

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  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**  
  
на тему:  
**«Підвищення пропускної здатності повітряних  
ліній розподільних електромереж»**

Виконав здобувач вищої освіти  
II курсу магістратури, групи ЕЕ-22М  
ОПП «Електротехнічні системи  
електроспоживання»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
\_\_\_\_\_ Віталій ДУТЧАК  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

Керівник роботи к. т. н., доц.  
\_\_\_\_\_ Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 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 ПЛІШКОВ

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

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

Дутчаку Віталію Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних електромереж.

Increasing the capacity of overhead power distribution lines».

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

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

3. Строк подання роботи до захисту 28.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних мереж, на основі використання проводів нових конструкцій.

Завдання: 1. Провести аналіз стану повітряних ліній розподільних мереж. 2. Провести критичний аналіз методів підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних мереж. 3. Дослідити характеристики СІП і неізолюваних проводів повітряних ліній. 4. Оцінити підвищення пропускної здатності повітряних ліній 35 кВ після заміни неізолюваних проводів на СІП. 5. Оцінити підвищення пропускної здатності повітряних ліній 110 кВ після заміни проводів на компактні високотемпературні проводи. 6. Розробити заходи з електробезпеки.

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. Аналіз методів підвищення пропускної здатності повітряних ліній</i>                     | <i>11.09 – 22.09</i>          |          |
| 3     | <i>Розділ 2. Дослідження характеристик неізолюваних проводів повітряних ліній розподільних мереж</i> | <i>25.09 – 27.10</i>          |          |
| 4     | <i>Розділ 3. Оцінка підвищення пропускної здатності повітряних ліній після заміни проводів</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 – 8.12</i>            |          |
| 8.    | <i>Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді слайдів</i>                                        | <i>11.12 –22.12</i>           |          |
|       |                                                                                                      |                               |          |
|       |                                                                                                      |                               |          |

Дата видачі завдання

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_

*Козловський О. А.*

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_

*Дутчак В. В.*

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 90 с.; 30 рис.; 14 табл.; 28 джерел.

**Дутчак В. В. Підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних електромереж. – Рукопис.**

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

Об'єктом дослідження є процес передавання електричної енергії в розподільних мережах.

Предмет дослідження – електричні параметри проводів повітряних ліній.

Мета роботи – підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних мереж, на основі використання проводів нових конструкцій.

Перший розділ роботи присвячений аналізу стану повітряних ліній розподільних електромереж і методів підвищення їх пропускної здатності. У другому розділі проведено дослідження характеристик проводів повітряних ліній розподільних мереж. Третій розділ роботи присвячений дослідженню підвищення пропускної здатності повітряних ліній за допомогою заміни проводів. У четвертому розділі виконані аналіз факторів, що впливають на ураження електрострумом і розроблені організаційні заходи з електробезпеки.

За результатами роботи розроблено технічні рекомендації підвищення пропускної здатності ПЛ 35-110 кВ .

**Ключові слова:** повітряна лінія, розподільна мережа, пропускна здатність, високотемпературний провід, компактний провід

## ABSTRACT

Qualification work 90 p.; 30 Fig.; 14 tables; 28 sources.

**Dutchak V. V Increasing the capacity of overhead power distribution lines.**

– **Manuscript.**

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrical systems of power consumption".

– Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The object of the study is the process of transmitting electricity in distribution networks.

The subject of the study is the electrical parameters of overhead line wires.

The goal of the work is to increase the capacity of overhead lines of distribution networks based on the use of wires of new designs.

The first section of the work is devoted to the analysis of the state of overhead lines in power distribution networks and methods for increasing their throughput. In the second chapter, a study of the characteristics of overhead line wires of distribution networks is carried out. The third section of the work is devoted to the study of increasing the capacity of overhead lines by replacing wires. In the fourth chapter, an analysis of the factors influencing electric shock and the developed organizational measures for electrical safety are carried out.

Based on the results of the work, technical recommendations were developed regarding increasing the capacity of 35-110 kV overhead power lines.

**Keywords:** overhead power line, distribution network, capacity, high-temperature wire, compact wire.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....</b>                                                                           | <b>8</b>  |
| <b>ВСТУП .....</b>                                                                                               | <b>9</b>  |
| <b>1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ<br/>ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ .....</b>                              | <b>12</b> |
| 1.1. Аналіз стану повітряних ліній розподільних мереж .....                                                      | 12        |
| 1.2. Аналіз методів підвищення пропускної здатності ПЛ.....                                                      | 19        |
| 1.3. Постановка задач дослідження.....                                                                           | 28        |
| 1.4. Висновки до 1-ого розділу .....                                                                             | 29        |
| <b>2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ<br/>ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ .....</b>                       | <b>30</b> |
| 2.1. Порівняльний аналіз конструктивних особливостей проводів марок А,<br>АС і СІП.....                          | 30        |
| 2.2. Порівняльний аналіз конструктивних особливостей проводів марок<br>АС і АЕРО-Z .....                         | 38        |
| 2.3. Порівняльний аналіз конструктивних особливостей проводів АС з<br>високотемпературними проводами .....       | 50        |
| 2.4. Висновки до 2-ого розділу .....                                                                             | 56        |
| <b>3. ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ<br/>ШЛЯХОМ ЗАМІНИ ПРОВОДІВ .....</b>                      | <b>57</b> |
| 3.1. Теоретичне обґрунтування шляхів підвищення пропускної здатності<br>повітряних ліній розподільних мереж..... | 57        |
| 3.2. Оцінка підвищення пропускної здатності ПЛ 35 кВ після<br>реконструкції.....                                 | 64        |

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3. Оцінка підвищення пропускної здатності ПЛ 110 кВ після<br>реконструкції.....         | 68        |
| 3.4. Технічні рекомендації, щодо підвищення пропускної здатності<br>повітряних ліній..... | 74        |
| 3.5. Висновки до 3-ого розділу.....                                                       | 76        |
| <b>4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>                                                              | <b>77</b> |
| 4.1. Аналіз факторів, що впливають на ураження електрострумом.....                        | 77        |
| 4.2. Огляд засобів електробезпеки.....                                                    | 79        |
| 4.3. Розробка організаційних заходів з електробезпеки .....                               | 83        |
| 4.4. Висновки до 4-ого розділу.....                                                       | 85        |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>                                                             | <b>86</b> |
| <b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....</b>                                                             | <b>88</b> |

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЛ – повітряна лінія;

ПЛЗ – повітряна лінія із захищеними проводами;

ПРКП – пристрій компенсації реактивної потужності;

ПС – підстанція;

СП – самоутримний ізолюваний провід

ПУЕ – правила улаштування електроустановок;

ПТЕЕС – правила технічної експлуатації електроустановок споживачів;

ПБЕЕС – правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів;

МРС – магніторушійна сила;

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Розподільні електромережі України мають високий ступінь зношеності електрообладнання і низький рівень автоматизації. Однак, із кожним роком на них збільшується навантаження, в той час як вкрай повільне спорудження нових повітряних ліній не вирішує проблеми забезпечення споживачів необхідною кількістю електроенергії нормованої якості [1, 2]. Проблеми підвищення пропускної здатності повітряних ліній зумовлені з одного боку, обмеженнями режимного характеру (обмеження в ремонтному режимі роботи, аварійному режимі, режимі найбільших навантажень і т.п.) з іншого боку, зниженням габаритів проводів ПЛ зі значним строком служби. Яке призводить до істотного зниження пропускної здатності ПЛ. Зниження габариту ПЛ пов'язане як з природною зміною рельєфу, так і штучними змінами – реконструкцією та будівництвом нових комунікацій під ПЛ. Також істотним фактором, що впливає на зниження пропускної здатності є природний знос алюмінієвих та сталевалюмінієвих проводів, що проявляється у збільшенні їх довжини, тобто витягуванні. Цей процес набирає лавиноподібного темпу при впливі на ПЛ екстремальних кліматичних навантажень: вітрових, ожеледних та їх комбінації [3, 4].

Розроблено значну кількість способів, що дозволяють практично вирішити окреслену проблему які можливо розділити на дві великі групи. До першої групи відносяться: регулювання стріли провисання в анкерному прогоні, збільшення висоти існуючих електроопор, зміна рельєфу місцевості в межах траси лінії, заміна підтримуючих гірлянд ізоляторів (для ПЛ 110-150 кВ). До другої групи відносяться: будівництво нових ПЛ, заміна проблемних ділянок повітряної лінії кабельними вставками, підвіска нових ланок, заміна проводів меншого перерізу на більший, підвищення класу напруги, застосування проводів з розщепленою фазою. Перша група способів дозволяє вирішити проблему, що пов'язана зі зниженням габаритів проводів ПЛ, а друга – проблеми режимного характеру.

Звідси впливає проблема вибору методів підвищення потужності, що може бути передана через повітряні лінії розподільних мереж, без будівництва нових і корінної перебудови існуючих ПЛ, додавання додаткових ланок і т.п.

Таким чином, розробка заходів з підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних мереж є актуальною.

*Мета і завдання досліджень* – підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних мереж, на основі використання проводів нових конструкцій.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- виконати аналіз стану повітряних ліній розподільних мереж;
- провести критичний аналіз методів підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних мереж;
- дослідити характеристики СІП і неізолюваних проводів повітряних ліній;
- оцінити підвищення пропускної здатності повітряних ліній 35 кВ після заміни неізолюваних проводів на СІП;
- оцінити підвищення пропускної здатності повітряних ліній 110 кВ після заміни проводів на компактні високотемпературні проводи;
- розробити заходи з електробезпеки.

*Об'єкт дослідження* – процес передавання електричної енергії в розподільних мережах.

*Предмет дослідження* – електричні параметри проводів повітряних ліній .

*Методи досліджень.* У роботі для досягнення поставлених цілей було використано такі методи дослідження: аналіз та синтез технічних рішень, формалізація завдань, методи математичної статистики для опрацювання даних, класичні методи аналізу процесів в електричних колах, а також метод математичного моделювання. Застосування цих методів дозволило в повній мірі виконати поставлені в роботі завдання.

*Наукова цінність* роботи полягає в адаптації розрахункових моделей пропускної здатності повітряних ліній 35-110 кВ до особливостей їх функціонування та реконструкції в сучасних умовах.

*Практична цінність* результатів, що були отримані в роботі для електроенергетичної галузі України полягає в розробці технічних рекомендацій стосовно підвищення пропускної здатності ПЛ 35-110 кВ, шляхом заміни застарілих проводів марки АС на сучасні аналоги при їх реконструкції.

## РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розподільні мережі України характеризується тим, що мають значну протяжність і розгалуженість, а також значний строк експлуатації, що наближається до завершення. Вони були спроектовані на основі застарілих, на сьогодні, нормативних документів і, в більшості, не забезпечують необхідної пропускної здатності. Тому, в першу чергу необхідно:

- провести аналіз стану повітряних ліній розподільних електромереж з метою визначення тих, що мають найбільше технологічних порушень у роботі;
- визначити найбільш придатні методи для підвищення їх пропускної здатності.

### 1.1 Аналіз стану повітряних ліній розподільних мереж

Проведений аналіз досвіду експлуатації ПЛ показав, що найменш надійним елементом розподільних електромереж є повітряні лінії внаслідок їх чутливості до впливів навколишнього середовища [2].

Станом на початок 2021 року довжина повітряних ліній 0,4-154 кВ розподільних мереж України складала понад 747 тис. км [5]. У табл. 1.1 наведено загальну кількісну характеристику електромереж напругою 0,4-154 кВ, а на рис. 1.1 показано відсотковий склад ПЛ кожного класу напруги до загальної сукупності.

Таблиця 1.1 – Кількісна характеристика електромереж 0,4-154 кВ

| Кількість       | Напруга, кВ |        |         |         |         |
|-----------------|-------------|--------|---------|---------|---------|
|                 | 110 (154)   | 35     | 6 (10)  | 0,4     | Всього  |
| Довжина ПЛ, км* | 35 079      | 60 858 | 267 034 | 384 245 | 747 216 |

\* Без врахування без Кримської ЕЕС та неконтрольованої території Донбаської ЕЕС

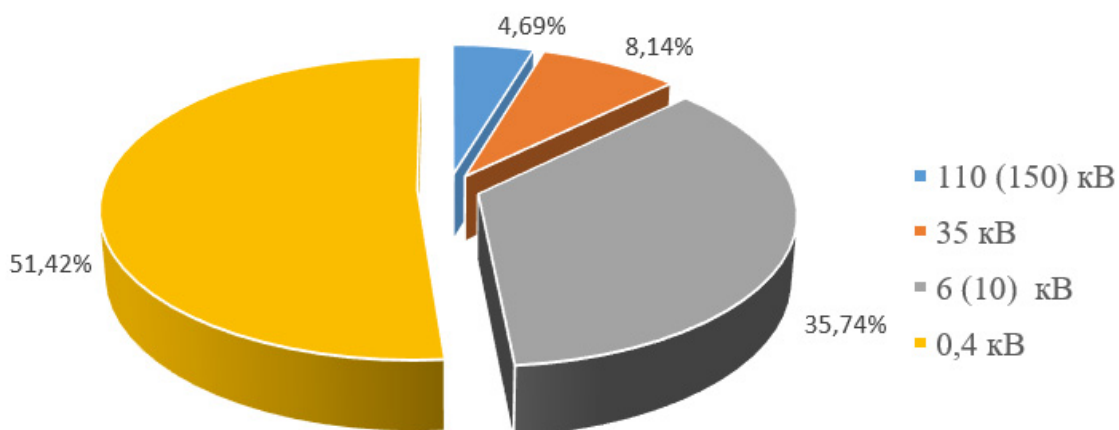


Рисунок 1.1 – Відсотковий склад ПЛ розподільної мережі

З метою визначення експлуатаційних характеристик ПЛ розподільних мереж проаналізуємо наявні статистичні дані щодо технологічних порушень в їх роботі та обсяги недоотриманої електроенергії споживачами. Для цього на основі аналізу «Річних оглядів діяльності Держенергонагляду» НЕК Укренерго було складено табл. 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.2 – Технологічні порушення цехового обліку в електромережах енергопостачальних компаній

| Рік  | Клас напруги |           |           |
|------|--------------|-----------|-----------|
|      | до 1000 В    | 6 (10) кВ | 35-154 кВ |
| 2009 | 122 010      | 41 958    | 2113      |
| 2010 | 123 803      | 42 084    | 2181      |
| 2011 | 125 763      | 37 670    | 1412      |
| 2012 | 135 061      | 41 575    | 3068      |
| 2013 | 120 631      | 41 512    | 1580      |
| 2014 | 120 448      | 50 325    | 1663      |
| 2015 | 115 154      | 43 795    | 1356      |
| 2016 | 101 591      | 47 868    | 1401      |
| 2017 | 110 347      | 49 376    | 1408      |
| 2018 | 101 862      | 53 088    | 1402      |

Таблиця 1.3 – Недодана електроенергія внаслідок технологічних порушень цехового обліку в електромережах енергопостачальних компаній, тис. кВт·год

| Рік  | Клас напруги |           |           |
|------|--------------|-----------|-----------|
|      | до 1000 В    | 6 (10) кВ | 35-154 кВ |
| 2009 | 8,320        | 26,349    | 5,107     |
| 2010 | 6,914        | 28,382    | 7,109     |
| 2011 | 8,250        | 23,532    | 2,145     |
| 2012 | 9,111        | 26,727    | 3,804     |
| 2013 | 7,834        | 26,922    | 3,168     |
| 2014 | 5,452        | 37,002    | 2,956     |
| 2015 | 7,010        | 37,399    | 2,085     |
| 2016 | 5,955        | 39,317    | 2,942     |
| 2017 | 7,200        | 31,100    | 3,108     |
| 2018 | 7,300        | 33,800    | 3,178     |

Оцінка статистики в табл. 1.2 і 1.3 показує, що найбільша кількість технологічних порушень зафіксована в роботі ПЛ 0,4 кВ, а найменша – ПЛ 35-154 кВ. Це пов'язано, в першу чергу, з різною протяжністю цих повітряних ліній, а також з експлуатацією повітряних ліній 10 кВ, що були спроектовані за 10-річним періодом повторюваності несприятливих погодних умов.

З метою отримання більш об'єктивної оцінки надійності ПЛ мережі розподілу на основі наявних статистичних даних було розраховано параметр потоку відмов за формулою [6]:

$$\omega(\tau) = \frac{n(\tau, \tau + \Delta\tau)}{L_{\Sigma} \Delta\tau},$$

де  $\tau$  – поточний час;

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

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

$L_{\Sigma}$  – сумарна довжина ПЛ зі строком служби  $T$  ( $\tau \leq T \leq \tau + \Delta\tau$ );

Результати розрахунку наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Значення параметру потоку відмов ПЛ у 2018 році (на 100 км)

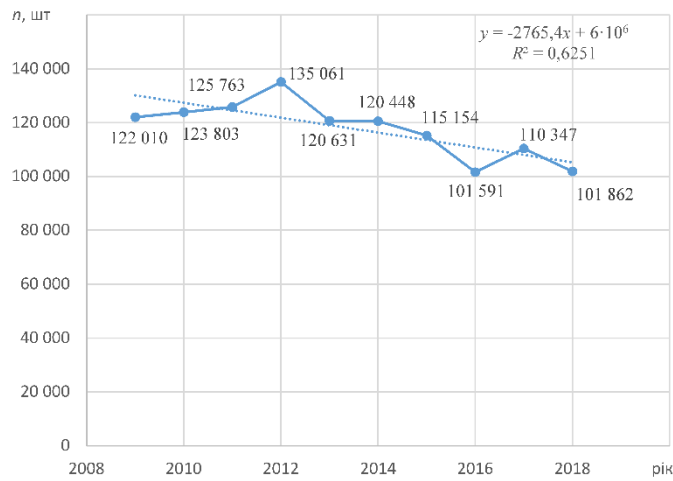
| Параметр                     | Напруга, кВ |        |           |
|------------------------------|-------------|--------|-----------|
|                              | 0,4         | 10 (6) | 35-154    |
| $\omega$ , 1/рік             | 26,2        | 19,8   | 1,5       |
| $\omega_{\text{пр}}$ , 1/рік | 25          | 7,6    | 0,72-1,16 |

де  $\omega_{\text{пр}}$  – проектне значення потоку відмов, 1/рік [6].

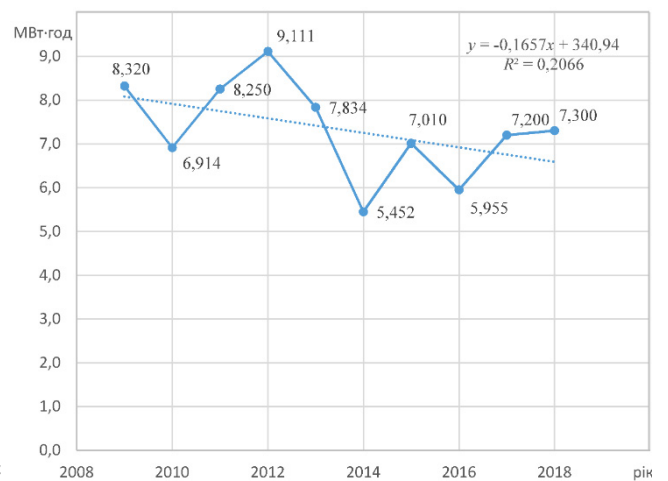
Проведені розрахунки показали, що параметр потоку відмов ПЛ 10 кВ майже в 3 рази вищий рекомендованих значень. Починаючи з 2016 року спостерігалось зниження кількості технологічних порушень порівняно з 2014 роком, в першу чергу для ПЛ 0,4 кВ (від 4,4% до 16,7%). Це пов'язано з відсутністю статистичних даних з Кримської та непідконтрольних територій Донбаської енергосистем внаслідок їх окупації. Аналіз побудованих трендів технологічних порушень (рис. 1.2) показав, що для ПЛ 0,4 кВ і 35-154 кВ вони мають тенденцію до зниження, а для ПЛ 6(10) кВ – тенденцію до зростання. Подібні тенденції спостерігаються і на графіках обсягів недоданої електроенергії.

Загалом у 2018 році на обладнанні електромереж напругою 0,4-154 кВ електропередавальних організацій сталося понад 156 тисяч технологічних порушень, що на 5 тисяч порушень менше порівняно з 2017 роком. Проте обсяг недоданої електроенергії споживачам склав 44,3 млн кВт·год, що на 2,8 млн кВт·год більше ніж у 2017 році.

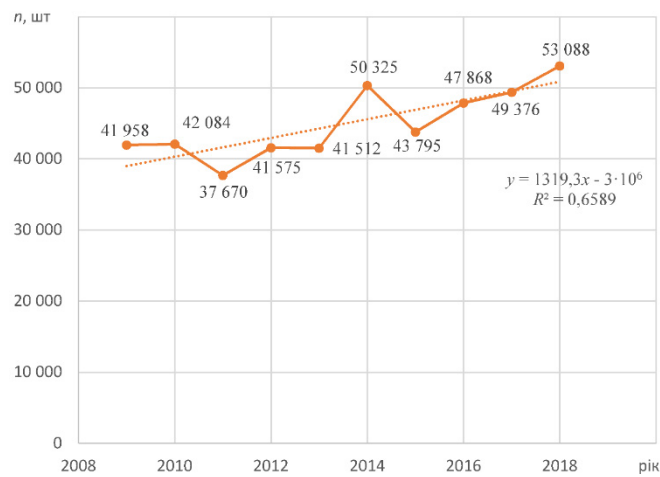
На обладнанні розподільчих мереж 10(6) кВ у 2018 році виникло більше 53 тисяч технологічних порушень, що на 3,7 тисячі порушень перевищує показник попереднього року, а обсяг недоданої електроенергії становив 33,8 млн кВт·год.



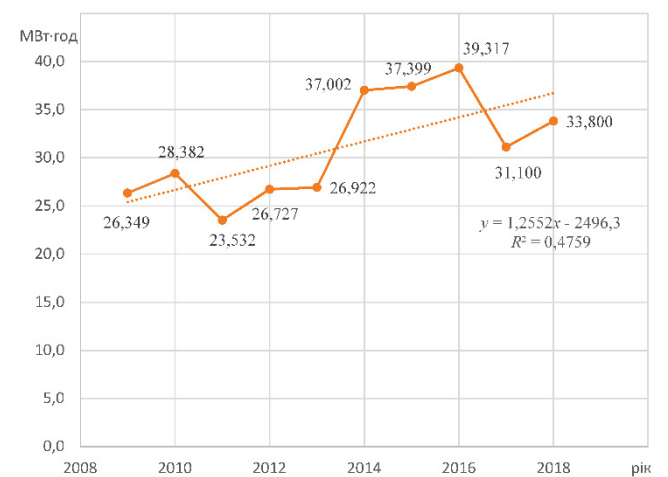
а)



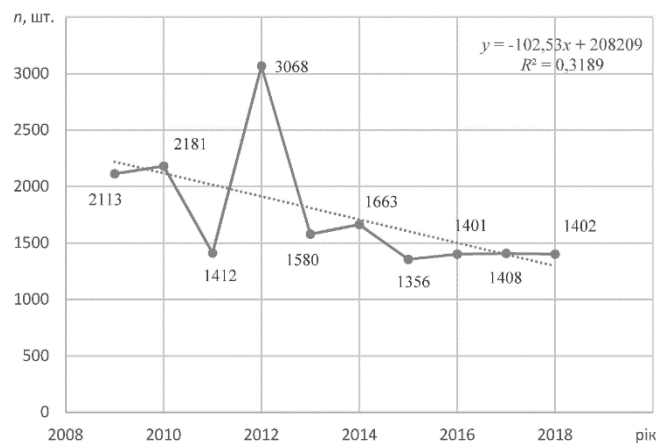
г)



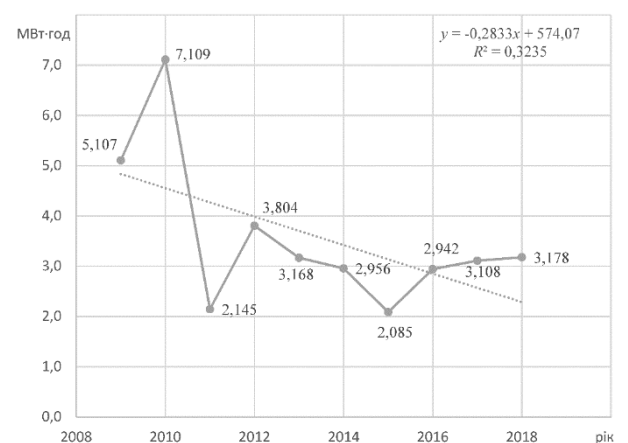
б)



д)



в)



е)

Рисунок 1.2 – Динаміка зміни кількості технологічних порушень

і недоданої електроенергії в електричних мережах:

а), г) – 0,4 кВ; б), д) – 6(10) кВ; в) – 35-154 кВ.

На обладнанні напругою до 1 кВ сталося понад 101,8 тис. технологічних порушень, що на 8,4 тис. порушень менше порівняно з 2017 роком, при цьому обсяг недоданої електроенергії склав 7,3 млн кВт·год, що на 121 тисячу кВт·год більше ніж у 2017 році.

Для з'ясування причин технологічних збоїв у роботі устаткування розглянуто відмови I та II категорій за організаційними ознаками (див. табл. 1.5). До них відносять порушення функціонування й пошкодження обладнання електростанцій, електричних та теплових мереж груп А, Б або В, що зазначені в Переліку устаткування електростанцій, електричних і теплових мереж. Такі порушення спричиняють короткочасні перерви виробництва електроенергії, збоїв в роботі енергопідприємств, енергопостачальних компаній, цехів, і окремих об'єктів. Вони класифікуються як відмови I і II категорій або як порушення цехового обліку та розслідуються, класифікуються і реєструються відповідно до[7].

У 2018 році сталося 8 відмов I категорії та 45 відмов II категорії. Внаслідок цього обсяг недоданої електричної енергії споживачам за відмовами I категорії склав 12,2 млн кВт·год, а за відмовами II категорії – 4,54 тис. кВт. Для порівняння, у 2017 році було зафіксовано 8 відмов I категорії та 43 відмови II категорії, через що обсяг недоданої електричної енергії споживачам склав 3,5 млн кВт·год за відмовами I категорії та 1,4 млн кВт за відмовами II категорії.

Таблиця 1.5 – відмови I-ї та II-ї категорії за організаційними ознаками

| Причина                    | Рік  |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                            | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Несприятливі погодні умови | 22   | 19   | 10   | 13   | 28   | 18   |
| Вина персоналу             | 13   | 7    | 18   | 13   | 11   | 22   |
| Інші                       | 12   | 19   | 19   | 15   | 12   | 13   |
| Всього                     | 47   | 45   | 47   | 41   | 51   | 53   |

Проведений аналіз табл. 1.5 показав, що несприятливі погодні умови спричиняють від 21% до 55% відмов обладнання I та II категорій. Отже, енергетичне обладнання зазнає значного впливу природних ризиків. Наслідки кліматичних аварій є серйозними – вони руйнують або пошкоджують критично важливі елементи інфраструктури, що призводить до фінансових втрат енергопостачальних компаній.

У результаті проведеного аналізу стану повітряних ліній мережі розподілу встановлено, що:

- для розподільних електромереж характерний низький рівень надійності повітряних ліній електропередачі. Зокрема, параметр потоку відмов ПЛ напругою 10 кВ майже втричі перевищує рекомендовані норми, а для ПЛ 110 кВ – майже вдвічі;

- внаслідок кліматичних змін, несприятливі погодні умови стали причиною 21-55% відмов обладнання I та II категорій. Значна кількість повітряних ліній 10 кВ, побудованих у 1970-х роках, зазнає суттєвого впливу несприятливих кліматичних умов. Це особливо проявляється в осінньо-зимовий період в Південній і Дніпровській енергосистемах. Підвищення механічних навантажень призвели до зростання кількості пошкоджень елементів ПЛ, значного зростання та прискорення їх зносу.

Ситуацію додатково ускладнює той факт, що впродовж останніх років через брак фінансування знизилася якість проведення профілактичних та планових ремонтів. Це призвело до значного зростання ймовірності виникнення аварійних ситуацій [8, 9].

Отже, наявні повітряні лінії розподільних мереж мають значний фізичний знос та знижену механічну міцність. Підвищення їх пропускної здатності необхідно виконувати шляхом проведення комплексних заходів з урахуванням їх класу напруги, які не знизять їх механічну міцність, за можливості, зафіксують її на існуючому рівні.

## 1.2 Аналіз методів підвищення пропускної здатності ПЛ

Пропускна здатність лінії електропередавання – це найбільша активна (повна) потужність, яка тривало може передаватися по лінії з урахуванням усіх технічних обмежень.

Межа граничної потужності, яка може бути передана по лінії за умови, що генератори віддаленої електростанції та ті, що працюють у енергосистемі оснащені регуляторами сильної дії, можуть підтримувати постійними задані напруги  $U_1$  і  $U_2$ , відповідно, на початку та в кінці лінії, становитиме

$$P_{\text{гр}} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{\text{л}}}, \quad (1.1)$$

де  $X_{\text{л}}$  – індуктивний опір лінії.

З рівності (1.1) впливають наступні способи збільшення пропускної здатності повітряної лінії [10, 12]:

- підвищення номінальної напруги. У цьому випадку істотним є те, що гранична потужність пропорційна квадрату напруги лінії;
- зменшення індуктивного опору, може бути досягнуто за рахунок розщеплення фаз, що особливо доцільно для ліній великої довжини. Інший спосіб полягає у використанні різних варіантів конструктивного виконання повітряних компактних ліній електропередавання;
- застосування повздовжньої компенсації реактивного опору (рис. 1.3, а);
- застосування керованих джерел реактивної потужності (ДРП) на проміжних підстанціях (рис. 1.3, б). З цією метою можуть бути використані статичні тиристорні компенсатори, синхронні компенсатори тощо. Якщо шляхом підбору відповідної потужності ДРП забезпечити підтримання заданої напруги в проміжних точках повітряної ліній, то вона розподілиться на декілька незалежних ланок. У такому разі пропускна здатність усієї лінії буде визначатися ланкою, що має з найменшу граничну потужність.

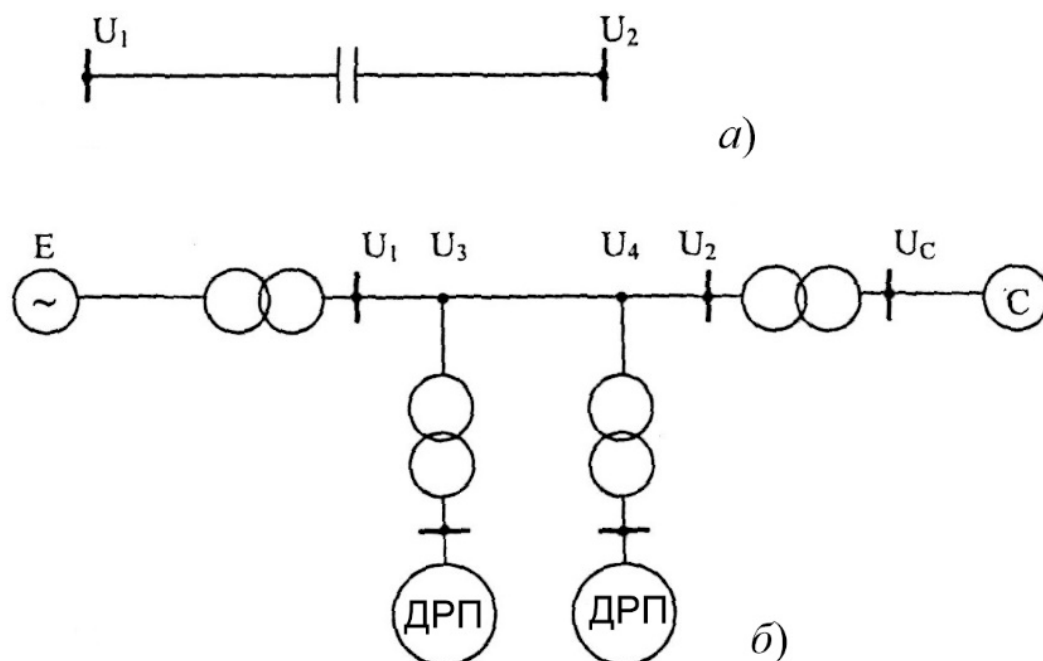


Рисунок 1.3 – Схема ПЛ:

а) з повздовжньою компенсацією;

б) з проміжними підстанціями

Пропускна здатність повітряної лінії, що обмежується максимально допустимим струмом нагріву проводу, визначається як:

$$P_{\text{пр}} = \sqrt{3} U_{\text{пл}} I_{\text{max}} \cos \varphi, \quad (1.2)$$

де  $U_{\text{пл}}$  – напруга повітряної лінії;

$I_{\text{max}}$  – максимально допустимий струм;

$\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності.

З аналізу (1.2) впливають такі методи підвищення пропускної здатності повітряних ліній режимний та конструктивний (рис. 1.4).

Застосування способів, що входять в групу режимного методу не передбачає фізичної зміни повітряної лінії. До цих способів відносяться наступні: підвищення номінальної напруги мережі або окремої ПЛ, підвищення  $\cos \varphi$ , врахування фактичних умов навколишнього середовища (використання DLR-технології).



Рисунок 1.4 – Способи підвищення пропускної здатності ПЛ

За умови незмінного допустимого струму, пропускна здатність ліній прямо пропорційна номінальній напрузі. Підвищення напруги повітряних ліній можливе в межах класу напруги або поза його межами. У межах класу напруги підвищення, у більшості випадків, здійснюється за допомогою пристроїв регулювання напруги під навантаженням (РПН) трансформаторів. Згідно ДСТУ рівень такого підвищення може сягати +10% від номінальної напруги. Відповідно до формули (1.2) це призводить до збільшення пропускної здатності повітряної лінії також на 10% [10-12].

Підвищення напруги поза межами класу – це перевід мережі на наступний вищий клас напруги. Наприклад, при застосуванні класу напруги 10 кВ замість 6 кВ, 20 кВ замість 10 кВ, 110 кВ замість 35 кВ пропускна здатність повітряної лінії, відповідно, збільшиться:

$$\frac{U_{\text{вк}}}{U_{\text{нк}}} = \frac{10}{6} = \sqrt{3}; \quad \frac{U_{\text{вк}}}{U_{\text{нк}}} = \frac{20}{10} = 2; \quad \frac{U_{\text{вк}}}{U_{\text{нк}}} = \frac{110}{35} = 3 \text{ рази,}$$

де  $U_{\text{вк}}$  – напруга вищого класу;

$U_{\text{нк}}$  – напруга нижчого класу.

Найпростіша технічна реалізація цього методу при переводі ПЛ 6 кВ на номінальну напругу 10 кВ. При переведенні ПЛ на інші класи напруги технічна реалізація значно ускладнюється – необхідно будувати нові лінії.

Підвищення коефіцієнта потужності за рахунок встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності (ПКРП). Нехай по ПЛ протікає струм, що дорівнює допустимому струму за умовами нагріву, при цьому  $\cos\varphi < 1$  (рис. 1.4). У цьому випадку для підвищення рівня активної потужності, що передається по ПЛ, необхідно виконати компенсацію реактивної потужності. Для цього необхідно в кінці ПЛ встановити ПКРП такої потужності, щоб повна потужність, що передається по ПЛ залишилась незмінною. На векторній діаграмі (рис. 1.4, б), цей режим роботи мережі описує трикутник  $S_{\text{доп}}QP$ . При збільшенні активної потужності з  $P_1$  до  $P_2$  також відбудеться збільшення реактивної потужності, внаслідок чого повна потужність зросте до  $S_2$ . За умови постійності  $\cos\varphi$ , трикутник потужностей займе положення  $S_2Q_2P_2$ . Підключення ПКРП, викличе зниження повної потужності  $S_2$  до рівня  $S_2 = S_1$  і тоді трикутник потужностей набуде вигляду  $S_{\text{доп}}P_2Q_3$ . Для випадку повної компенсації реактивної потужності, що передається через ПЛ гранично допустиме значення активної потужності складе  $P_{\text{к}} = P_{\text{гр}}$ .

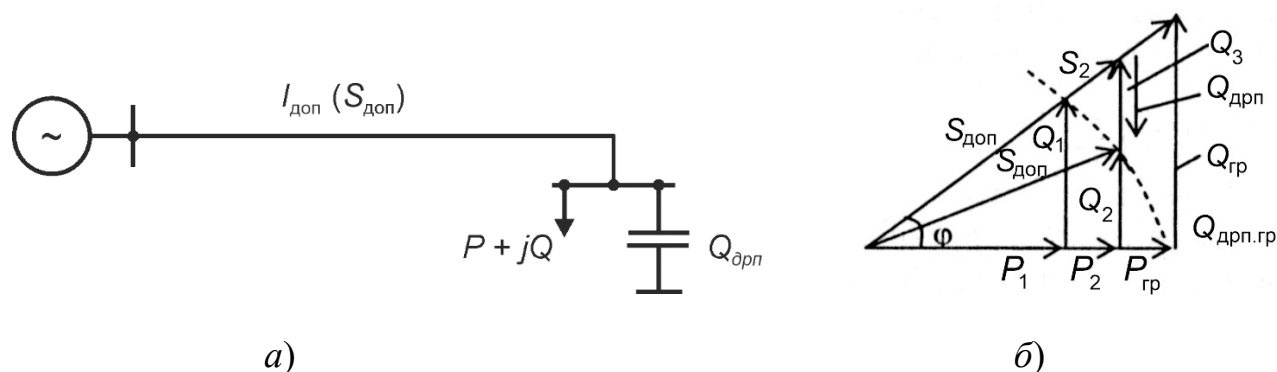


Рисунок 1.4 – Схема мережі а), векторна діаграма б)

При експлуатації розподільних електромереж, часто виникає ситуація, коли зростання навантаження не дозволяє підтримувати напругу в межах встановлених ДСТУ [13]. У таких випадках, виникає необхідність реконструкції мережі (рис. 1.5). Яку можливо провести шляхом реконструкції або будівництва нової ПЛ з проводами більшого перерізу чи вищого класу напруги. Найбільш доцільним шляхом у цьому буде встановлення пункту автоматичного регулювання напруги (ПАРН) 10 кВ (рис. 1.5, б). У процесі роботи ПАРН вимірює поточні значення сили струму та напруги ПЛ, розраховує рівень падіння напруги на ділянці ПЛ, на основі заданих значень її опору, і автоматично перемикає відгалуження, щоб забезпечити рівень напруги в споживача, згідно ДСТУ [13].

Головною перевагою цього підходу є менші капіталовкладення ніж під час реконструкції існуючої чи будівництві ПЛ, малий об'єм електромонтажних робіт, а недоліками – зростання струму на ділянках мережі до встановлення ПАРН.

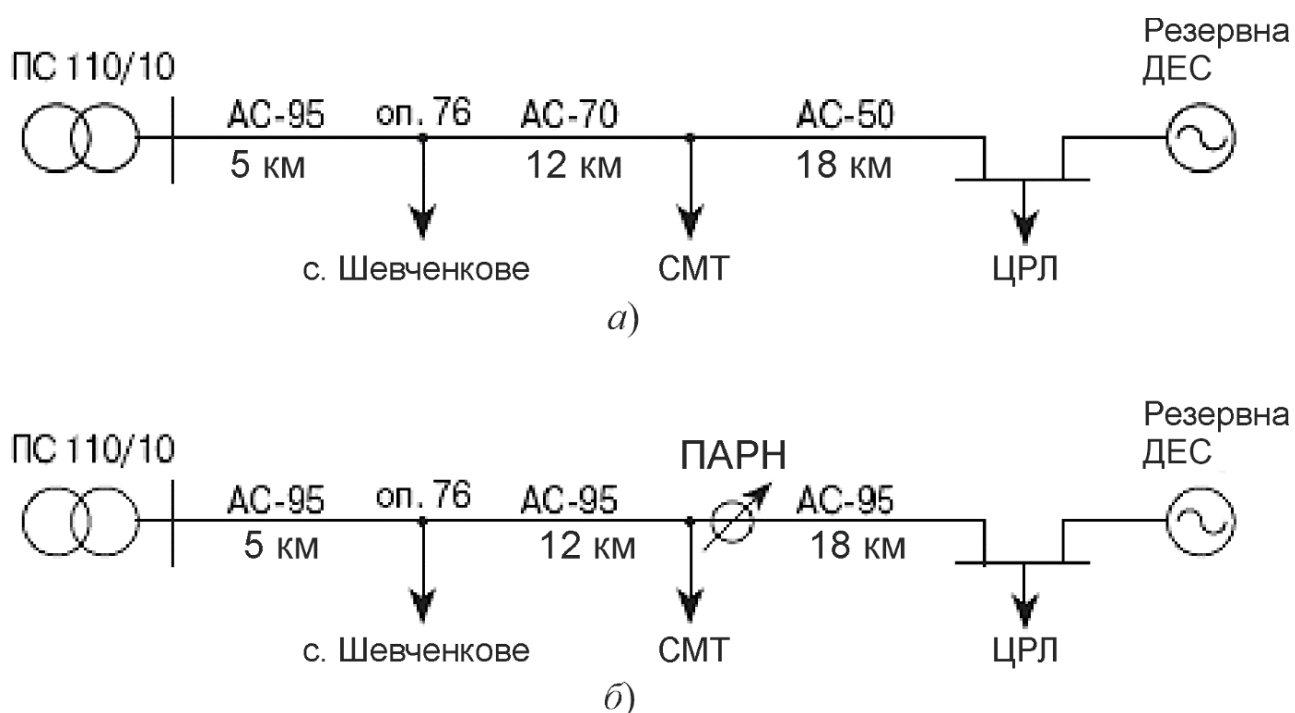


Рисунок 1.5 – Ділянка схеми мережі:

а) початкова схема;

б) після реконструкції

*Врахування фактичних умов навколишнього середовища.* При зміні температури навколишнього середовища умови охолодження проводів ПЛ також змінюються. У проектній практиці нагрів проводів повітряних ліній обмежується максимально допустимим струмом для певного перерізу проводу згідно ПУЕ [14]. Допустимі струми проводів визначаються на базі метеопараметрів, отриманих за тривалий період для кліматичних умов кожного сезону. Ці параметри характеризують найгірші поєднання несприятливих умов, які в реальній експлуатації трапляються менше ніж у 10% випадків. Проте такий розрахунковий режим залишається незмінним впродовж усього терміну експлуатації ПЛ, незважаючи на постійні зміни навколишнього середовища. На відміну від цього, врахування фактичних умов навколишнього середовища дозволяє встановити температурні обмеження, що дозволяють максимально завантажити ПЛ, без шкоди для неї та безпеки.

Головною перевагою цього способу є те, що пропускна здатність ПЛ збільшується, а її конструкція залишається без змін. Згідно статистики 10% часу роботи ПЛ DLR-технологія не зможе перевищити проектну пропускну здатність лінії, що є досить вагомим недоліком. Також для реалізації способу необхідне встановлення системи моніторингу стану проводу та навколишнього середовища. Тому такими системами обладнуються повітряні лінії напругою 110 кВ і вище. Найбільшу ефективність дана технологія має в електромережах до яких підключені повітряні і сонячні електростанції.

До конструктивного методу відносяться ті способи, що потребують часткової або повної зміни конструкції повітряної лінії. До таких способів належать: використання проводів нових типів, збільшення перерізу проводу, прокладання додаткових ПЛ і будівництво ділянок мережі з глибоким вводом.

До проводів нових типів можуть бути віднесені всі, що мають конструктивні відмінності або покращені характеристики відносно проводів марок *A* та *AC*, що найбільше розповсюджені в розподільних електромережах. На сьогодні, такими проводами є високотемпературні проводи марок *AERO-Z*, *TACSR/ACS* и *(Z)TACSR/HICIN*, всі самоутримні ізольовані проводи (СІП) і

захищені проводи марки СП-3, також полі проводи марки ПА та проводи з розвиненою поверхневою марки та ін.

Збільшення пропускної здатності проводів марок TACSR / ACS та TACSR/HACIN забезпечується їх вищою робочою температурою. Ці проводи стійкі до високих температур і можуть тривалий час витримувати більше електричне навантаження в нормальних умовах, ніж проводи марки АС. Повітряні лінії, що працюють за температури проводів до 150 °С, або навіть 210 °С, не схильні до відкладення ожеледно-паморозевих відкладень [12]. Це знижує ймовірність виникнення обриву проводів, а також зменшує ожеледні та вітрові навантаження на опори. Навіть при збільшенні пропускної здатності в півтора рази порівняно з проводом марки АС високотемпературний провід має менший діаметр. Це дозволяє або знизити навантаження на опори, або збільшити прольоти.

Конструкція проводів TACSR/ACS та (Z)TACSR/HACIN не відрізняється від класичних. Це уможливорює використання всіх відомих типів арматури за умови її розрахунку на роботу з високотемпературними проводами.

Ще одна перевага проводів – їх відносно невисока вартість, яка становить 270% від вартості АС за кілометр. Це значно менше порівняно з іншими сучасними аналогами підвищеної пропускної здатності.

СП і захищені проводи можуть бути використані для реконструкції ПЛ розподільних мереж напругою 0,4-35 кВ. Крім відомих переваг (запобігання коротких замикань (КЗ) при сплітанні проводів різних фаз, підвищення безпеки ліній тощо), такі проводи мають у порівнянні з неізолюваними гіршу, за однакової допустимої температури, пропускну здатність за умовами нагріву, внаслідок погіршення тепловіддачі у навколишнє середовище. Допустима температура самоутримних і захищених проводів з поліетиленовою ізоляцією, як і для неізолюваних, становить не більше 70 °С. Розрахунки показують, що за цієї умови гранично допустимі струми проводів ПЛЗ на 10-13% менші ніж струми ПЛ за температури повітря +25°С. Водночас, для проводів з ізоляцією зі зшитого

поліетилену виробники вказують допустиму температуру до 90 °С, а допустимі струми при цьому на 10-15% більші порівняно з неізольованими проводами [12].

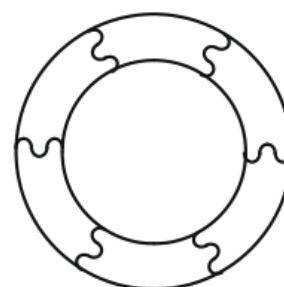
Недоліків СІП та захищених проводів відносно проводів марок А, АС слід віднести: вищу вартість; необхідність застосування для монтажу спеціальної лінійної арматури; більшу вагу на одиницю довжини через вагу ізоляції, що збільшує навантаження на опори ПЛ; збільшені габарити через товщину ізоляційного шару. Також вони потребують більш складного ремонту та обслуговування через необхідність зняття ізоляції та використання спеціальних з'єднувачів.

Застосування проводів з розвиненою поверхнею. За незмінної площі перетину проводу його поверхню можливо збільшити різними методами, наприклад виконавши його полим (рис. 1.6), багатожильним з джутовим наповнювачем у повивах або з поверхнею, що має значну шорсткість. У цьому випадку допустимий струм такого проводу буде вищим внаслідок покращення його охолодження.

Недоліком таких проводів є обмежена придатність до використання в розподільних мережах, оскільки вони мають переріз 500 мм<sup>2</sup> і вище. Проводи менших перерізів, у яких збільшення поверхні досягається шляхом формування на мікроребер будуть сприяти захвату та накопиченню ожеледно-паморозевих відкладень. Тому їх встановлення недоцільне в районах мереж з інтенсивним ожеледоутворенням.



а)



б)

Рисунок 1.6 –Полий провід марки ПА:

а) зовнішній вигляд; б) переріз

Збільшення площі перерізу проводів. Тривалодопустимі струми і відповідні їх пропускні здатності приймають, виходячи з допустимої температури нагріву проводів лінії. Відомо, що залежність допустимого струму від площі перерізу проводу є нелінійною, тому при збільшенні площі перерізу проводу допустима густина струму знижується. Це пов'язано з тим, що проводи з більшими площами перерізів мають меншу площу поверхні, яка припадає на  $1 \text{ мм}^2$  перерізу.

Застосування глибоких вводів. Глибокий ввід – це система електропостачання, яка дає змогу подати до центрів навантаження найбільш економічнодоцільну напругу з найменшою кількістю ступенів проміжного трансформування. Такі вводи застосовують як при проектуванні нових мереж, так і при розвитку та реконструкції наявних. Наприклад, якщо навантаження  $I$  живиться по лінії ПЛ-1 від центру живлення 2, то для підвищення пропускною здатності мережі можливо прокласти паралельну лінію ПЛ-2 того ж рівня напруги (рис. 1.6). Замість цього більш доцільним може бути спорудження глибокого вводу ПЛ-3 більш високої напруги. У результаті пропускна здатність за струмом збільшиться пропорційно до підвищення напруги. До суттєвих переваг глибокого вводу слід віднести зменшення втрат електроенергії в мережі завдяки зниженню струмів, скорочення витрат на обслуговування мережі в розрахунку на 1 кВт потужності.

Головним недоліком такого технічного рішення є висока вартість будівництва ліній ВН та підстанцій у порівнянні з лініями нижчих класів напруги.

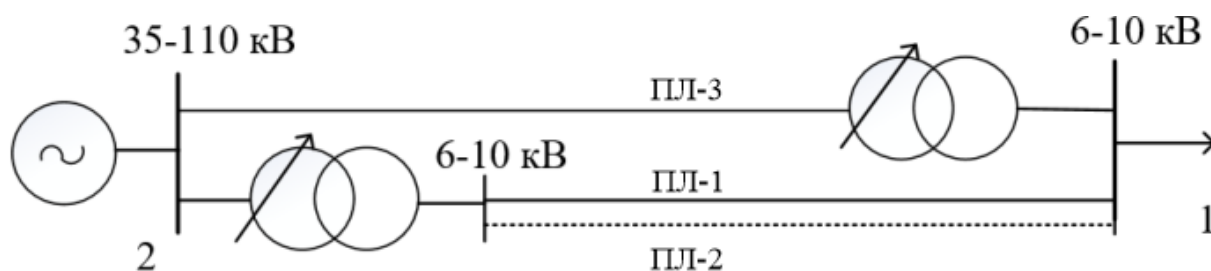


Рисунок 1.6 – Схема ділянки мережі з глибоким вводом

### 1.3 Постановка задач дослідження

Проведений аналіз можливих методів та способів підвищення пропускної здатності повітряних ліній 6-154 кВ, які знаходяться в експлуатації, показав, що на першому етапі найбільш ефективним з економічної точки зору є застосування режимних методів – зокрема, підвищення коефіцієнта потужності в мережі за рахунок компенсації реактивної потужності. Це дозволить оптимальніше використовувати наявні технічні можливості як обладнання підстанцій, так і самих повітряних ліній, а також мінімізувати обсяг необхідних капітальних вкладень. Якщо розподільна мережа вже частково обладнана батареями статичних конденсаторів або іншими пристроями компенсації реактивної потужності, то на другому етапі доцільно виконати реконструкцію повітряних ліній шляхом заміни застарілих проводів на сучасніші, більш досконалі конструкції. Адже значна частина повітряних ліній 6-154 кВ експлуатується 40-50 років, тому їм властивий високий рівень фізичного та морального зносу, а також знижена за сучасними вимогами механічна міцність і стійкість до впливу зовнішніх чинників. Таким чином, проводи, які встановлюватися під час реконструкції ПЛ, обов'язково мають бути сучасніших, удосконалених конструкцій з покращеними технічними і експлуатаційними характеристиками, щоб не створювати додаткових механічних навантажень на ПЛ.

Отже, для реалізації завдання досліджень необхідно вирішити наступні основні задачі:

- дослідити характеристики сучасних захищених проводів з характеристиками проводів марок А, АС для мереж 10-35 кВ;
- дослідити характеристики компактних проводів, що використовуються на ПЛ 110 (154) кВ;
- оцінити підвищення пропускної здатності повітряних ліній 35 кВ при застосуванні захищених проводів;
- оцінити підвищення пропускної здатності повітряних ліній 110 кВ при застосуванні компактних і високотемпературних проводів;

– розробити технічні рекомендації з підвищення пропускної здатності ПЛ 6-154 кВ, що тривалий час знаходяться в експлуатації.

– розробити організаційні заходи безпеки при експлуатації електроустановк.

#### **1.4 Висновки до 1-ого розділу**

1. Встановлено, що найбільш незахищеними від природних ризиків є повітряні лінії розподільних електромереж (6)10 кВ, вони мають параметр потоку відмов, що близько в три рази більший ніж проектні значення, у цілому несприятливі погодні умови є причиною до 55% відмов I і II категорій у розподільних мережах 0,4-154 кВ.

2. Виявлено, що на першому етапі підвищення пропускної здатності ПЛ найбільш доцільним є застосування режимних методів, зокрема, підвищення коефіцієнта потужності мережі, а на 2-му – доцільно виконувати реконструкцію ПЛ шляхом заміни проводів на проводи сучасних конструкцій.

3. Визначено основні задачі розробки технічних рекомендацій щодо підвищення пропускної здатності ПЛ 6-154 кВ, які тривалий час знаходяться в експлуатації.

## **РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕІЗОЛЬОВАНИХ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ**

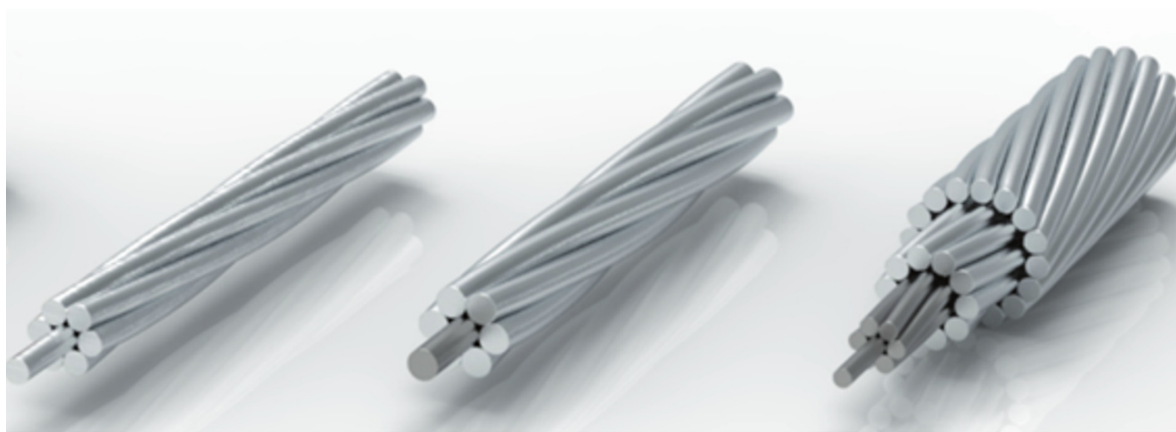
### **2.1 Порівняльний аналіз конструктивних особливостей проводів марок А, АС і СІП**

Будівництво нових повітряних ліній і модернізація старих включає багато складових, але головною з них є впровадження нових сучасних типів проводів. Ці проводи повинні задовольняти таким основним вимогам, як:

- висока електропровідність;
- висока механічна міцність за невеликої погонної маси;
- низькі пластичне подовження та стріла провисання;
- стійкість до вітрових, ожеледних і ожеледно-вітрових навантажень;
- можливість роботи при високих температурах;
- висока корозійна стійкість;
- технологічність виготовлення, монтажу та ремонту.

На сьогодні, основним проводом в Україні для ПЛ 10-35 кВ залишаються алюмінієвий провід марки А та сталюалюмінієвий провід марки АС (рис. 2.1). Він представляє собою звиту з окремих дротин конструкцію у вигляді канату. Останні забезпечують його гнучкість, завдяки чому підвищується надійність при монтажу та експлуатації повітряних ліній.

У залежності від необхідного перерізу проводу та діаметру окремих дротин провід може мати декілька шарів дротин (повивів) навколо центральної (рис. 2.1, в) Суміжні повиви мають різний напрям скручування, чим забезпечується стійкість проводу до розкручування. Дротини кожного повиву після скручування набувають спіральної форми. Такі проводи виготовляються монометалевими або біметалевими.



а)

б)

в)

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд неізолюваних проводів:

а) марка А; б), в) марка АС

Найбільш поширеними є комбіновані біметалеві сталевалюмінієві проводи. Внутрішні повиви таких проводів виконують з сталюого дроту підвищеної міцності, а зовнішні – з алюмінієвого. Стальне осердя підвищує міцність проводу. Такі проводи мають високу механічну міцність та електропровідність.

У сталевалюмінієвих проводів розривна міцність складається із сумарних розривних міцностей алюмінієвої частини та неповної міцності (за 1% подовження) сталюї частини.

Проводи марок А, АС можуть складатися з різної кількості дротин.

Сталевалюмінієві проводи марок АС, АСКС, АСКП, АСК мають алюмінієву частину виготовлену із дротин згідно ТУ16-705.472.87, а сталюу частину із сталюих оцинкованих дротин марки ОС або МС.

Проводи марок А та АС мають наступні основні переваги: низьку вартість, доступність, простоту монтажу та ремонту, навченість обслуговуючого персоналу.

Завдяки простій конструкції та низькій технологічності виробництва, ці проводи є дешевшими порівняно з сучасними аналогами за умови однакової пропускної здатності. Проводи А і АС досить широко розповсюджені і доступні для закупівлі та постачання. Вони випускаються багатьма вітчизняними

заводами. Ці проводи не потребують спеціального устаткування та навичок для виконання монтажних робіт і ремонту ліній. Проводи марок А і АС можуть використовуватися як заміна на існуючих опорах та лініях без суттєвої зміни конструкцій. Знайома технологія для обслуговуючого персоналу. Перевага полягає в тому, що персоналу не потрібно навчатися новим технологіям для роботи з такими проводами.

Отже, головна перевага проводів А і АС – їх низька вартість та сумісність з існуючою мережевою інфраструктурою.

Проводи марок А та АС також мають ряд суттєвих недоліків, основними серед яких є: низька корозійна стійкість, низька механічна міцність, велика вага та електричний опір, велика охоронна зона. Досвід експлуатації показує, що ці проводи мають низьку корозійну стійкість, тому їхній ресурс обмежений, особливо в промислових районах і районах біля солоних водойм. Проводи марок А і АС поступаються за міцністю сучасним проводам зі сталевалюмінієвого сплаву. Вони більш схильні до пошкоджень під дією вітрових та ожеледних навантажень. Ці проводи мають відносно велику вагу на одиницю довжини у порівнянні з сучасними, що збільшує механічне навантаження на опори. Електричний опір проводів А і АС вищий, ніж у сучасних проводів з алюмінієвими сплавами тієї ж площі перерізу, це збільшує втрати електроенергії в мережі. Отже, головними недоліками проводів марок А і АС є їх низька надійність та обмежений ресурс роботи в порівнянні з сучасними аналогами. Це потребує їх поступової заміни.

Проведений аналіз конструктивних особливостей і експлуатаційних характеристик проводів марок А, АС показав, що вони мають ряд суттєвих недоліків тому необхідно виконати аналіз проводів сучасних марок, які можливо використати для їх заміни. Для розподільних мереж 10-35 кВ до таких, у першу чергу, відноситься провід марки СП-3.

Провід марки СП-3 – це одножильний самоутримний провід, що має захисну оболонку. Його жила виготовляється з алюмінієвого сплаву високої міцності або ж з двох матеріалів сталі та алюмінієвого сплаву (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Провід СІП-3

Струмopровідна виконується багатopровіюною з ущільнених дpотин (рис. 2.2, б). Ізоляція виготовляється з силанольнозшитого поліетилену. Даний матеріал не змінює своїх ізоляційних, механічних та хімічних властивостей у широкому, діапазоні температур. Так він може працювати з тривалий час за умови нагріву до 90 °С а в режимі тривалого перевантаження – до 130 °С (не більше 8-ми годин на добу) і до 250 °С у режимі струму КЗ. До складу ізоляції додається до 2-х відсотків сажі, щоб забезпечити високу стійкість її до дії ультрафіолету.

Номинальна товщина захисної оболонки становить 2,3 мм для проводів, що експлуатуються при напрузі до 20 кВ та 3,5 мм для проводів, що експлуатуються при напрузі до 35 кВ. Від перерізу проводів товщина ізоляції не залежить. На практиці спостерігаються відхилення від приведених значень товщини, які для випадку 2,3 мм можуть реально відповідати товщині ізоляції 2,06-2,58 мм. Таким, чином середня товщина шару ізоляції складає 2,5 мм.

У ПЛЗ полімерна ізоляція проводу не розрахована на тривале прикладення напруги. Тому в прольотах повітряних ліній основною ізоляцією між фазами служить повітря, а на опорах проводи кріпляться до ізоляторів, що застосовуються на ПЛ. Однак, захисна оболонка проводу може працювати тривалий час у таких аварійних режимах ПЛЗ, як сплітання фазних проводів, накид на провід (падіння дерева). Наявність полімерної ізоляції також дозволяє

зменшити відстані між фазами ПЛЗ (рис. 2.3). Кріплення ізольованих проводів на опорах анкерного типу до натяжних гірлянд ізоляторів здійснюється за допомогою натяжних роликів затискачів. При цьому гірлянди ізоляторів рекомендується збирати із двох підвісних скляних ізоляторів. На проміжних опорах проводи кріпляться на шийках штирових ізоляторів типовою в'язкою.

Захисне покриття з поліетилену надійно захищає провід від впливу вологи, агресивних речовин, перепадів температури. Проводи СП-3 менш схильні до пошкоджень під дією механічних навантажень чи вібрацій. Вони мають меншу масу в порівнянні з неізольованими проводами. Це зменшує навантаження на опори. Можливість роботи при підвищених температурах дозволяє передавати більші струми. Безпека обслуговування лінії під напругою. Застосування ізольованих проводів дозволяє виконати ПЛЗ зі зближеними фазами без ізоляційних розпірок, і до того ж зменшити відстань між фазами, що забезпечить збільшення пропускної здатності лінії та покращення її характеристик.

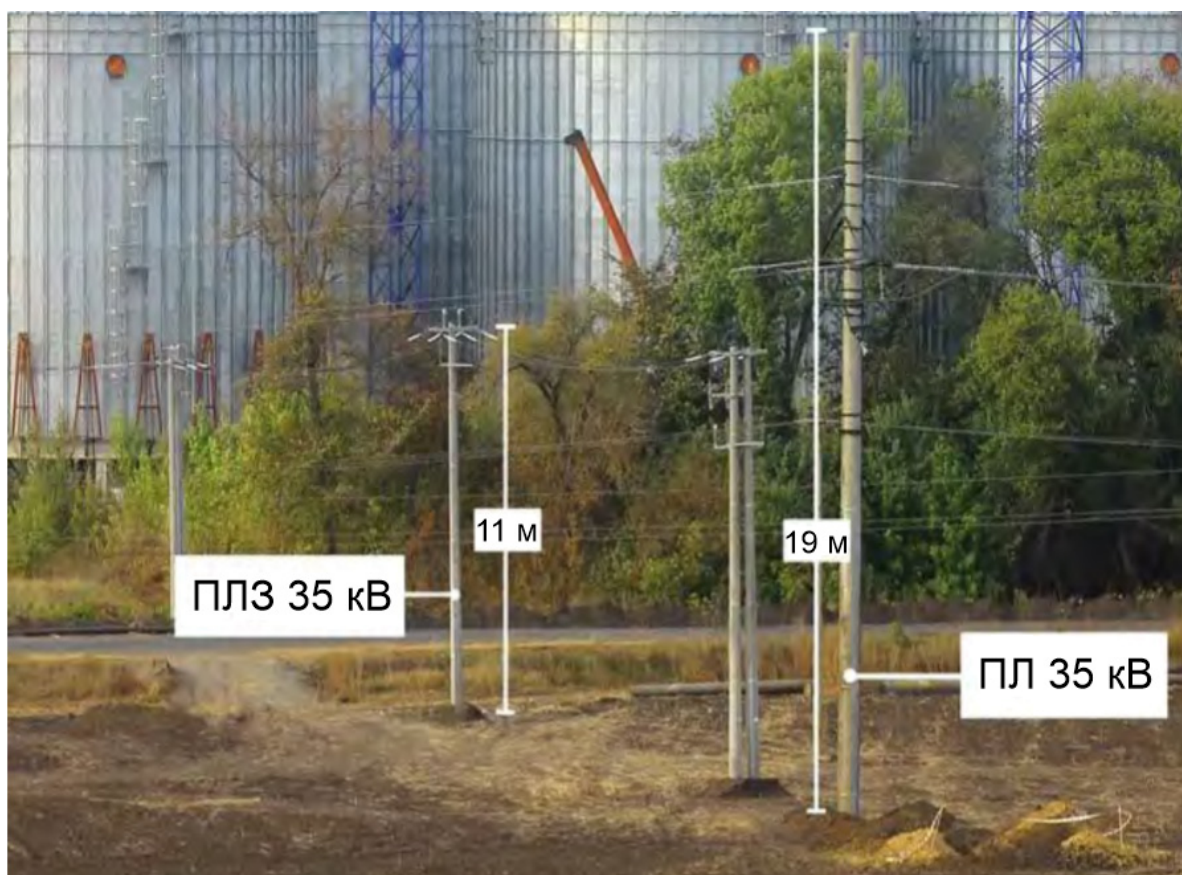


Рисунок 2.3 – Габарити електроопор ПЛЗ і ПЛ

Ізоляційне покриття також захищає персонал, тварин і птахів від ураження електричним струмом.

Проводи марки СПП-3 виготовляються на такі класи напруги: 20 кВ і 35 кВ, з перерізом струмоведучої жили від 35-240 мм<sup>2</sup>.

Монтаж проводів марки СПП має ряд особливостей: його радіус вигину має бути менше допустимого (зазвичай 10 діаметрів проводу), провід заборонено згинати в зворотному напрямі з метою усунення провисань, його не можна волочити по землі та допускати механічних ушкоджень ізоляції. Якщо проводиться реконструкція ПЛ із заміною проводів марки АС на СПП-3 то вся лінійна арматура теж замінюється. При цьому допускається використання старих ізоляторів ШФ-20 або ж сучасних ІФ27, які мають втулку з пластмаси. Фіксація натягнутого проводу здійснюється за допомогою спіральних в'язок.

Головними недоліками проводу марки СПП-3 є:

- вища в кілька разів вартість відносно неізольованих проводів аналогічного перерізу;
- необхідність застосування спеціальних затискачів та арматури через наявність ізоляції;
- підвищена складність ремонту проводу.

До основних переваг ПЛЗ марки СПП-3 слід віднести:

- високу корозійну стійкість;
- підвищену механічну міцність;
- меншу масу;
- підвищену робочу температуру ;
- вищу пропускну здатність;
- вузьку трасу лінії;
- вищу безпеку обслуговування;
- високу безпеку для тварин та птахів.

Основні технічні характеристики проводу СПП-3 представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики СПП-3 з ізоляцією із силанольнозшитого поліетилену [14]

| Номінальний<br>переріз | Допустимий струм, А |       | Електричний<br>опір постійному<br>струму при<br>$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ Ом/км | Розривне<br>зусилля жили,<br>кН, не менше |
|------------------------|---------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                        | 20 кВ               | 35 кВ |                                                                                        |                                           |
| 50                     | 245                 | 270   | 0,72                                                                                   | 14,2                                      |
| 70                     | 310                 | 340   | 0,493                                                                                  | 20,6                                      |
| 95                     | 370                 | 400   | 0,363                                                                                  | 27,9                                      |
| 120                    | 430                 | 460   | 0,288                                                                                  | 35,2                                      |
| 150                    | 485                 | 520   | 0,236                                                                                  | 43,4                                      |
| 185                    | 560                 | 600   | 0,188                                                                                  | 53,5                                      |
| 240                    | 600                 | 670   | 0,145                                                                                  | 69,5                                      |

продовження табл. 2.1.

| Номінальний<br>переріз | Розрахункова маса проводу,<br>кг/км |       | Розрахунковий зовнішній<br>діаметр |       |
|------------------------|-------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
|                        | 20 кВ                               | 35 кВ | 20 кВ                              | 35 кВ |
| 50                     | 210                                 | 266   | 12,9                               | 15,3  |
| 70                     | 277                                 | 339   | 14,4                               | 16,8  |
| 95                     | 367                                 | 437   | 16,3                               | 18,7  |
| 120                    | 446                                 | 522   | 17,7                               | 20,1  |
| 150                    | 520                                 | 600   | 19,0                               | 21,4  |
| 185                    | 649                                 | 737   | 20,9                               | 23,3  |
| 240                    | 798                                 | 894   | 22,9                               | 25,3  |

Порівняння характеристик проводів марок А, АС і СПП-3 представлено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння характеристик проводів марок А, АС і СП-3

| Тип проводу | Допустимий струм, А | Електроопір постійному струму при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом/км | Розривне зусилля, кН | Маса кг/км | Тип проводу | Допустимий струм, А |       | Електроопір постійному при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом/км | Розривне зусилля кН |
|-------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------|-------------|---------------------|-------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|
|             |                     |                                                                            |                      |            |             | 20 кВ               | 35 кВ |                                                                     |                     |
| <b>А</b>    |                     |                                                                            |                      |            | <b>СП-3</b> |                     |       |                                                                     |                     |
| А-50        | 215                 | 0,588                                                                      | 7,62                 | 135        | СП-3 1×50   | 245                 | 270   | 0,72                                                                | 14,2                |
| А-70        | 265                 | 0,421                                                                      | 10,46                | 189        | СП-3 1×70   | 310                 | 340   | 0,493                                                               | 20,6                |
| А-95        | 320                 | 0,315                                                                      | 13,5                 | 252        | СП-3 1×95   | 370                 | 400   | 0,363                                                               | 27,9                |
| А-120       | 375                 | 0,251                                                                      | 19,19                | 321        | СП-3 1×120  | 430                 | 460   | 0,288                                                               | 35,2                |
| А-150       | 440                 | 0,198                                                                      | 23,67                | 406        | СП-3 1×150  | 485                 | 520   | 0,236                                                               | 43,4                |
| А-185       | 500                 | 0,161                                                                      | 29,11                | 502        | СП-3 1×185  | 560                 | 600   | 0,188                                                               | 53,5                |
| А-240       | 590                 | 0,123                                                                      | 35,95                | 655        | СП-3 1×240  | 600                 | 670   | 0,145                                                               | 69,5                |
| <b>АС</b>   |                     |                                                                            |                      |            | <b>СП-3</b> |                     |       |                                                                     |                     |
| АС-50/8     | 210                 | 0,603                                                                      | 17,1                 | 195        | СП-3 1×50   | 245                 | 270   | 0,72                                                                | 14,2                |
| АС-70/11    | 265                 | 0,429                                                                      | 24,13                | 276        | СП-3 1×70   | 310                 | 340   | 0,493                                                               | 20,6                |
| АС-95/16    | 330                 | 0,306                                                                      | 33,37                | 385        | СП-3 1×95   | 370                 | 400   | 0,363                                                               | 27,9                |
| АС-120/19   | 375                 | 0,249                                                                      | 41,52                | 471        | СП-3 1×120  | 430                 | 460   | 0,288                                                               | 35,2                |
| АС-150/24   | 450                 | 0,199                                                                      | 52,28                | 705        | СП-3 1×150  | 485                 | 520   | 0,236                                                               | 43,4                |
| АС-185/29   | 510                 | 0,162                                                                      | 58,08                | 728        | СП-3 1×185  | 560                 | 600   | 0,188                                                               | 53,5                |
| АС-240/32   | 605                 | 0,121                                                                      | 75,05                | 921        | СП-3 1×240  | 600                 | 670   | 0,145                                                               | 69,5                |

Аналіз табл. 2.2 показує, що проводи марки СПП-3 всіх перерізів мають більший тривало допустимий струм як для ПЛЗ напругою 20 кВ, так і для ПЛЗ напругою 35 кВ. У порівнянні з проводами марки А проводи марки СПП-3 мають на  $\approx 50\%$  більше розривне зусилля, однак воно складає 83-92% у порівнянні з проводами марки АС. Проводи марки СПП-3 обох класів напруги мають значно більшу погонну масу (табл. 2.1) ніж проводи марки А і приблизно однакову з проводами марки АС.

Отже, проводи марки СПП-3 доцільно використовувати для заміни проводів марки АС при реконструкції повітряних ліній, що дозволить збільшити їх пропускну здатність і подовжити їх термін служби.

## **2.2 Порівняльний аналіз конструктивних особливостей проводів марок АС і АЕРО-Z**

На сьогодні, основними проводами для ПЛ 110 (150) кВ є сталевалюмінієві проводи марок АС, АСКС, АСК, АСКП [14-16]. Ці проводи мають ті ж недоліки, що і неізолювані проводи для марок А, АС. Виключенням є підвищена корозійна стійкість проводів марок АСКС, АСК, АСКП. Які призначені для передавання електричної енергії в повітряних електричних мережах на узбережжях морів, солоних озер, промислових районах і районах засолених пісків.

Питомий активний опір проводів марки АС суттєво залежить від параметрів скрутки повивів. Визначальним чинником, який обумовлює додаткові витрати енергії в проводі, є поздовжній магнітний потік у сталевому осерді, зумовлений скручуванням. Цей потік призводить до виникнення втрат потужності за рахунок гістерезису та вихрових струмів у сталевому осерді, а також через нерівномірний розподіл струму в окремих повивах. Завдяки протилежному напрямку скрутки суміжних дротин у традиційних проводах, МРС, що створюються струмами окремих повивів і діють на осердя частково компенсують одна одну. За парної кількості алюмінієвих повивів, результуючий поздовжній магнітний потік є незначним і не впливає на активний опір проводу.

Водночас, сталевалюмінієві проводи, що мають три алюмінієві повиви та сталеве осердя намагнічуються значним магнітним потоком, що призводить до додаткових витрат електроенергії в діапазоні нормальних навантажень. Ці втрати становлять [15, 16]:

- для проводу з 1-м алюмінієвим повивом – 20-50%;
- для проводу з 3-ма алюмінієвими повивами – 3-15%.

Необхідність застосування проводів з непарною кількістю алюмінієвих повивів зумовлена обмеженнями на діаметр алюмінієвих дротин. Так, якщо їх діаметр більше 4,5 мм знижуються гнучкість і міцність проводу, а при зменшенні діаметра до 1,5 мм ускладнюється сам технологічний процес виробництва проводів [15].

Активний опір сталевалюмінієвих проводів з непарною кількістю повивів можливо знизити шляхом компенсації поздовжнього магнітного потоку в осерді або виготовивши осердя з немагнітної сталі. Компенсацію магнітного потоку можливо досягти шляхом зменшення різниці між сумарними поперечними перерізами різноспрямованих алюмінієвих повивів, наприклад, за рахунок застосування в них дротин різного діаметра.

У проводах, що мають 3 повиви максимальний ефект досягається при відносному збільшенні діаметра дротин 2-ого повиву та зменшенні діаметра дротин 1-ого (внутрішнього) повиву. Компенсація магнітного потоку в сталевому осерді проводу за допомогою зниження відносної частки струму в 1-ому повиві призводить до загального зменшення опору проводу [15, 17].

Таким чином, існуючі сталевалюмінієві проводи, як малих перерізів так і великих, мають ряд суттєвих недоліків.

На сьогодні існують рішення, які позбавлені вище розглянутих недоліків. Вони можуть забезпечити збільшення пропускної здатності існуючих ліній рахунок застосування спеціальних проводів. Така постановка задачі приваблює як з технічної, так і та з економічної точки зору.

На сьогодні до сучасних проводів висувається ряд вимог, а саме:

- висока електропровідність;
- висока механічна міцність;
- низька питома вага;
- стійкість до впливу високих температур;
- мінімальні температурні подовження;
- стійкість до старіння та вітрових навантажень.

Умови дотримання зазначених вимог є конкуруючими, адже найкращу міцність забезпечує сталь, а найвищу електропровідність і найменшу вагу має алюміній. Для забезпечення необхідної термостійкості використовуються дисперсно-зміцнені матеріали, на основі цирконієвих сплавів, композитів тощо, а також використання волокон оксиду алюмінію.

Таким чином характерними ознаками сучасного проводу є покращені:

- матеріал осердя;
- матеріал електропровідних дротин проводу;
- геометрія поперечного перерізу дротини.

У якості матеріалу осердя застосовуються сталь підвищеної міцності, сталь, плаковану алюмінієм, сталь із цинк-алюмінієвим покриттям, сплав заліза з вмістом до 36% нікелю (інвар) та композитні матеріали.

У якості матеріалу струмопровідних дротин використовуються: холоднотягнутий алюміній, що має достатньо високу провідність і механічну міцність з робочою температурою до 90 °С; алюмінієві сплави системи Al-Si-Mg типу АВЕ, 6101, 6201; термостійкий алюміній-цирконієвий сплав із робочою температурою до 150-230 °С.

Форма перерізу дротин може бути як однаковою в окремих повивах, так і різною. Крім круглої використовують дротини наступних профілів: трапецієподібного, Z-подібного та стрілоподібних. Класифікації неізолюваних дротів достатньо часто зустрічаються у технічній літературі.

На сьогодні в Україні кабельна-провідникова продукція представлена провідними компаніями: Nexans (Бельгія), Lumpi-Berndorf (Австрія), 3М (США), J-Power Systems (Японія) та ін. [18-25].

Класифікація інноваційних проводів представлена на рис. 2.4, що базується на матеріалах, які використовують при їх виробництві. На ринку представлена значна кількість різновидів проводів, за рахунок використання різних комбінацій складових, що наведені в класифікації.

Крім використання нових матеріалів при виробництві проводів, ще одним із способів підвищення пропускної здатності ПЛ є застосування компактних проводів. Цей підхід дає змогу зменшити діаметр окремого проводу без зміни його пропускної здатності. Компактні проводи виготовляють за допомогою щільного скручування струмопровідних дротин, або збираючи верхні шари проводу зі спеціально профільованих дротин. Компактність проводів характеризується коефіцієнтом заповнення перерізу  $k_{з.п}$  – часткою перерізу, що припадає на метал. Виробники проводів прагнуть досягти якомога вищих значень цього коефіцієнта. У проводах виготовлених з круглих дротин  $k_z$  складає 0,75, а



Рисунок 2.4 – Класифікація сучасних неізолюваних проводів

в ущільнених – 0,85-0,90. Найбільш досконалыми з цієї точки зору є проводи, скручені з попередньо профільованих дротин, у яких  $k_{з.п} = 0,90 - 0,95$ .

Серед проводів з попередньо профільованими струмопровідними дротинами найбільшого поширення набула конструкція з трапецієподібним профілем, наприклад, марки ACSS (Aluminum Conductor, Steel-Supported). Вони мають конструкцію аналогічну конструкції проводу типу АС, але верхні повиви дротин мають трапецієподібний профіль (ACSS/TW) (рис. 2.5). Проїї головним недоліком є те, що при ушкодженні хоча б однієї з дротин зовнішнього повиву, ця дротина внаслідок клинового ефекту виштовхується назовні. Далі вона починає розплітатися, а при появі вітру гойдатися. Це врешті решт призведе до міжфазного замикання під час експлуатації проводу. У проводів звитих з дротин, що мають Z-подібний і профіль відсутній. Оскільки, у них контакт сусідніх дротин у повиві відбувається по криволінійній поверхні, що утримує ушкоджену дротину від випадіння.

Зовнішній вигляд та переріз проводу представлені на рис. 2.5. Осердя проводу виконується з особливо міцної сталі, а електропровідна частина з відпаленого алюмінію. Покриття зі сплаву Bezinal (95% Zn та 5% Al) компанії Bekaert надає сталевим дротинам осердя проводів корозійну стійкість у 2,5-3 рази вищу, ніж в оцинкованих дротин.

У табл. 2.3 приведені характеристики проводів марок АС і АЕРО-Z (компанія Nexans, Бельгія) [19].



Рисунок 2.5 – Провід ACSS/TW:

а) зовнішній вигляд; б) поперечний переріз

Таблиця 2.3 – Порівняння характеристик проводів марок АС і АЕРО-Z

| Марка          | Зовнішній діаметр | Переріз, мм <sup>2</sup> | Електричний опір постійному струму при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом/км | Допустимий тривалий струм, А | **Маса проводу, кг/км | *Розривне зусилля, кН |
|----------------|-------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>АС</b>      |                   |                          |                                                                                 |                              |                       |                       |
| АС-150/24      | 17,1              | 149/24,2                 | 0,198                                                                           | 450                          | 599                   | 52,28                 |
| АС-185/29      | 18,8              | 181/29                   | 0,162                                                                           | 510                          | 728                   | 62,06                 |
| АС-240/39      | 21,6              | 236/38,6                 | 0,122                                                                           | 610                          | 1106                  | 80,90                 |
| АС-300/39      | 24,0              | 301/38,6                 | 0,098                                                                           | 710                          | 1132                  | 90,57                 |
| АС-450/56      | 28,8              | 434/56,3                 | 0,068                                                                           | 890                          | 1640                  | 131,37                |
|                |                   |                          |                                                                                 |                              |                       |                       |
| <b>АЕРО-Z</b>  |                   |                          |                                                                                 |                              |                       |                       |
| A3F-Z-148-14,7 | 14,7              | 149,09                   | 0,2259                                                                          | 504                          | 425                   | 47,7                  |
| A3F-Z-177-16,5 | 16,5              | 179,27                   | 0,1851                                                                          | 572                          | 506                   | 57,0                  |
| A3F-Z-242-18,9 | 18,9              | 246,0                    | 0,1352                                                                          | 692                          | 688                   | 80,0                  |
| A3F-Z-301-21,0 | 21,0              | 306,3                    | 0,1086                                                                          | 792                          | 856                   | 99,5                  |
| A3F-Z-455-26,1 | 26,1              | 455                      | 0,0722                                                                          | 1022                         | 1306                  | 150,1                 |

\* із дроту марки АТп;

\*\* для проводу АЕРО-Z з урахування мастила

Поверхня верхнього повиву проводу AERO-Z є практично гладкою (рис. 2.6), з незначними гвинтоподібними канавками, що утворюються між верхніми крайками Z-подібних дротів. Завдяки цьому конструкція проводу AERO-Z виходить компактнішою порівняно з проводом АС, і за того ж діаметра має більший переріз алюмінієвої частини. Оскільки замість сталевго осердя використовуються алюмінієві дротини, провід важить менше (табл. 2.3). Такі особливості призводять до зменшення механічних навантажень на опори ПЛ у разі застосування проводів однакового діаметра, або дають змогу збільшити корисний електропровідний переріз.

Порівняно велика контактна поверхня між двома Z-подібними дротинами одного шару забезпечує ефективний захист від витікання консистентного мастила зсередини проводу на зовні. У зв'язку з цим внутрішній антикорозійний захист виявляється кращим, ніж у проводів марки АС, в яких спостерігається витиснення захисного мастила назовні під дією циклічних навантажень. Цим досягається уповільнене старіння проводу компактного проводу. У табл. 2.4 наведені експериментальні дані отримані на звичайному (типу АС) і компактному (типу AERO-Z) проводах, що знаходились в експлуатації 18 років.

За умови обриву дротин зовнішнього повиву AERO-Z, вони залишаються на своєму місці під впливом механічних робочих напружень. Цей стан зберігається до моменту обриву 5-ти суміжних дротин.



Рисунок 2.6 – Провід AERO-Z:

- а) зовнішній вигляд;
- б) поперечний переріз

Таблиця 2.4 – Зміни характеристик проводів типів АС і АЕРО-Z за 18-ть років експлуатації [19]

| 1                               | Зміна ваги мастила | Зміна міцності зовнішніх шарів на розтягування | Зміна середнього подовження при обриві |               |
|---------------------------------|--------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------|
|                                 |                    |                                                | внутрішні шари                         | зовнішні шари |
| Звичайний                       | -28%               | -5%                                            | -19%                                   | -26%          |
| Компактний з 1-м шаром Z-дротин | без змін           | -5%                                            | -9%                                    | -2,2;         |

Більша поверхня контакту між дротинами також покращує демпфірування проводу. Експериментальні дослідження показали, що в проводі звитому із Z-подібних дротин згинаючі та крутильні коливання затухають у 2-3 рази швидше, ніж у проводах марки АС.

Покращене вертикальне та крутильне самогасіння проводу АЕРО-Z значно зменшує галопування. Ймовірність появи галопування набагато нижча, а якщо воно і виникає, то його амплітуда буде суттєво меншою. Спостереження за характером низькочастотних коливань проводів АЕРО-Z у реальних умовах підтвердило результати випробувань у аеродинамічній трубі.

Проводи марки АС мають недостатню крутильну жорсткість, тому ожеледодонесучий потік з навітряної сторони створює одностороннє гребеневидне нашарування ожеледі (рис. 2.7, 1). Яке зі зростанням маси створює крутий момент, що причиняє поворот проводу на певний кут  $\omega$  (рис. 2.7, 2). Це спричинить наростання ожеледі на чистій ділянці проводу та подальше збільшення крутного моменту і, як результат, сильніше закручування проводу (рис. 2.7, 3). У підсумку, при тривалому процесі утворення ожеледі, на проводі утвориться дуже міцна ожеледна муфта (рис. 2.7, 4).

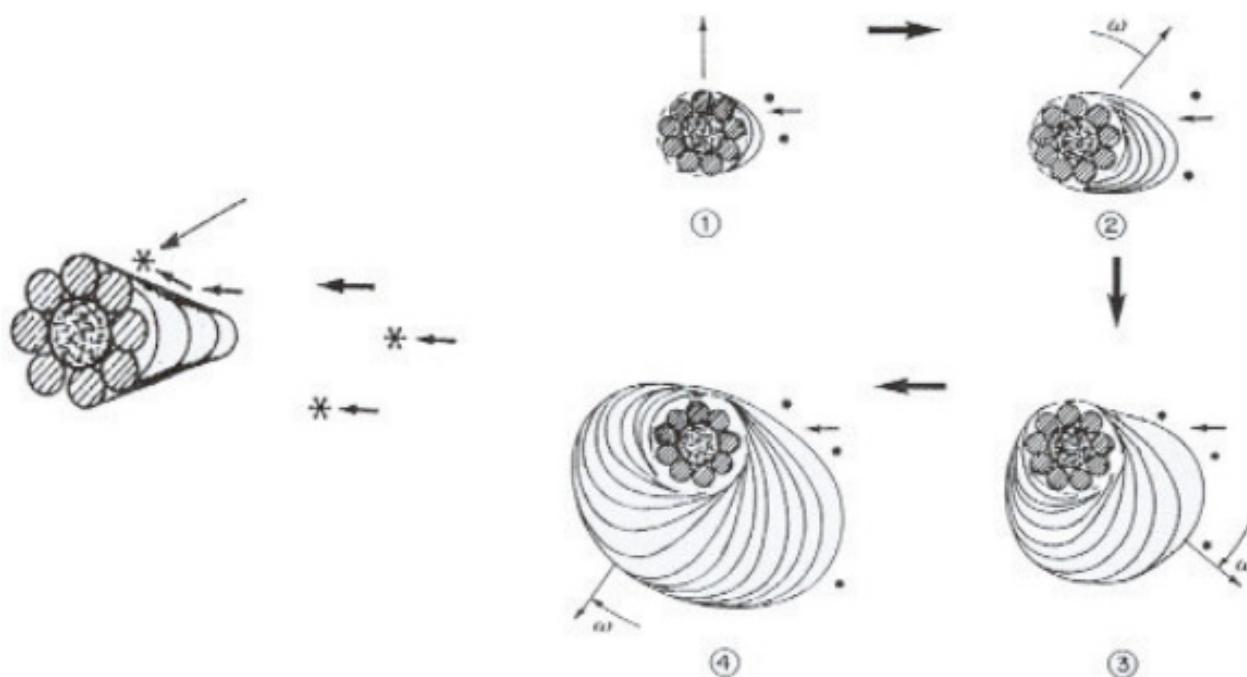


Рисунок 2.7 – Утворення ожеледної муфти на проводах марки АС

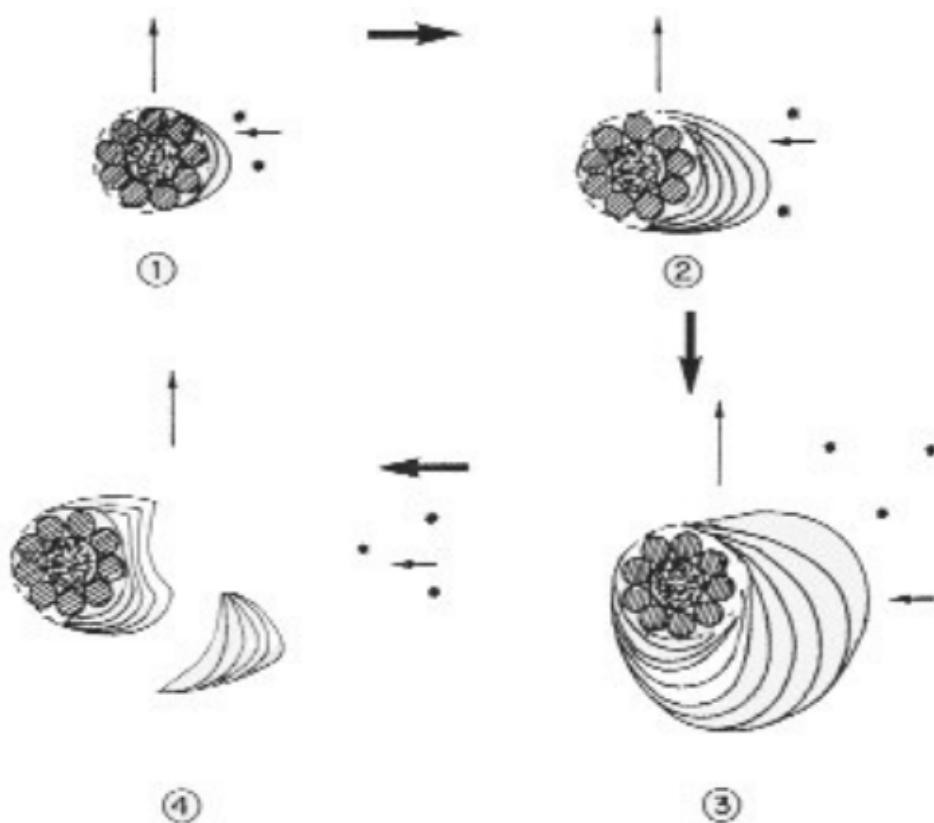


Рисунок 2.8 – Механізм самоочищення проводу АЕРО-Z від ОПВ

На відміну від проводів марки АС провід марки AERO-Z має підвищену крутильну жорсткість, а отже краще протидіє снігу та ожеледі. На початковій стадії процесу ожеледоутворення на проводі AERO-Z утворюється аналогічне гребеневидне нашарування ожеледі (рис. 2.8, 1). Однак, внаслідок високої крутильної жорсткості воно не спричинює провертання проводу і продовжує збільшуватися далі (рис. 2.8, 2). Таким чином, наростання ожеледно-паморозевого відкладення відбувається з одного боку, тобто зі сторони ожеледонесучого потоку. У результаті маса відкладення збільшується швидше, ніж з підвітряної сторони, що призводить до самоочищення проводу (рис. 2.8, 4)

Провід марки AERO-Z має такі основні переваги в порівнянні з проводом марки АС:

- підвищену пропускну здатність. Завдяки більш компактній конструкції може пропускати більший струм при тому самому діаметрі;
- меншу вагу. Наслідком є зменшення навантаження на опори ліній електропередавання;
- кращу стійкість до вібрацій і складних коливань, тобто знижену ймовірність виникнення ефекту галопування проводів;
- підвищену опірність до утворення ожеледі завдяки вищій крутильній жорсткості та практично гладкій поверхні;
- ефективніший внутрішній захист від проникнення вологи завдяки більшій контактній поверхні між дротинами.

Головним недоліком проводу марки AERO-Z є його висока вартість, так один його кілометр приблизно в шість разів дорожчий ніж проводу АС [15].

Профільовані дротини за своєю геометричною природою дозволяють створити, так звані, проводи із зазором. У них простір між осердям і першим струмопровідним повивом заповнено термостійким мастилом (рис. 2.9). До таких проводів відносяться проводи компанії J-Power Systems Corporation (Японія) [21-23]. У них застосовуються трапецієподібні дротини, що забезпечують щільне «кільце» із зазором навколо осердя. Для створення зазору працює так званий арочний ефект, коли стискання кільця зі складових його елементів після певного моменту стає неможливим. Така будова забезпечує

ковзання алюмінієвих шарів відносно сталюого осердя, за рахунок чого провід можливо натягнути зафіксувавши лише його осердя. Внаслідок того, що основне механічне навантаження прикладається до сталюого осердя, ці проводи мають малі значення коефіцієнта лінійного термічного розширення (КЛТР) і, як наслідок, малі значення стріл провисання. Також ці проводи відзначаються підвищеною стійкістю до вібраційних навантажень і мають збільшену рухливість алюмінієвих дротин за рахунок зазору між ними та сталюим осердям [21-23]. Проте технології виготовлення, монтажу та ремонту проводів із зазором є вкрай складними. Більше того, відповідно до інструкції з обслуговування, за умови пошкодження понад 10% алюмінієвих повивів або при пошкодженні осердя, необхідна повна заміна проводу всього анкерного прогону ПЛ. Також розривна міцність цього проводу дорівнює міцності лише осердя і потенційно зменшена на величину міцності струмопровідної частини. Тому проводи такої конструкції не отримали широкого розповсюдження.

До недоліків компактних проводів слід віднести: більш складну технологію виробництва і, як наслідок, вищу вартість; більш складний монтаж; меншу механічну міцність на розрив порівняно зі сталюими проводами аналогічного перерізу; більш сильний віброакустичний вплив при дії вітру.

Головні переваги компактних проводів і вигоди від них представлені у вигляді блок-схеми на рис. 2.10.

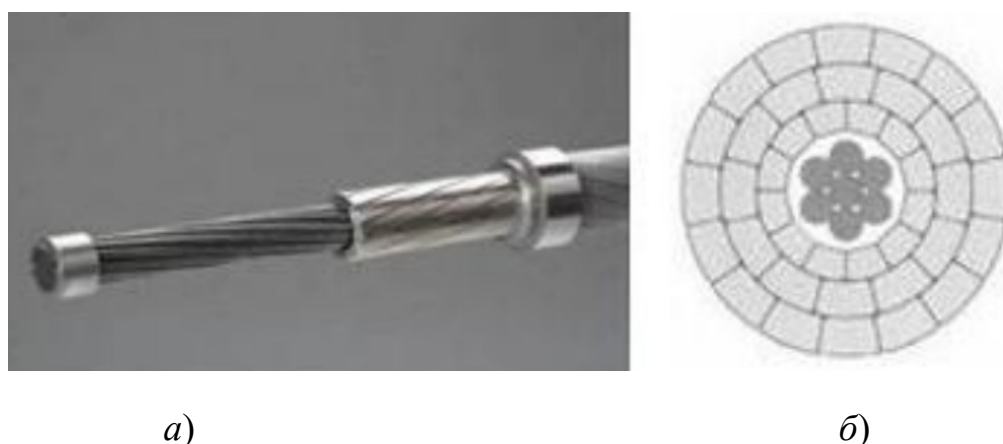


Рисунок 2.9 – Провід із внутрішнім зазором GTACSR (к. J-power, Японія):

а) зовнішній вигляд; б) поперечний переріз

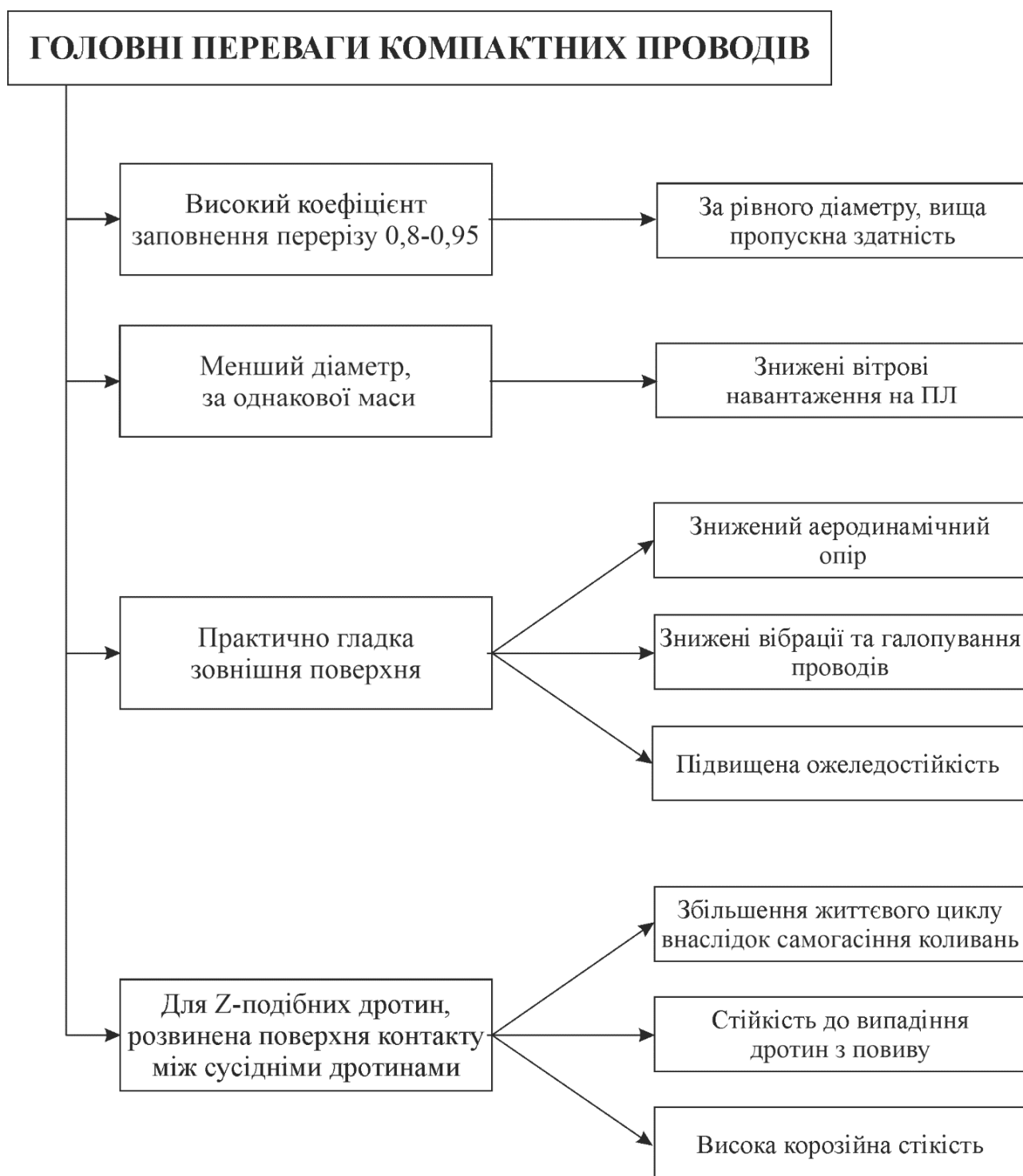


Рисунок 2.10 – Головні переваги компактних проводів

### 2.3 Порівняльний аналіз конструктивних особливостей проводів АС з високотемпературними проводами

Збільшити пропускну здатність розглянутих проводів можливо шляхом підвищення їх робочої температури. З цією метою було розроблено проводи TACSR / ACS і (Z) TACSR / HACIN (комп. Lumpi-Berndorf, Австрія), які є стійкими до високої температури і тому можуть у нормальних умовах тривалий працювати з більш високим електричним навантаженням, ніж проводи марки АС.

Конструкція цих проводів аналогічна конструкції проводів марки АС: сталевий осердя і навиті навколо нього струмопровідні повиви (рис 2.11).

Підвищення робочої температури цих проводів досягається за рахунок використання для струмопровідної частини проводу алюміній-церконієвих сплавів (Al-Zr) які позначаються як: TAL, ZTAL, XTAL, KTAL. Їх застосування дозволяє підняти робочу температуру проводу до 150-230 °С, що призводить до підвищення пропускну здатності до 2-х раз у порівнянні з проводами із алюмінію (табл. 2.5).

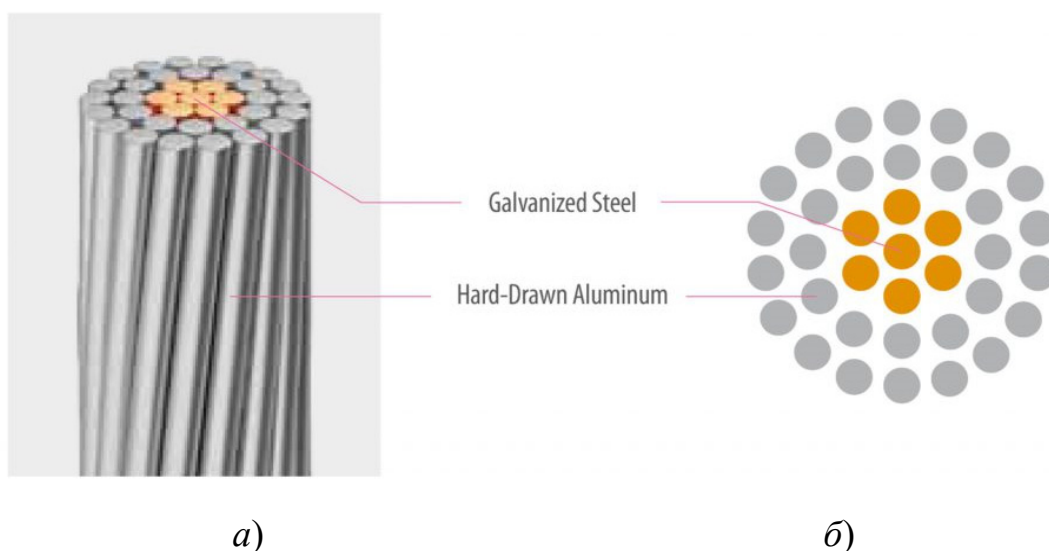


Рисунок 2.11 – Провід TACSR / ACS:

- а) зовнішній вигляд;
- б) поперечний переріз

Лінії, що експлуатуються в штатному режимі за температури проводів 150 °С або 230 °С, не схильні до відкладення ожеледі. Це означає як різке зниження ймовірності виникнення галопування, так і зменшення ожеледно-вітрових навантажень ПЛ у цілому.

Навіть за умови подвоєння пропускної здатності відносно проводу АС, високотемпературний провід має аналогічний діаметр.

За конструкцією проводи TACSR/ACS і TACSR/HACIN не відрізняються від класичних проводів. Це уможливлює використання всіх відомих типів арматури: спіральної, клинових затискачів і пресованих з'єднань. Однак, арматура має бути розрахована на роботу з високотемпературними проводами.

Технології монтажу та експлуатації проводів Lumpi-Berndorf ідентичні до технологій класичного проводу АС, тому їх впровадження не потребує впровадження нових технологій, пристроїв або додаткового навчання персоналу.

Іншою перевагою проводів TACSR/ACS виробництва Lumpi-Berndorf є їх відносно невисока вартість – приблизно 270% від вартості АС. Це значно менше порівняно з усіма сучасними аналогами – проводами підвищеної пропускної здатності.

Таблиця 2.5 – Порівняння характеристик проводів марки АС і високотемпературних

| Марка проводу | Переріз | Тривало допустима температура проводу, °С | Діаметр проводу, мм | Маса кг/км | Тривало допустимий струм, А | Провис, м |
|---------------|---------|-------------------------------------------|---------------------|------------|-----------------------------|-----------|
| АС            | 240/39  | 70                                        | 21,6                | 952        | 610                         | 10,1      |
| TACSR/ACS     | 212/49  | 150                                       | 21,0                | 914        | 870                         | 11,6      |
| GTACSR        | 217/49  | 150                                       | 20,3                | 1015       | 840                         | 9,1       |
| ACCR          | 238/39  | 210                                       | 21,6                | 793        | 1210                        | 9,9       |

Підвищення пропускної спроможності проводів GTACSR забезпечується, як і для проводів виробництва «Lumpi Berndorf», більш високою робочою температурою. Ці проводи стійкі до впливу високих температур, можуть тривалий час витримувати значне електричне навантаження

За умови застосування термостійких алюміній-цирконієвих сплавів, пропускна здатність проводів із повітряним проміжком може бути збільшена до 2-х разів порівняно з проводами типу АС.

Переваги конструкції проводу із зазором полягають в тому, що при монтажі та нагріванні вся вага припадає на сталеве осердя. Відповідно, коефіцієнт розширення і модуль пружності збігаються з характеристиками сталі. Тому провід такої конструкції набагато менше схильний до подовження внаслідок підвищення температури. За робочих температур стріла провисання проводу помітно менша, ніж у проводу АС [12].

При застосуванні термостійких алюміній-цирконієвих сплавів слід враховувати наступне. Вони мають більш високий питомий електричний опір порівняно з алюмінієм призводить до деякого зростання втрат електроенергії. Перевага проводів з алюмінієво-цирконієвими сплавами відносно проводів АС найбільш помітно проявляється за відносно високих температур навколишнього повітря і є менш значущою при зниженні температури довкілля. Крім того, покращення охолодження проводів вітром зменшує переваги термостійких сплавів перед алюмінієм.

До групи високотемпературних проводів також можливо віднести провід ACCR (комп. ЗМ, США) [24].

Провід ACCR має високу робочу температуру, що дозволяє пропускати через нього великі струми, подібно до проводів Lumpi-Berndorf та J-Power Systems. Використання композитного матеріалу з низьким коефіцієнтом теплового розширення та високою міцністю, для виготовлення осердя, забезпечує гарні механічні властивості проводу навіть за високих температур (рис. 2.12). Осердя проводу ACCR виготовляється з композитного матеріалу, що складається з ниток оксиду алюмінію, рівномірно розподілених алюмінії.

Застосування алюмінієво-цирконієвого сплаву для струмопровідної частини дає змогу використовувати провід ACCR за підвищених температур. Сердечник з композитних сплавів має практично аналогічні механічні характеристики, що і сталеві осердя [15].

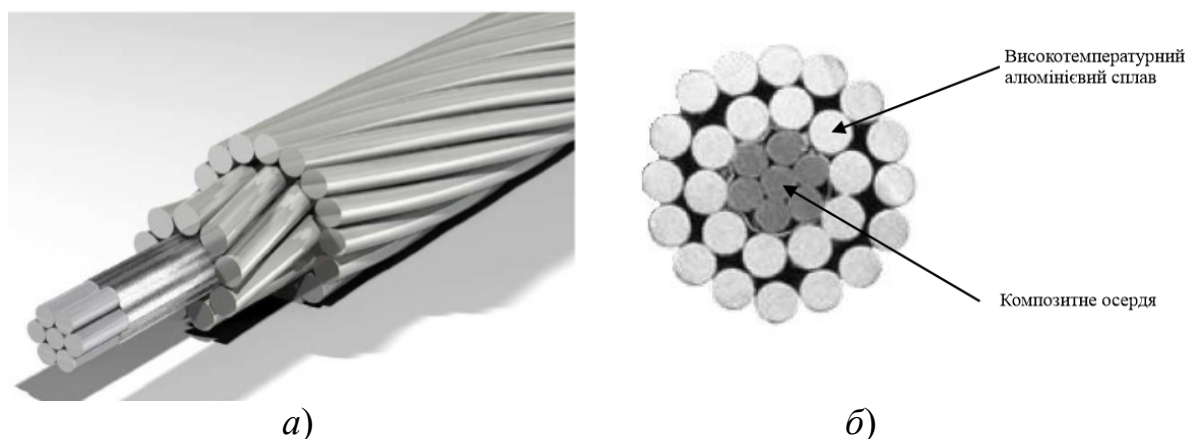


Рисунок 2.12 – Провід ACCR (к. 3М, США) [24]:

а) зовнішній вигляд; б) поперечний переріз

У табл. 2.6 проведено порівняння характеристик проводів ACCR 405-T16 та AC 240/39, які мають однаковий діаметр.

Таблиця 2.6 – Порівняльна характеристика проводів ACCR 405-T16 і AC 240/39

| №<br>п/п | Характеристика                  | Од.<br>вим.     | Марка проводу |              |
|----------|---------------------------------|-----------------|---------------|--------------|
|          |                                 |                 | AC 240/39     | ACCR 270-T16 |
| 1        | Зовнішній діаметр               | мм              | 21,6          | 21,6         |
| 2        | Переріз струмопровідної частини | мм <sup>2</sup> | 236           | 238          |
| 3        | Переріз осердя                  | мм <sup>2</sup> | 38,6          | 39           |
| 4        | Зусилля на розрив               | кН              | 80895         | 87090        |
| 5        | Модуль пружності                | ГПа             |               | 78           |
| 6        | Допустимий струм                | А               | 610           | 1213         |
| 7        | Маса                            | кг              | 952           | 793          |

Порівняння проводу марки АС з удосконаленим проводом марки АССР, що мають однакові перерізи показує, що характеристики останнього значно кращі, зокрема, його пропускна здатність за струмом у двічі вища.

Головним недоліком проводу марки АССР є його висока вартість, яка майже в 10-ть разів перевищує вартість проводів марки АС. Крім того їх композитне осердя досить крихке, тобто не може витримувати перенапружень, що виникають при перегинанні. Тому транспортування та монтаж цього проводу дещо складніші ніж проводу марки АС.

У цілому основні переваги високотемпературних проводів представлені на рис. 2.13.



Рисунок 2.13 – Переваги високотемпературних проводів

Основними недоліками проводів TACSR / ACS і (Z) TACSR / HACIN є значно вища вартість у порівнянні зі звичайними проводами з алюмінієвих сплавів і необхідність використання термостійкої лінійної арматури.

У табл. 2.7 наведено техніко-економічне порівняння різних типів проводів, що можуть бути використані для ПЛ 110 кВ. Порівняння виконане для ПЛ, що має прогін довжиною 360 м і за умови досягнення максимально допустимого натягування проводу 45% від розривного [14], але не більше 42,5 кН.

Таблиця 2.7 – Порівняльна характеристика проводів марки АС і високотемпературних

| Марка проводу      | Виробник        | $d_{\text{пр}}$ ,<br>мм | $m_0$ ,<br>кг/км | $I_{\text{доп}}$ ,<br>А | $C$ ,<br>% | $f$ ,<br>м |
|--------------------|-----------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------|------------|
| GTACSR 217/49      | J-Power Systems | 20,3                    | 1015             | 1015                    | 450%       | 9,1        |
| 366-2Z             | Nexans          | 23,1                    | 1014             | 1014                    | 600%       | 9,9        |
| TACSR/HACIN 212/49 | Lumpi-Berndorf  | 21,0                    | 939              | 939                     | 450%       | 10,5       |
| TACSR/ACS 212/49   |                 | 21                      | 914              | 914                     | 270%       | 11,6       |
| ACCR 470-T16       | 3M              | 21,6                    | 793              | 793                     | 1000%      | 9,9        |
| АС 300/48          | ДКЗ Енерго      | 24,2                    | 1257             | 690                     | 100%       | 11,1       |
| АС 240/32          | ДКЗ Енерго      | 21,6                    | 952              | 605                     | 76%        | 10,1       |

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

$m_0$  – погонна маса проводу, кг/км;

$I_{\text{доп}}$  – допустимий струм, А;

$C$  – вартість проводу, віднесена до вартості проводу АС-300/48, %;

$f$  – стріла провисання проводу при  $T = \text{max}$ , м.

У цілому порівняння проводів є складним завданням, оскільки за одними параметрами вибраний провід має беззаперечну перевагу, а за іншим – навпаки. Тому вибір проводу необхідно провидити для вирішення конкретної задачі, а до

порівняння приймати найбільш його критичні параметри. Наприклад, для групи проводів, що розглядається провід АС 300/48 має найбільшу пропускну здатність і ціну базового рівня, однак його погонна маса теж є найбільшою.

## **2.4 Висновки до 2-ого розділу**

1. Встановлено, що проводи марки СІП-3 класу напруги 35 кВ мають підвищену пропускну здатність за струмом, практично ідентичні до проводу марки АС зусилля на розрив і масу та можуть бути використані для заміни проводів марки АС при реконструкції повітряних ліній, що дозволить збільшити їх пропускну здатність і подовжити їх термін служби.

2. Виявлено, що компактні проводи марки АЕРО-Z у порівнянні з проводом марки АС мають у середньому на 10% більший тривалодопустимий струм, меншу масу на 20-30% при цьому близьке, а починаючи з проводу АЗФ-Z-242 навіть вище зусилля на розрив.

3. Встановлено, що застосування термостійких проводів, що виконані з термостійкого алюміній-цирконієвого сплаву доцільно на відносно коротких ділянках ПЛ з великими потоками потужності та для забезпечення резерву пропускну здатності на випадок аварійного перемикавання. Такі проводи висувають підвищені вимоги до термостійкості арматури.

4. Головним недоліком усіх проводів нової конструкції є вища значно вартість відносно звичайних проводів традиційних, що лежить у межах 270-1000% вартості проводу марки АС.

## **РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ШЛЯХОМ ЗАМІНИ ПРОВОДІВ**

### **3.1 Теоретичне обґрунтування шляхів підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних мереж**

Мережі середньої напруги виконують роль з'єднувальної ланки між високовольтними магістральними лініями електропередачі та низьковольтними розподільчими мережами. Така схема дає змогу постачати електроенергію населенню й промисловим підприємствам. Основне призначення цих мереж – зниження рівня напруги в мережі на шляху до кінцевого споживача.

Перерізи проводів, які використовують в таких мережах, можуть варіюватися залежно від різних чинників: електричних, механічних, географічних тощо. Вони лежать в межах 35-240 мм<sup>2</sup>. Спочатку для ліній середньої напруги застосовували неізолювані проводи, оскільки їх монтаж потребував менших капіталовкладень. Проте, ця технологія має низку істотних недоліків. Тому було розроблено нові типи захищених проводів і ліній середньої напруги, а будівництво нових і реконструкція наявних ліній середньої напруги із захищеними проводами залишається важливим та перспективним напрямком, незважаючи на вищу вартість таких проводів порівняно зі звичайними.

Конструктивні параметри визначають пропускну здатність проводу та повітряної лінії, її механічну міцність, а також стійкість мережі до електромагнітних полів. Провід із захисною оболонкою дає змогу розташовувати фази на меншій відстані одна від одної.

Пропускна здатність повітряної лінії є однією з найважливіших функціональних характеристик електропередачі, яка визначається наступними обмеженнями:

- гранична потужність, що може бути передана;
- допустимий струм за умовою нагріву проводів;
- допустима втрата напруги.

Таким чином, щоб оцінити пропускну здатність ПЛ необхідно розглянути всі ці технічні обмеження.

I. Процес передавання електричної потужності по ПЛ, що немає втрат можливо охарактеризувати рівнянням:

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{\text{л}}} \sin \delta, \quad (3.1)$$

де  $U_1$  і  $U_2$  – напруги, відповідно, на початку та в кінці лінії;

$X_{\text{л}}$  – індуктивний опір лінії.

$\delta$  – кут зсуву між напругами на початку та в кінці лінії.

Із аналізу (3.1) випливає, що за умови незмінних рівнів напруги по кінцях ПЛ максимальна потужність може бути передана при  $\delta = 90^\circ$  [25]:

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{\text{л}}} \sin \delta \approx \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_c \sin(k_{3.\phi} \cdot l)} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{\sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \sin(k_{3.\phi} \cdot l)}, \quad (3.2)$$

де  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга повітряної лінії;

$x_0$  – погонний індуктивний опір повітряної лінії, Ом/км:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \left( \frac{D_{\text{с.г}}}{r_{\text{пр}}} \right) + 0,0157, \quad (3.3)$$

де  $D_{\text{с.г}}$  – середньгеометрична відстань між фазами, якщо проводи розміщуються у вершинах трикутника (рис. 3.1, а), см:

$$D_{\text{с.г}} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}, \quad (3.4)$$

де  $D_{ab}$ ,  $D_{bc}$ ,  $D_{ca}$  – відстань між проводами відповідно фаз А, В, С.

$r_{\text{пр}}$  – радіус проводу, см.

$b_0$  – погонна ємність повітряної лінії, См/км

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg\left(\frac{D_{\text{с.г}}}{r_{\text{пр}}}\right)} 10^{-6}, \quad (3.5)$$

$l$  – довжина повітряної лінії.

$k_{\text{з.ф}}$  – коефіцієнт зміни фази лінії.

Для компактних ліній з фазами, що знаходяться в одній площині

$$x_0 = \frac{6,28 U_{\phi} \cdot 10^{-5}}{r_0 \cdot E_{\text{доп}} \cdot k_{\text{вик}}}, \quad (3.6)$$

де  $E_{\text{доп}}$  – допустима напруженість електричного поля на поверхні проводу;

$k_{\text{вик}}$  – коефіцієнт використання поверхні проводу.

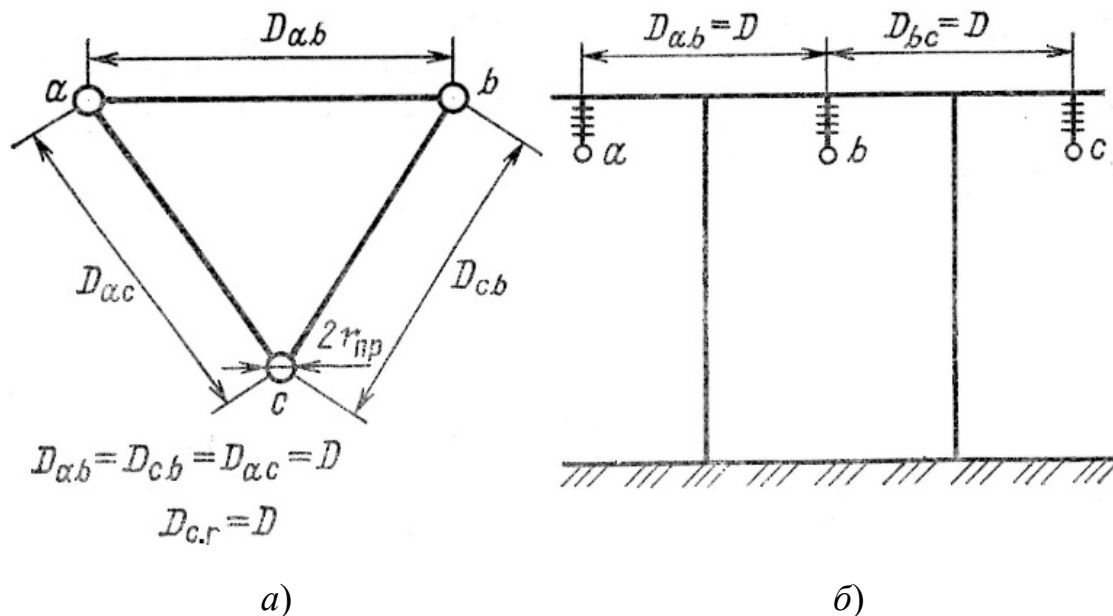


Рисунок 3.1 – Розташування проводів повітряної лінії:

а) по кутах рівностороннього трикутника;

б) за горизонтального розташування фаз

З формули (3.2) слідує, що пропускна здатність пропорційна квадрату номінальної напруги повітряної лінії, тому її збільшити можливо шляхом підвищення класу напруги. Цей шлях прийнятний лише при спорудженні нових розподільних мереж. Для ПЛ на яких проводиться реконструкція збільшення пропускної здатності можливо досягти зменшенням хвильового опору  $Z_c$ . Він залежить від електричних і магнітних властивостей середовища, в якому поширюється електромагнітна хвиля, а також від взаємного розташування проводів у системі «провід – земля». Причому зміни індуктивного опору та ємнісної провідності узгоджені – при зменшенні індуктивного опору ємнісна провідність збільшується та навпаки. Цю властивість можливо використати для підвищення пропускної здатності повітряних ліній, якщо замінити неізольовані проводи на СІП або захищені та зблизити їх на мінімально допустиму відстань згідно [14].

Фактична пропускна здатність, яку можливо реалізувати на практиці, дещо менша за граничну потужність  $P_{пр}$ , що передається:

$$P_{пр.ф} = \frac{P_{пр} - \delta P}{1 + k_3}, \quad (3.7)$$

де  $\delta P$  – нерегулярні коливання потоку потужності;

$k_3$  – коефіцієнт запасу статичної стійкості, приймається рівним 0,2.

Підставивши у (3.7) вираз (3.2) отримаємо

$$P_{пр.ф} = \frac{1}{1 + k_3} \left( \frac{U_{ном}^2 - \delta P}{\sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \sin(k_{3.ф} \cdot l)} \right), \quad (3.8)$$

або

$$P_{\text{пр.ф}} = \frac{1}{1 + 0,2} \left( \frac{U_{\text{ном}}^2 - \delta P}{\sqrt{\frac{x_0}{b_0} \sin(k_{\text{з.ф}} \cdot l)}} \right) = 0,83 \left( \frac{U_{\text{ном}}^2 - \delta P}{\sqrt{\frac{x_0}{b_0} \sin(k_{\text{з.ф}} \cdot l)}} \right), \quad (3.9)$$

Використавши залежності (3.3) і (3.5) отримаємо рівняння хвильового опору повітряної лінії класичної ПЛ (рис. 3.1, а):

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{0,144 \cdot \lg\left(\frac{D_{\text{с.г}}}{r_{\text{пр}}}\right) + 0,157}{b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{\text{с.г}}}{r_{\text{пр}}}} 10^{-6}}} = 100 \sqrt{1,9 \cdot \lg\left(\frac{D_{\text{с.г}}}{r_{\text{пр}}}\right) \left[ \lg\left(\frac{D_{\text{с.г}}}{r_{\text{пр}}}\right) + 0,157 \right]}, \quad (3.10)$$

Аналогічно для компактних ПЛЗ із горизонтальним розташуванням фаз (рис. 3.2, б) [25]:

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = 60 \frac{U_{\text{ф}}}{r_0 \cdot E_{\text{доп}} \cdot k_{\text{вик}}}, \quad (3.11)$$

II. Пропускна здатність ПЛ за умовами нагріву визначається за умовою:

$$I_{\text{р}} \leq k_{\text{т}} I_{\text{доп}}, \quad (3.12)$$

де  $I_{\text{р}}$  – робочий струм лінії, А

$I_{\text{доп}}$  – тривало допустимий струм за умовою нагріву при температурі повітря 25 °С, А;

$k_{\text{т}}$  – поправочний температурний коефіцієнт, що залежить від температури навколишнього середовища.

Тоді пропускна здатність ПЛ за умовою нагріву складе

$$P_{\text{пр.н}} = \sqrt{3} U_{\text{ном}} I_{\text{доп}} \cos \varphi, \quad (3.13)$$

де  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності.

Очевидно, що досягнення  $P_{\text{пр.н}} \rightarrow \max$  можливе при  $\cos \varphi \rightarrow 90^\circ$ , тобто рівень реактивної потужності, що передається через ПЛ повинен бути мінімальним.

Тривало допустимий струм проводу ПЛ визначається гранично допустимою температурою [26]

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{k_2}{k_1} \frac{F(t_{\text{доп}} - t_{\text{н.с}}) F_{\text{охл}}}{\rho_{25} \cdot l}}, \quad (3.14)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт переводу електричної потужності в теплову;

$k_2$  – коефіцієнт теплопровідності;

$F$  – поперечний переріз проводу;

$t_{\text{доп}}$  – допустима температура проводу. Складає для проводів типу АС –  $70^\circ\text{C}$ ,  
а для захищених –  $90^\circ\text{C}$ , за найгірших умов охолодження;

$t_{\text{н.с}}$  – температура навколишнього середовища;

$F_{\text{ох}}$  – площа поверхні охолодження проводу;

$\rho_{25}$  – питомий опір проводу.

Аналіз рівняння (3.12) показує, що підвищити пропускну здатність повітряної лінії за умовами нагріву проводу можливо шляхом збільшення площі поперечного перерізу проводу, а також його площі поверхні. Слід зазначити, що зі збільшенням перерізу проводу площа його поверхні збільшується не пропорційно, а отже зростання допустимого струму теж буде таким значним.

Для повітряних ліній розподільних мереж сумарний переріз електропередачі можливо збільшити лише збільшивши переріз фазних

провідників. Важливою обставиною є те, допустимий струм за умовами нагріву не залежить від конструкції повітряної лінії, і він буде практично однаковим як для ПЛ, так і ПЛЗ.

III. Для повітряних ліній розподільних гранична пропускання здатність також обмежується втратою напруги:

$$\delta U \leq \delta U_{\text{доп}}, \quad (3.15)$$

де  $\delta U_{\text{доп}}$  – допустима втрата напруги в ПЛ, згідно ДСТУ EN 50160:2014 [26] в нормальному режимі роботи складає  $\pm 10\%$ .

У режимі максимальних навантажень підстанції мережі забезпечують зустрічний режим регулювання напруги, якому піднімають на пругу до  $+10\%$ . Таким чином, допустимі втрати напруги лежать в межах  $\Delta U_{\text{доп}} = 20\%$ . Тоді умова, що обмежує пропускання здатність ПЛ матиме вигляд

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{(r_0 + x_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi) P \cdot l}{10 U_{\text{ном}}^2}, \quad \%, \quad (3.16)$$

де  $R$  – активний опір ПЛ довжиною  $l$ ;

$X$  – індуктивний опір ПЛ.

Виразивши з рівняння (3.16) потужність, отримаємо пропускання здатність повітряної лінії з урахуванням обмеження втрат напруги, кВт

$$P_{\text{пр}} = \frac{10 \Delta U_{\text{доп.мак}} U_{\text{ном}}^2}{l (r_0 + x_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi)}, \quad (3.17)$$

де  $\Delta U_{\text{доп.мак}}$  – маскимально допустима втрата напруги в ПЛ, %.

Отримані вирази (3.9), (3.13) і (3.17) дозволяють визначити пропускання здатність ПЛ у нормальному режимі роботи з урахуванням різних обмежуючих умов.



Розрахунок пропускної здатності виконаємо для обмежувальних критеріїв, що були детально розглянуті в пункті 3.1 роботи.

Розрахунок проводиться для діапазону марки АС і марки СПП-3 з перерізами, що лежать в діапазоні від 70 мм<sup>2</sup> до 240 мм<sup>2</sup>. Параметри проводів, вихідні дані до розрахунку були взяті з табл. 2.1 і табл. 2.2 і зведені в табл. 3.1.

Для опори ПБ 35-1.1 на основі рис. 3.1 та за виразом (3.4) була визначена середньгеометрична відстань між фазами, яка склала 3,5 м. За допомогою виразів (3.4) були розраховані індуктивні опори лінії, результати занесені до табл. 3.1. Потім визначався хвильовий опір лінії за (3.10) і на основі нього натуральна потужність. Фактична пропускна здатність визначалася, шляхом урахування коефіцієнта 0,83 (3.9). Аналогічні розрахунки із використанням відповідних формул були виконані для повітряної лінії виконаної проводом СПП-3. Результати розрахунків, для обох марок проводів представлені на рис. 3.3.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані до розрахунку

| Марка проводу | $F$ , мм <sup>2</sup> | $I_{\text{доп}}$ , А | $r_0$ , Ом/км | $x_0$ , Ом/км | $r_{\text{пр}}$ , мм | $d_{\text{пр}}$ , мм |
|---------------|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|----------------------|----------------------|
| СПП-3 1×70    | 70                    | 340                  | 0,493         | 0,307         | 4,72                 | 16,8                 |
| СПП-3 1×95    | 95                    | 400                  | 0,363         | 0,298         | 5,55                 | 18,7                 |
| СПП-3 1×120   | 120                   | 460                  | 0,288         | 0,294         | 6,18                 | 20,1                 |
| СПП-3 1×150   | 150                   | 520                  | 0,236         | 0,287         | 6,91                 | 21,4                 |
| СПП-3 1×185   | 185                   | 600                  | 0,188         | 0,281         | 7,67                 | 23,3                 |
| СПП-3 1×240   | 240                   | 670                  | 0,145         | 0,275         | 8,74                 | 25,3                 |
| АС-70/11      | 68                    | 265                  | 0,429         | 0,417         | 5,70                 | 11,4                 |
| АС-95/16      | 95,4                  | 330                  | 0,306         | 0,407         | 6,75                 | 13,5                 |
| АС-120/19     | 118                   | 375                  | 0,249         | 0,399         | 7,60                 | 15,2                 |
| АС-150/24     | 149                   | 450                  | 0,199         | 0,392         | 8,55                 | 17,1                 |
| АС-185/29     | 181                   | 510                  | 0,162         | 0,386         | 9,40                 | 18,8                 |
| АС-240/32     | 236                   | 605                  | 0,121         | 0,377         | 10,80                | 21,6                 |

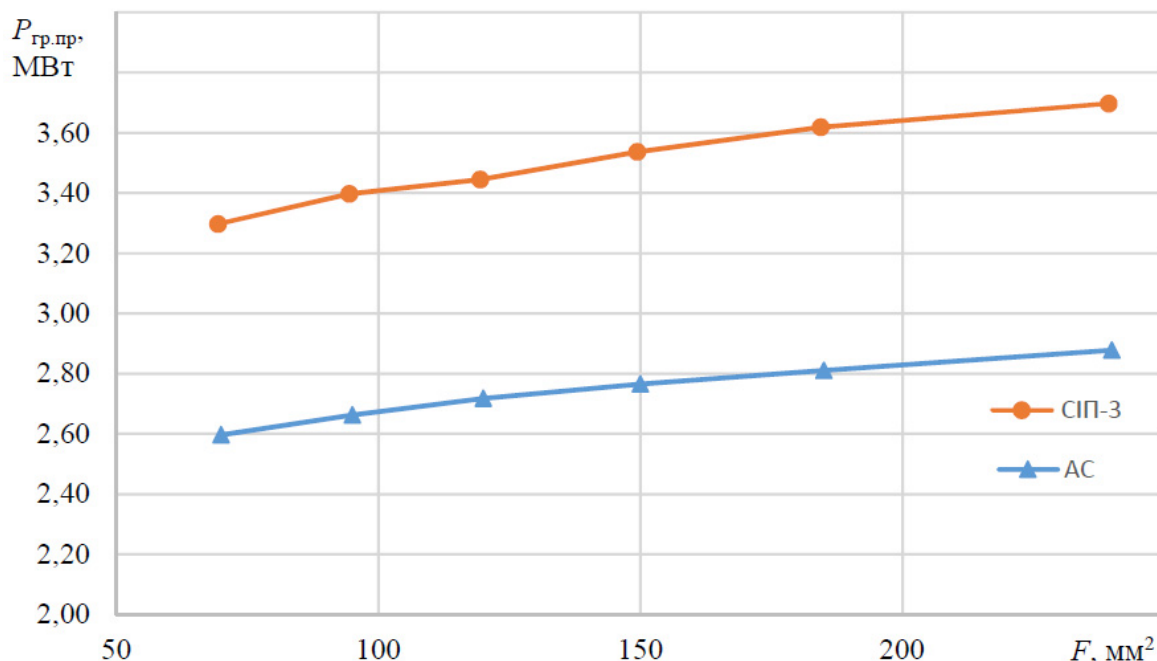


Рисунок 3.3 – Пропускна здатність ПЛ і ПЛЗ за критерієм граничної потужності, що може бути передана

Отримані чисельні значення фактичної пропускну здатності повітряної лінії з проводами марки АС, яку можливо реалізувати на практиці, близькі до тих, що приводяться в літературних джерелах: 2,3 – 3,2 МВт [16, 25]. Пропускна здатність ПЛЗ виявилася в середньому на 20% вища ніж для ПЛ, це пов'язано з нижчим її індуктивним опором. Слід відмітити, що пропускна здатність ПЛ за критерієм граничної потужності, що може бути передана, має близьку до лінійної залежність від перерізу проводу. Причому зростання для всього розглядуваного діапазону проводів складає близько 9%.

На основі рівняння (3.13) були побудовані залежності пропускну здатності ПЛ за нагрівом у відносних одиницях від перерізу проводів (рис. 3.4). Завдяки більшому допустимому струму [14] проводів марки СІП-3 пропускна здатність ПЛЗ виявляється приблизно на 10% вищою ніж ПЛ для всього діапазону перерізів проводів, що розглядається.

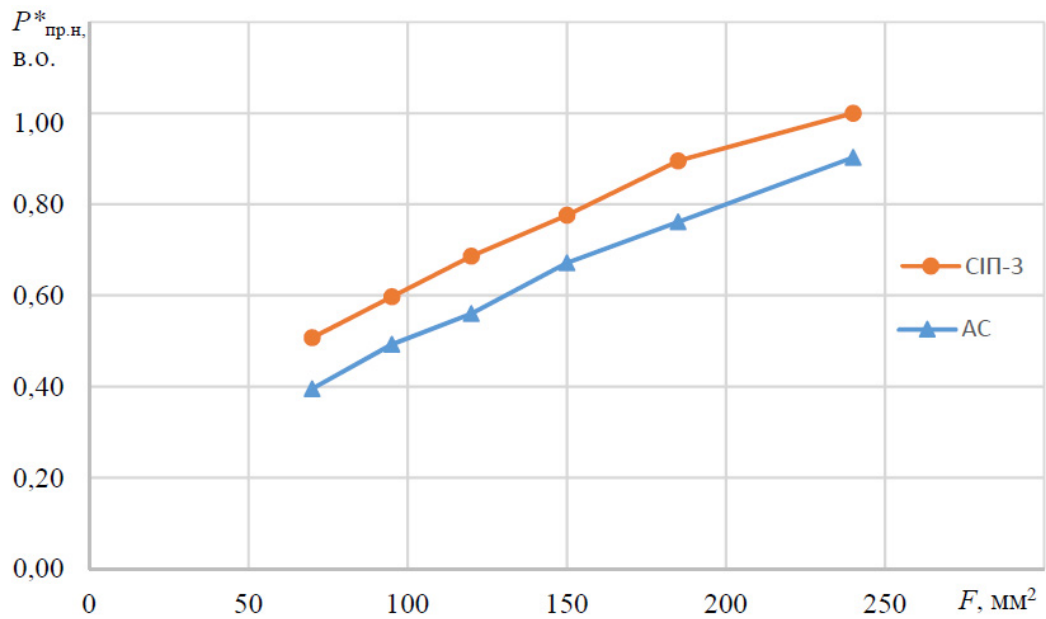


Рисунок 3.4 – Пропускна здатності ПЛ і ПЛЗ за критерієм допустимого струму нагріву проводів

За допомогою рівняння (3.17) були побудовані залежності пропускної здатності ПЛ за критерієм втрати напруги у відносних одиницях від перерізу проводів (рис. 3.5). При розрахунку довжина повітряних ліній була прийнята рівною 25 км, гранично допустимі втрати напруги в ній  $\Delta U_{\text{пл}} = 20\%$ , а коефіцієнт

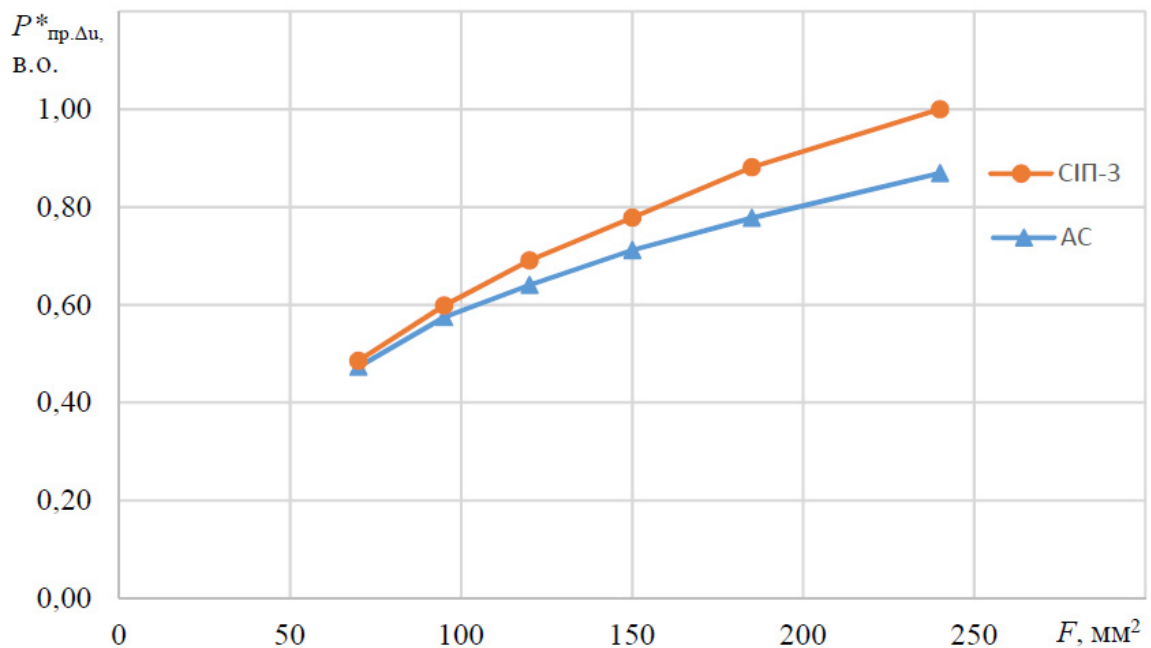


Рисунок 3.5 – Пропускна здатності ПЛ і ПЛЗ за критерієм втрати напруги

потужності  $\cos\varphi = 0,8$ . Аналіз отриманих залежностей показує, що пропускна здатність ПЛ і ПЛЗ на початку діапазону перерізів, що розглядається практично ідентичні, а в кінці різниця складає близько 12%. Це пов'язано з тим, що індуктивний опір ПЛЗ менший за індуктивний опір ПЛ, внаслідок меншої в 2,5 рази відстані між проводами.

Отже, проведені розрахунки показали, що після реконструкції повітряної лінії, що полягає в заміні проводів марки АС на проводи марки СІП-3, пропускна здатність лінії за критерієм граничної потужності, що може бути передана збільшується в середньому на 20%.

### **3.3 Оцінка підвищення пропускної здатності ПЛ 110 кВ після реконструкції**

Розглянемо реконструкцію одноланкової ПЛ 110 кВ довжиною 55 км, що виконана на проміжних залізобетонних опорах марки ПБ 110-1 (рис. 3.6). Сердньогометрична відстань між її фазами складає 4,5 м. Заміна проводів на сучасні вискоєфективні марки з кращими характеристиками дозволить істотно наростити пропускну здатність без посилення конструкції опор чи збільшення ізоляційних відстаней. Для оцінки зміни пропускної здатності ПЛ після заміни проводів до порівняння прийняті наступні варіанти:

- встановлюються звичайні сталевалюмінієві проводи марки АС;
- встановлюються компактні проводи марки АЕРО-Z;
- встановлюються високотемпературні проводи марки АССР.

Розрахунок проводиться для трьох обмежувальних критеріїв:

- граничної потужності, що може бути передана по ПЛ;
- допустимого струму проводу за умовою нагріву;
- допустима втрата напруги в ПЛ.

Методика розрахунку детально розглянута в п. 3.2 роботи.

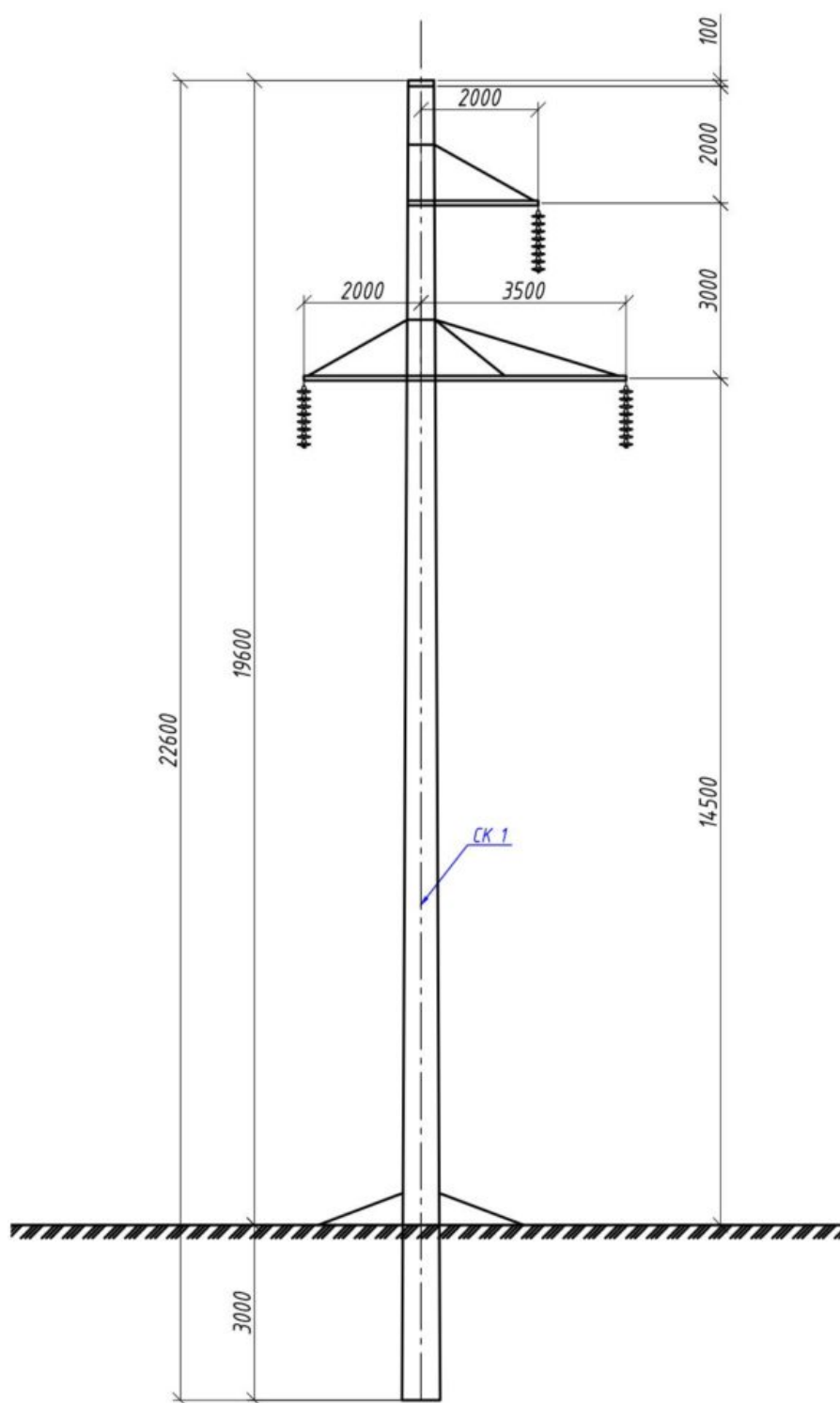


Рисунок 3.6 – Габаритні розміри проміжної залізобетонної опори ПБ 110-1

Вихідні дані до розрахунку представлені в табл. 3.2. Індуктивний опір для всіх проводів був розрахований за виразом (3.3). Результати розрахунків представлені у вигляді графічних залежностей активної потужності від марки та перерізу проводу на рис. 3.7-3.9.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до розрахунку

| Марка проводу  | $F$ ,<br>мм <sup>2</sup> | $I_{\text{доп}}$ ,<br>А | $r_0$ ,<br>Ом/км | $x_0$ ,<br>Ом/км | $r_{\text{пр}}$ ,<br>мм | $d_{\text{пр}}$ ,<br>мм |
|----------------|--------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>АС</b>      |                          |                         |                  |                  |                         |                         |
| АС-150/24      | 149                      | 450                     | 0,199            | 0,408            | 8,55                    | 17,1                    |
| АС-185/29      | 181                      | 510                     | 0,162            | 0,402            | 9,40                    | 18,8                    |
| АС-240/32      | 236                      | 605                     | 0,121            | 0,393            | 10,80                   | 21,6                    |
| АС-300/39      | 301                      | 710                     | 0,098            | 0,386            | 12,00                   | 24,0                    |
| АС-330/30      | 335                      | 730                     | 0,088            | 0,384            | 12,4                    | 28,4                    |
| АС-450/56      | 434                      | 890                     | 0,068            | 0,375            | 14,40                   | 28,8                    |
| <b>AERO-Z</b>  |                          |                         |                  |                  |                         |                         |
| A3F-Z-148-14,7 | 149,1                    | 504                     | 0,2259           | 0,417            | 7,35                    | 14,7                    |
| A3F-Z-177-16,5 | 179,3                    | 572                     | 0,1851           | 0,41             | 8,25                    | 16,5                    |
| A3F-Z-242-18,9 | 246,0                    | 692                     | 0,1352           | 0,401            | 9,45                    | 18,9                    |
| A3F-Z-301-21,0 | 306,3                    | 792                     | 0,1086           | 0,395            | 10,5                    | 21,0                    |
| A3F-Z-346-22,0 | 351,4                    | 864                     | 0,0953           | 0,391            | 11,4                    | 22,4                    |
| A3F-Z-455-26,1 | 455,0                    | 1022                    | 0,0722           | 0,381            | 13,05                   | 26,1                    |
| <b>ACCR</b>    |                          |                         |                  |                  |                         |                         |
| Ostrich 300    | 150                      | 896                     | 0,1826           | 0,42             | 6,97                    | 13,94                   |
| Linnet 336     | 172                      | 979                     | 0,1596           | 0,416            | 7,46                    | 14,92                   |
| Ibis 397       | 238                      | 1100                    | 0,1338           | 0,411            | 8,15                    | 16,3                    |
| Hawk 477       | 291                      | 1213                    | 0,1153           | 0,406            | 8,78                    | 17,56                   |
| Dove 557       | 332                      | 1382                    | 0,0945           | 0,4              | 9,69                    | 19,38                   |
| Grosbeak 636   | 418                      | 1509                    | 0,0828           | 0,401            | 9,42                    | 18,84                   |

Результати розрахунку фактичної пропускної здатності ПЛ 110 кВ за критерієм граничної потужності, що може бути передана для трьох марок проводів представлені на рис. 3.7. Отримані чисельні значення активної потужності у лежать у загальновизнаних межах натуральної потужності для ПЛ 110 кВ – 25-32 МВт. Згідно даного критерію найбільшу пропускну здатність має

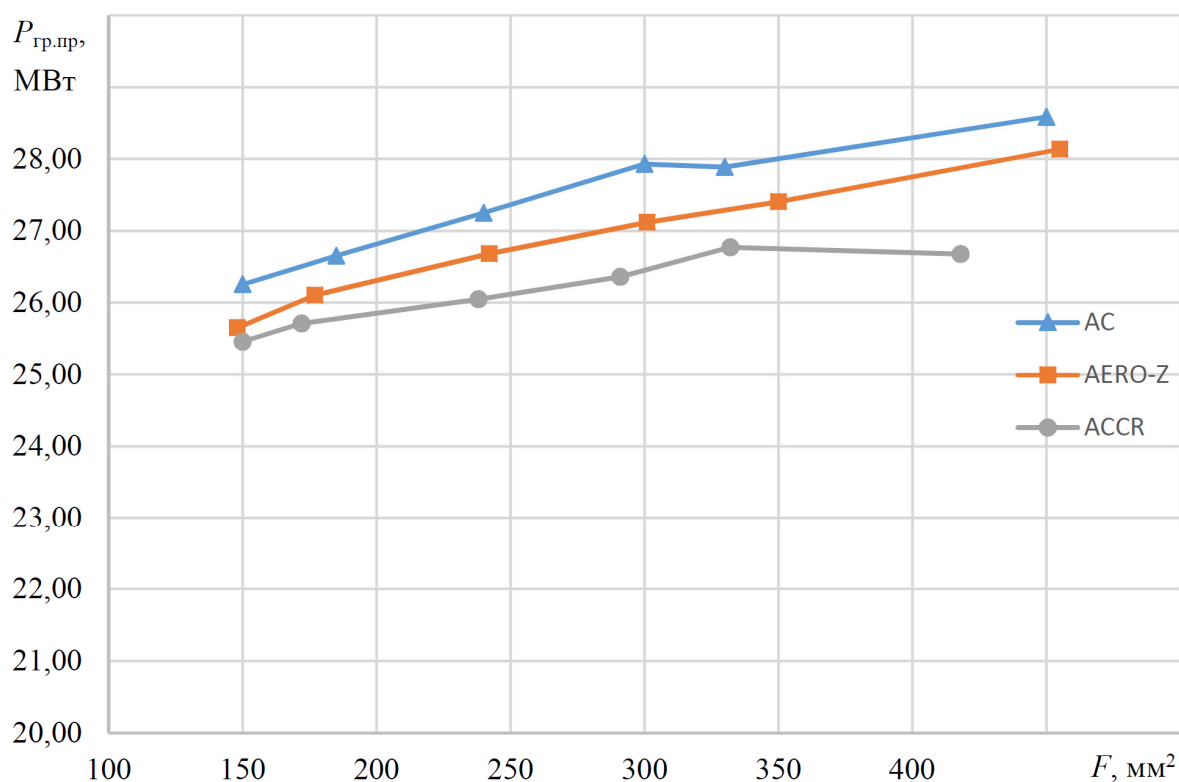


Рисунок 3.7 – Пропускна здатність ПЛ за критерієм граничної потужності, що може бути передана

ПЛ, при використанні проводів марки АС. Це пов'язано з тим, що її індуктивний опір виявляється дещо меншим ніж у варіантів ПЛ з іншими марками проводів. Різниця між значенням потужності, що може бути передана для ПЛ з проводами марки АС і ПЛ з проводами марки АЕРО-Z лежить у межах 1,6-2,9%, для ПЛ з проводами марки АССР вона дещо більша і складає від 3% до 6,7%. Таким чином, отримані значення пропускну здатності для різних типів проводів практично однакові. Тому при виборі проводів марок АЕРО-Z і АССР необхідно брати до уваги їх інші переваги. Наприклад, провід АЕРО-Z має менший діаметр, а отже і аеродинамічний опір. У підсумку це зменшує вітрове навантаження на всі конструктивні елементи повітряної лінії в т.д.

Результати розрахунку пропускну здатності ПЛ 110 кВ за критерієм допустимого струму проводу за нагрівом представлені на рис. 3.7. Тут істотну перевагу має ПЛ, що виконана високотемпературними проводами марки АССР.

Її пропускна здатність на 69-100% від вища від ПЛ з проводами марки АС і на 48-78% вища від пропускної здатності ПЛ з проводами марки АЕРО-Z.

Слід зазначити, що ПЛ з проводом АЕРО-Z також має дещо вищу пропускну здатність (на 12-15%) відносно ПЛ з проводом АС. Це пов'язано з тим, що проводи АЕРО-Z виконуються з алюмінієвого сплаву, який допускає тривалу роботу цього проводу при температурі 90 °С, у той час як максимальна температура проводів марки АС становить лише 70 °С. Пропускна здатність ПЛ за критерієм допустимого струму проводу за нагрівом практично не залежить від її конструктивного виконання і визначається лише конструкцією проводу.

Отримані результати свідчать, що застосування сучасних високотемпературних проводів дозволяє істотно збільшити пропускну здатність повітряних ліній без заміни опор або посилення конструкції. Це особливо актуально при реконструкції застарілих ліній, адже дає змогу уникнути дорогих будівельних робіт.

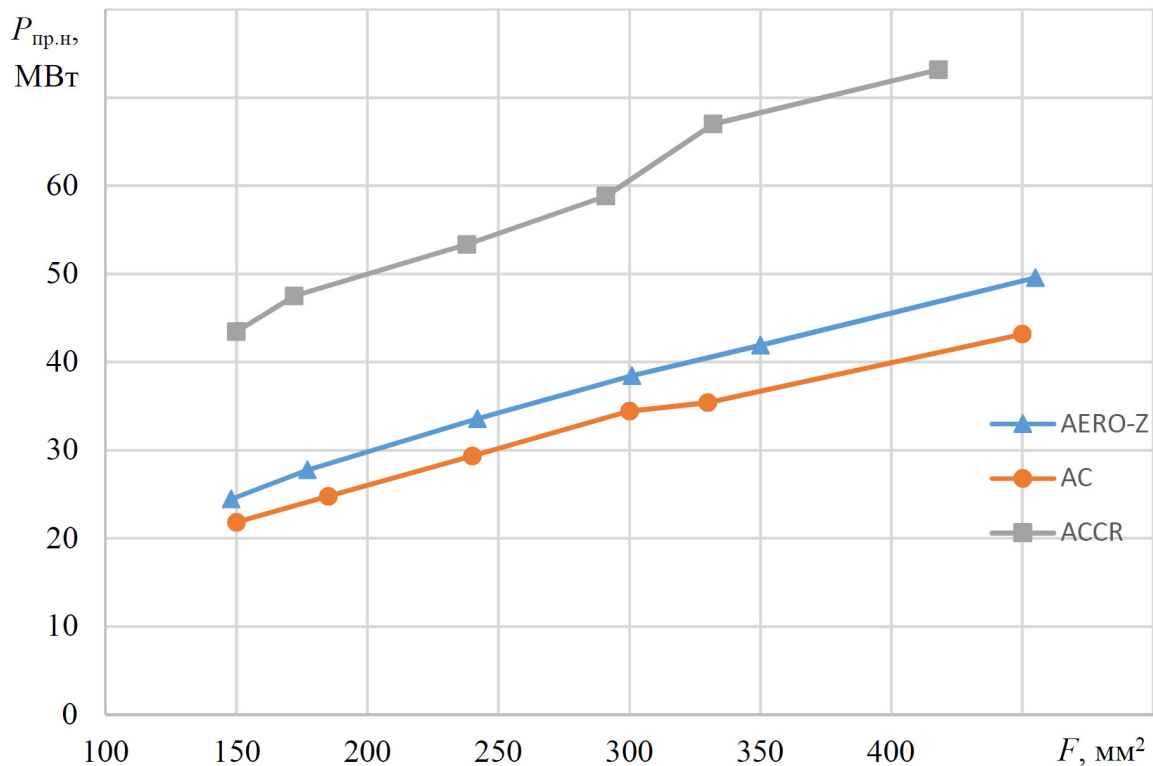


Рисунок 3.8 – Пропускна здатність ПЛ за критерієм допустимого струму нагріву проводів

За допомогою рівняння (3.17) були побудовані залежності пропускної здатності ПЛ за критерієм втрати напруги від перерізу проводів (рис. 3.9). При розрахунку гранично допустимі втрати напруги к лінії прийняти  $\Delta U_{\text{пл}} = 20\%$ , а коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 0,8$ .

Аналіз отриманих залежностей показує, що пропускна здатність повітряних ліній з різними марками проводів практично однакові, максимальна різниця складає не більше 6,5%. Це пов'язано з тим, що компактні (AERO-Z) та високотемпературні (ACCR) проводи виготовляються зі спеціальних сплавів на основі алюмінію, які дозволяють працювати їм при підвищених температурах. Однак, вони мають вищий активний погонний опір ніж проводи еквівалентного перерізу марки АС.

Отже, проведені розрахунки показали, що внаслідок заміни на ПЛ 110 кВ стандартних проводів марки АС на компактні марки AERO-Z істотного підвищення пропускної здатності не відбувається. За критерієм допустимого струму за умовою нагріву проводів пропускна здатність лінії може бути підвищена практично в два рази відносно ПЛ, що виконана проводом марки АС.

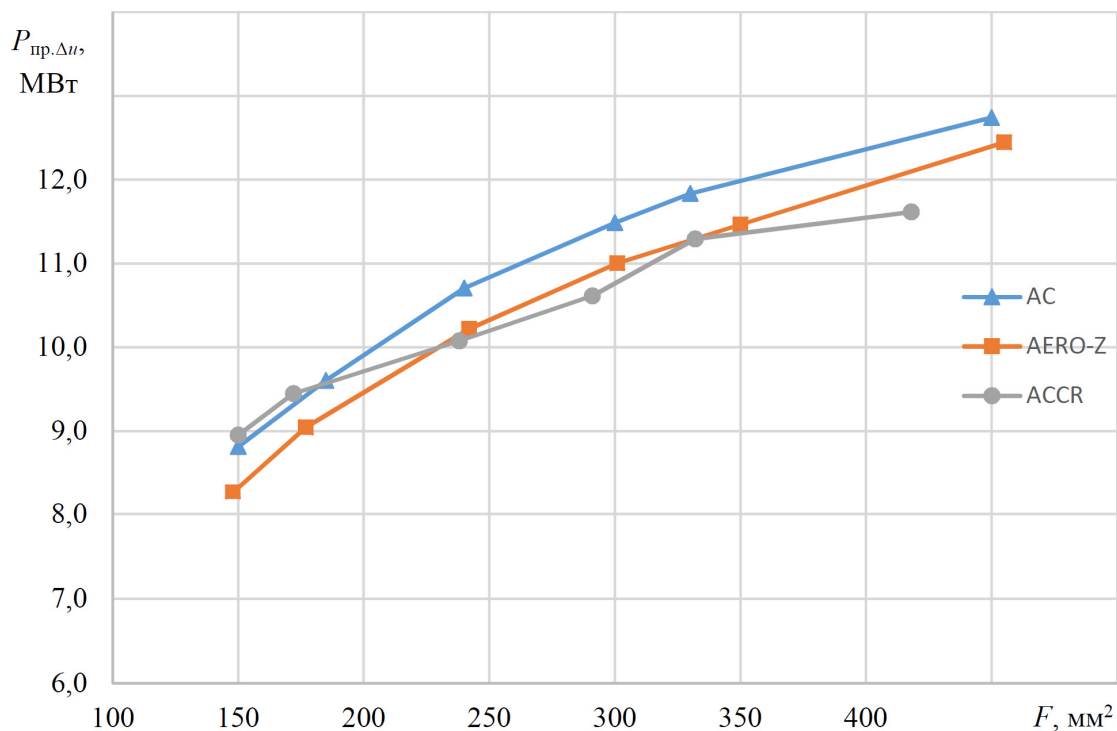


Рисунок 3.9 – Пропускна здатності ПЛ за критерієм втрати напруги

### **3.4 Технічні рекомендації, щодо підвищення пропускної здатності повітряних ліній**

На базі виконаних досліджень розроблено технічні рекомендації, щодо підвищення пропускної здатності повітряних ліній 35 кВ при заміні проводів марки АС на проводи марки СІП-3:

1. Оцінити рівень споживання реактивної потужності та передбачити засоби її компенсації.
2. Підібрати переріз проводу СІП-3 з урахуванням допустимих струмових навантажень і втрати напруги, а також перспективи росту навантажень ПЛЗ.
3. Перевірити стан траси лінії за необхідності виконати роботи з її розчищення від порослі, кущів.
4. Перевірити стан опор, за необхідності посилити або замінити для можливості подальшої експлуатації.
5. Виконати розрахунок стріл провисання майбутньої лінії з урахуванням ваги та діаметра нових проводів, а також кліматичних навантажень на них згідно чинних нормативних документів.
6. Скорегувати висоту підвішування проводів та стріли провисання для забезпечення необхідних габаритів.
7. Провести заходи щодо посилення ізоляції та захисту від дії перенапруг, якщо це необхідно за розрахунками.
8. Виконати вибір нових траверс і лінійної арматури відповідно до вибраних проводів марки СІП-3 з метою зменшення відстані між фазами ПЛЗ.
9. Провести тепловізійне обстеження лінії через 2-3 місяці після реконструкції, щоб виключити дефекти монтажу контактних з'єднань.

Дотримання цих рекомендацій дозволить повною мірою реалізувати потенціал проводів СІП-3 з точки зору підвищення пропускної здатності ПЛЗ 35 кВ.

Рекомендації щодо підвищення пропускної здатності повітряної лінії 110 кВ при заміні проводів марки АС на високотемпературні проводи марки ACCR:

1. Підібрати оптимальний переріз проводу марки ACCR з урахуванням допустимих струмових навантажень, втрати напруги, а також перспективи росту навантажень повітряної лінії.

2. Перевірити стан траси ПЛ за необхідності виконати роботи з її розчищення від кущів і дерев, несанкціонованих будівель і т.п.

3. Перевірити стан опор і їх фундаментів, за необхідності посилити чи замінити з метою подальшої експлуатації.

4. Перевірити придатність існуючої лінійної арматури, опор та ізоляторів до роботи з проводами марки ACCR при нагріві їх до 180-210 °С. За потреби замінити або посилити захист від можливого перегріву.

5. Виконати перевірочний розрахунок стріл провисання з урахуванням коефіцієнта лінійного розширення матеріалу проводу ACCR.

6. За результатами розрахунків скоригувати висоту підвішування проводу та стріли провисання для дотримання необхідних габаритів згідно чинних нормативних документів.

7. Розглянути питання про заміну ізоляторів на більш високовольтні, що дозволить зменшити ізоляційні відстані між фазами та підвищити грозозахисні властивості лінії.

7. Виконати термоциклічні випробування повітряної лінії після заміни проводів перед введенням в експлуатацію.

8. Підібрати розрядники з урахуванням нового значення струму короткого замикання після заміни проводів.

Виконання наведених рекомендацій надасть можливість повноцінно використати потенціал високотемпературних проводів марки ACCR для підвищення пропускної здатності лінії 110 кВ.

### 3.5 Висновки до 3-ого розділу

1. Теоретично обґрунтовано вирази, що дозволяють визначити пропускну здатність ПЛ розподільних мереж у нормальному режимі роботи на основі трьох видів обмежень – граничної потужності, допустимого струму проводу за умовами нагріву та допустимої втрати напруги.

2. Розраховано, що після заміни на ПЛ 35 кВ проводів марки АС на проводи марки СІП-3 разом із арматурою її пропускна здатність за критерієм граничної потужності, що може бути передана збільшується на 20%.

3. Встановлено, що пропускна здатність ПЛ 110 кВ за критерієм допустимого струму нагріву найбільше підвищується після заміни проводів марки АС на високотемпературні проводи марки АССР.

4. Розроблені технічні рекомендації щодо підвищення пропускної здатності ПЛ 35-110 кВ, які дають комплексне уявлення про заходи, необхідні для модернізації існуючих ПЛ шляхом заміни застарілих проводів марки АС на сучасні аналоги при реконструкції.

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз факторів, що впливають на ураження електрострумом

Тяжкість наслідків впливу електричного струму на організм людини визначається значенням сили струму, його родом та частотою, електроопором тіла, тривалістю дії, напрямом проходження крізь тіло, індивідуальними особливостями людини, схемою контакту з ланцюгом живлення, а також умовами навколишнього середовища [27, 28].

Сила струму, що проходить через організм людини, є вирішальним чинником, котрий визначає ступінь ураження: чим більший струм, тим небезпечніша його дія. Людина починає відчувати проходження змінного струму частотою 50 Гц при значеннях 0,5-1,5 мА, а постійного струму – при 5-7 мА [27].

Цей струм називається відчутним. Його мінімальне значення, за якого людина починає відчувати його дію, називається порогом відчутності. Сам по собі він не становить небезпеки, проте може стати опосередкованою причиною нещасного випадку. Раптово відчувши дію струму, людина може мимоволі зробити неправильні дії, що призведуть до травмування.

Тип і частота струму визначають рівень небезпеки ураження. Найнебезпечнішим є змінний струм частотою від 20 Гц до 200 Гц. Підвищення частоти вище 1000 Гц значно знижує ризик ураження, але за частоти 100 кГц і вище існує небезпека опіків. Змінний струм силою 50 мА (при 50 Гц) безпосередньо впливає на серцевий м'яз і вважається смертельно небезпечним.

Постійний струм напругою до 0,5 кВ у 4-5 разів безпечніший за змінний з частотою 50 Гц тієї ж напруги. При напрузі понад 500 В постійний струм стає небезпечнішим за змінний, що має частоту 50 Гц.

Електроопір тіла людини визначається опором рогового шару шкіри. За умови сухої чистої шкіри без пошкоджень опір становить 500-500 000 Ом. Опір вологої брудної шкіри різко зменшується, що збільшує небезпеку ураження. При

розрахунках захисних пристроїв опір тіла людини до змінного струму промислової частоти вважається рівним 1000 Ом [28].

Тривалість дії струму на організм людини впливає на наслідки ураження. З часом опір шкіри знижується через її руйнування в місці контакту та підвищення температури. Це призводить до різкого зростання сили струму. Вже через 30 секунд опір тіла зменшується на 25%, а через 90 секунд – на 70% порівняно з початковим. Тому при наданні допомоги потерпілому необхідно якнайшвидше припинити дію струму. Напрямок проходження струму через організм також впливає на наслідки. Найнебезпечнішим є його проходження через серце, легені та голову.

Індивідуальні особливості людини, а також її фізичний та психофізіологічний стан істотно впливають на наслідки ураження електрострумом. Наприклад, струм певної сили може бути пороговим відпускаючим для одних людей та невідпускаючим для інших. Характер дії однакового за силою струму залежить від маси тіла людини та її фізичного розвитку. Встановлено, що у жінок порогові значення струму приблизно на 1,5 рази нижчі, ніж у чоловіків.

Провідність тканин тіла людини зумовлена складними фізико-хімічними та біологічними процесами. Через це опір тіла людини електроструму є нелінійною та нестабільною величиною. Тіло людини – це добрий провідник електричного струму. Він завжди проходить по ньому шляхом найменшого опору, який не завжди збігається з найкоротшою геометричною відстанню. Це пояснюється значною різницею питомих опорів різних тканин. Сила струму, що протікає через тіло людини залежить від напруги та його опору тіла, який приблизно вважається активним. Вважається, що опір тіла складається з опору шкіри в місцях контакту та опору внутрішніх тканин. Це пояснюється значною різницею між питомими опорами різних тканин тіла людини.

Опір тіла людини до електричного струму визначається опором шкіри, яка має великий питомий опір завдяки верхньому роговому шару. Електроопір тіла – це опір струму між двома електродами, прикладеними до поверхні тіла.

## 4.2 Огляд засобів електробезпеки

Електробезпека – це комплекс організаційних і технічних заходів і засобів, що гарантують захист людини від шкідливої та небезпечної дії електроструму, електродуги, електромагнітних полів і статичної електрики [27, 28].

Засоби захисту від ураження електрострумом передбачають дотримання безпеки як за нормального режиму роботи електроустаткування, так і в аварійних ситуаціях. Вони поділяються на колективні та індивідуальні. Захист має забезпечуватися: конструкцією електроустаткування та технічними засобами захисту. Будова електроустаткування повинна відповідати вимогам стандартів. Залежно від засобів електробезпеки, існують 5 класів електротехнічних виробів: 0, 0I, I, II та III.

За конструктивним виконанням, способом встановлення та якістю ізоляції електроустаткування має відповідати умовам експлуатації згідно з нормативними документами: ПУЕ, ПТЕЕС, ПБЕЕС. Залежно від цього розрізняють наступні класи електроустаткування: загального призначення, спеціальне, відкрите, захищене, герметичне, вибухозахищене тощо.

До технічних засобів та заходів захисту від ураження електрострумом належать:

- низька напруга;
- ізоляція струмоведучих частин;
- недосяжність неізованих частин;
- захисне заземлення та занулення;
- захисне вимикання;
- вирівнювання потенціалів,
- електричне розділення мереж,
- компенсація струмів замикання на землю.

Також широко застосовуються огороження, сигналізація, блокування, знаки безпеки, засоби індивідуального захисту тощо.

Низькою вважається напруга, що не перевищує 42 В. Вона застосовується для зниження небезпеки ураження електрострумом.

У виробничих умовах застосовують два рівні малої напруги – 12 В і 42 В. У приміщеннях підвищеної небезпеки для місцевого освітлення та ручного інструменту напруга не повинна бути більшою 42 В.

Для ізоляції струмоведучі частини покривають або відділяють одну від одної (якщо мають різний потенціал) і від інших частин шаром діелектрика. Опір ізоляції знижується з підвищенням температури та напруги, а також при її старінні. Опір основної ізоляції в холодному стані між ланцюгами та заземленими корпусами устаткування повинен бути не менше 2 МОм.

Недоступність неізованих струмоведучих частин досягається застосуванням стаціонарних огорож та розміщенням їх на значній висоті чи в недоступних місцях. Для захисту від дотику до струмопровідних елементів використовують апарати закритої конструкції: пакетні вимикачі, рубильники з важільним приводом, комплектні пускачі тощо.

Орієнтування в електроустановках забезпечується спеціальним маркуванням, сигналізацією небезпеки, написами, табличками, розташуванням та фарбуванням неізованих та ізованих частин, що дозволяє уникати помилкових дій персоналу під час виконання робіт.

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання із землею металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитися випадково чи в процесі роботи під напругою (рис. 4.1). Застосовується при напрузі змінного струму понад 380 В, а постійного – понад 440 В.

Суть його дії полягає в зниженні напруги дотику. З'єднання корпусу устаткування, що опинилось під напругою, і землею повинно мати значно менший опір, ніж опір тіла людини. Це дозволяє зменшити силу струму, що проходить через тіло людини при дотику, до безпечного рівня. Згідно ПУЕ найбільший допустимий опір розтіканню струму заземлення для електроустановок напругою до 1000 В з ізованою нейтраллю становить 10 Ом (потужність джерела живлення до 100 кВА) і 4 Ом (потужність джерела понад 100 кВА).

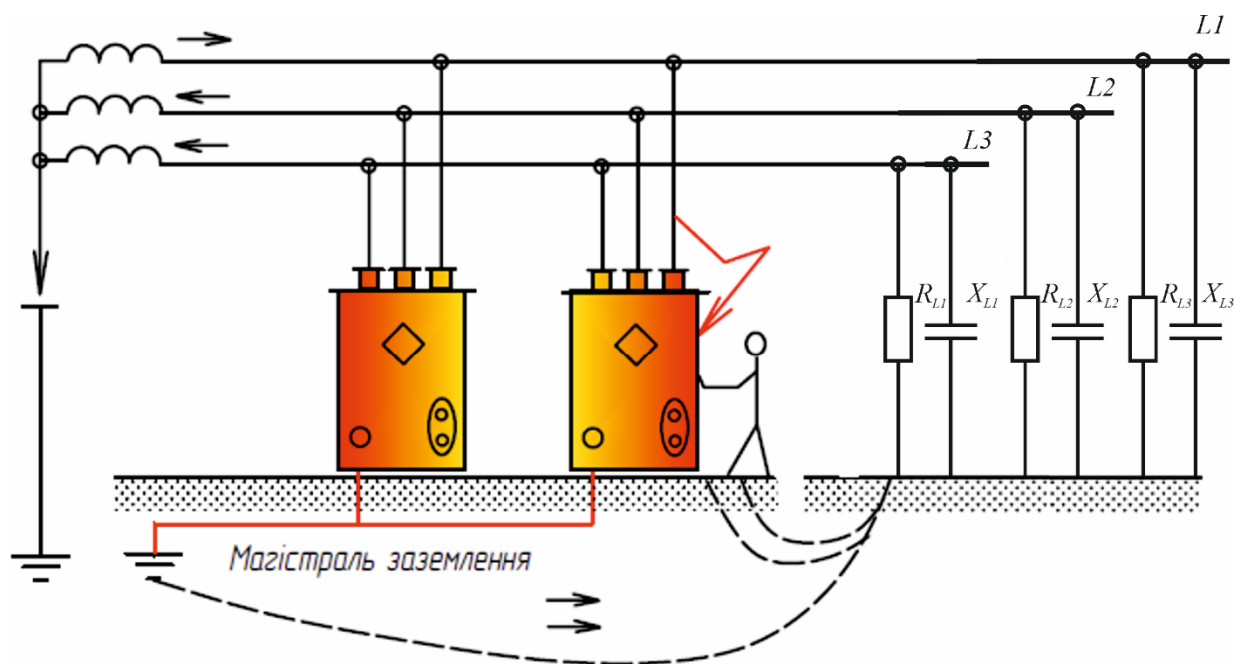


Рисунок 4.1 – Схема захисного заземлення

Занулення – це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним проводом металевих неструмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою (рис. 4.2). З'єднання металевого корпусу устаткування з нульовим проводом мережі живлення перетворює замикання фази на корпус на однофазне коротке замикання.

Струм короткого замикання, що при цьому виникає, має забезпечити спрацювання автоматичного вимикача, який відімкне пошкоджене устаткування від мережі живлення. Таким чином, занулення дозволяє швидко знеструмити пошкоджене устаткування при замиканні на корпус.

Занулення застосовується в тих самих випадках, що і захисне заземлення. Це ефективний метод захисту при живленні електроустаткування від чотирипровідних мереж з глухозаземленою нейтраллю напругою до 1000 В. Нульовий провід використовується для створення контуру з малим опором при замиканні фази на корпус, перетворюючи його на однофазне коротке замикання.

Заземлення нейтралі джерела живлення потрібне для зниження напруги відносно землі на нульовому проводі та з'єднаних з ним корпусах електрообладнання в разі замикання фази на землю.

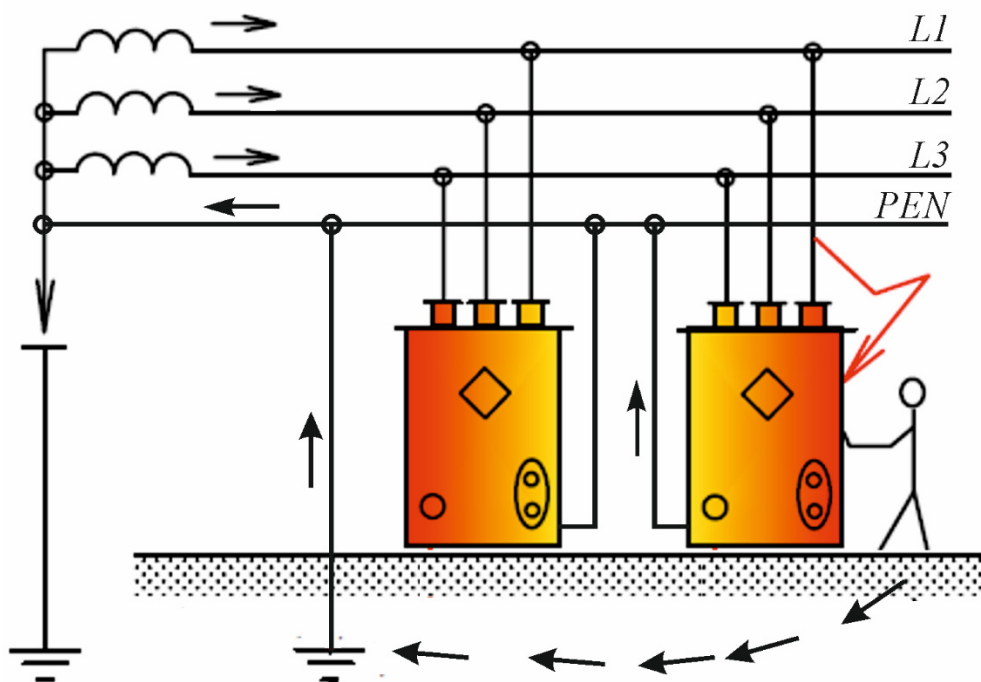


Рисунок 4.2 – Схема занулення

Улаштування та контроль занулення мають відповідати вимогам нормативних документів.

Захисне відключення – це швидкодіючий захист, що забезпечує автоматичне вимкнення електроустаткування у разі виникнення в ньому небезпеки ураження струмом. Він виконує наступні функції:

- контроль ізоляції перед увімкненням;
- захист при замиканнях на землю чи коротких замиканнях корпус;
- захист при появі небезпечних струмів витоку;
- автоматичний контроль ланцюга захисного заземлення чи занулення;
- контроль справності пристрою захисного відключення.

Пристрої захисного відключення мають відповідати вимогам нормативних документів: бути високочутливими та швидкодіючими (час спрацювання не більше 0,2 с), забезпечувати селективність, надійність і самоконтроль.

Захисне відключення застосовується як основний засіб захисту разом із захисним заземленням чи зануленням. При цьому воно повинно забезпечувати безпеку в разі дотику до корпусу устаткування, контролювати безперервність контурів захисного заземлення та занулення, а також здійснювати самоконтроль.

Захисне відключення також може бути додатковим заходом до інших засобів захисту. У цьому випадку воно повинне забезпечувати безпеку при дотику до заземлених або занулених частин устаткування. Однак, при цьому основні заходи захисту повинні гарантувати безпеку навіть без захисного відключення.

### **4.3 Розробка організаційних заходів з електробезпеки**

За організацією, роботи в електроустановках вони поділяються на [27, 28]:

- роботи за нарядом-допуском;
- роботи за розпорядженням;
- роботи в порядку поточної експлуатації.

Організаційні заходи безпеки поділяються на довготривалі, що складаються на рік і тимчасові, що діють під час виконання певних робіт.

До довготривалих належать:

- затвердження переліків робіт за видами організації;
- призначення відповідальних осіб за безпечне виконання робіт.

Ці заходи підлягають щорічному перегляду.

До організаційних заходів, що діють під час виконання робіт за нарядом чи розпорядженням, відносяться (у порядку проведення):

- оформлення робіт нарядом або розпорядженням;
- підготовка робочих місць;
- допуск до виконання роботи;
- нагляд під час виконання робіт;
- переведення працівників на інше робоче місце;
- оформлення перерв та закінчення робіт.

Ці заходи спрямовані на забезпечення безпечних умов праці безпосередньо під час виконання робіт в електроустановках.

Організаційними заходами безпеки робіт у порядку поточної експлуатації є: визначення можливості безпечного виконання робіт; складання та

затвердження переліку таких робіт залежно від місцевих умов; призначення виконавців робіт певної групи з електробезпеки.

Переліки усіх видів робіт складає відповідальний за електрогосподарство та затверджує керівник підприємства. Це можуть бути або три окремі переліки, або один перелік з трьома розділами залежно від складності електроустановок.

Віднесення робіт до певного переліку залежить від місцевих умов експлуатації конкретних електроустановок та вимог ПБЕЕС.

Призначення осіб, що відповідають за безпечне виконання робіт, оформлює відповідальний за електрогосподарство у вигляді списку та подає на затвердження керівникові.

Працівник, який видає наряд чи розпорядження, визначає можливість безпечного виконання робіт та відповідає за достатність і правильність зазначених у наряді заходів безпеки.

Працівник, який дає дозвіл на підготовку робочих місць та допуск до робіт, відповідає за достатність і можливість реалізації передбачених для виконання робіт заходів безпеки: відключення та заземлення обладнання, а також узгодження часу та місця роботи бригад.

Працівник, що готує робоче місце, відповідальний за правильне виконання вказаних у наряді та необхідних заходів з підготовки робочих місць: встановлення замків, плакатів, огорож тощо.

Допускач несе відповідальність за достатність і правильність заходів безпеки відповідно до характеру та місця робіт, що вказані у наряді, правильність допуску до виконання робіт і проведеного ним інструктажу.

Керівник робіт здійснює постійний нагляд за членами бригади, відсторонює тих, хто порушує ПБЕЕС, не допускає до роботи осіб у стані алкогольного сп'яніння та хворих.

Наглядач за електротехнічним персоналом, включно з відрядженими, призначається при виконанні робіт в особливо небезпечних умовах.

Наглядач контролює наявність на робочому місці дотримання наступних заходів безпеки: використання заземлень, огорож, плакатів тощо. Він також відповідає за безпеку членів бригади щодо ураження електричним струмом.

#### 4.4 Висновки

1. Встановлено, що основними факторами, що впливають на ураження людини електричним струмом є: тип і частота струму, сила та тривалість дії струму, електроопір тіла людини, а також її індивідуальні особливості.

2. Встановлено, що технічні засоби електробезпеки діляться на дві групи колективні та індивідуальні. До колективних відносяться наступні: низька напруга, ізоляція струмоведучих частин, недоступність неізольованих струмопровідних частин, захисне заземлення та занулення, захисне вимикання, зрівнювання потенціалів, електричне розділення мереж. До індивідуальних відносяться такі: покажчики напруги, ізолювальні штанги та кліщі, діелектричні рукавички, взуття, інструмент, що має електроізоляційне покриття.

3. Розроблено, організаційні заходи безпеки під час роботи в електроустановках, які полягають у оформленні робіт за нарядом або розпорядженням, підготовці робочих місць, допуском до виконання роботи, нагляду під час виконання робіт, переведення робітників на інше робоче місце, оформлення перерв та закінчення робіт.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі було вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення пропускної здатності повітряних ліній розподільних електромереж. Завдяки проведеному дослідженню чого отримано такі ключові результати:

1. Встановлено, що повітряні лінії розподільних електромереж 6-150 кВ мають істотний знос, внаслідок чого їх параметр потоку відмов перевищує проектні значення в 1,5-3 рази, а електричне навантаження споживачів при цьому зростає. Для підвищення їх пропускної здатності, у першу чергу, найбільш доцільне застосування режимних методів, зокрема – підвищення коефіцієнта потужності мережі, а потім – реконструкція ПЛ шляхом заміни їх проводів на проводи сучасних конструкцій.

2. Встановлено, що сучасні інноваційні марки проводів, такі як СП-3, AERO-Z, ACCR мають ряд переваг порівняно з традиційними проводами марки АС – підвищену пропускну здатність за струмом, ідентичні або покращені механічні характеристики, меншу масу, підвищені робочі температури, кращу стійкість до впливів навколишнього середовища, а головним їх недоліком є значно вища вартість, що лежить у межах 270-1000% вартості проводу марки АС.

3. Теоретично обґрунтовано вирази, що дозволяють визначити пропускну здатність ПЛ розподільних мереж у нормальному режимі роботи на основі трьох видів обмежень – граничної потужності, допустимого струму проводу за умовами нагріву та допустимої втрати напруги.

4. Розраховано, що пропускну здатність ПЛ 35 кВ після заміни проводів марки АС на проводи марки СП-3 разом із арматурою збільшується на 20% за критерієм граничної потужності, що може бути передана, а пропускну здатність ПЛ 110 кВ після заміни проводів марки АС на високотемпературні проводи марки ACCR – на 100% за критерієм допустимого струму нагріву.

5. Розроблені технічні рекомендації щодо підвищення пропускної здатності ПЛ 35-110 кВ, що дають комплексне уявлення про заходи, необхідні для модернізації існуючих ПЛ шляхом заміни застарілих проводів марки АС на сучасні аналоги при реконструкції.

6. Встановлено, що основними факторами, що впливають на ураження людини електричним струмом є: тип і частота струму, сила та тривалість дії струму, електроопір тіла людини, а також її індивідуальні особливості. Для запобігання ураженню електрострумом необхідно використовувати організаційні та технічні засоби електробезпеки, останні діляться на дві групи колективні та індивідуальні.

7. Розроблено, організаційні заходи безпеки під час роботи в електроустановках, які полягають у оформленні робіт за нарядом або розпорядженням, підготовці робочих місць, допуску персоналу до виконання робіт, нагляду під час виконання робіт, переведення робітників на інші робочі ділянки, оформлення перерв та закінчення робіт.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іськова М.С., Буряк А.Р., Кирик В.В. впровадження в Україні мереж напругою 20 кВ. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 4. С. 87-92.
2. Підвищення надійності функціонування розподільних електричних мереж / Р. В. Бондаренко, О. М. Довгалюк, Г. В. Омеляненко, О. Є. Піротті, Т. В. Сиромятнікова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2018. Вип. 195. С. 69-71.
3. Рубаненко О. О., Явдик В. В. Проблема ожеледі в розподільчих електричних мережах. Сучасні моделі розвитку агропромислового виробництва: Виклики та перспективи: Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції, 27 вересня 2018 року, м. Глухів. Збірник статей і тез. Вип. 1. С. 255-257.
4. Заїка О. В. Фактори, що впливають на виникнення пошкоджень ліній електропередач, та методи їх виявлення. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах» 5-6 листопада 2020 р. м. Харків, Україна. С. 135-139.
5. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2020 році. Затверджено: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг 26 травня 2021 року №893.
6. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. Київ : Вид-во «Політехніка», 2017. 456 с.

7. Наказ Міністерство палива та енергетики України від 09.06.2005 «Про затвердження Інструкції про розслідування і облік технологічних порушень на об'єктах електроенергетики і в об'єднаній енергетичній системі України» №255. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 7 жовтня 2005 р. за №1165/11445.

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

9. Стрелкова Г. Г. Технічний стан та перспективи розвитку розподільних електричних мереж України / Г. Г. Стрелкова, А. М. Пустовойтов // Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку: зб. наук. пр., Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2018. С. 50-51.

10. Електричні системи та мережі

11. 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.

12. Клименко М. М., Єгорова О. Ю. Аналіз ефективності використання існуючих засобів підвищення Пропускної здатності ліній електропередач. Системи озброєння і військова техніка, 2011, № 1(25). С. 96-100.

13. Держстандарт України «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT), чинний з 1.10.2014. Київ, Україна: Держстандарт України, 2014. 27 с.

14. Правила улаштування електроустановок. Х.: Вид-во «Форт», 2017. 760

15. Бондаренко В.О., Черкашина В.В. Конструкції ліній електропередачі: Харків: «Факт», 2020. 174 с.

16. Електричні системи і мережі. Частина 1 / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ; за ред. П. Д. Лежнюка. Вінниця : ВНТУ, 2020. 200 с.

17. Барбашов И.В. Общая характеристика современных электрических систем и сетей. Харьков: НТУ “ХП”, 2003. 124 с.

18. Черкашина В. В. Інноваційні напрямки технічних рішень передачі електроенергії змінним струмом. Енергоефективність та енергетична безпека

електроенергетичних систем (EEES-2020), 10-13 листопада 2020 року. Харків, 2020.

19. Nexans. AERO-Z. The solutions for future-oriented overhead power lines. 41 p.

20. NBN C 34-100 Conducteurs nus pour les lignes aérie. Comité Électrotechnique Belge asbl.

21. J-Power Systems Official Catalogue CAT.NO.TL-101A, 2007.

22. J-Power Systems Technical Data JTD 80-1876A Supply Record of Gap Conductor, 2010.

23. Lumpi-Berndorf Supply Reference List, 2008.

24. 3M ACCR Case Studies, 2013. URL: <https://www.scribd.com/document/156509995/ACCR-Case-Studies-Presentation-1-22-13-1>

25. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В. Т. Федин, Ю. Д. Головач, Г. И. Селиверстов, М. С. Чернецкий. Мн.: Навука і тэхніка, 1993.

26. Держстандарт України, «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT), чинний з 1.10.2014. Київ, Україна: Держстандарт України, 2014. 27 с.

27. Геврик Є. О. Охорона праці. К.: Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.

28. Серіков Я. О. Основи охорони праці: Навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти. Харків.: ХНАМГ, 2007. 227 с.