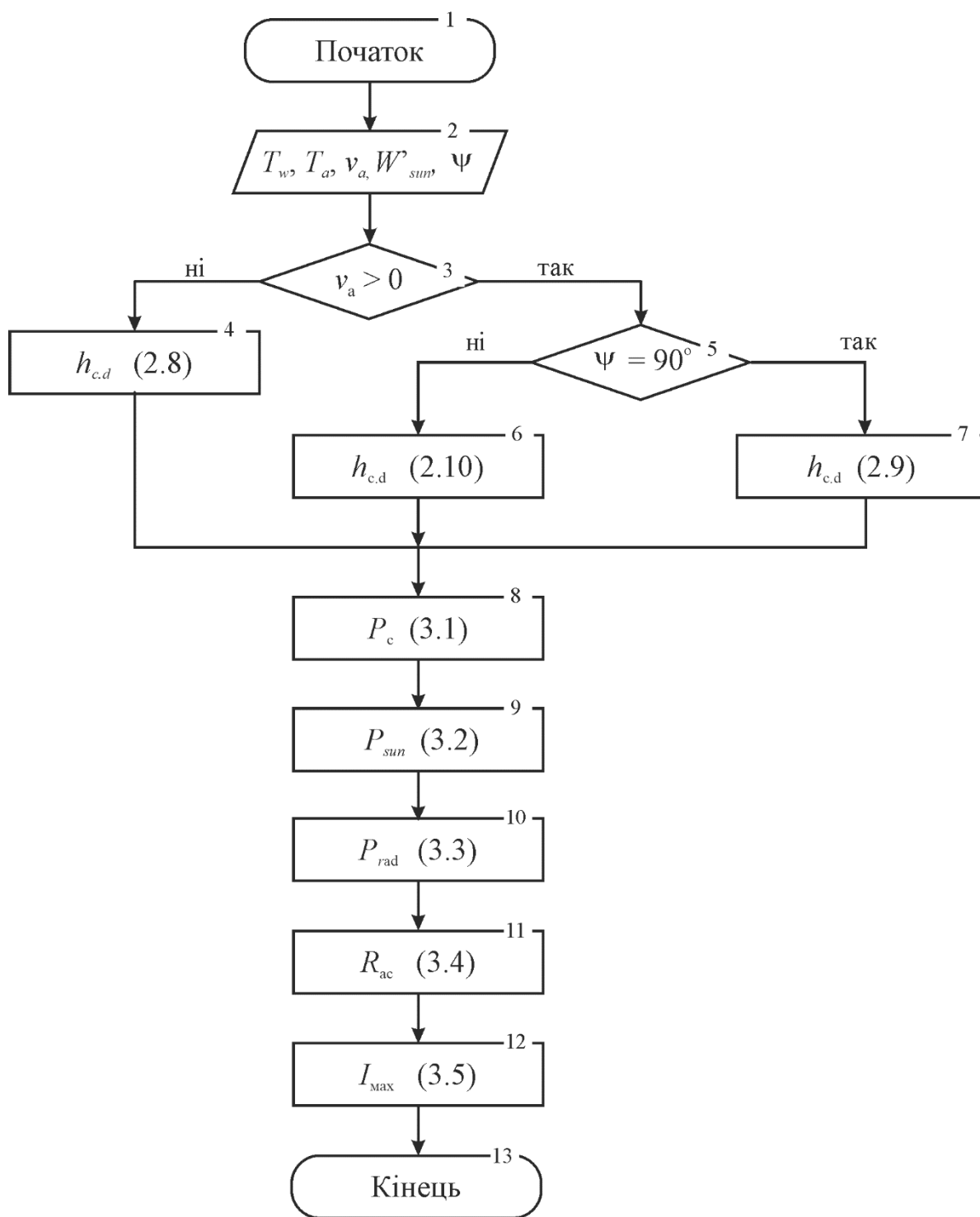


Рис. 3.3. Блок схема алгоритму обчислення пропускної здатності ПЛ

Якщо вітер наявний тоді у блоці 5, вибирається математична модель для розрахунку вимушеної конвекції в залежності від кута під яким він направлений до проводу ПЛ, відповідно, блок 6 для випадку $\psi < 90^\circ$ і блок 7 для випадку

$\psi = 90^\circ$. Далі виконується розрахунок кількості тепла, що набуває та втрачає провід (блоки 8-11).

Втрати тепла проводом внаслідок конвективного теплообміну (блок 8)

$$P_c = h_{c.d} S_{sur.w} (t_w - t_a), \quad (3.1)$$

де $h_{c.d}$ – коефіцієнт конвективного теплообміну проводу, згідно (2.8)-(2.10);

$S_{sur.w}$ – площа поверхні проводу;

t_a – температура навколишнього повітря;

t_w – поточна температура проводу.

У блоці 9 визначається набуте проводом тепло внаслідок сонячного випромінювання

$$P_{sun} = q_{sun.max} l_w, \quad (3.2)$$

де $q_{sun.max}$ – максимальна потужність випромінювання сонця, що поглинає провід, згідно (2.19) і (2.20) на основі виміряного значення;

l_w – довжина контрольованої ділянки проводу ПЛ.

Втрати тепла проводом внаслідок випромінювання (блоці 10)

$$P_{rad} = q_{rad} S_{sur.w}, \quad (3.3)$$

де q_{rad} – втрати потужності при теплопередачі випромінюванням, визначаються згідно рівняння (2.14).

Активний опір ПЛ, що відповідає поточній температурі проводу (блок 11):

$$R_w = r_{20} [1 + \alpha_{eqv} (t_w - 20^\circ)], \quad (3.4)$$

де r_{20} – опір проводу при температурі 20°C ;

α_{eqv} – еквівалентний температурний коефіцієнт.

На основі розрахованих параметрів у блоках 8-11, у блоці 12 проводиться розрахунок пропускної здатності ПЛ за поточних метрологічних умов і навантаження

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_c + P_{rad} - P_{sun}}{R_w}}. \quad (3.5)$$

Виміряні та розраховані дані передаються до районного центру збору та обробки телеметричної інформації за допомогою GSM-модема.

Для забезпечення безперервної роботи живлення системи здійснюється від блоку живлення, який у свою чергу, отримує електроенергію від акумуляторної батареї. Заряджання АКБ здійснюється контролеру заряду батареї, до якого також підключаються сонячні панелі.

Всі підсистеми, розміщуються у водонепроникних корпусах, зі ступенем захисту не нижче IP66.

Встановлення систем збору даних рекомендується проводити при планових відключеннях ПЛ в безпосередній близькості від електроопор, але після гасників вібрації. У важкодоступній місцевості систему слід встановлювати в прольотах ПЛ, де різко змінюється площа, а проводи екрановані від вітру різними природними чи штучними бар'єрами [5].

На ділянках зі складним рельєфом оптимально встановлювати від 3 до 4 пристроїв. На прямих і рівних безлісних ділянках ПЛ кількість пристроїв можливо зменшити до 2-х пристроїв на початку і в кінці лінії або на ділянках зі значним кутом повороту.

Вимірювання температури та струму анотовано міткою точного часу. Пристрій забезпечує локальний і віддалений доступ для налаштувань лічильника, зчитування поточних значень, оновлення програмного забезпечення тощо. Вимірювання та події з високою роздільною здатністю передаються на вибрані комп'ютери та центр керування (SCADA) через стандартні протоколи ІЕС (рис. 6). Легкий доступ користувача доступний через веб-браузер.

3.4 Підсистема контролю параметрів проводу

Основне призначення даної підсистеми полягає у вимірюванні сили струму, що протікає в проводі ПЛ і його температури. До складу підсистеми входять (рис. 3.4): трансформатор струму (ТС), мікроконтролерний блок (МКБ), блок вимірювання сили струму (БВС), первинний вимірювальний перетворювач температури (ПВПТ), блок вимірювання температури проводу (БВТП) і радіомодем (РМ). Підсистема виконується у вигляді моноблоку, що розміщується на фазному проводі ПЛ і має його потенціал. У даній підсистемі реалізоване пряме вимірювання температури та струму проводу ПЛ.

Підсистема працює наступним чином. Для контролю струму лінії та живлення підсистеми встановлюється двообмотковий ТС. До першої обмотки якого підключається БЖ, а до другої – БВС. Таке технічне рішення дозволяє підвищити точність вимірювання сили струму. Блок вимірювання струму перетворює поточне значення сили струму в цифровий сигнал і передає його до МКБ. Паралельно з цим, ПВПТ проводить вимірювання температури проводу та подає напругу пропорційну температурі проводу на вхід блоку БВТП. Даний блок переводить цей сигнал у цифрову форму, проводить верифікацію та

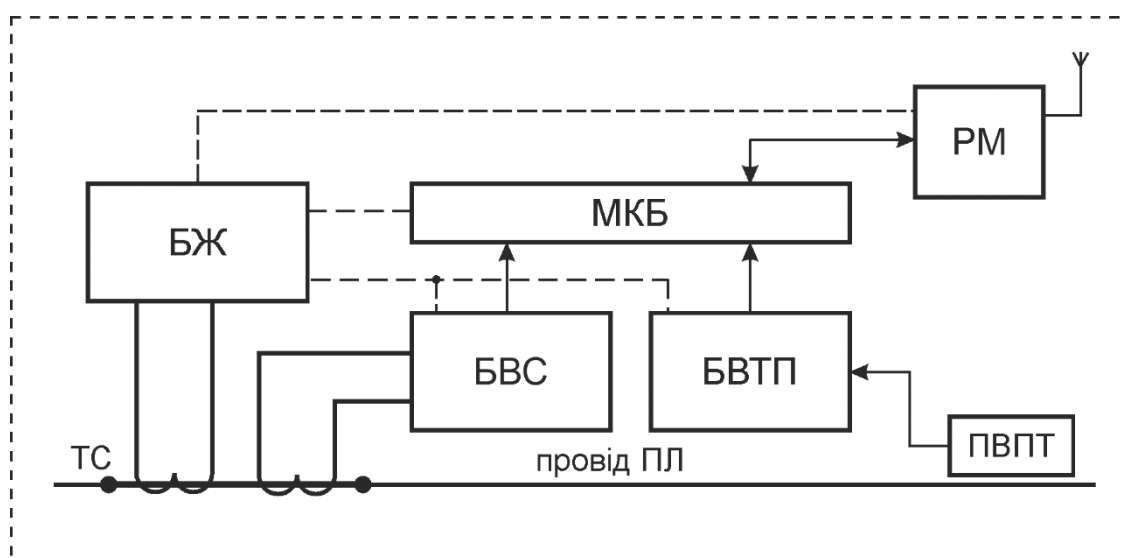


Рис. 3.4. Схема підсистеми контролю параметрів проводу

фільтрацію значень температури проводу. Перевірена інформація про температуру проводу передається до МКБ. Мікроконтролерний блок веде протоколювання отриманої телеметричної інформації та насилає за допомогою радіомодема її до системи збору даних, за якою закріплений. Вимірювання обох параметрів відбуваються в циклічному режимі, за умови, що сила струму в проводі ПЛ більше 60 А. З метою запобігання перезапуску системи при зниженні струму нижче 60 А МКБ має функцію моніторингу потужності, яка контролює запуск залежно від контрольованого струму. Первинний струм ТС вибирається в залежності від класу напруги та завантаження повітряної лінії. Корпус системи має циліндричну форму, що утруднює утворення на ньому коронного розряду. В цілому, підсистема повинна мати малі габарити.

3.5 Підсистема контролю параметрів навколишнього середовища

Підсистему контролю параметрів навколишнього середовища створено на базі вимірювальних перетворювачів, що входять до складу професійних метеорологічних станцій і серійно випускаються. Структурна блок-схема системи представлена на рис. 3.5. Вона складається зі спектрально плаского піранометру 1, вимірювального перетворювача температури повітря 2, вимірювального перетворювача швидкості вітру 3, вимірювального перетворювача напрямку вітру 4 і реєстратора даних 5.

Чутливим елементом піранометра типу LPPYRA02 є вимірювальна термобатарея. Її поверхня покрита чорною матовою фарбою для панхроматичності в широкому спектральному діапазоні, який визначається пропусканням двох скляних куполів. Променева енергія поглинається чорною поверхнею, створюючи різницю температур між центром термобатареї (гарячий спай) та корпусом приладу (холодний спай). Ця різниця температур завдяки ефекту Зеебека перетворюється на різницю потенціалів.

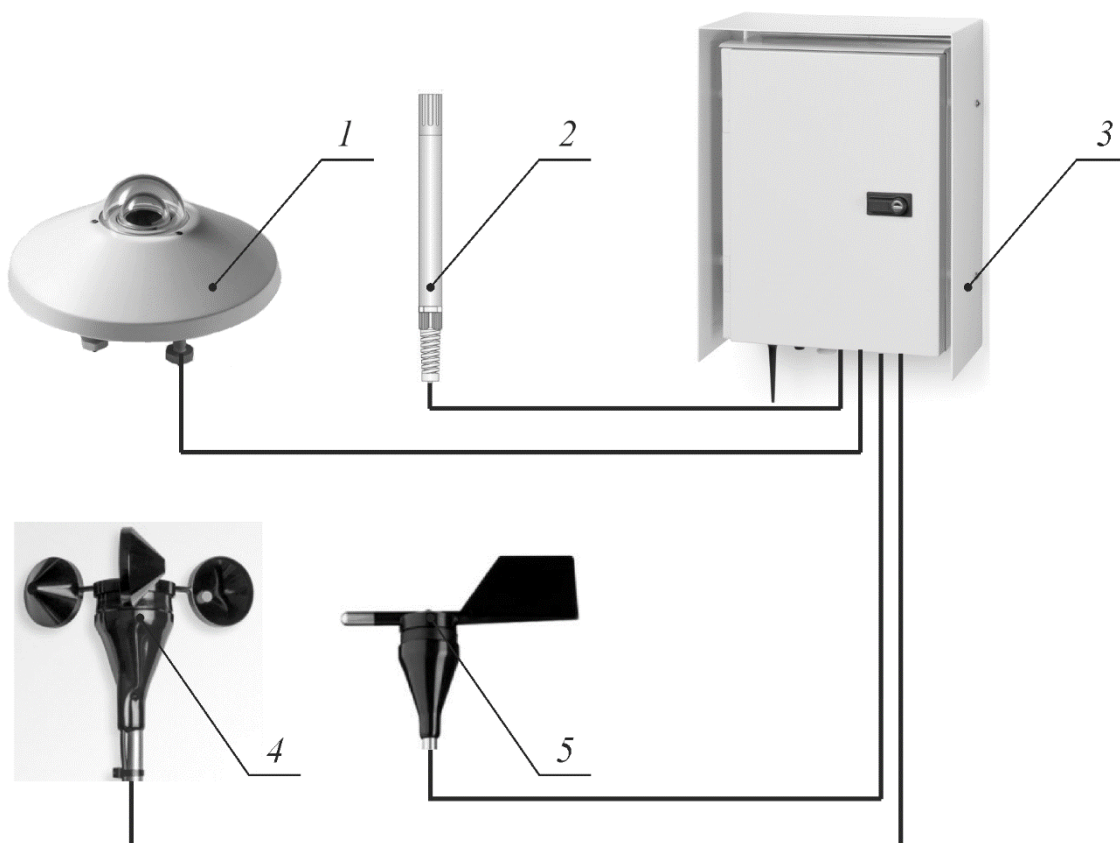


Рис. 3.5. Блок-схема підсистема контролю параметрів навколишнього середовища (на базі обладнання ф. Delta)

Щоб забезпечити термобатарей належну теплоізоляцію піранометр оснащений двома концентричними куполами. Щоб запобігти утворенню внутрішнього конденсату на внутрішній стороні купола, всередині піранометра є силікагель для поглинання вологи.

Вимірювання температури повітря здійснюється за допомогою вимірювального перетворювача ОНМ ТР350N, що має діапазон вимірювання $-40 \dots 105$ °C. Вимірювальний перетворювач побудований на термометрі опору NTC 10 кОм. Точність вимірювання температури повітря перетворювача складає $\pm 0,3$ °C у діапазоні $0 \dots +70$ °C та $0,4$ °C поза вказаним діапазоном. Чутливий елемент вимірювального перетворювача захищений екраном, що служить для захисту його від бризів дощу, снігу та прямого сонячного випромінювання.

Пасивний чашковий анемометр OHM HD54.3 призначений для вимірювання швидкості вітру в діапазоні 1...75 м/с.. Він має аналоговий вихід, з синусоїдальним сигналом з частотою, що лінійно пропорційна швидкості вітру. Він придатний до експлуатації в тяжких умовах -45...+60 °С, 0...100% RH.

Вимірювальний перетворювач напрямку вітру (флюгер) OHM HD54.D призначений для вимірювання напрямку повітряного потоку в діапазоні 0...360°. Зона нечутливості нормальна 4°, а максимальна 8°. Поріг спрацювання 1 м/с. Вихідний сигнал – напруга постійного струму, що пропорційна опору потенціометра. Сенсор має захист внутрішнього об'єму за допомогою поліхровінілового корпусу та сальників.

Щоб отримати точні вимірювання вітру, анемометр і флюгер повинні бути встановлені на відкритому повітрі на 360°. Це може бути важко або неможливо в районі з великою кількістю будівель або дерев. Робіть усе можливе.

Основою підсистеми є електронний реєстратор Meteo HD32MT.1. Він призначений для вимірювання електричних сигналів від таких сенсорів: температури повітря, швидкості та напрямку вітру, сонячного випромінювання та ін. Реєстратор перетворює сигнали в цифрову форму, фіксує мінімальні, максимальні, середні та стандартні значення відхилення метеорологічних параметрів і зберігає їх в наявній пам'яті. Кожне вимірювання має позначку дати та часу. Реєстратор повністю програмується користувачем за допомогою комплектного програмного забезпечення HD32MTLogger. Передача отриманих даних здійснюється за допомогою радіомодему. Реєстратор підтримує інтерфейси переважної більшості промислових вимірювальних перетворювачів (0...20 мА, термометри опору Pt100/Pt1000 і NTC і т.д.) також оснащений портом RS485 і RS232.

Реєстратор даних інтегрований у зовнішній корпус із поліестеру, який оснащений екраном для захисту корпусу від сонячного випромінювання. Передбачено живлення від мережі 100...240 В змінного струму або від постійного струму напругою 12 В.

Всі вимірювальні перетворювачі підключаються до електронного реєстратора за допомогою багатожилевих кабелів по яких передається електроенергія для їх роботи та інформація про виміряні метеорологічні параметри.

3.5 Висновки до 3-ого розділу

1. Сформульовані вимоги до системи моніторингу пропускної здатності ПЛ дозволили обрати підхід до її технічної реалізації.

2. Виявлено, що система моніторингу пропускної повітряних ліній електропостачального підприємства повинна мати три ієрархічні рівні: локальних систем збору даних, районного та головного. Основою системи є множина систем збору даних, що встановлюються безпосередньо на контрольованих ділянках ПЛ.

3. Показано, що система збору даних повинна мати автономне живлення від акумулятора, що заряджається від фотоелектричної батареї, здійснювати зв'язок з підсистемою контролю параметрів проводу за допомогою радіомодема, а з районним центром збору та обробки даних – за допомогою GSM-модему.

4. Показано, що підсистема контролю параметрів проводу розміщується безпосередньо на проводі ПЛ і отримує живлення від нього за допомогою трансформатора струму. З метою запобігання перезавантаженню підсистеми при зниженні струму ПЛ нижче 60 А передбачено функцію моніторингу потужності.

5. Розроблено структурну схему підсистеми контролю параметрів навколишнього середовища, на основі вимірювальних перетворювачів швидкості та напрямку вітру, температури повітря та сонячної радіації, які серійно випускаються та можуть експлуатуватися в складних умовах, що дозволить значно знизити її вартість.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Роботи з монтажу та ремонту повітряних ліній електропередавання пов'язані з підйомом людей і матеріалів на значну висоту за допомогою вантажопідйомних машин і механізмів. Це створює додаткову небезпеку травмування експлуатаційного персоналу внаслідок падіння з опор, удару чи поранення. Також існує ризик ураження блискавкою під час грози чи наведеною напругою від сусідніх повітряних ліній [32].

4.1 Заходи безпеки при роботі на електроопорах

Працівник, який видає наряд (розпорядження) на виконання робіт, обов'язково враховує наявність дефектів на ПЛ і перевіряє за оперативною документацією наявність на ПЛ напругою 6-35 кВ однофазних замикань на землю, що могли пошкодити лінійну арматуру [32].

Дозволено підніматися та працювати на опорі лише за умови впевненості в її достатній стійкості та міцності. Якщо міцність електроопори викликає сумніви, то рішення про способи її укріплення визначає на місці керівник робіт. Опори, які не розраховані на однобічне навантаження та ті, що тимчасово йому піддаються, попередньо укріплюються для запобігання падінню.

Укріплення опори за допомогою розтяжок проводиться без піднімання на неї, тобто за допомогою телескопічної вежі, зі встановленої поряд опори або за допомогою спеціальних розкріплювальних пристроїв, для навішування яких не потрібно підніматись на опору.

Якщо на проміжні електроопори на яких закріплено менше двох проводів підніматися забороняється.

Роботи зі складання, встановлення, виправлення, заміни опор та їх елементів, а також заміни проводів (грозозахисних тросів) необхідно виконувати

за технологічною картою або проектом виконання робіт під керівництвом відповідальної особи з числа керівників чи фахівців.

Право підніматися на опору мають члени бригади:

- з II-ю групою до верху опори, за умови що ПЛ вимкнена;
- з I-ю групою не вище 3 м від рівня землі для проведення всіх видів робіт.

Під час заміни деталей опори слід уникати можливості її зміщення чи падіння.

Забороняється відкопувати одночасно обидва стояки опори для заміни одинарних і здвоєних приставок П- і АП-подібних опор і перебувати в котловані під час витягування або опускання приставок.

Заборонено перебувати на траверсах під час піднімання на них або спускання з них проводів чи тросів, а також під час їх натягування та перебувати біля опори в зонах виконання робіт.

4.2 Заходи безпеки при виконанні робіт на ПЛ під наведеною напругою

До робіт на струмопровідних частинах ПЛ під наведеною напругою допускаються працівники з III групою з електробезпеки, що пройшли спеціальне навчання.

На повітряних лініях, що перебувають під наведеною напругою, за допомогою вимірювання чи розрахунку визначають ділянки, де після вимкнення та заземлення ПЛ на її кінцях залишається потенціал вище 42 В за найбільшого робочого струму.

Роботи в зоні слабкої дії наведеної напруги ПЛ проводяться із заземленням в РУ підстанції, а роботи в зоні сильної дії наведеної напруги – без заземлення лінії на підстанції. Додатково вживають заходів для запобігання помилковому чи самочинному ввімкненню комутаційних апаратів. Для цього схему вимикача роз'єднують з обох боків, а на лінійному роз'єднувачі вмикають заземлювальні ножі в бік вимикача [32].

На струмопровідні частини ПЛ, що знаходяться під наведеною напругою заземлюються на кожному робочому місці, за допомогою контуру заземлення опори.

З моменту заземлення проводу не можна торкатися заземлювача заземлювальних провідників, монтажних канатів, машини та механізми без застосування індивідуальних електрозахисних засобів, а також заходити / виходити до кабіни машини.

Під час робіт без заземлення лінії на підстанції в зоні сильної дії наведеної напруги встановлюють базове заземлення на ділянці робіт. Базове заземлення на електроопорі, на якій виконуються роботи встановлювати заборенено.

Виконання операцій щодо встановлення та знімання базового заземлення виконується за окремим нарядом. Установлення та зняття основного заземлення проводиться до початку підготовчих робіт і після повного завершення всіх робіт і зняття робочих заземлень. Накладання та знімання основного заземлення виконується з одночасним заземленням проводів усіх фаз ПЛ на контур заземлення опори або на груповий заземлювач. Ця робота доручається двом членам бригади, що мають IV і III з групи допуску та проводиться під наглядом керівника робіт [32].

У зоні високої напруги, при проходженні ПЛ, роботи дозволяється виконувати на одній або двох сусідніх опорах і в прогоні між ними. Якщо довжина ділянки робіт менше 2 км, можуть працювати декілька бригад одночасно. У разі потреби робіт на довшій ділянці ПЛ, то її необхідно розділити на електрично незв'язані частини і встановити базове заземлення на кожній з них.

У зоні сильної дії наведеної напруги при сумісному проходженні повітряної лінії роботи виконують на одній або двох сусідніх опорах і в прогоні між ними. За умови сумісного проходження повітряної лінії в зоні сильної дії наведеної напруги можливе одночасне виконання робіт кількома бригадами, якщо довжина ділянки робіт менше 2 км. У разі потреби робіт на довшій ділянці повітряної лінії, вона розділяється на декілька електрично незв'язаних частини зі встановленням базового заземлення на кожній з них.

До виконання робіт під наведеною напругою проводиться вирівнювання потенціалів проводу, монтажних канатів, машин і механізмів шляхом їх заземлення на спільний заземлювач. При цьому провід ПЛ заземлюється останнім – після виконання монтажу та заземлення такелажної схеми. Розбирання такелажної схеми проводиться в зворотній послідовності.

Роботи, що потребують дотику до проводу ПЛ, що опущений на землю, необхідно виконувати із застосуванням електрозахисних засобів або з металевого майданчику, що з'єднаний з проводом для вирівнювання потенціалів.

Забороняється входити на майданчик чи сходити з нього, а також подавати металеві предмети із землі без діелектричного взуття.

Перед розрізанням проводу виконується його заземлення з обох боків від місця розриву на контур заземлення опори, а під час робіт у прогоні – на груповий заземлювач. На нього також заземлюються монтажні канати, машини та механізми. На місці робіт, при наближенні до заземлювача на відстань менше 3 м, необхідно надівати діелектричне взуття.

Під час монтажу та заміни проводів під наведеною напругою усі роботи, що пов'язані з дотиком до проводу повітряної лінії або машин і механізмів, виконуються із заземленням їх на місці робіт. При цьому обов'язково використовуються електрозахисні засоби.

Піднімання та опускання проводу здійснюється із заземленням його на кожній електроопорі, де проводиться монтаж, за умови, що довжина ділянки лінії менша 2-х км. Натягування та візування проводу виконується лише після його заземлення на анкерній електроопорі, через яку проводиться натягування. Також заземленню на робочому місці або на сусідній опорі підлягає провід, який перекладається із розкочувальних роликів. Якщо він лежить у металевих роликах чи у підтримувальних затискачах, досить заземлити їх на контур заземлення опори.

Перед початком робіт зі з'єднання проводів у петлях анкерних опор повітряних ліній 110 кВ і вище їх необхідно закріплювати за проводи або за натяжні ізолювальні підвіски, а на лініях 35 кВ і нижче – лише за проводи.

Починати з'єднувати проводи в петлях анкерних електроопор можливо лише після повного завершення робіт у суміжних анкерних прогонах і зняття там усіх заземлень. Лінія має бути заземлена в одному місці – на анкерній опорі, де виконуються роботи, при цьому кінців з'єднувальних проводів приєднуються до контуру заземлення опори. Перед встановленням заземлень не можна наближатися до незаземлених проводів внаслідок наявності на них значного електростатичного потенціалу.

Під час виконання робіт на ПЛ під наведеною напругою з використанням телескопічних і гідравлічних підйомників робочий майданчик необхідно з'єднати гнучким мідним проводом перерізом не менше 25 мм^2 із заземленим на місці робіт проводом за допомогою спеціальної штанги. Сам механізм має бути заземлений на спільний із проводом заземлювач. Механізми повинні мати інвентарні заземлювачі, на робочих майданчиках мають бути позначені та ретельно очищені місця для приєднання проводів-перемичок.

4.3 Заходи безпеки при виконанні робіт на ПЛ під робочою напругою

Роботи на повітряних лініях, що знаходяться під робочою напругою виконуються за трьома можливими схемами [32]:

- "провід - людина - ізоляція - земля", для випадку перебування працівника під потенціалом проводу та ізоляції його від землі;
- "провід - ізоляція - людина - земля", якщо працівник ізольований лише від проводу;
- "провід - ізоляція - людина - ізоляція - земля", якщо працівник повністю ізольований.

Роботи під напругою виконують лише працівники, що пройшли спеціальне навчання.

Для уникнення можливого ураження електричним струмом робітника під час виконання робіт під потенціалом проводу необхідно:

- надійно ізолювати працівника від землі;

- використовувати екранувальний комплект одягу;
- зрівнювати потенціали проводу повітряної лінії, робочого майданчика та екранувального комплекту.

Перед підйомом ізолювального пристрою з працівником до проводу ПЛ екранувальний комплект одягу з'єднується з металевим робочим майданчиком ізолювального пристрою. Перед дотиком працівника до проводу виконується вирівнювання потенціалів майданчика ізолювального пристрою та проводу за допомогою гнучкого мідного проводу. Провід повинен мати переріз не менше 4 мм^2 і бути попередньо приєднаним до майданчика ізолювального пристрою. Його накладають ізолювальною штангою на провід.

При виконанні роботи під напругою, що передбачають ізоляцію людини від проводу необхідно використовувати електрозахисні засоби, що відповідають класу напруги лінії. Право на безпосередній дотик до струмопровідних частин ПЛ мають члени бригади IV-ю групою допуску, всі інші – III групу.

Заборонено торкатися ізоляторів та арматури ізолювальних підвісок з іншим потенціалом, ніж провід ПЛ, а також передавати інструмент працівникам, що перебувають на іншому робочому майданчику, під час роботи з ізолювального пристрою, що знаходиться під потенціалом проводу.

У разі потреби передати інструмент робочу площадку необхідно від'єднати від проводу, опустити на безпечну відстань, здійснити передачу, після чого знову підняти та зрівняти потенціали її та проводу.

Перед початком робіт на ізолювальних підвісках, вимірювальною штангою перевіряють електричну міцність підвісних ізоляторів та наявність шплінтів і замків у арматурі. За потреби, зумовленої рельєфом траси, на опорі, де проводять роботи, та сусідніх опорах заклинюють випускаючі затискачі.

Роботи на ізолювальній підвісці з її перечеПЛення, заміни окремих ізоляторів або арматури дозволяється виконувати монтерам з ізолювальних пристроїв чи траверс за умови справності не менше 70% ізоляторів у підвісці.

При встановленні трубчастих розрядників на ПЛ 35, 110 кВ під напругою необхідно використовувати ізолювальні підвісні габаритники, що

унемоżliвлюють наближення зовнішнього електрода розрядника до проводу на відстань меншу ніж допустима.

Заборонено перебувати в зоні можливого викиду газів під час наближення чи відведення зовнішнього електрода розрядника від проводу під час його заміни. Для наближення чи відведення електроду слід використовувати за ізолювальну штангу.

Заборонено наближатися до ізолюваного від опори блискавкозахисного троса ближче 1 м.

Заборонена робота на лініях і тросах під напругою під час туману, дощу, снігу; в темний час доби, а також за умови вітру, що ускладнює роботи на опорі.

Розчищення траси ПЛ без виключення дозволяється за умови, що проводи знаходяться в нормованих габаритах, а висота дерев, що підлягають вирубці або розчищенню, перевищує 4 м.

4.4 Заходи безпеки під час обходів та оглядів ПЛ

Забороняється виконувати будь-які ремонтні роботи, підніматися на електроопори та їх конструкції під час огляду повітряних ліній. Підйом на опору дозволяється лише під час верхового огляду ліній.

В умовах важкопрохідної місцевості, несприятливої погоди, а також у темну пору доби огляд ліній мають проводити два працівники з II-ю і III-ю групами допуску. В інших випадках дозволяється одноособовий огляд працівником з III-ю групою допуску. Під час огляду в темну пору доби заборонено знаходитися під проводами лінії. Пошук ушкоджень лінії працівники виконують лише з попереджувальними знаками або плакатами.

Наближатися до проводу, що лежить на землі, на відстань менш 8 м на лініях понад 1000 В забороняється. Біля такого проводу слід організувати охорону, щоб попередити наближення людей і тварин, встановити попереджувальні знаки. Потім повідомити власника мережі та дочекатися ремонтної бригади.

На лініях 6-35 кВ заборонено наближатися до опор під напругою ближче 8 м, якщо є ознаки замикання фазного проводу на землю внаслідок пошкодження ізоляторів, торкання проводу до опори і т.п.

4.5 Заходи безпеки при розчищенні траси ПЛ

Перед початком звалювання дерев робоче місце потрібно розчистити.

Для запобігання падіння дерев на проводи ПЛ до початку їх вирубки, слід застосовувати відтяжки.

У випадку можливого падіння зрубаних дерев або обпиляного гілля на проводи чи небезпечного наближення людей до струмовідних частин, роботи з розчищення траси лінії виконують за нарядом з вимкненням і заземленням лінії.

Перед звалюванням дерева необхідно попереднього його підпилювати чи підрубувати. Нахилені дерева звалюють в бік їх нахилу. Якщо після підпилювання дерево не падає, то його звалюють примусово із застосуванням валочних пристосувань чи клину.

Заборонено залишати не звалене підпиляне чи підрубане дерево під час перерви чи переходу до інших дерев. Якщо дерево впало на проводи ПЛ до нього заборонено наближатися ближче ніж на 8 метрів до зняття напруги з лінії.

Не можна проводити групове звалювання дерев з попереднім підпилюванням чи використанням падіння одного дерева на інше.

Заборонено залазити на підрубані та підпиляні дерева.

Якщо розчищення траси ПЛ виконує декілька окремих груп робітників, то вони не повинні наближатись одна до одної ближче ніж на 50 м.

Всі роботи з розчищення траси ПЛ при наближенні грози, бурі чи вітру понад 10 м/с роботи припиняються.

Заборонено звалювати дерева під час ожеледі та поганої видимості (туман, сутінки).

4.6 Висновки до 4-го розділу

1. Встановлено, що основними заходами безпеки при роботі на електроопорах є перевірка ПЛ на наявність дефектів, укріплення опор за допомогою розтяжок, використання технологічних карт або проекту проведення робіт.

2. Виявлено, що основними заходами безпеки при виконанні робіт на ПЛ під наведеною напругою є спеціальне навчання працівників; визначення ділянок де після вимкнення та заземлення ПЛ на її кінцях залишається потенціал вище 42 В; накладання заземлення на струмопровідні частини ПЛ на робочому місці; роз'єднання з обох боків, схеми лінійного вимикача; вмикання заземлювальних ножів у бік вимикача на лінійному роз'єднувачі; використання індивідуальних електрозахисних засобів – діелектричних рукавичок та взуття.

3. Встановлено, що основними заходами безпеки при виконанні робіт на ПЛ під робочою напругою є виконання робіт за однією з встановлених схем; спеціальне навчання працівників; використання відповідних електрозахисних засобів; зрівнювання потенціалів повітряної лінії; робочого майданчика та екранувального комплекту одягу; дотримання безпечних відстаней до обладнання (розрядників, грозозахисного тросу).

4. Встановлено, що основними заходами безпеки при обходах та оглядах повітряних ліній є групове виконання оглядів за несприятливих погодних умов і у важкодоступній місцевості; дотримання безпечної відстані до обірваного проводу ПЛ і електроопор, що мають ознаки замикання на землю; охорона обірваного проводу.

5. Виявлено, що основними заходами безпеки при розчищенні траси ПЛ є відключення ПЛ від мережі (за необхідності); використання відтяжок для гілля та дерев; валочних пристосувань; валка з дотримання безпечної відстані до дерева, що упало на провід ПЛ; дотримання безпечної відстані між окремими групами працівників.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто розв'язання актуальної науково-прикладної задачі, що направлена на удосконалення систем моніторингу пропускної здатності повітряних ліній електропередавання.

Основні результати дослідження полягають у наступному:

1. Виявлено, що повітряні лінії з неізолюваними проводами, за певної комбінації метеорологічних умов, мають резерв для передавання потужності без порушення їх технічного регламенту, але скористатися ним можливо лише при обладнанні ПЛ системою моніторингу пропускної здатності.

2. Виявлено, що більшість розповсюджених систем моніторингу пропускної здатності ПЛ, побудовані на основі безпосереднього вимірювання температури проводу та визначення пропускної здатності повітряної лінії за допомогою математичних моделей, однак вони мають ряд недоліків і потребують удосконалення.

3. Отримано математичну модель теплового стану неізолюваного проводу повітряної лінії, що встановлює залежність між температурою проводу, електричним струмом і параметрами навколишнього середовища.

4. Досліджено, що найбільший вплив на температуру проводу чинять температура навколишнього середовища та швидкість і напрям вітру, а наявність водяної плівки на проводі призводить до зниження коефіцієнту конвективного теплообміну.

5. Розроблено систему моніторингу пропускної повітряних ліній яка має три ієрархічні рівні: локальних систем збору даних, районний та головний, а її основою є множина систем збору даних, що встановлюються безпосередньо на контрольованих ділянках ПЛ.

6. Розроблено систему збору даних, що має автономне живлення від акумулятора, який заряджається від фотоелектричної батареї, здійснює зв'язок з підсистемою контролю параметрів проводу за допомогою радіомодема, а з районним центром збору та обробки даних – за допомогою GSM-модему.

7. Розроблено підсистему контролю параметрів проводу, що розміщується безпосередньо на проводі ПЛ і отримує живлення від нього за допомогою трансформатора струму. З метою запобігання перезавантаження підсистеми при зниженні струму ПЛ нижче 60 А передбачено функцію моніторингу потужності.

8. Розроблено структурну схему підсистеми контролю параметрів навколишнього середовища на основі вимірювальних перетворювачів швидкості та напрямку вітру, температури повітря та сонячної радіації, які серійно випускаються, що дозволить знизити вартість системи моніторингу.

9. Встановлено, що заходи безпеки при експлуатації повітряних ліній діляться на організаційні та технічні. До перших відносяться наступні: виконання робіт за нарядом, використання технологічних карт або проекту проведення робіт; спеціальне навчання працівників; виконання робіт за однією з встановлених схем, дотримання безпечних відстаней до обладнання. До других відносяться такі: перевірка ПЛ на наявність дефектів, укріплення опор за допомогою розтяжок, накладання захисного заземлення, використання індивідуальних електрозахисних засобів, відключення ПЛ від електромережі.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cheremisin N., Miroshnyk A., Cherkashyna V. Monitoring the operation factors of overhead transmission lines and environment for controlling the work of electrical networks distribution. International conference “energy of Moldova 2016. Regional aspects of development” 29 September – 01 October, 2016 Chisinau, Republic of Moldova. p. 378-384.
2. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення. Технічна електродинаміка. 2010. №6. С. 44-50.
3. Kanálik, M., Margitová, A. & Beňa, Ľ. Temperature calculation of overhead power line conductors based on CIGRE Technical Brochure 601 in Slovakia. Electrical Engineering. 2019. 101. Pp. 921–933.
4. Черемісін М. М., Черкашина В. В., Буславець О. А. Розвиток повітряних ліній 110-750 кВ у рамках концепції SMART GRID. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, 2014. №153. №3. С. 3-6.
5. The Contribution of Conductor Temperature and Sag Monitoring to Increased Ampacities of Overhead Lines (OHLs) / V. Lovrenčić, M. Gabrovšek, M. Kovač at etc. Periodica polytechnica electrical engineering and computer science. 2015. Vol. 59 No. 3. P. 70-77.
6. Правила улаштування електроустановок. Х.: Вид-во «Форт», 2017. 760 с.
7. Abdelrahman S., Tamer M., Abo-Zahhad M. Overhead transmission lines dynamic rating estimation for renewable energy integration using machine learning. Energy Reports 2021. Vol. 7. Nov. pp. 804-813
8. Review of dynamic line rating systems for wind power integration / E. Fernandez, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, A. J. Mazon, P. T. Leite. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. Jan. P. 80-92

9. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-1906).
10. CIGRE Technical Brochure 601, Thermal Behavior of Overhead Conductors, Working Group B2.43. 2014. 93 p.
11. Формирование ведомственной системы сбора метеоданных в условиях эффективного оптового рынка электроэнергии / Н. Н. Титов, М. С. Доценко, С. И. Доценко и др. // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. Енергетичні ринки: перехід до нової моделі ринку двосторонніх контрактів і балансуючого ринку. К.: 2009. С. 41-48.
12. Overhead Transmission Line Monitoring System for Dynamic Rating / M. Sanda, T. Kojima, E. Higashi at. etc. Sei technical review. 2018. Oct. No. 87. P. 64-69.
13. Tapani O. Seppa. Reliability and real time transmission line ratings / TheValley Group – A Nexans Company, 2007.
14. Overhead Transmission Line Monitoring Equipment for Large-Scale Introduction of Renewable Energy / E. Higashi, T. Maruyama, Y. Umemura at etc. Sumitomo electric technical review. 2023. Apr., №96, P. 104-109.
15. B. Forbes, D. Bradshaw, F. Campbell. Finding hidden capacity in transmission lines, Transm. Distrib. World. 2002. 54 (9).
16. Engelhardt JS., Basu. SP. Design, installation, and field experience with an overhead transmission dynamic line rating system, IEEE PES Transmission and Distribution Conference. Los Angeles, California. September 15-20. 1996. p.p. 366 – 370.
17. Increasing Grid Integration of Wind Energy by using Ampacity Techniques / A. Madrazo, A. Gonzalez, R. Martínez at etc. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICERPQ '13), No. 11, March 2013.
18. Equipment and methodology for linking overhead line circuit ratings to the output of nearby windfarms / L. McClean, L. Bryans, J. Colandairaj at. etc., Universities Power Engineering Conference, 2008.
19. Lindsey system. SMARTLINE-TCF. Transmission Line Rating Platform www.lindsey-usa.com.

20. Identification of Critical spans for Monitoring system in Dynamic Thermal Rating / M. Matus, D. Sáez, M. Favley et. al. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27. No. 2, April 2012. (9).

21. Kozlovskyi O. Computer simulation of measuring transducers used for diagnosis of icing in Solidworks software package / O. Kozlovskyi, D. Trushakov, S. Rendzinyak // Computational Problems of Electrical Engineering. 2016. Vol. 6. No. 2. – P. 75-81.22.

22. Kurowski P. Thermal Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2022 and Flow Simulation. USA: SDC Publications 2022. 300 p.

23. Matsson J. E. An Introduction to ANSYS Fluent. USA: SDC Publications 2022. 688 p.

24. SolidWorks Flow Simulation 2021. Technical Reference. 2021. 160 p.

25. Numerical study of the thermal behavior of bare overhead conductors in electrical power lines / F. Alvarez Gomez, J. M. Garcia De Maria, D. Garcia Puertas, A. Bairi, R. Granizo Arrabe. World Scientific and Engineering Academy and Society. USA. 2011. p. 143–153.

26. Козловський О. А., Орлович А. Ю., Некрасов А. В. Обґрунтування вибору параметру діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній розподільних електричних мереж. Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ. 2015. Вип. 3. 2015. С. 149–157.

28. Launiainen J. Markku Lyrra. Icing on a non-rotating cylinder under conditions of high liquid water content. Journal of Glaciology. 1986. V. 32, №110, pp. 12–19.

29. Black W. Z., Rehbery R. L. Simplified model for steady state and real-time ampacity of overhead conductors. IEEE Transactions on power apparatus and system. 1985. oct. V. PAS-104, №10, p. 2942 – 2953.

30. Draganoiu G., Lamarche L., McComber P. A computer model of glaze accretion on wires // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1996. may. V. 118. Pp. 148–157.

31. Possibilities of increasing transmission capacity overhead lines / M. Špes, L. Beňa, M. Mikita, M. Márton, H. Wachta. *Acta Electrotechnica et Informatica*, Vol. 16, No. 3, 2016, pp. 20–25.

32. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок. Наказ Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 6 жовтня 1997 року № 257. Із змінами і доповненнями від 25 лютого 2000 року № 26.