

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет  
Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

**Пояснювальна записка**

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Підвищення ефективності струмознімання для  
електротранспорту

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1412-1

Барський І.І.

(прізвище та ініціали) (підпис)

спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

Керівник

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя

2023 рік

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем  
(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень  
(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика,  
електротехніка  
(шифр і назва)  
та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.



В.Л. Коваленко

“ 07 ” грудня 2023 року

### **ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу студенту

Барський Іван Іванович

1. Тема роботи: Підвищення ефективності струмознімання для електротранспорту

Керівник роботи: Артемчук В.В.

затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с

2. Строк подання студентом роботи: 01 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: поточний тариф вартості електроенергії; погодні умови; об'єми споживання електричної енергії електрорухомим складом; технічні дані споживачів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано розробити):




вступ; 1) утворення ожеледь-паморозі на лініях електропостачання;

2) способи боротьби з ожеледицею на проводах ліній електропостачання;

3) додаткові пристрої боротьби з ожеледицею; висновки

5. Перелік графічного матеріалу: 1) титульна сторінка; 2) основні причини пошкоджень ліній електропередач; 3) розподіл аварійних випадків за видами; 4) принципова схема обладнання для боротьби з ожеледицею; 5) схеми плавки плавлення ожеледиці

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Нормоконтроль	Бандуренко І.І., асистент		

7. Дата видачі завдання

01.06.2023 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Фактори, що впливають на утворення ожеледі і паморозі	01.10.2023	
2	Електричні методи протидії утворенню ожеледиці на ЛЕП	01.11.2023	
3	Пристрої плавлення льоду додатковими засобами	01.12.2023	

Студент



(підпис)

Барський І.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи



(підпис)

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер



(підпис)

Бандуренко І.І.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

У даній роботі було показано умови утворення ожеледі на дротах різних ліній електропередач. Крім того, було проаналізовано способи боротьби з ожеледицею на високовольтних проводах, ліній електропостачання залізниць та допоміжних систем. Проведено необхідні розрахунки параметрів кіл та наведено схеми плавки ожеледі та джерела живлення. Також у роботі наведено різноманітні схеми пристроїв систем для боротьби з ожеледдю та рекомендації щодо їхнього використання.

Ключові слова: ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, КОНТАКТНИЙ ПРОВІД, ОЖЕЛЕДЬ, ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ, ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ

## ANNOTATION

This work showed the conditions of ice formation on the wires of various power lines. In addition, methods of combating icing on high-voltage wires, railway power supply lines and auxiliary systems were analyzed. Necessary calculations of circuit parameters were carried out, and diagrams of ice melting and power sources were given. The work also provides various schemes of devices for anti-icing systems and recommendations for their use.

Keywords: POWER SUPPLY LINES, CONTACT WIRE, ICE, ELECTRICITY, ELECTRIC CIRCUITS

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА УТВОРЕННЯ ОЖЕЛЕДИ І	
ПАМОРОЗІ .....	8
1.1 Проблема утворення ожеледиці і поморозі на лініях електропередач....	8
1.2 Фізичні явища, які супроводжують утворення ожеледиці .....	12
1.3 Деякі особливості утворення ожеледиці та поморозі на ЛЕП.....	17
1.4 Деякі особливості високовольтних ліній систем електропостачання та автоблокування.....	25
2 ЕЛЕКТРИЧНІ МЕТОДИ ПРОТИДІЇ УТВОРЕННЮ ОЖЕЛЕДИЦІ	
НА ЛЕП .....	36
2.1 Основні аспекти використання технік та запобіжних заходів для боротьби з ожеледицею та профілактичного обігріву проводів .....	36
2.2 Визначення струмів та часу плавлення ожеледі .....	41
2.3 Схеми плавки ожеледиці .....	45
3 ПРИСТРОЇ ПЛАВЛЕННЯ ЛЬОДУ ДОДАТКОВИМИ ЗАСОБАМИ .....	78
ВИСНОВКИ.....	88
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	89
ДОДАТКИ.....	91

## ВСТУП

Електрифіковані ділянки залізниць України є важливою частиною транспортної системи, які забезпечують понад 80 % всіх перевезень залізничним транспортом. Однак, збої в їх роботі можуть призвести до суттєвих матеріальних та моральних втрат.

Основною причиною таких збоїв є інтенсивна ожеледь. Відкладення ожеледі та паморозі на проводах і тросах ліній електропередачі можуть призвести до значного збільшення навантаження на них. У поєднанні з вітром це може призвести до пошкодження ліній та навіть до аварій.

Правильний вибір розрахункових навантажень від ожеледі є одним з найважливіших аспектів проектування ліній електропередачі. Перебільшення цих навантажень може призвести до зайвих витрат на будівництво, а недооцінка – до аварій.

Зі сказаного ясно те велике практичне значення, яке має правильний вибір розрахункових навантажень від ожеледиці, паморозі та супутніх їм метеорологічних явищ при спорудженні ліній електропередачі високої напруги.

Перебільшення ожеледно-морозових навантажень пов'язане з зайвими вкладенням великих коштів і матеріалів. У свою чергу недооцінка дійсних умов ожеледиці траси може призвести до цілої серії важких аварій: розривів проводів, вивертання траверз і навіть повного руйнування опор. В результаті дезорганізується робота транспорту та серйозний народногосподарський збиток неминучий.

Насправді застосовують різні способи боротьби з зледенінням проводів. Найбільш ефективним є електричний – нагрівання проводів від джерела, встановленого на тяговий підстанції. Відомі дві модифікації цього способу: профілактичний підігрів проводів для попередження утворення ожеледиці і плавлення льоду, що вже утворився.

Слід зазначити, що використання струмів, що значно перевищують допустимі, обговорювалося ще у 70-х роках минулого сторіччя, проте відповідне рішення не було прийнято – у зв'язку з відсутністю надійного температурного контролю. Сучасний стан техніки дозволяє вирішити це завдання на необхідному рівні надійності та безпеки.

З вищесказаного очевидно є важливість правильного вибору розрахункових навантажень від ожеледиці, паморозі та пов'язаних метеорологічних явищ при будівництві ліній електропередачі високої напруги. Перебільшення навантажень від ожеледиці може призвести до зайвих витрат на матеріали та ресурси, тоді як недооцінка їхнього впливу може призвести до серії аварій, включаючи пошкодження проводів, деформацію опор і навіть їхнє руйнування. Це може призвести до зупинку транспорту та завдати значної шкоди економіці. Існують різні методи боротьби з ожеледицею на проводах, але найефективнішим є електричний метод – нагрівання проводів з використанням спеціальних джерел енергії, розташованих на тягових підстанціях. Існують два підходи до цього методу: профілактичний підігрів, що запобігає утворенню ожеледиці, і плавлення вже утвореного льоду. Слід зауважити, що ще раніше розглядалися можливості використання струмів значно вищих, ніж зазвичай, але відсутність надійного температурного контролю призвела до відмови від цього підходу. Однак сучасний рівень технологій дозволяє впроваджувати цей метод з необхідною надійністю та безпекою.

## 1 ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА УТВОРЕННЯ ОЖЕЛЕДИ І ПАМОРОЗИ

### 1.1 Проблема утворення ожеледиці і поморозі на лініях електропередач

Для забезпечення надійної та оптимальної конструкції ліній електропередачі у районах з високим ризиком ожеледиці, важливо враховувати реальні умови завантаження та ретельно розробляти комплекс заходів. Ці завдання є серйозними інженерними викликами у сфері передачі електроенергії. Розглянемо рекомендації, які надаються в електротехнічних нормах і правилах різних країн у цьому контексті.

Оцінка навантажень на лінії електропередачі в районах з великою ймовірністю ожеледі є доволі складним завданням. На даний час існують різні підходи до оцінки навантажень, які розробляються електротехнічними правилами і нормами різних країн. В залежності від географічного розташування застосовують норми з чотирма різними районами ожеледиці з питомою вагою осаду 0,9. Згідно цих норм деякі країни не враховують, наприклад, вітер (Німеччина, Швейцарія, Нідерланди), а в США, Україні (навантаження від вітру приймається 13,5 і 24 кг/м<sup>2</sup>), Британії, Франції, Італії та інших завжди враховують. Стосовно температурних режимів, то зрозуміло, що різні країни також приймають різні розрахункові температури: в США, Канаді Японії, Італії та Норвегії розрахункова температура береться навіть на рівні -25 °С, в Німеччині, Україні, Голландії, Польщі приймають розрахункову температуру -5 °С, в Британії -5,5 °С, а в Швейцарії 0 °С. Крім того, деякі країни встановлюють розрахункові вимоги незалежно від конкретних умов, а інші (Італія, Франція) орієнтуються на матеріали спостережень

Цей підхід є розумним, оскільки вітер може значно збільшити навантаження на лінії електропередачі. Однак, при проектуванні ліній електропередачі в районах з великою ймовірністю ожеледі важливо враховувати місцеві умови.



У той же час норми не враховують роботу ліній в районах з сильною ожеледі. Вони також не дають вказівок про можливі навантаження проводів в таких умовах. Крім того, в нормах існують значні розбіжності в оцінці таких важливих розрахункових параметрів, як тиск вітру і температура при ожеледиці, що вказує на недостатню опрацьованість питання ожеледі в даний час.

Сфера теорії ожеледно-морозових явищ відзначається значним відставанням, а також існуванням низки фундаментальних питань, що досі залишаються невирішеними науковою спільнотою. Всупереч існуючим поглядам, часто виникають суперечки та розбіжності в цьому напрямку досліджень. Тому, наряд з ретельним розглядом інженерних методів боротьби з ожеледицею, виникає необхідність в розв'язанні деяких фізичних аспектів цього явища.

Постановка проблеми в контексті фізики ожеледиці є найбільш обґрунтованою та важливою не лише на науковому рівні, але і з практичної точки зору при будівництві та експлуатації ліній в сильно ожеледицьких районах. Без успішного вирішення питань, пов'язаних з теорією ожеледиці, досягти поставлених цілей з мінімальними витратами коштів та матеріалів стає неможливо. Це і є причиною, чому на міжнародних конференціях з питань високовольтних мереж приділяється така велика увага розгляду всіх аспектів ожеледиці.

Ожеледь-вітрові навантаження на лінії електропередачі (ЛЕП) становлять серйозну загрозу та призводять до значних руйнувань ЛЕП. За даними [3...10], ці навантаження відіграють ключову роль у близько 18% всіх випадків ушкоджень ЛЕП, і це місце залишається другим серед усіх причин ушкоджень ЛЕП.

Проведені дослідження показали, що ожеледні аварії часто призводять до серйозних порушень в електропостачанні в цілих регіонах. Ці порушення включають провисання проводів (рис. 1.1); розхитування проводів, їх стикання, що може спричинити опіки проводів, коротке замикання і, як

наслідок, їх обриви (рис. 1.2). У деяких випадках це може також призвести навіть до пошкодження кріплень і опор (рис. 1.3). Також можуть виникати обриви проводів через перевантаження (рис. 1.4).



Рисунок 1.1 – Провисання ЛЕП



Рисунок 1.3 – Руйнування опори ЛЕП



Рисунок 1.4 – Обрив ЛЕП через перевантаження

Додаткові фактори, які спричинюють серйозні проблеми при експлуатації повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) під впливом ожеледиці та сильного вітру, включають: руйнування опор внаслідок спільного впливу ожеледиці та сильного вітру, спрямованого під кутом 6...90 градусів до напрямку ЛЕП. Ця ситуація може призвести до збоїв в структурі опор та підвищеного ризику руйнування опор, особливо там, де ожеледиця може накопичуватися і зростати на опорах.

Перекриття лінійної ізоляції повітряних ЛЕП під час танення ожеледиці. Під впливом тепла та сонця, ожеледиця може почати танути, і це може призвести до стікання води на ізоляцію проводів. Якщо ізоляція недостатньо здатна витримати вологу та тиск, це може призвести до коротких замикань та пошкоджень проводів.

Перекриття повітряної ізоляції (провід – земля) при сильному зменшенні висоти провису дроту через ожеледицю. Збільшення маси проводів через намерзання ожеледиці може призвести до значного зменшення висоти провису дроту. Це може вплинути на безпеку ЛЕП та призвести до контакту проводів з наземною поверхнею або іншими об'єктами, що знаходяться поруч.

Для зменшення ризику таких проблем необхідно проводити детальні дослідження та розробляти заходи безпеки, включаючи покращення конструкції опор, вдосконалення ізоляції та систем контролю, що допоможе забезпечити стабільну та надійну роботу ЛЕП при негодових умовах.

Ці проблеми (рис. 1.5) свідчать про важливість подальших досліджень та розробки стратегій та методів для запобігання та реагування на ожеледні аварії на ЛЕП з метою підвищення надійності електропостачання.

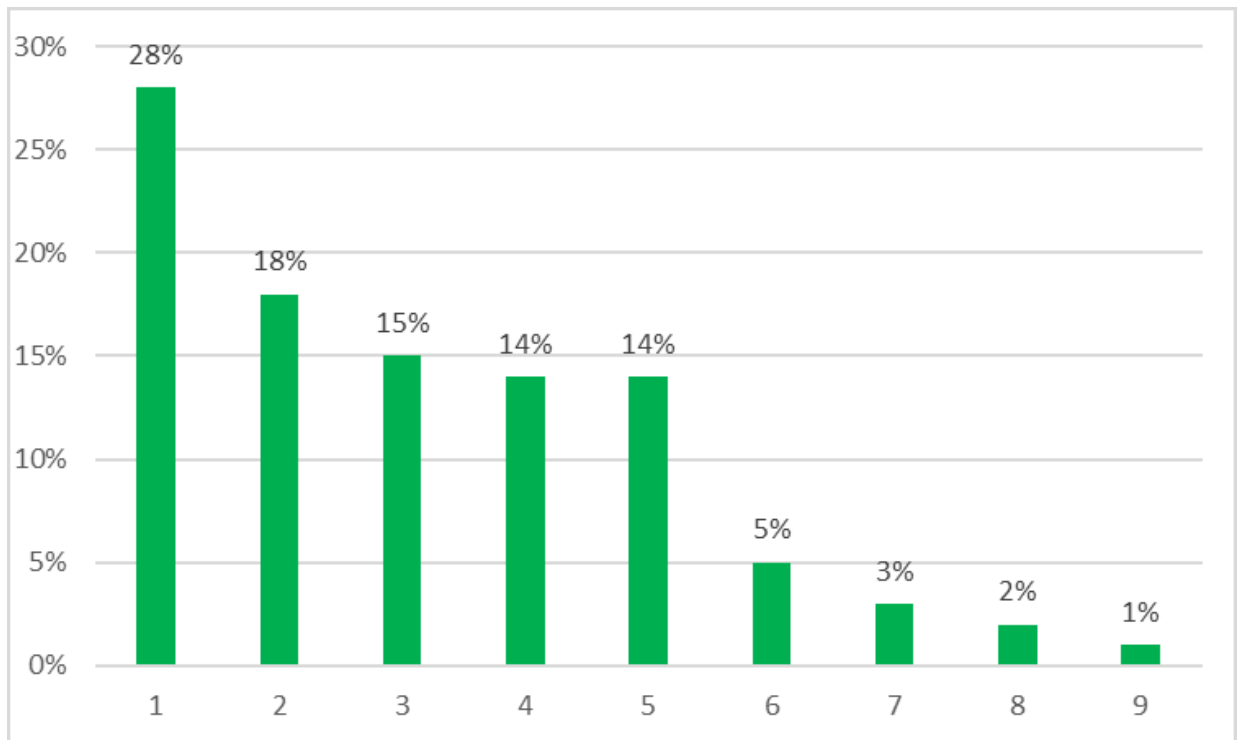


Рисунок 1.5 – Основні причини пошкоджень високовольтних ЛЕП:

1 – сторонні впливи (падіння дерев, наїзди, начерки, розстріли ізоляторів);  
 2 – ожеледь-вітрові навантаження; 3 – атмосферні перенапруги; 4- втрата несучої здатності, знос, корозія; 5 – дефекти проектування, будівництва та монтажу; 6 – дефекти експлуатації; 7 – забруднення ізоляції, птиці;  
 8 – нерозрахункові режими у мережі; 9 - стихійні явища (землетруси, селі, зсуви і т.д.)

## 1.2 Фізичні явища, які супроводжують утворення ожеледиці

Утворення ожеледиці та паморозі – це фізичні процеси, які відбуваються за певних умов. Зазвичай ці умови включають наступне:

- температура нижче нуля: ожеледиця зазвичай утворюється при температурі нижче 0 °С, коли вода переохолоджується і може змінити свій агрегатний стан з рідкого у твердий. Це може відбуватися при наявності охолодженого повітря;
- туман або переохолоджений дощ: ожеледиця може утворюватися в умовах туману або під час випадання переохолодженого дощу. У таких умовах вологість повітря дуже висока і сприяє конденсації водяної пари на поверхнях;
- висока вологість повітря: умови для утворення ожеледиці передбачають дуже високий рівень вологості в повітрі, близький до 100%. Це важливий фактор, оскільки вологість повітря впливає на можливість конденсації та замерзання водяної пари;
- процес кристалізації: при відповідних умовах контакт переохолоджених крапель води з льодом або іншим твердим тілом, яке має температуру нижче 0 °С, призводить до негайної кристалізації і утворення ожеледиці.

Важливо зазначити, що в умовах електропередачі будь-який елемент лінії, такий як проводи або ізолятори, може стати центром кристалізації для переохолодженої атмосферної вологи, що може призвести до утворення ожеледиці на ЛЕП та інших об'єктах.

Явище сублімації, коли пара переходить безпосередньо у твердий стан, може пояснити випадання твердих опадів без утворення туману при прозорому повітрі. Питання про те, який процес (кристалізація або сублімація) є визначальним, дійсно є важливим для наукового та практичного розуміння ожеледиці. Справжній внесок кожного з цих процесів може залежати від конкретних погодних умов, характеристик атмосфери та фізичних властивостей об'єктів, на які впливає ожеледиця.

Дослідження утворення ожеледиці в природних умовах може бути складним завданням, оскільки це вимагає спеціальних умов та обладнання для спостережень. Однак розуміння динаміки та фізичних процесів, які

відбуваються при ожеледиці, є важливим для розвитку методів прогнозування та протидії цьому явищу, зокрема в сферах енергетики та транспорту. Дослідження в цій галузі може допомогти покращити безпеку та надійність інфраструктури в умовах ожеледиці. Для проведення експериментів використовувалися холодильні камери промислового типу. Для створення потоку переохолоджених крапель застосовувалося розпилення води за допомогою ежектора та конденсація пари, яка вироблялася за допомогою невеликого електричного котла.

Температура, при якій утворюються ожеледиці та морозові утворення, відрізняється від температури навколишнього середовища і залежить від кількох факторів, таких як обсяг опадів, які випадають протягом певного часу, та умови тепловідведення. Значна кількість вологи, навіть в дрібних краплях при низьких температурах, може призвести до утворення чистих ожеледиць. Навіть в умовах дуже великої кількості вологи деякі крапельки можуть залишитися рідкими і стікати з поверхні без замерзання.

Серед факторів, які сприяють ущільненню осаду, слід враховувати збільшення вологості повітря, що призводить до збільшення кількості кристалізованої вологи і, отже, підвищення температури формування осаду. Очевидно, що спостереження, проведені Одеською обсерваторією в районах з невеликим ризиком ожеледиць, можуть бути неповними. Таким чином, можна зробити висновок, що структура осаду залежить від декількох взаємозв'язаних фізичних факторів.

Розглянемо, як ці явища взаємодіють у природі. Під час морозу та переохолодженого дощу краплі великі і слабо переохолоджені, коли вони падають на провід. Це сприяє утворенню ожеледицьких формацій.

У випадку низьких температур, краплі менше, більш схильні до переохолодження, і при цьому зазвичай відсутні мряка та дощ. У таких умовах утворюються відклади морозу, і навпаки, не утворюється ожеледиця. Це пояснює, чому думки щодо умов формування ожеледиці та паморозі є суперечливими. Оскільки явища, що визначають структуру осаду,

взаємодіють одне з одним, то вибір будь-якого з них як основи міркувань підтверджує його найбільший вплив на форму відкладень.

У природі існує можливість послідовного накладання різних видів осаду один на одного. Один з таких специфічних видів осаду – це суміш танучого снігу і води, відома як мокрий сніг. В умовах дощу цей сніг може падати у великих кількостях та мати значний вплив на дроти.

Щодо класифікації ожеледь-морозових утворень, досі існує деяка неоднозначність. Проте це питання важливе як теоретично, так і практично, оскільки воно впливає на обчислення навантаження на дротах. Одні класифікують ці явища як три окремі види, інші як два, а деякі об'єднують їх всі разом.

Паморозь відрізняється від ожеледиці у тому, що вона утворюється на горизонтальних поверхнях, на землі та гілках дерев у ясні світлі ночі, коли ці поверхні сильно охолоджуються через явища радіації. Утворення інею зазвичай невелике і не має практичного значення для ліній електропередачі.

Деякі дослідники, пов'язані з авіацією, запропонували класифікувати ожеледиці як гладкі прозорі і шорсткі, молочно-кольору, мало прозорі. Ця класифікація може бути пов'язана з негативним впливом шорстких поверхонь на літні характеристики літаків.

Під морозом розуміють непрозорий осад, що складається з дрібних кристалів льоду, що випадає при температурі навколишнього середовища нижче нуля градусів, зазвичай під час туману. Об'ємна вага морозу становить від 0,1 до 0,25, і зовні він нагадує сніг. Ожеледиця, з іншого боку, утворюється при випаданні крижаного дощу або в насиченому вологому повітрі при температурі нижче 0 градусів Цельсія та вітрі. Найширше про це питання дискутує професор Глазунов, який розділяє поняття паморозі та ожеледиці. Він визначає паморозь як білі пухкі опади з об'ємною вагою від 0,05 до 0,6, що випадають при тумані та негативних температурах. До ожеледиці він включає прозорі крижані утворення з об'ємною вагою 0,6...0,9, що утворюються при випаданні крапель переохолодженого дощу.

Наразі існує декілька підходів до класифікації ожеледиць і схожих явищ. Однак можна запропонувати таку основну класифікацію цих явищ:

а) ожеледиця: включає в себе осад у формі твердого, прозорого або напівпрозорого (білуватого) льоду з гладкою поверхнею. Ожеледиця відрізняється значною твердістю та прозорістю. Об'ємна вага ожеледиці зазвичай знаходиться в межах 0,6 - 0,9. Утворення ожеледиці відбувається на вертикальних і горизонтальних поверхнях за наявності в повітрі переохолоджених крапель дощу, мряки та туману. Температура утворення ожеледиці зазвичай лежить між 0 °С і -3 °С, але в окремих випадках може знизитися до -5 °С або навіть -6 °С;

б) паморозь: це непрозорий осад, що складається з дрібних кристалів льоду і випадає при температурі навколишнього середовища нижче нуля градусів, зазвичай під час туману. Об'ємна вага паморозі зазвичай становить від 0,1 до 0,25. Вигляд паморозі схожий на сніг;

в) змішані утвори: ця група включає в себе різноманітні комбінації ожеледиці та паморозі, а також інші специфічні форми відкладень.

Окремою групою можуть бути відкладення мокрого снігу, які суттєво відрізняються за природою свого утворення від інших явищ. Ця класифікація допомагає краще розуміти та охарактеризувати різні форми ожеледиць та схожі явища.

Дійсно, після сильних морозів можливе утворення ожеледиці на сильно охолоджених поверхнях навіть при дощах і туманах з температурою вище нуля. Ожеледиця виникає на вертикальних і горизонтальних поверхнях, коли наявні переохоложені краплі дощу, мряка або туману, і температура на поверхні нижче точки замерзання. Її температура утворення зазвичай лежить між 0 °С і -3 °С.

Звільнюючись з повітря, переохоложені краплі прилягають до поверхні і замерзають, утворюючи прозорий або напівпрозорий лід. Ожеледиця є досить твердою та прозорою, і її об'ємна вага зазвичай



знаходиться в межах 0,6...0,9. Паморозь, як ви зазначили, відрізняється від ожеледиці тим, що вона складається з дрібних кристалів льоду і випадає при температурі нижче нуля градусів, зазвичай під час туману. Об'ємна вага паморозі зазвичай становить від 0,1 до 0,25.

Змішані утворення можуть виникати при чергуванні умов, що сприяють утворенню ожеледиці і паморозі один на одного. Об'ємна вага таких відкладень може бути різною, залежно від товщини окремих шарів.

Мокрий сніг, з іншого боку, може випадати при температурі близької до 0 °С, він має велику липкість і може приставати до дротів та інших поверхонь. За зниження температури мокрий сніг твердіє, утворюючи міцні відкладення. Причому існує різниця між різними видами ожеледиці та паморозі. Голчаста паморозь, завдяки своїй крихкості, може ламатися і відпадати під впливом сильних вітрів. Це може бути проблемою для ліній електропередач та інших систем, які використовують металеві частини, оскільки така паморозь може пошкодити елементи системи, які вона застигає.

### 1.3 Деякі особливості утворення ожеледиці та паморозі на ЛЕП

При вивченні впливу ожеледиці та паморозі на проводах і тросах повітряних ліній, важливо враховувати конструкцію споруд та властивості матеріалів, з яких вони виготовлені. Ожеледиця та паморозь можуть створити складнощі, такі як збільшення ваги проводів і можливий ризик їх обриву або прогину під навантаженням. Ось деякі особливості впливу ожеледиці та паморозі на лінії електропередач:

Односторонній гребінець. У разі одностороннього утворення гребінця, якщо вітер дме в одному напрямку, провід буде засипаний і зледеніння буде відбуватися на одному боці. Це може спричинити нерівномірне навантаження на провід і привести до його закручування.

Збільшення ваги проводу. Ожеледиця та паморозь на поверхні проводу збільшують його вагу. Це може призвести до прогину лінії, особливо на довгих відстанях.

Зміна форми гребінця. З розвитком процесу, гребінець може змінювати свою форму. Горизонтальний гребінець може перетворитися на похилий, що призводить до збільшення площі зледеніння.

Закручування проводу. Внаслідок нерівномірного навантаження на проводі, він може почати закручуватися. Це може призвести до подальшого зростання площі зледеніння та нерівномірного розподілу навантаження.

Урахування цих факторів важливо для забезпечення надійності електричних ліній та ефективного управління ними в умовах зимових погодних умов.

При розгляді утворення ожеледиці на лініях електропередачі, особливо при утворенні льодового покриття на проводах, важливим фактором є здатність проводів до закручування. Закручування проводів може виникнути через дію вітру, особливо під час одностороннього утворення ожеледиці, коли лід нагромаджується лише з одного боку проводу.

Для кількісної характеристики здатності проводів до закручування розглянемо приріст кута закручування на елементі довжини  $dx$ .

Цей приріст кута  $d\theta$  може бути обчислений як відношення довжини елемента  $dx$  до радіуса закручування  $R$ , де  $R$  – радіус закручування проводу:

$$d\theta = dx / R$$

Для знаходження радіуса закручування  $R$ , можна використовувати рівняння, що описує взаємодію моменту обертання  $M$  та крутного моменту опори  $T$ , де  $T$  залежить від властивостей матеріалу проводу та зовнішніх умов:

$$M = T * R.$$

Звідси можна отримати:

$$R = M / T$$

Таким чином, приріст кута закручування на елементі довжини  $dx$  буде:

$$d\theta = dx * T / M.$$

Ця формула описує залежність між зміною кута закручування та властивостями проводу (представленими крутним моментом опори –  $T$  та моментом обертання –  $M$ ) в кожній конкретній ситуації.

Кутове прискорення  $\alpha$  вказує на швидкість зміни кутової швидкості проводу, що може відбуватися через вплив вітру. Момент сили  $\tau$  зазвичай враховує силу вітру, що спрямована перпендикулярно до проводу і призводить до його закручування.

Залежно від конкретних умов і параметрів системи можуть використовуватися різні підходи для оцінки цього процесу. Після розрахунку кутового прискорення та моменту сили можна оцінити, наскільки провід буде закручуватися під дією вітру.

Це цікавий спостережений феномен. Зважаючи на те, що ожеледиця утворюється на підвітряних поверхнях зледеніння предметів та включає в себе накопичення льоду при ексцентричному наростанні опадів та закручуванні дроту, справді важко зрозуміти, як цілком циліндричні форми ожеледиці можуть утворюватися при невеликій товщині стінки.

Підходячи до цього явища, можна розглядати додаткові чинники, такі як структура льоду і властивості матеріалу проводу. Також важливо враховувати термодинамічні процеси, які відбуваються під час утворення ожеледиці.

Для отримання глибшого розуміння цього явища може бути корисним проведення додаткових досліджень та аналізу відповідних фізичних процесів.

Виявлення важливих факторів, які впливають на форму ожеледиці, може допомогти покращити проектування і підтримку ліній електропередачі, зокрема у відношенні до запобігання негативним наслідкам ожеледиці для систем електропостачання.

Ініціюючі фактори, такі як переохолоджений дощ та мряка, можуть призводити до накопичення ожеледиці на лініях електропередачі, що ускладнює їхню роботу та може призвести до великих навантажень та руйнування опор.

Досліди та спостереження в реальних умовах дійсно є важливими, оскільки вони дозволяють краще розуміти процес утворення ожеледиці та її вплив на лінії передачі електроенергії. Однак реальні умови можуть бути досить складними, і вони можуть різнитися від одного випадку до іншого, залежно від кліматичних умов та географічного положення.

Важливо також враховувати, що динаміка вітру та інші метеорологічні умови можуть впливати на розподіл ожеледиці на лініях передачі. Тому розрахунки та моделювання повинні враховувати ці фактори для точного прогнозування та мінімізації ризиків.

Дослідження та аналіз впливу ожеледиці на лінії передачі електроенергії є важливим завданням для забезпечення надійності системи електропостачання в умовах негоди.

Розглянемо вплив матеріалу провідника на теплообмін. Його значення в контексті теплоємності набуло визначення в електротехнічній літературі після спостережень на горі Брокен. Дослідження показали, що алюмінієві проводи витримували підвищене навантаження від ожеледиці (10-25%) в порівнянні з мідними проводами.

Об'єктивний аналіз вказує, що запасена теплова енергія міді або алюмінію дуже невелика (кілька джоулів на 1 см довжини та 1 °C) і може бути розсіяна протягом 10 хвилин при слабкому вітрі. При таких умовах вплив теплоємності матеріалу виявлятиметься помітним лише на початковій стадії ожеледиці, а при тривалих процесах не буде суттєвим.

Щодо спостережень на горі Брокен, алюмінієвий провід був підвішений на прольоті 10 метрів, у той час як мідний мав довжину 4,5 метра. Ураховуючи меншу жорсткість алюмінієвого дроту і більшу довжину прольоту, можна показати, що його здатність до закручування була близько в 10 разів вище, ніж у мідного.

Враховуючи навіть невеликий кут відхилення, алюмінієвий провід значно збільшував базу для осадження ожеледиці, тим самим підвищуючи навантаження. Таким чином, різниця у товщинах наносів була обумовлена не тільки різницею в теплоємності проводів, але головним чином їхньою різною здатністю до закручування. Вірність цього розуміння підтверджують матеріали дослідження, що підкреслюють, що найбільша різниця в товщинах наносів виникала не на початкових етапах процесу, як це можна було б очікувати внаслідок різниці в теплоємності, але на завершальних етапах внаслідок різниці в умовах закручування. Порівняння утворення ожеледиці на металевих поверхнях та різних неметалевих матеріалах, таких як тканини, деревина, пластмаса і інші, дозволяє краще оцінити вплив фізичних властивостей матеріалів на процес.

Важливо зазначити, що утворення ожеледиці на різних матеріалах може відрізнятися через різницю в теплоємності, теплопровідності, а також адгезії (здатність прилягати до поверхні). Ці фактори можуть впливати на те, як швидко і в якому обсязі вода переходить в стан льоду на різних матеріалах.

Щодо впливу діаметра дроту, це може бути суперечливим, оскільки він також може варіюватися в залежності від умов і факторів, таких як місцеві кліматичні особливості та властивості ліній передачі. Діаметр проводу може впливати на терези ожеледиці та їхню здатність до закручування.

Згідно з вашими спостереженнями, вплив діаметра дроту може бути складним і залежати від конкретних умов. Такі дослідження та спостереження можуть бути важливими для подальших досліджень та розробки стратегій мінімізації наслідків ожеледиці на лініях передачі електроенергії.

Очевидно, що вплив діаметра дроту на електроенергетичних лініях не може бути розглянутий в ізоляції від жорсткості матеріалу і довжини прольоту. З'єднання всіх цих параметрів визначатиме кут закручування дроту. При формуванні ожеледиці на коротких відомих стрижнях, таких як у випадку Брокена, можна практично не враховувати закручування, і максимальна вага досягається на товстому дроті з найбільшою базою для осадження льоду.

Схожа ситуація спостерігається на початкових етапах процесу і в реальному прольоті; однак тонший провід подальше швидше закручується, що різко збільшує базу для формування опадів. В результаті вага швидко зростає, перевищуючи зростання навантаження. У цьому випадку співвідношення ваги ожеледистих та морозових утворень на проводах різних перерізів залежатиме від фази розвитку процесу.

Щодо відкладень на лініях зв'язку, слід відзначити, що здатність проводів до закручування при типових конструкціях ліній слабкого струму менша, ніж у проводів ліній електропередачі. Це пояснюється тим, що у ліній слабкого струму часто використовують проводи з меншим діаметром, що призводить до меншої бази для утворення опадів.

Враховуючи також меншу початкову базу для утворення опадів, визначену меншим діаметром, спостерігається зменшення розмірів ожеледниць та морозових утворень на проводах зв'язку порівняно з лініями високої напруги, що є природнім явищем.

Збільшення довжин прольотів при підвищенні поперечного перерізу і жорсткості проводу, яке зазвичай застосовується, має суттєвий нівелюючий ефект на процес закручування. Таким чином, для ходових конструкцій ліній 35 і 110 кВ умови для відкладення ожеледиці і морозів майже однакові, і в завершених стадіях процесу результуючі навантаження на погонний метр можна вважати приблизно однаковими.

При невеликих навантаженнях і в тих випадках, коли закручування дроту не відбувається, ваги відкладень повинні бути приблизно пропорційні

зовнішньому діаметру дроту, і, отже, розрахунок за незмінної товщині стінки ожеледиці є виправданим.

Питання впливу електричного поля на процеси ожеледиці є досить складним і не повністю розгрібаним. Цікаво, що існують деякі спостереження та теоретичні роздуми про можливий вплив електричного поля на утворення ожеледиці.

Вказані матеріали та роботи на цю тему можуть свідчити про існуючий інтерес до вивчення цього питання. Однак, здається, що фізичні механізми, які лежать в основі взаємодії електричного поля і процесу ожеледиці, ще не повністю зрозумілі.

Дослідження у цьому напрямку можуть мати важливе значення для розвитку методів прогнозування та управління процесами ожеледиці в різних областях, таких як авіація, електропередача та інші. Можливість впливу електричного поля на процеси ожеледиці може відкрити нові можливості для підвищення безпеки і надійності інфраструктури та устаткування в умовах ожеледиці.

Дослідники продовжують вивчати це питання, і додаткові дослідження можуть привести до кращого розуміння впливу електричного поля на ожеледицю та розробки більш ефективних методів її передбачення та управління.

У той же час, підвищена інтенсивність ожеледиці при наявності електричного поля не може бути пояснена високим вмістом іонів, оскільки вже у 1897 році Вільсоном було доведено, що конденсація на них можлива лише за величезного пересичення (400...700 %). Власний заряд крапель також не може зміцнювати ожеледь через його невелику величину (500...3000 зарядів електрона) і змінне поле струму.

Якщо розглядати крапельку як провідну кулю і вважати поле в межах крапельки досить рівномірним, можна сформулювати:

$$F = \frac{1}{2} r_k^3 E^2,$$

де  $F$  - діюча на крапельку сила в дінах;

$r_k^3$  - радіус крапельки в см;

$E$  - напруженість поля в електростатичних одиницях.

Таким чином, механізм впливу електричного поля на ожеледицю залишається об'єктом подальших досліджень і дослідникам необхідно подолати труднощі, пов'язані з визначенням фізичних процесів, що відбуваються при взаємодії електричного поля та крапельок води в умовах ожеледиці.

Напруженість електричного поля  $E$  на відстані  $d$  від дроту з радіусом  $r$  буде:

$$E = U/d$$

Тобто, сила тяжіння, яку викликає прикладена напруга, залежить від квадрату напруги та обернено пропорційна кубу відстані між краплею та дротом. Це означає, що чим далі від дроту розташована крапля, тим менше впливу на неї має електричне поле, що виникає від прикладеної напруги на дроті.

Цей фактор може впливати на процеси ожеледиці, але для того, щоб електричне поле суттєво впливало на краплі води та процеси ожеледиці, зазвичай потрібні дуже великі значення напруги. Зважаючи на те, що для створення великої напруги може бути необхідне велике споживання електричної енергії, а також ризики і обмеження з точки зору безпеки, вплив електричного поля на ожеледицю не є типовим чинником і не розглядається в якості основного способу боротьби з ожеледицею на лініях передачі та інших об'єктах.



#### 1.4 Деякі особливості високовольтних ліній систем електропостачання та автоблокування

На ділянках залізниць, електрифікованих на постійному струмі, використовуються пристрої сигналізації, централізації та блокування (СЦП) із частотою сигнального струму 50 Гц. Ці пристрої живляться від трифазної лінії електропередачі (ЛЕП) автоблокування з частотою 50 Гц та лінійною напругою 6 або 10 кВ. Живлення забезпечується трансформаторами СЦБ потужністю 30-100 кВА, які встановлюються на тягових підстанціях постійного струму, розташованих зазвичай на відстані 12-25 км один від одного.

Резервом ЛЕП автоблокування використовуються зазвичай трифазні лінії поздовжнього енергопостачання з лінійною напругою 6 і 10 кВ. Ці лінії прокладені на кронштейнах, розташованих на опорах контактної мережі, та отримують живлення безпосередньо від шин 6 або 10 кВ тягових підстанцій.

Для відбору електроенергії від цих ліній для різних апаратів та приладів, що входять в окремі елементи пристроїв СЦБ, на перегонах та станціях здійснюється однофазними лінійними трансформаторами типу ОМ-6 або ОМ-10 з потужністю від 0,3 до 1,2 кВА. Також можуть використовуватися трифазні силові трансформатори з потужністю до 20 кВА.

Ці трансформатори використовуються для адаптації напруги та потужності з ліній електропередачі поздовжнього енергопостачання до вимог електроприладів у системі СЦБ. Вони забезпечують необхідні параметри напруги та потужності для безперебійного та ефективного функціонування обладнання.

Лінії електропередачі поздовжнього енергопостачання на більшості ділянок залізниць також використовуються для живлення нетягових залізничних об'єктів, а також сільськогосподарських та районних споживачів, що розташовані поблизу залізниці. Відбір потужності від цих ліній може

сягати кількох сотень кіловольт-ампер у деяких випадках, в залежності від потреб та розміру споживачів.

Більшість ділянок залізниць, де використовується електрична тяга на змінному струмі, обладнано автоблокуванням із частотою сигнального струму 75 Гц. Пристрої автоблокування отримують живлення від ліній електропередачі (ЛЕП) автоблокування з лінійним напруженням 6 кВ і частотою 75 Гц. Ці трифазні ЛЕП розташовані на окремих опорах і не мають резервної лінії. Їхнє електропостачання забезпечується від тягових підстанцій змінного струму, які зазвичай розташовані на відстані 40-60 км одна від одної.

На деяких ділянках змінного струму, що були електрифіковані останнім часом, використовується нова система автоблокування з частотою сигнального струму 25 Гц. На цих ділянках електропостачання пристроїв СЦБ реалізується за допомогою додаткового дроту з напругою 27,5 кВ і частотою 50 Гц, який прокладений по опорах контактної мережі і приєднаний до однієї з шин 27,5 кВ тягової підстанції змінного струму.

Відбір потужності з цієї лінії здійснюється за допомогою однофазних комплектних трансформаторних підстанцій, які включені між додатковим проводом і рейками. Ця система дозволяє ефективно жити пристрої СЦБ та інші споживачі на ділянках змінного струму з використанням нових технологій автоблокування.

Перетворення струму промислової частоти в сигнальний струм із частотою 25 Гц виконується статичними перетворювачами, розташованими безпосередньо в кожному споживачі СЦБ. На більшості ділянок електрифікованого змінного струму з автоблокуванням на частоті 25 Гц, електропостачання пристроїв СЦБ забезпечується від трифазних ЛЕП автоблокування з частотою 50 Гц і напругою 6 і 10 кВ. Ці лінії прокладені на окремих опорах і, як правило, використовують сталеві проводи. Живлення цих ЛЕП здійснюється односторонньо на довжині консолі 40-60 км від однієї з тягових підстанцій змінного струму.

Резервною лінією для живлення пристроїв СЦБ із частотою 25 Гц на електрифікованих ділянках змінного струму може служити система ДПР (два дрти-рейки). Ця система використовується для комплексного енергопостачання однофазних і трифазних нетягових залізничних, районних і сільськогосподарських споживачів, що розташовані поблизу залізниці. Система ДПР отримує консольне живлення від шин 27,5 кВ тягових підстанцій.

Зазначені особливості ЛЕП автоблокування відрізняють їх від звичайних високовольтних ліній електропередачі і роблять важливими питання, пов'язані з боротьбою з ожеледицею та забезпеченням безперебійного електропостачання для систем автоблокування. Ось деякі аспекти, які слід враховувати:

- зберігання та підтримання. Ці ЛЕП потребують регулярного технічного обслуговування, у тому числі очищення від ожеледиці. Забезпечення доступу до пристроїв для обслуговування та виправлення може бути складною задачею в зимових умовах;
- засоби попередження. Важливо мати системи попередження і діагностики для виявлення небезпечних умов, таких як накладення льоду на проводи або несправності в обладнанні. Це допоможе уникнути аварій та забезпечити швидкий відгук на проблеми.
- заходи з обслуговування взимку. Регулярне обслуговування ліній взимку, включаючи очищення від ожеледиці та відновлення електропостачання в разі аварій, важливе для надійності системи.
- резервні джерела живлення. Важливо мати резервні джерела живлення для систем автоблокування у випадку відмови основної ЛЕП або інших аварій.
- заходи з попередження ожеледиці. Вивчення місцевих умов та застосування заходів, які можуть зменшити ризик накопичення льоду на проводах і обладнанні.

Ці заходи можуть допомогти забезпечити надійну роботу систем автоблокування при негативних погодних умовах і підвищити безпеку на залізницях.

Електричні методи боротьби з ожеледицею на високовольтних ЛЕП автоблокування та поздовжнього енергопостачання є ефективними і надійними. Ці методи використовуються для уникнення небезпечних ситуацій та забезпечення надійності системи автоблокування та подачі електроенергії на залізничних ділянках. Ось деякі із них:

Теплові кабелі. Теплові кабелі (або обігрівальні кабелі) можуть бути встановлені на проводах ЛЕП. Вони генерують тепло, яке розталяє ожеледицю на проводах. Цей метод може бути включений або вимкнений за необхідності.

Системи високочастотного нагріву. Вони використовують високочастотні коливання, що генерують тепло на проводах та допомагають розтопити ожеледицю. Ці системи можуть працювати на великих відстанях.

Електричний розморожувач. Ця система включає нагрівальні елементи, вбудовані в проводи ЛЕП. Вони можуть бути активовані, коли є ризик накопичення ожеледиці.

Системи високовольтного імпульсного розряду. Ці системи використовують високовольтні імпульси, що генерують електричні розряди на проводах. Це може допомогти відлучити ожеледицю та попередити її накопичення.

Системи вентиляторів та спеціальних генераторів. Вони можуть створювати об'ємні повітряні потоки, що допомагають уникнути накопичення ожеледиці на проводах.

Автоматизовані системи моніторингу і управління. Сучасні системи автоматизації можуть виявляти накопичення ожеледиці на проводах і активувати відповідні методи боротьби з нею.

Ці методи дозволяють дистанційно та ефективно управляти ситуацією на високовольтних ЛЕП, зменшуючи ризик аварій та забезпечуючи надійну

подачу електроенергії для систем автоблокування та інших потреб на залізницях.

Розгляньмо два основних методи плавкості ожеледиці та підігріву проводів на ЛЕП автоблокування та поздовжнього енергопостачання:

Плавка ожеледиці за допомогою штучного живлення. Цей метод передбачає підключення додаткового живлення до проводів ЛЕП, що нагріває їх і допомагає розтопити ожеледицю. Це може бути виконано за допомогою спеціальних живильних схем або додаткових джерел живлення. Підключення додаткового живлення може використовувати ті ж джерела, від яких ЛЕП отримує живлення в робочому режимі.

Профілактичний підігрів проводів. Цей метод передбачає постійний нагрів проводів під час робочого режиму ЛЕП. Використовуються спеціальні системи підігріву, які підтримують оптимальну температуру проводів для запобігання утворенню ожеледиці. Цей метод може бути більш ефективним в умовах, де ризик утворення ожеледиці великий, але не досягає критичного рівня.

Обираючи між цими методами, слід враховувати конкретні умови на ділянці ЛЕП, наявність резервного живлення, можливість забезпечити живлення та діяльність пристроїв СЦБ та інших споживачів в режимі аварії та плавки ожеледиці.

Це складна проблема, і обрана стратегія повинна бути добре пророблена та забезпечувати надійність роботи системи автоблокування та подачі електроенергії на залізничних ділянках, що є важливим для безпеки руху поїздів і пропускної спроможності залізниці.

Для забезпечення ефективного боротьби з ожеледицею на ЛЕП автоблокування та поздовжнього енергопостачання необхідно враховувати ряд важливих технічних аспектів. Ось кілька ключових моментів:

Перевірка та підготовка ЛЕП. Перед настанням періоду ожеледиці ЛЕП повинні бути попередньо перевірені, і їх стан повинен бути таким, що забезпечує безпечний нагрів проводів. Однак, зазначено, що перерізи проводів

у зоні боротьби з ожеледицею повинні бути однаковими, щоб уникнути великих відмінностей у температурі між проводами.

Запобіжники та обладнання для нагріву. Важливо перевірити обладнання для нагріву проводів та впевнитися, що воно придатне для тривалого навантаження струмом плавки ожеледиці або профілактичного підігріву проводів. Запобіжники та інше обладнання повинні витримувати це навантаження без аварій.

Ревізія стикових з'єднань та роз'єднувачів. Стикові з'єднання і роз'єднувачі на лінії повинні бути перевірені на наявність корозії та правильної роботи. Вони повинні бути готові до роботи в умовах ожеледиці.

Рівномірність опору проводів. Різниця в опорі проводів на довжині зони боротьби з ожеледицею не повинна бути великою, щоб забезпечити рівномірний нагрів. Важливо визначити та усунути будь-які відмінності, якщо вони є.

Позачергове випробування ізоляції. Перед використанням схем накладання струму нагріву, які можуть призвести до підвищення напруги між проводами та землею, слід провести позачергове випробування ізоляції кабельних вставок та трансформаторів, підключених до лінії. Це важливо для безпеки та надійності системи.

Забезпечення належного стану та роботи ЛЕП та відповідність їхніх параметрів вимогам є важливою умовою ефективної боротьби з ожеледицею на високовольтних лініях та збереження надійності систем автоблокування та подачі електроенергії на залізничних ділянках.

Отже, в залежності від умов охолодження дроту та товщини стінки ожеледиці, час, необхідний для його оплавлення, різний. Після очищення ожеледиці на всіх ділянках лінії, зону плавлення струму необхідно відключити. При нагріванні проводів ліній, що мають значні навантаження (наприклад, лінії ДПР), при визначенні допустимих струмів слід враховувати також струм від робочого навантаження. У всіх випадках, де це можливо, боротьбу з ожеледицею рекомендується проводити мінімально необхідним

струмом для зменшення ризику пошкоджень лінії, а також для економії електроенергії та потужності обладнання.

Опір проводів є ключовим параметром, що визначає довжину зони боротьби з ожеледицею, а також необхідну напругу і потужність джерела живлення. Величина погонного опору проводів залежить від їх матеріалу, поперечного перерізу і взаємного розташування. В залежності від роду струму розрізняють омичний опір при постійному струмі і активний, індуктивний і повний опір при змінному струмі. Індуктивний опір включає в себе внутрішній і зовнішній компоненти. Для проводів з кольорового металу та біметалу омичний та активний опори практично однакові як при постійному струмі, так і при змінному струмі з частотою 50 Гц.

Зазначимо, що в лініях живлення застосовують дроти А-25, А-240, а також сталеві дроти АС-35, АС-185, а на ділянках змінного струму в лініях ДПР – сталеві дроти АС-35, АС-50, АС-70, АС-95, алюмінієві дроти А-25, А-35, А-50, А-70, а також сталеві дроти ПС- 25, ПС-35. У високовольтних лініях автоблокування використовуються алюмінієві дроти А-25, А-35, сталеві дроти АС-35, сталевомідний одножильний провід БМ-6, а також сталеві дроти ПСО-5, ПС-25, ПС-35. У ожеледних районах слід вибирати дроти для ліній, виходячи з механічних розрахунків при дійсних значеннях ожеледного навантаження і супутнього їй вітру, а також з урахуванням захисту проводів від вібрації.

Через поверхневий ефект допустимі значення струму для сталевих проводів при змінному струмі нижчі, ніж при постійному струмі. При розрахунках струму плавки ожеледиці також важливо враховувати величину робочого струму лінії.

Багато високовольтних ліній, які живлять пристрої автоблокування залізниць та лінії поздовжнього енергопостачання, використовують сталеві проводи. Нелінійність опору сталевих проводів суттєво ускладнює вибір струму для боротьби з ожеледицею, оскільки нагрівання проводу залежить від

значень струму та активного опору проводу. Останній, у свою чергу, визначається величиною струму, що протікає по проводу.

Вибір струму для профілактичного підігріву проводів і плавки ожеледиці дійсно є важливим завданням, і врахування нелінійності опору сталевих проводів у розрахунках важливо для досягнення оптимального рішення.

Метод послідовних наближень може бути досить обґрунтованим і ефективним, хоча вимагає багаторазових розрахунків і може бути громіздким. Враховуючи нелінійність опору проводів, обчислення потрібно проводити з максимальною точністю.

Для зменшення громіздкості розрахунків і полегшення вибору струму боротьби з ожеледицею, можна використовувати числові методи, комп'ютерні програми та інші інженерні розрахунки, які можуть обчислити оптимальні значення струму в залежності від усіх факторів, що впливають на процес. Такий підхід дозволить отримати значення струму з необхідною точністю і врахувати всі параметри лінії, опору проводів та інші важливі чинники.

Враховуючи зменшення опору проводів при низьких температурах та нелінійність цього опору, можливо визначити ефективний струм, який забезпечить оптимальну боротьбу з ожеледицею на сталевих проводах і забезпечить надійну роботу системи при різних температурних умовах.

Коефіцієнт екрануючої дії, як ви описали, визначає ефективність компенсації наведеної електрорушійної сили (ЕРС), яка індукується в дротах, що перетинаються магнітними полями сусідніх дротів. Величина цього коефіцієнта залежить від відстані між проводами, їхнього розташування, а також конструкції кабелів і трансформаторів, які застосовуються для зменшення наведеної ЕРС. Для проводів, розташованих поблизу залізничного полотна, середні значення цього коефіцієнта становлять на одноколійних ділянках 0,5, а на двоколійних 0,4.

Коефіцієнт захисної дії кабелів зв'язку, який ви також згадали, впливає на захист кабелів від індуктивного впливу тягової мережі залізниці. Цей



коефіцієнт враховує конструкцію і ефективність захисних пристроїв, таких як відсмоктуючі трансформатори, які застосовуються для компенсації наведеної ЕРС і зменшення можливих впливів на кабелі зв'язку. Для спеціальних кабелів зв'язку, що прокладаються поблизу полотна залізниці у зв'язку з її електрифікацією на змінному струмі, цей коефіцієнт зазвичай дорівнює 0,1.

Захист кабелів зв'язку від індуктивного впливу тягової мережі є важливим завданням для забезпечення надійності і якості зв'язку в областях, де дроти живлення електрифікованої залізниці розташовані поруч. Застосування відсмоктуючих трансформаторів і інших захисних пристроїв дозволяє зменшити вплив індуктивної ЕРС на кабелі зв'язку та забезпечити стійкий зв'язок у цих умовах. Величина коефіцієнта близька до 0,5.

Коефіцієнт  $r_{cx}$  вказує на наявність замкненого ланцюгу зворотного струму, який проходить через землю і може впливати на стан і надійність системи. Коефіцієнт  $r_{cx} = 1$  для проводів, ланцюг зворотного струму яких проходить через землю. Врахування цього коефіцієнта допомагає уникнути негативних наслідків індуктивного впливу тягової мережі на системи зв'язку і електропередачі.

Розглядаючи специфічні умови індуктивного впливу на трифазні симетричні високовольтні лінії з ізолюваною нейтраллю та транспозицією дротів, коефіцієнт  $r_{cx}$  може бути дуже невеликим. Це зменшує вплив індуктивної електрорушійної сили на лінії автоблокування та поздовжнього енергопостачання в умовах боротьби з ожеледицею.

Щодо розподілу наведеної електрорушійної сили в проводі, схильному до впливу, ви правильно вказали, що напруження на кінці дроту, який з'єднаний з землею, дорівнює нулю, тоді як на ізолюваному кінці воно близьке до величини наведеної електрорушійної сили. Це може бути важливо при врахуванні індуктивного впливу та застосуванні заходів захисту для кабельних ліній зв'язку.

У разі виникнення вимушеного режиму плавки ожеледиці дійсно важливо припинити цей процес, щоб уникнути перевищення допустимих

величин індуктованих напруг в лініях зв'язку. Такі заходи безпеки і захисту допомагають забезпечити надійність і стабільність роботи ліній в умовах впливу індуктивних електрорушійних сил.

Важливим є врахування індуктивного небезпечного впливу системи ДПР (додатковий провід - рейки) на лінії зв'язку, а також на необхідність обмеження струму плавки ожеледиці в умовах індуктивного впливу. Це важливо для забезпечення безпеки та надійності роботи ліній зв'язку на електрифікованих ділянках залізниць.

Щоб обмежити струм плавки ожеледиці в умовах індуктивного впливу системи ДПР, зазвичай використовують петлеву схему боротьби з ожеледицею. Ваш коментар включає умову  $E = [U\epsilon]$ , і це правильно для встановлення параметрів струму плавки ожеледиці в таких умовах.

Обмеження струму плавки ожеледиці важливо для того, щоб уникнути надмірного навантаження на лінії зв'язку і забезпечити їх нормальну роботу. Боротьба з ожеледицею на електрифікованих ділянках залізниць вимагає уважного розрахунку та обрання відповідних заходів для забезпечення стабільності та надійності системи зв'язку в умовах індуктивного впливу.

$$I_{пл} \leq \frac{U_B}{z_{КА} \cdot r_P \cdot r_{ОБ} \cdot l_A}$$

де  $l_A$  – довжина зближення дроту лінії зв'язку, км.

Розрахунки відображають значення струму плавки ожеледиці, які можуть бути допущені в умовах індуктивного впливу на лінії зв'язку. За вашими вказівками, значення струму плавки ожеледиці допустимі в найбільш важких умовах, коли ураховано фактори, такі як екрануюча дія рейок, провідність землі та відстань кабелю зв'язку від осі шляху.

Це важливий результат для забезпечення стабільності і надійності ліній зв'язку в умовах електрифікованих ділянок залізниць, де індуктивний вплив системи ДПР може бути небезпечним. Дотримання таких стандартів і

обмежень допомагає забезпечити безпеку та ефективну роботу комунікаційних систем на залізницях.

На електрифікованих залізницях постійного струму, згідно з нашими рекомендаціями, боротьба з ожеледицею на лініях електропередачі автоблокування та систем енергопостачання виконується за допомогою випрямленого струму або змінного трифазного струму без використання землі як зворотного проводу. Вищезазначені схеми боротьби з ожеледицею не викликають небезпечних впливів на повітряні лінії зв'язку, які зазвичай використовуються на таких ділянках. Також важливо зауважити, що ці схеми не впливають на пристрої системи централізації та блокування, які працюють на цих ділянках з сигнальним струмом частотою 50 Гц.

Потрібно відзначити, що умови індуктивного впливу на повітряні лінії зв'язку та системи централізації та блокування були враховані при розробці вищезазначених схем для боротьби з ожеледицею на контактних мережах.

Для оцінки допустимості короточасних та рідко виникаючих впливів індуктивного характеру на повітряні лінії зв'язку при використанні електричних методів боротьби з ожеледицею, необхідно керуватися збільшеними нормами перешкод. Такі норми повинні бути встановлені для випадків порушення нормального режиму експлуатації високовольтних мереж, наприклад, при роботі ліній електропередачі автоблокування з фазою, заземленою під час останньої фази. Відомо, що для таких режимів роботи норма напруги втричі вище, ніж при нормальному режимі роботи високовольтних мереж.

## 2 ЕЛЕКТРИЧНІ МЕТОДИ ПРОТИДІЇ УТВОРЕННЮ ОЖЕЛЕДИЦІ НА ЛЕП

2.1 Основні аспекти використання технік та запобіжних заходів для боротьби з ожеледицею та профілактичного обігріву проводів

Переривання проводів високовольтних ліній передусім виявляються після відключення короткого замикання на лінії, проте на практиці можливі й обриви без утворення короткого замикання. Застосування плавкої технології для розтанування ожеледиці та систем профілактичного підігріву проводів на високовольтних лініях є основним методом забезпечення нормальної експлуатації в умовах осадження ожеледиці при великих швидкостях вітру та коливань проводів.

Відкладення ожеледиці на проводах повітряних ліній у поєднанні з сильними вітрами може викликати:

- а) інтенсивні коливання, що супроводжується замиканнями між проводами, їх опіками, а також пошкодженнями опор та кріплень;
- б) перевантаження та руйнування траверс та кронштейнів;
- в) механічне навантаження проводів та їх обриви, особливо за наявності пошкоджень електричною дугою;
- г) перевантаження і руйнування опор;
- д) розрегулювання проводів та зближення їх між собою.

Для ефективного управління проблемою утворення ожеледей на проводах повітряних ліній передусім важливо вчасно виявляти їх утворення та запобігати перевищенню розрахункових значень накладань на провід.

З наближенням періоду можливого виникнення ожеледі відкладень важливо організувати систему своєчасного отримання та аналізу метеорологічної інформації, а також підтримувати безперервну службу метеорологічних станцій у найбільш критичних місцях, де ожеледь є найбільш небезпечною.

Розподіл коротких замикань за видами залежить від типу ізоляції та конструкції елементів мережі [10 - 12]. Для ЛЕП напругою 35–750 кВ однофазні КЗ та ОЗЗ становлять приблизно 65 %, двофазні та подвійні замикання на землю – 20 %, двофазні без землі – 10 %, трифазні – 5 %. З цих даних випливає, що приблизно 85% від усіх замикань пов'язане із землею (рис. 2.1). Трифазні КЗ на практиці відбуваються дуже рідко [20]. Як правило, трифазні КЗ виникають через помилки оперативного персоналу: відключення роз'єднувача під навантаженням, подача напруги на заземлене обладнання.

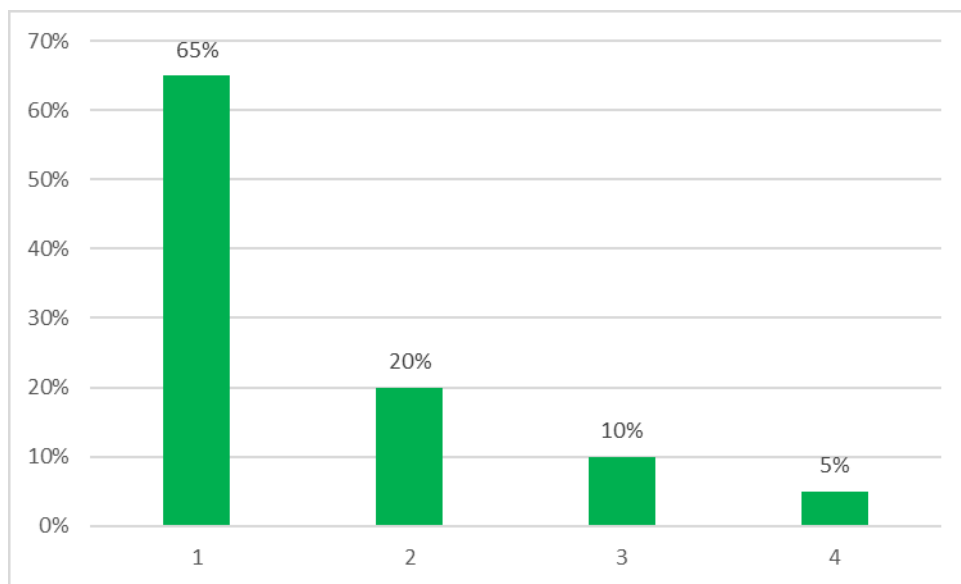


Рисунок 2.1 – Розподіл КЗ за видами:

- 1 – однофазні КЗ та ОЗЗ; 2 - двофазні та подвійні замикання на землю;  
3 – двофазні без землі; 4 – трифазні

Схеми для плавки ожеледь та профілактичного підігріву повинні бути спроектовані таким чином, щоб забезпечити максимальну простоту, механізацію та автоматизацію процесу їх впровадження.

При підготовці пристроїв для плавки ожеледиці та профілактичного підігріву на повітряних лініях електропередачі необхідно дотримуватися наступних експлуатаційних вимог:

а) забезпечити наявність оперативних інструкцій для складання схем плавки та профілактичного підігріву, проведення плавки та розбирання схем. Персонал повинен бути підданий тренуванням, щоб збільшити ефективність монтажу схем, досягаючи мінімального часу збирання (не більше ніж 30 хвилин);

б) перед початком періоду можливого випадання ожеледь слід підготуватися до роботи і випробувати пристрої плавки та профілактичного підігріву. Перевірка схем плавки ожеледиці або підігріву повинна бути проведена після завершення монтажу та всіх підготовчих робіт. Під час перевірки контролюються величина струму, наведеної напруги тощо. Опробування схем доцільно проводити у вікно часу для того, щоб виявити і ліквідувати можливі проблеми без шкоди для руху поїздів;

в) перевірити відсутність обривів у дротах проводів, а також відсутність дефектних стикувань проводів, особливо в лініях, де передбачається плавка ожеледиці з великими струмами;

г) почати плавку або профілактичний підігрів своєчасно, якщо досягнуті розрахункові значення ожеледно-морозових відкладень. Запізніла плавка може спричинити аварії на лінії через перевищення допустимих теплових навантажень від струму плавки, що виникають внаслідок появи дефектів при замиканні між проводами;

д) у випадках, коли необхідно здійснювати плавку ожеледиці на кількох лініях, які виходять з одного пункту живлення, необхідно розпочинати плавку при менших відкладах, ніж розрахункові, щоб забезпечити своєчасне завершення процесу.

На ділянках, де використовуються дорожньо-поїздні радіопередавачі (ДПР) або повітряні лінії передачі (ПЛ) як хвилевод для поїздного радіозв'язку, необхідно ретельно перевірити можливість проведення струму плавки та підігріву через високочастотні загороджувачі, які включені в дроти на обході тягової підстанції.

Допустимий тривалий струм контуру СК-6 в режимі плавки або профілактичного підігріву проводів складає 180 А. У випадках великих навантажень, необхідно використовувати спеціальні контури.

Під час плавки ожеледиці або профілактичного підігріву проводів змінним струмом в магістральних кабелях зв'язку відбувається індукція напруги. Ця напруга, спільно з напругою, індукованою тяговою мережею, може перевищити допустимі норми. Тому під час плавки необхідно здійснювати контроль над величиною індукованої напруги. У випадку перевищення норми, слід припиняти плавку або обмежувати навантаження тягової мережі.

На ділянках, де існують низьковольтні лінії, які проходять паралельно з повітряними лініями передачі, можливість використання плавки ожеледиці повинна визначатися індивідуально для кожного конкретного випадку, враховуючи довжину низьковольтної лінії, відстань до повітряних ліній і інші параметри.

Вивідні кабелі, кабельні вставки і запобіжники, встановлені на лініях, повинні мати можливість тривалого навантаження струмом плавки або профілактичного підігріву, при необхідності, з урахуванням споживчого навантаження. Перевірка на нагрівання має здійснюватися відповідно до вимог Правил внутрішньої електроустановки (ПУЕ), враховуючи фактичну температуру навколишнього середовища.

Під час проектування пристроїв для плавки ожеледиці для кожної лінії повинні складатися таблиці, які вказують час, необхідний для плавки в залежності від погодних умов і товщини ожеледиць. Для забезпечення повного відкидання осаджень на всій довжині лінії плавки, час проведення плавки слід продовжити на 5-10 хвилин понад розрахунковий час.

Забезпечення живлення для плавки ожеледиці або підігріву повинно бути готовим до роботи протягом ожеледичного сезону.

Для уникнення небезпечного зближення між проводами різних повітряних ліній передачі електроенергії, при проведенні плавки ожеледиці

або під час морозу на нижній лінії повинно бути передбачено проведення цих робіт після плавки на верхній лінії. Порядок виконання плавки на обох лініях регулюється місцевими інструкціями, враховуючи реальні відстані між проводами ліній, які перетинаються, та приналежність ліній.

Під час плавки ожеледиці силові трансформатори і автотрансформатори можуть бути перевантажені відповідно до вимог ГОСТ 11677-75. Додаткове навантаження на трансформатори, понад передбачене ГОСТом, повинно бути узгоджене з виробником трансформаторів.

Під час плавки ожеледиці або при морозі допускається перевантаження на 50% трансформаторів струму і контактів вимикачів та роз'єднувачів (відповідно до інформаційного повідомлення інституту "Енергомережапроект" № 25/59 від 50.05.67).

Під час плавки, за допомогою однофазного, двофазного короткого замикання на землю, а також за схемою "змійка", від трансформаторів, які не мають глухого заземлення нейтралі, слід забезпечити відповідне заземлення на час плавки.

У режимі плавки ожеледиці, всі захисні пристрої, призначені для нормального режиму роботи лінії, мають бути вимкнені. Для забезпечення безпеки під час плавки на лініях слід встановлювати спеціальні комплекти захисту.

При проектуванні цих комплектів захисту, необхідно враховувати можливість використання існуючих захистів для відключення обладнання, яке живить схему плавки ожеледиці.

При плавці за способом трифазного короткого замикання, слід передбачати захисний пристрій, який реагує на несиметричні види коротких замикань і трифазні короткі замикання. Це може бути струмовий захист, що реагує на струми зворотної послідовності, а також струмове реле в одній з фаз.

У випадку пофазної плавки (за способом однофазного або двофазного короткого замикання), слід передбачити встановлення додаткових струмових



реле в кожній фазі, які реагують на струм плавки для забезпечення безпеки проведення цих робіт.

## 2.2 Визначення струмів та часу плавлення ожеледі

Для уникнення утворення ожеледиці при температурі повітря навколо 0 °С і помірних вітрах рекомендується використовувати профілактичний підігрів проводів ПЛ. Проте в умовах несприятливої погоди, профілактичний підігрів проводів може вимагати значних струмів, близьких до струмів плавки, і стати неефективним.

Профілактичний підігрів проводів може бути застосований на ПЛ, де за допомогою перерозподілу навантаження можна досягти робочих струмів, які запобігають утворенню ожеледиці. Підвищення струмових навантажень може досягатися шляхом відключення паралельних ліній, переведенням додаткових споживачів на живлення від лінії, яка підігривається, тощо.

При профілактичному підігріві проводів від самостійного джерела струму, рекомендується вибирати струм, близький до мінімально необхідного. Це допомагає зменшити можливість пошкоджень, знизити споживану електроенергію та необхідну потужність обладнання.

Потужність обладнання для плавки ожеледиці або профілактичного підігріву повинна бути розрахована з урахуванням одночасного підігріву проводів на суміжних ділянках.

Мінімальний струм для профілактичного підігріву може бути визначений так, щоб температура проводу за певних метеорологічних умов досягла +1 °С, відповідно до відповідних формул і розрахунків:

$$I_{нд}^2 \cdot R_{л} = 0.0314 \cdot d \cdot \left[ 2 \cdot E_{л} \cdot (1 + 0.01 \cdot t_2) + 5.1 \cdot \left( \frac{1}{d} \right)^{0.25} \right] \cdot (t_1 - t_2)^{1.3}$$

$$I_{\text{нд}}^2 \cdot R_{\text{il}} = \left[ 7.24 \cdot \left( \frac{318 + 0.5 \cdot t_2}{1000} \right)^3 \cdot E_{\text{л}} \cdot d + 1.1 \cdot \sqrt{v \cdot d} \right] \cdot (t_1 - t_2)$$

У цих формулах:

$I_{\text{нд}}$  - ток профілактичного підігріву, А;

$R_{\text{il}}$  - активний опір 1 м дроту при температурі  $t_1$ , Ом;

$d$  - діаметр дроту, см;

$E_{\text{л}}$  - постійна променевипускання проводу, що дорівнює 0,6 для проводів, що мають мідну або алюмінієву зовнішню поверхню, і 0,5 для сталевих проводів;

$t_1$  - температура дроту, °С, що приймається рівною +1 °С;

$t_2$  - температура повітря, °С;

$V$  - швидкість вітру, м/с.

Для визначення струму плавки ожеледиці застосовується дві формули, враховуючи швидкість вітру. Перша формула застосовується при швидкості вітру менше 2 м/с, друга - при вітрі понад 2 м/с. Обидві формули враховують енергію, яка витрачається на тепловіддачу в навколишнє середовище.

Для успішної плавки ожеледиці рекомендується використовувати можливо великі струми, які дозволяють видалити відкладення протягом 60 хвилин. Це дозволяє швидко завершити процес плавки і відновити нормальний режим роботи лінії при мінімальних витратах електроенергії на плавку.

При підігріві ПЛ без перерви живлення споживачів, які мають велике навантаження, слід враховувати струм робочого навантаження. При визначенні струму підігріву також слід враховувати ступінь корозії проводів, оскільки це може вплинути на ефективність підігріву.

Вибір режиму плавки (струму і часу) має ґрунтуватися на ділянці ПЛ з найбільшими відкладеннями ожеледиці і морозу. Це дає можливість плавці тривати на цій ділянці, поки на ділянках ПЛ з меншими відкладеннями вона

вже завершилася, і дроти нагріватимуться. Такий підхід також застосовується на ділянках ПЛ, де ожеледиця або мороз узагальнено не утворюються, а також на ділянках з гіршими умовами охолодження проводів.

Допустиму температуру проводів слід приймати, °С:

Для алюмінієвих та сталюалюмінієвих	80;
для сталемідних	120;
для сталевих	60.

Температуру повітря та швидкість вітру необхідно отримувати з метеорологічних станцій або власних спостережень на ділянках, де ожеледиця не утворювалася або мала невеликі розміри. У відсутність даних щодо швидкості вітру, її можна приймати рівною половині тієї, яка спостерігається на найбільш ожеледній ділянці ПЛ.

Найбільший струм плавки слід розраховувати за вищенаведеними формулами при температурі  $t_1$ , яка дорівнює допустимій для даного проводу.

Час плавки (розрахунковий) слід визначати за такою формулою:

$$\tau = \frac{10 \cdot \gamma \cdot d \cdot b + \frac{0.045 \cdot \gamma \cdot D^2}{R_{T0} + R_{T1}} \cdot \left( R_{T1} + 0.22 \cdot \frac{R_{T0}}{\lg \frac{D}{d}} \right) \cdot (-t_2)}{\left| I_{\text{ПЛ}} R_{i0} - \frac{(-t_2)}{R_{T0} + R_{T1}} \right|}$$

$I_n$  - струм плавки, А;

$R_{i0}$  - активний опір 1 м дроту за 0°С, Ом;

$\tau_4$  - час плавки, год;

$t_2$  - температура повітря, °С;

$\gamma$  - щільність ожеледиці або паморозі, г/см<sup>3</sup>;

$b$  - товщина стінки ожеледиці (сморозі), см;

$d$  - діаметр дроту, см;

$D$  - зовнішній діаметр дроту з ожеледицею (сморозу), см;

$R_{m0}$  - тепловий опір 1 м ожеледного циліндра при переході від внутрішньої до зовнішньої поверхні.

$$R_{t0} = \frac{\lg \frac{D}{d}}{273\lambda}$$

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності; для льоду  $\lambda = 2,27 \cdot 10^{-2}$ , для паморозі  $\lambda = (2,1 + 42 \gamma < +216 \gamma^3) \cdot 10^{-4}$  Вт/див.°С;

$R_{t1}$  - тепловий опір при переході з 1 м довжини зовнішньої поверхні покритого осадом дроту в повітря;

для ожеледиці

$$R_{t1} = \frac{1}{0,09D + 1,1\sqrt{VD}}$$

для паморозі:

$$R_{t1} = \frac{1}{0,04D + 1,1\sqrt{VD}}$$

Наведені формули враховують різні аспекти, такі як енергія, потрібна для розплавлення ожеледиці, тепловіддача в навколишнє середовище і нагрівання осаду до температури плавлення. При цьому враховується, що до включення струму плавки температура проводу та ожеледиці може бути близькою до температури повітря.

Допускається використовувати плавку ожеледиці на ПЛ, де дроти мають різні перетини, при умові, що різниця в перетині не перевищує одного щабель (наприклад, АС-50 і АС-70). У такому випадку струм плавки повинен бути безпечним для проведення через менший перетин і достатнім для оплавлення ожеледиці на проводі з більшим перетином.

## 2.3 Схеми плавки ожеледиці

Проектування пристроїв для плавки ожеледиці, передбачає дотримання деяких принципів:

- забезпечення швидкого збирання схеми плавки: уникати використання тимчасових перемичок і надавати перевагу роз'єднувачам для цього. Забезпечувати надійний зв'язок між комутаційними пунктами схеми плавки та диспетчерським пунктом;
- використовувати автоматичні пристрої для включення та відключення елементів схеми, що покращує керованість і ефективність процесу плавки;
- спрямовувати зусилля на створення схем плавки, використовуючи наявні на пунктах живлення робочі напруги та джерела струму, уникаючи встановлення додаткових спеціальних трансформаторів;
- в якості джерел живлення схем плавки можуть використовуватися збірні шини підстанцій, силові трансформатори та пересувні установки. Зазвичай для цих цілей використовуються силові трансформатори та шини підстанцій.

Ці принципи допомагають забезпечити ефективну та безпечну плавку ожеледиці на лініях електропередачі.

Підбір необхідного струму для плавки ожеледиці дійсно важливий процес, і його можна забезпечити різними способами, включаючи:

- регулювання напруги джерела живлення: Зміна напруги в джерелі живлення може впливати на струм плавки. Зазвичай дозволяється регулювання напруги в межах  $\pm (12,5-15) \%$  для трансформаторів, обладнаних пристроєм регулювання напруги під навантаженням;
- регулювання довжини лінії обігріву: Зміна довжини лінії, яка обігривається під час плавки, також може впливати на струм плавки;
- зменшення довжини лінії зменшує опір і допомагає збільшити струм;

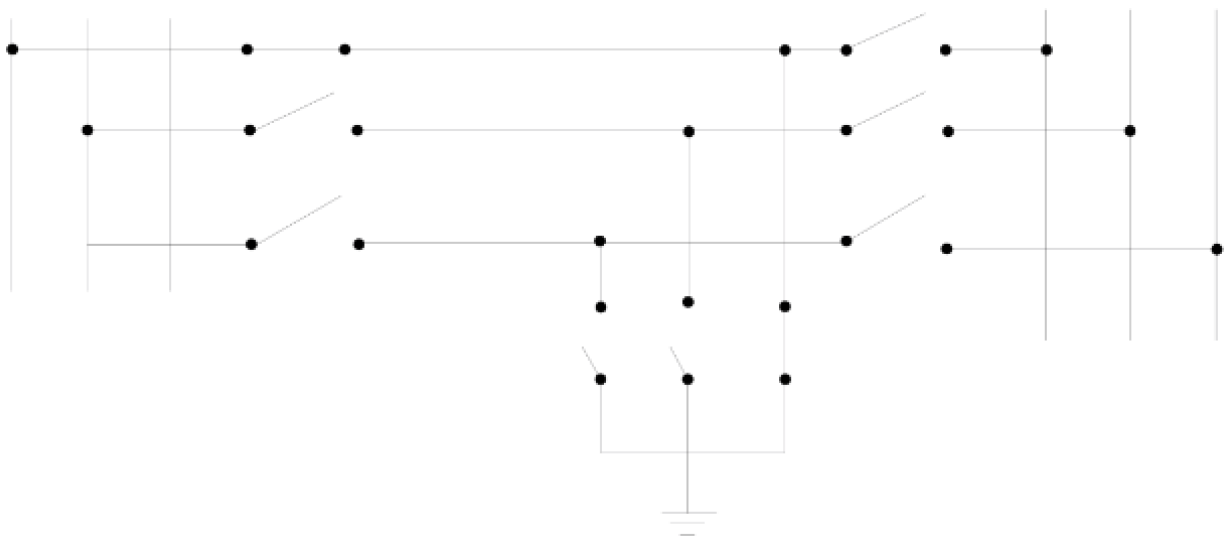
- виділення окремого трансформатора: Особливі заходи забезпечуються шляхом виділення окремого трансформатора для плавки ожеlediці. З цим підходом можливе ефективне регулювання струму та напруги для досягнення необхідних параметрів плавки.

Перерозподіл навантаження. На лініях, які не можуть бути відключені для плавки ожеlediці, можна використовувати спосіб перерозподілу навантаження, щоб збільшити струмове навантаження. На інших лініях, які можуть бути відключені на час плавки, можна використовувати пристрої коротких замикань (рис. 2.2).

Залежно від конкретних умов і потреб, ці методи можуть застосовуватися для забезпечення необхідного струму плавки та ефективності процесу.

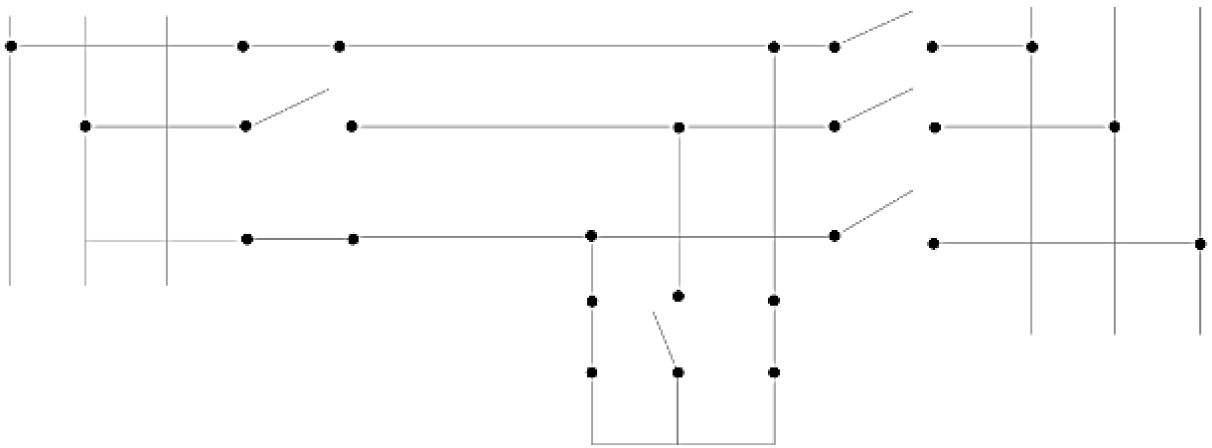
- а) однофазне коротке замикання на землю:

$$I_n = \frac{U_l}{\sqrt{3}(Z_{\Sigma}l + 2R_3)}$$



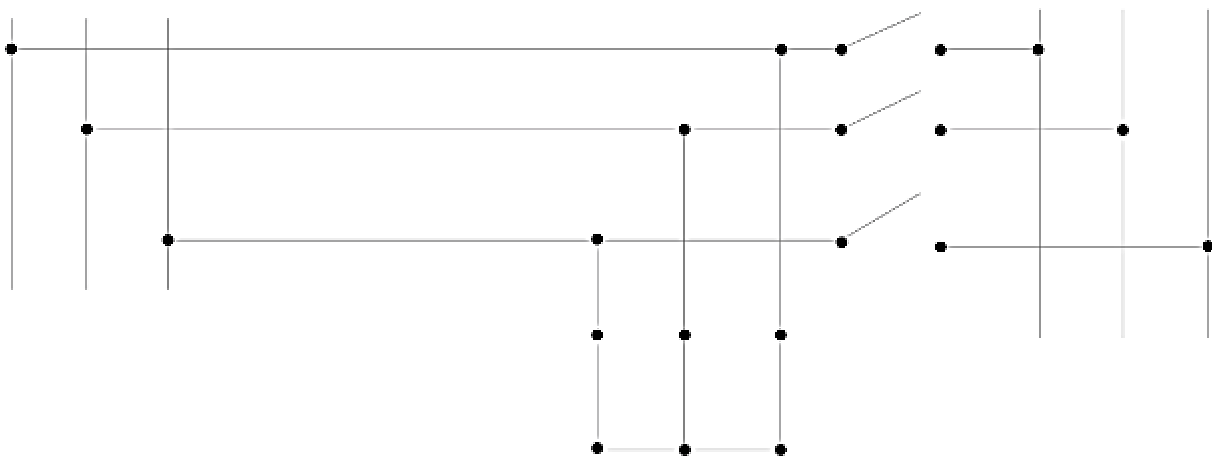
- б) двофазне коротке замикання (без землі):

$$I_n = \frac{U_l}{2Z_0l}$$



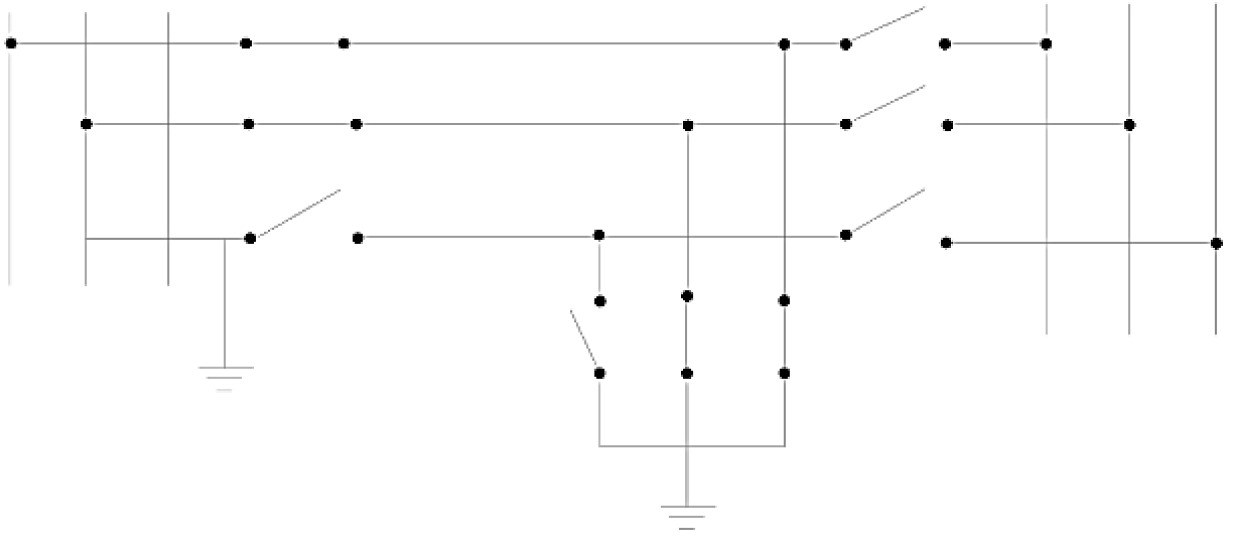
в) трифазне коротке замикання:

$$I_n = \frac{U_l}{\sqrt{3}Z_0l}$$



г) включення заземленої фази на лінійну напругу:

$$I_n = \frac{U_l}{Z_\Sigma l + 2R_3}$$



д) однофазне коротке замикання за способом «змійка»:

$$I_n = \frac{U_l}{\sqrt{3}(3Z_0l - 2Z_{0n}l + 2R_3)}$$



е) зустрічне включення фаз трансформаторів:

$$I_n = \frac{U_l}{Z_0l}$$



Рисунок 2.2 – Пристрої коротких замикань



У формулах, які супроводжують рисунок 2.2:

$I_n$  - струм плавки, кА,

$U_n$  - лінійна напруга джерела живлення схеми, кВ,

$Z_0$  - питомий повний опір трифазної лінії, Ом/км,

$Z_\Sigma$  - питомий повний опір контуру плавки "дріт-земля", Ом/км,

$L$  - довжина ділянки плавки, км,

$R_3$  - опір заземлювального пристрою, Ом.

При плавці ожеледиці в умовах, коли напруга джерела живлення не може підтримувати номінальну напругу при включенні плавки, розглядається система зі спрощенням до шин нескінченної потужності, що позначається як зазначено вами, замість величин  $z_{0L}$  і  $z_L$ . В такому випадку формули залишаються важливими для визначення необхідного струму плавки і інших параметрів процесу.

Плавка ожеледиці за схемою трифазного короткого замикання є найшвидшим і найбільш простим способом, який одразу впливає на всі три фази лінії. Це дозволяє ефективно і оперативно впливати на ситуацію з ожеледицею. При слабкому опорі лінії можна послідовно включати додаткові ділянки лінії для плавки, які ще не піддалися процедурі.

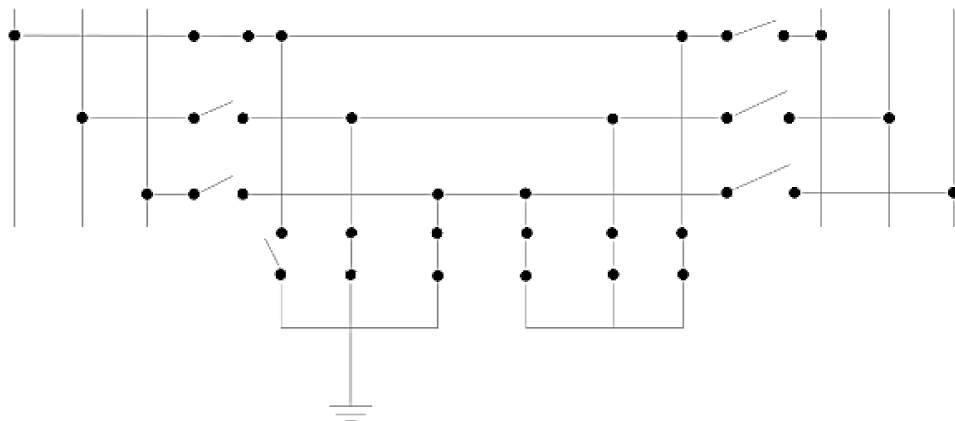
Установка короткого замикання проводиться за допомогою спеціальних пристроїв і забезпечує оперативне відключення лінії для впливу на ожеледицю. Заземлення ніжок лінійних роз'єднувачів допомагає швидко і надійно створити короткий замикання для плавки ожеледиці.

Плавка ожеледиці за схемою однофазного замикання на землю використовується у випадках, коли інші методи, такі як плавка за схемою трифазного короткого замикання або інші прості схеми змінного струму, не можуть бути застосовані через обмеження у потужності або неможливість їхнього використання.

Ця схема створює несиметричний режим у системі, що може призвести до перевантаження та перенапруги обладнання. Тому важливо перевірити обладнання на допустимість такого режиму перед використанням схеми плавки однофазного короткого замикання.

Час плавки за цією схемою триватиме більше, ніж при використанні схеми трифазного короткого замикання, але вона вимагатиме менше потужності. Найпоширеніші схеми для плавки однофазного короткого замикання показані на рисунку 2.3, і вони можуть бути використані в залежності від конкретних умов та обмежень системи електропостачання.

а) при послідовному з'єднанні фази з двома іншими фазами



б) при послідовному з'єднанні фази з іншою фазою

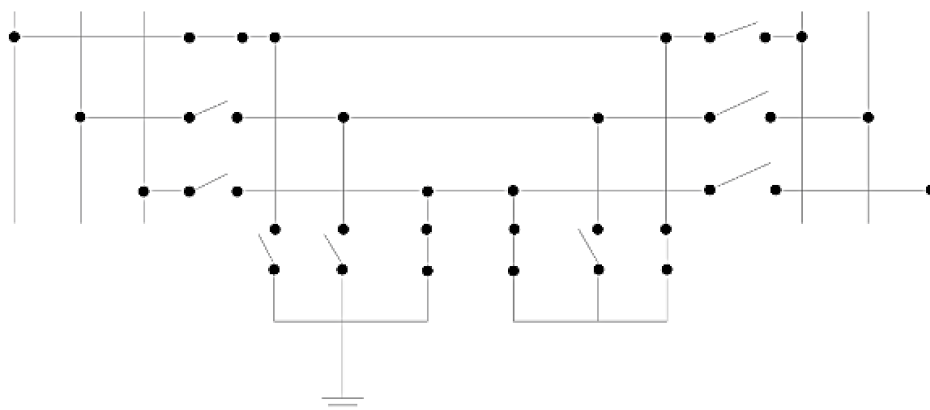


Рисунок 2.3 – Плавка за способом однофазного короткого замикання

Схема однофазного короткого замикання "змійка" використовується для плавки ожеледиці на всіх трьох фазах одночасно, що дозволяє значно скоротити час плавки порівняно з пофазним обігрівом проводів. У цій схемі три фази з'єднані послідовно, а кінець лінії заземлений. Це робить можливим одночасний обігрів всіх трьох фаз.

Однак схема "змійка" вимагає більше операцій зі складання схеми порівняно зі схемою трифазного короткого замикання. Це може бути важливим фактором при виборі методу плавки, особливо у випадках, коли потрібно швидко та ефективно впоратися з ожеледицею на лінії.

Схема однофазного короткого замикання, яка використовується для сталевих дротів, коли напруга підстанції недостатня для плавки по всій довжині ПЛ, також може бути варіантом в розрахунку на конкретні обставини та вимоги системи електропостачання (рис. 2.4).

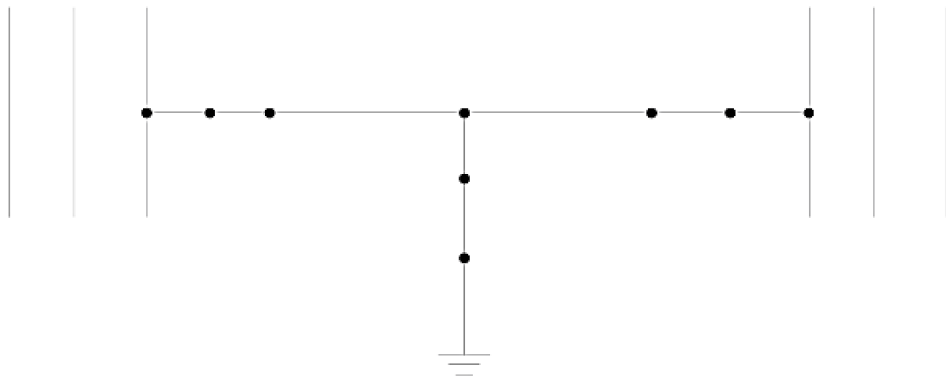


Рисунок 2.4 – Схема однофазного короткого замикання

Схема плавки проводиться з двох сторін, і провід заземляється в проміжній точці, що визначається розрахунками. При двофазному короткому замиканні спочатку проводиться плавка на двох фазах, а після оплавлення ожеледиці на цих фазах проводиться плавка на третій фазі разом з однією з оплавлених фаз.

Плавка за цим способом вимагає більше часу порівняно зі способом трифазного короткого замикання, але менше часу, ніж при схемі однофазного короткого замикання. В цьому випадку створюється несиметричний режим в

системі, і обладнання повинно бути перевірене на допустимість такого режиму.

Схема плавки за способом зустрічного включення фаз трансформаторів використовується для збільшення струму плавки або довжини лінії, яка обігривається. У цьому випадку трансформатори підключаються так, щоб активна та реактивна потужності були нерівномірно розподілені між ними. При цьому один трансформатор навантажується активною потужністю, а інший - реактивною. Зазначена схема може бути використана для збільшення струму плавки або подовження лінії, яка плавиться, коли потужність трансформатора недостатня для отримання необхідної величини струму плавки.

$$P_1 = UI \cos(\varphi - 30^\circ)$$

та віддає або отримує реактивну потужність

$$Q_1 = UI \sin(\varphi - 30^\circ)$$

Підстанція з відстаючим вектором напруги віддає або отримує активну потужність

$$P_2 = UI \cos(150^\circ - \varphi)$$

та віддає реактивну потужність

$$Q_2 = UI \sin(150^\circ - \varphi)$$

У цих формулах

$$\varphi = \arctg \frac{x}{R_0 \cdot \text{°C}}$$

Підстанція, яка має резерви активної потужності, повинна підключатися до лінії з випереджувальним вектором напруги, тоді як

підстанція, яка має резерви реактивної потужності, повинна підключатися з вектором напруги, що відстає.

Плавка за способом зустрічного включення фаз трансформаторів може бути застосована лише для ліній, які розташовані між підстанціями, що мають інші надійні електричні зв'язки між собою.

Складання і розбирання схеми плавки за способом зустрічного включення фаз може бути виконано швидко, якщо встановити спеціальний роз'єднувач на одному з кінців лінії, який здійснює поворот напруги на  $120^\circ$ .

Плавка за схемою включення заземленої фази або двох заземлених фаз на лінійну напругу застосовується, коли напруга, яку має підстанція, недостатня для плавки ожеледиці. При цьому нейтраль трансформатора повинна бути не заземлена. На лініях ДПР-27,5 кВ плавка може здійснюватися способом короткого замикання за відповідною схемою.

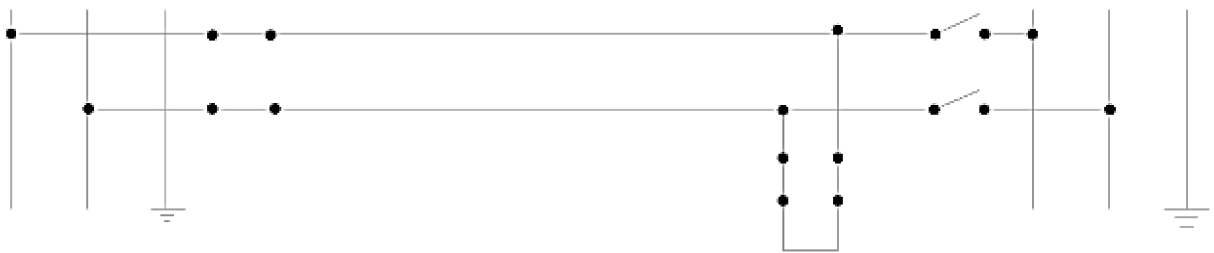


Рисунок 2.5 – Схема короткого замикання

Це рекомендації стосовно плавки ожеледиці за способом короткого замикання на лінії. Згідно з ними, всі роз'єднувачі поздовжнього секціонування на ділянці плавки мають бути включені. На період плавки всі трифазні споживачі повинні бути вимкнуті. Однофазні споживачі можуть отримувати живлення, але при цьому напруга між кожним проводом лінії і рейкою має знижуватися не більше, ніж на 13 %, без урахування падіння напруги від навантаження.

Ці заходи призначені для безпечної та ефективною плавки ожеледиці на лінії і забезпечення нормальної роботи системи після завершення процесу

плавки. Плавка ожеледиці є важливим процесом для забезпечення надійності та безпеки електроенергетичних систем під час холодних погодних умов.

Струм плавки

$$I_n = \frac{U_l}{2Z_{cp}l},$$

де  $U_l$  - лінійна напруга на шинах, кВ.

З урахуванням падіння напруги від тягового навантаження та навантаження струмом підігріву слід приймати:

$$U_{л} = 0.9 \cdot U_{н}$$

$Z_{cp}$  - середній опір проводу, Ом/км, що визначається за довідковою таблицею.

Важливі аспекти плавки ожеледиці на лініях ДПР (ділянках з розподільними тяговими підстанціями). Опір проводу визначається з урахуванням середнього опору проводу, що може бути визначений за допомогою таблиці.

За підвищених струмових навантажень, таких як струм плавки, тягові трансформатори можуть бути значно навантажені. Тому в таких ситуаціях може бути необхідно включати їх на паралельну роботу для забезпечення потрібної потужності.

Також, іноді плавка на лініях ДПР може бути здійснена без перерви живлення для трифазних та однофазних споживачів за двостороннього різнофазного включення проводів лінії за вказаною схемою (рис. 2.6). Це може бути корисним для зменшення впливу плавки на постачання електроенергії споживачам під час плавки ожеледиці.

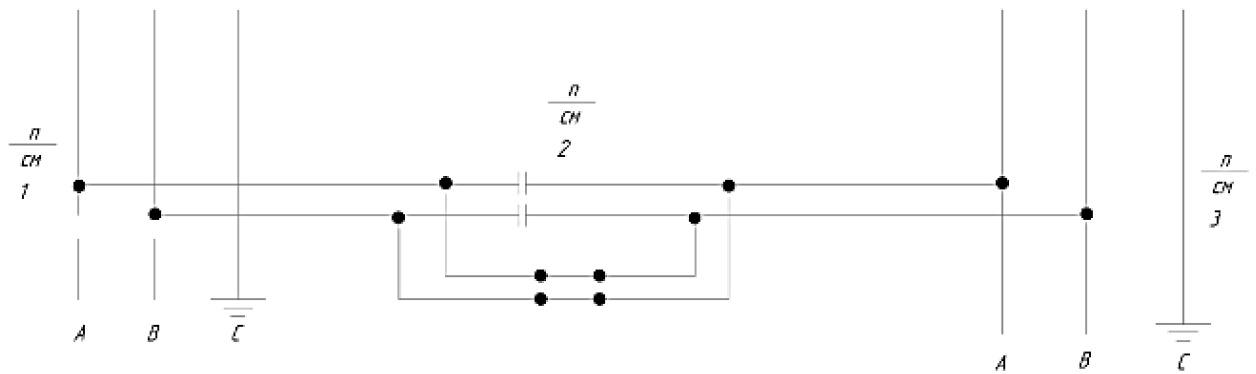


Рисунок 2.6 – Схема двостороннього різнофазного включення проводів лінії

Ви надали важливі вказівки щодо струму плавки при плавці на лініях ДПР, які живляться від двох сусідніх підстанцій різних типів по чергуванню фаз.

Якщо дві сусідні підстанції належать до різних типів по чергуванню фаз, і напруга в системі 25 кВ, то при плавці можливе живлення як трифазних, так і однофазних споживачів. Лінійна напруга знижується не більше, ніж на 13% в середині лінії (без урахування падіння напруги від навантаження). Таке зниження напруги частково може бути компенсоване підйомом напруги на 5% на кінцях лінії.

У випадку, коли дві сусідні підстанції належать до одного типу, при плавці можливе живлення лише однофазних споживачів, з таким самим зниженням напруги на 13%. Трифазні споживачі повинні бути відключені під час плавки.

Струм плавки розраховується згідно з наведеними формулами, і величина цього струму буде залежати від конкретних параметрів лінії та споживачів, які підключені до неї.

$$I_{\text{п}} = \frac{0.87 \cdot U_{\text{л}}}{z_{\text{ср}} \cdot L},$$

а при підстанціях одного типу:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л}}}{z_{\text{ср}} \cdot L}$$

Тут лінійна напруга  $U_{\text{л}}$  з урахуванням падіння напруги від тягового навантаження та навантаження струмом підігріву слід приймати  $0,9 U_{\text{н}}$ ;

$Z_{\text{ср}}$  -середнє опір, Ом/км, по таблиці.

Ці вказівки стосуються впливу тягового навантаження на опір  $Z_{\text{ср}}$  лінії під час плавки ожеледиці на лініях ДПР:

- при живленні від підстанцій одного типу, вплив тягового навантаження на опір  $Z_{\text{ср}}$  незначний через невеликий струм в рейках. Таким чином, цей вплив можна ігнорувати;
- при живленні лінії від підстанцій різних типів, взаємодія від тягового навантаження може вплинути на опір  $Z_{\text{ср}}$  і, отже, змінити величину струму підігріву проводів. Межі цих змін потрібно визначити дослідним шляхом, а під час плавки слід постійно контролювати величину струму підігріву;
- не рекомендується застосовувати схему плавки за способом підігріву проводів на ділянках, де захист ліній зв'язку та інших комунікацій від небезпечного індуктивного впливу тягової мережі здійснено відсмоктуючими трансформаторами, особливо, якщо захисна дія оболонки кабелю є недостатньою. Тобто в таких умовах застосування схеми плавки ожеледиці з підігрівом проводів може бути небезпечним для комунікацій;
- на електрифікованих ділянках постійного струму плавка ожеледиці на лініях ДПР 6 - 10 кВ може бути здійснена від шин 3,5 кВ за схемою, зображеною на рисунку 2.7.

Вибір схеми плавки та урахування впливу тягового навантаження на опір лінії та струм підігріву повинні бути обґрунтовані і здійснені з належним розрахунком та обережністю, щоб забезпечити безпеку та надійність системи електропостачання.



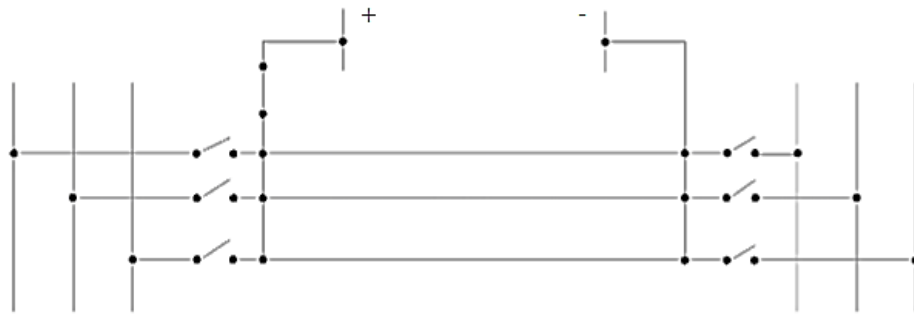


Рисунок 2.7 – Схема плавки ожеледиці на ПЛ 6 - 10 кВ від шин 3,5 кВ

Ця інформація пояснює, що плавка ожеледиці проводиться на відключеній лінії одночасно на трьох проводах ПЛ, і при цьому не допускається застосування автоблокування, оскільки це може призвести до перепалу лінійних трансформаторів ЗМ. Якщо необхідно застосувати цю схему, у ланцюг первинних обмоток цих трансформаторів включають спеціальні розділові конденсатори, які запобігають протіканню по них постійного струму.

Розділові конденсатори використовуються для ізоляції постійного струму від лінійних трансформаторів та іншого обладнання, щоб уникнути негативних наслідків, таких як перепал трансформаторів або пошкодження інших компонентів системи. Вони розміщені в ланцюгу первинних обмоток трансформаторів і використовуються для компенсації впливу постійного струму під час плавки ожеледиці.

Струм плавки

$$I_d = \frac{U_d}{r \cdot L}$$

де  $r$  - омичний опір одного дроту ПЛ, Ом/км;

$L$  – довжина зони плавки.

При надто великій довжині зони може бути застосована схема (рис. 2.8).

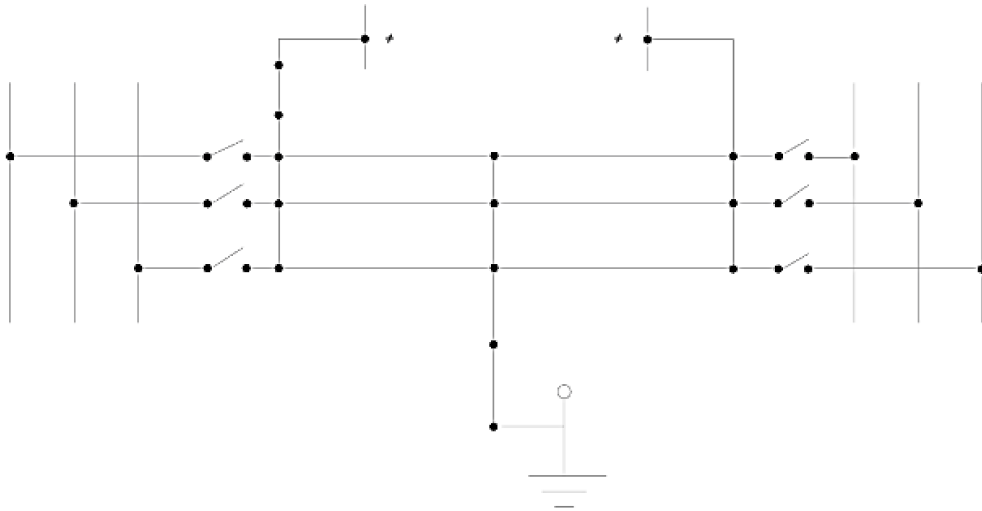


Рисунок 2.8 – Схема плавки при великій довжині

Повний опір  $Z$  1 км ПЛ при змінному струмі визначається за відомою формулою

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2},$$

де  $r$  і  $x$  - активний та індуктивний опір дроту при частоті 50 Гц, Ом/км.

Застосування схеми плавки ожеледиці за допомогою випрямленого струму на ділянках постійного струму (ПЛ). Основні кроки для цієї схеми включають наступне:

- відключення автоблокування: Лінію електропостачання автоблокування відключають від системи для забезпечення плавки ожеледиці;
- перекладання живлення пристроїв автоблокування: Живлення пристроїв автоблокування перекладають на резервну лінію;
- подача випрямленого струму: Випрямлений струм постачається безпосередньо від шин 3,3 кВ тягової підстанції та проходить по всіх трьох проводах лінії автоблокування, які з'єднані паралельно;
- з'єднання на кінці зони плавки: На кінці зони плавки дроти лінії з'єднують з мінусовою шиною суміжної підстанції або із середньою точкою колійного дроселя в середині міжпідстанційної зони;

- розрахунок мінімальної і максимальної довжини зон: Мінімальна та максимальна довжина зон плавки, у межах яких забезпечується струм плавки ожеледиці, визначається за відповідними формулами.

Ця схема дозволяє забезпечити плавку ожеледиці на лініях постійного струму без перегріву проводів, не покритих ожеледицею. Розрахунки мінімальної та максимальної довжини зон допомагають визначити оптимальні параметри для забезпечення цього процесу.

$$L_{\text{пл. min}} = \frac{U_d}{k_t \cdot r \cdot I_{\text{пл. max}}}$$

$$L_{\text{пл. max}} = \frac{U_d}{k_t \cdot r \cdot I_{\text{пл. min}}}$$

$U_d$  - випрямлена напруга на шинах тягової живильної підстанції, В;

$r$  - погонний омичний опір дроту, Ом/км.

Максимальне  $I_{\text{пл. max}}$  і мінімальне  $I_{\text{пл. min}}$  значення можливого струму плавки ожеледиці для відповідної марки проводів дано в таблиці.

Для здійснення схеми плавки ожеледиці з використанням випрямленого струму на живильній тяговій підстанції А застосовують такі елементи та кроки:

- роз'єднувач Р1. Цей роз'єднувач встановлюється на тяговій підстанції А і приєднується до запасної шини розподільного пристрою (РУ) 3,3 кВ;
- запасна шина РУ 3,3 кВ. Використовується для подачі випрямленої напруги під час плавки ожеледиці;
- випрямлена напруга. Щоб створити випрямлену напругу, включають шиноз'єднувальний вимикач ШСВ, який забезпечує подачу випрямленої напруги на лінію автоблокування;
- Лінія автоблокування. Лінія, на яку подається випрямлена напруга, для забезпечення процесу плавки ожеледиці.

Ця схема дозволяє ефективно використовувати випрямлену напругу для плавки ожеледиці на лініях постійного струму і забезпечити безперебійну роботу живильної тягової підстанції при негоді і обледенінні проводів.

Розглянемо процес плавки ожеледиці на двох тягових підстанціях (позначених як А і Б) та лінії між ними. Для здійснення цієї схеми необхідно виконати наступні дії:

- 1) Встановити роз'єднувач Р1 на тяговій підстанції А та приєднати його до запасної шини розподільного пристрою (РУ) напруги 6 кВ (або 10 кВ). На цю запасну шину подається випрямлена напруга шляхом включення шиноз'єднувального вимикача ШСВ.
- 2) Провести перемичку з дроту ПС-4000 відповідного перерізу від роз'єднувача Р1 до РУ напруги 6 кВ (або 10 кВ) автоблокування на обох осередках РУ.
- 3) Встановити автоблокування в обох осередках РУ на ізоляторах розподільних шин та закріпити на них по три шунти.
- 4) Встановити комплект реле для захисту ЗП (замикання проводів) лінії та трансформаторів, підключених до неї, під час плавлення ожеледиці у РУ автоблокування на обох підстанціях А і Б.
- 5) Встановити виконавчі реле цього захисту в осередку запасного швидкодіючого вимикача на тяговій підстанції А і прокласти необхідні контрольні кабелі.
- 6) При складанні ланцюга плавки ожеледиці підключити розподільні шини РУ автоблокування до знеструмлених шин за допомогою знімних перемичок. Це слід робити тільки на період плавки ожеледиці після відключення та заземлення відповідного фідера.
- 7) На тяговій підстанції Б повторити той самий ланцюг комутації, що і на підстанції А, але без включення шунтів та установки пристроїв захисту ЗП. Роз'єднувач Р2 на підстанції Б повинен бути приєднаний до мінусової шини для уникнення перегріву високовольних

обмоток трансформаторів напруги, яка випрямляється під час плавки ожеледиці.

- 8) Для уникнення перегріву обмоток трансформаторів напруги, яка випрямляється під час плавки ожеледиці, на обох підстанціях А і Б відключити нульові точки цих трансформаторів від землі.
- 9) Якщо відстань між сусідніми тяговими підстанціями велика, то плавку ожеледиці можна здійснювати іншою схемою, де всі проводи відключеної лінії з'єднуються з рейковою мережею в середині між тяговими підстанціями. У цьому випадку заземлення проводів проводиться поблизу посту секціонування.

Спосіб плавки ожеледиці із зазначеними заходами забезпечує надійну роботу тягових мереж та уникнення небажаних наслідків під час плавки ожеледиці на лінії між тяговими підстанціями.

$$L_{\text{пл. min}} \leq \frac{L_{\text{п/ст}}}{2} \leq L_{\text{пл. max}}$$

Якщо відстань між сусідніми тяговими підстанціями становить більше 16 км, то можлива альтернативна схема плавки ожеледиці. В цьому випадку плавка ожеледиці забезпечується видаленням суміжних підстанцій на відстані від 15 до 32 км один від одного. Плавку ожеледиці на проводах ЛЕП автоблокування можна проводити одночасно з плавкою на проводах контактної мережі. При цьому подача напруги в ланцюг плавки обох ліній може бути здійснена від однієї і тієї ж тягової підстанції. Проте важливо враховувати, що при петлевій схемі плавки ожеледиці на контактній мережі одночасна плавка на ЛЕП автоблокування неможлива.

Особливості ліній електропередачі (ЛЕП) автоблокування, які є розподільними пристроями, вимагають наявності захисту від замикань та обривів (ЗП) під час плавки ожеледиці. У нормальному режимі роботи плавки ожеледиці, всі проводи лінії мають практично однаковий опір, і тому

потенціал кожного проводу відносно землі є однаковим. Це означає, що напруга між проводами відсутня, і випрямлений струм плавки не розгалужується в обмотки лінійних трансформаторів, підключених до лінії.

Проте, ця рівновага порушується у випадках обриву одного з проводів ЛЕП автоблокування або його замикання на землю, а також при замиканні проводів лінії між собою. У таких ситуаціях виникає значна напруга між окремими проводами, що призводить до проходження випрямленого струму через високовольтні обмотки лінійних трансформаторів. Це може призвести до неприпустимого перегріву трансформаторів та їх виходу з ладу. Крім того, при замиканні проводів лінії між собою або на землю в зоні плавки можливе їх перегрівання.

У разі аварійних ситуацій, захист від замикань та обривів вимикає ланцюг плавки ожеледиці, впливаючи на ланцюги управління швидкодіючим вимикачем ШСВ. Принципову схему захисту ЗП, розроблену ПКБ ЦЕ, можна побачити на рисунку 2.9.

Реле Р1, Р2 і Р3 підключені до шунтів і вимикаються у випадках, коли струм в будь-якому проводі лінії перевищує максимально допустиме значення під час плавки ожеледиці. Ці реле включені диференціально і вимикаються, коли струми в окремих проводах лінії не збігаються, що може статися при обриві проводів або їх замиканні між собою або на землю.

Вплив цих реле на ланцюг керування вимикачем ШСВ може бути реалізований двома способами. Якщо котушки вимикача ШСВ мають ізоляцію, яка розрахована на напругу 4 кВ, то може бути використаний варіант, показаний на рисунку 2.9.б. У випадках, коли котушки не мають такої ізоляції, потрібно використовувати ізолюючий трансформатор, як показано на рисунку 2.9.в.

У разі відсутності резервної лінії електропередачі (ЛЕП) застосування розглянутої схеми призводить до необхідності припинення електропостачання системи контролю та безпеки (СЦБ) протягом періоду, коли виникає загроза плавлення ожеледиці. Результати експлуатаційних випробувань даної схеми,

проведених на Придніпровській залізниці, підтвердили її високий рівень ефективності.

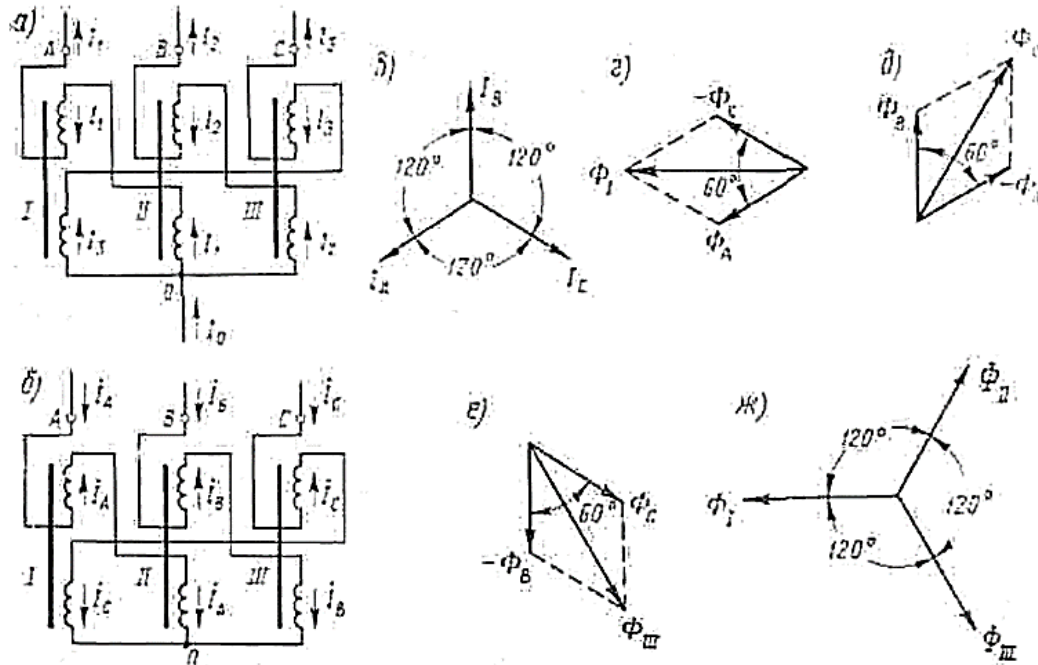


Рисунок 2.9 – Схеми (а і б) з'єднання обмоток дроселя та векторні діаграми його струмів та магнітних потоків

Метод, описаний у схемі накладання випрямленого струму через дроселі (зображено на рис. 2.9), дозволяє проводити профілактичний підігрів проводів лінійної електропередачі (ЛЕП) системи автоблокування, яка працює під напругою 6 і 10 кіловольт, без необхідності зупинки нормального електропостачання для підключених споживачів. Цей метод включає в себе одночасну передачу електричної енергії як змінним, так і постійним струмом по одній і тій же лінії. Схема була розроблена і вперше впроваджена співробітниками Південної та Донецької залізниць. За цією схемою підігрів проводів здійснюється за допомогою випрямленого струму, який надається спеціальним випрямним агрегатом тягової підстанції постійного струму, призначеного саме для цієї мети. Струм підігріву з цього агрегату подається в усі три провідники ліній через нульову точку спеціального трифазного дроселя, розташованого на початку області боротьби з ожеледицею. Важливо

правильно підключити дросель на тяговій підстанції, щоб трансформатори струму фідера системи автоблокування не були включені в ланцюг нагрівання проводів (див. рис. 2.10). Це робиться для того, щоб уникнути насичення сердечників трансформаторів постійним магнітним потоком, що може призвести до порушення роботи захисту фідера автоблокування та його вимірювальних кола. Той же дросель підключається на кінці цієї області і служить для з'єднання проводів ЛЕП автоблокування з заземленою системою сусідньої підстанції.

Для повного усунення можливості відгалуження струму з частотою 50 Гц з лінійної електропередачі (ЛЕП) в рейкові ланцюги системи автоблокування, які працюють на сигнальному струмі з частотою 50 Гц, на рис. 2.9, при використанні схеми, в якій зворотні дроти обмежені, слід використовувати виключно заземлення.

Використання тягових рейок для цієї цілі в умовах безпеки руху поїздів є неприпустимим. Для уникнення гальванічного зв'язку проводів з рейками, нульові точки живильного випрямного агрегату і дроселя повинні бути підключені до контуру заземлення тягової підстанції.

Щоб запобігти нагріванню ґрунту, що прилягає до контуру заземлення, і яке може призвести до різкого збільшення опору струму розтікання, струм підігріву в кожному проводі не повинен перевищувати значення, що визначається за допомогою вказаної формули.

$$I_n \leq \frac{100}{3R_3}$$

де  $R_3$  - опір розтіканню контуру заземлення. Для контурів заземлення тягових підстанцій згідно з ПУЕ величина  $R_3$  не повинна перевищувати 0,5 Ом.

Для визначення найбільшої та найменшої довжин зон протиожеледного нагріву проводів можна використовувати наступні співвідношення, замінивши струми плавки струмами підігріву:



$$L_{\max} = U_{\text{плавка}} / E_{\max},$$

$$L_{\min} = U_{\text{плавка}} / E_{\min}.$$

Розрахунки за цими формулами показують, що для ЛЕП, де використовується провід ПСО-5, як це зазвичай буває на більшості електрифікованих ділянок, можливий протиожеледний підігрів на відстані від 13 до 20 кілометрів між тяговими підстанціями.

Найважливішими елементами цієї схеми є дроселі. Щоб забезпечити високий опір для змінного трифазного струму та одночасно менший опір для постійного струму, їх обмотки повинні бути з'єднані в зигзаг (див. рисунок нижче).

Тепер розглянемо принцип дії трифазного дроселя зі сталевим сердечником та обмотками, з'єднаними в зигзаг. На рисунку видно, що обмотка кожної фази дроселя поділена на дві рівні частини. На кожному стрижні сердечника дроселя розташовані по дві такі напівобмотки, які належать різним фазам, і початок однієї напівобмотки з'єднаний з початком фази зигзагу.

Використовуючи принцип суперпозиції, спочатку розглянемо утворення магнітного потоку в кожному стрижні сердечника, викликаного протіканням по обмотках дроселя постійного струму для боротьби з ожеледицею. Нехай величини постійного струму в приводах фаз А, В і С системи автоблокування відповідають  $I_1$ ,  $I_2$  і  $I_3$  (див. рисунок 2.9, а). Загальний постійний струм  $I_0$ , який проходить через нульову точку дроселя, дорівнює арифметичній сумі трьох цих струмів, тобто  $I_0 = I_1 + I_2 + I_3$ .

На стрижні  $I$  дроселя розташовані половини обмоток фаз А і С, через які проходять струми  $I_1$  і  $I_3$ , кожен з яких створює в стрижні  $I$  відповідний постійний магнітний потік, пропорційний величині струму. Початки напівобмоток фаз А і С, розташованих на стрижні  $I$ , з'єднані між собою протилежними напрямками, тому магнітний потік  $\Phi_I$ , який виникає в стрижні

І завдяки струму  $I_1$ , протилежний магнітному потоку  $\Phi_3$ , що створюється в тому ж стрижні завдяки струму  $I_3$ . Отже, постійний магнітний потік, що виникає одночасно від дії струмів  $I_1$  і  $I_3$  в стрижні І, пропорційний різниці цих струмів, тобто  $I_1 - I_3$ . Аналогічний процес компенсації постійного магнітного потоку відбувається в інших стрижнях ІІ і ІІІ серцевого дроселя.

У випадку, коли струми в проводах лінії однакові, настає повна взаємна компенсація постійних магнітних потоків у всіх стрижнях.

В конструкції дроселя, як описано, наявність невеликої різниці в омичному опорі окремих проводів лінії не призводить до насичення сердечника від проходження значного постійного струму через його обмотки, що є важливим для боротьби з ожеледицею.

Утворення магнітного потоку в сердечнику трифазного дроселя, обумовленого проходженням через його обмотки трифазного змінного струму, викликаного робочою напругою лінії електропередачі (ЛЕП), можна спостерігати на рисунку 2.9, б. Припустимо, що під дією робочої напруги в фазах А, В і С дроселя виникають змінні струми, відповідно позначені як  $I_A$ ,  $I_B$  і  $I_C$ .

З векторної діаграми на рисунку видно, що кут між фазовими струмами становить 120 градусів. Величини цих фазових струмів близькі один до одного через те, що відмінність робочої напруги між проводами лінії електропередачі невелика, і обмотки фаз дроселя мають практично однаковий опір для змінного струму.

Під час проходження кожної напівобмотки фази дроселя змінного струму в стрижні сердечника утворюється змінний магнітний потік, який пропорційний величині цього струму і має близький фазовий кут. З огляду на те, що на стрижні І дроселя розташовані дві зустрічно включені напівобмотки, по яких проходять струми фаз А і С, результуючий змінний магнітний потік  $\Phi_1$  в стрижні І, викликаний спільною дією струмів  $I_A$  і  $I_C$ , визначиться як векторна сума магнітних потоків  $\Phi_A - \Phi_C$ . Аналогічним чином формуються змінні магнітні потоки  $\Phi_2$  і  $\Phi_3$  в стрижнях ІІ і ІІІ. У результаті у сердечнику

дроселя під впливом робочої напруги ЛЕП утворюється трифазний змінний магнітний потік, що вказано на рисунку. Це призводить до того, що дросель має дуже високий опір для змінного струму.

Отже, трифазний дросель в розглянутій конструкції має здатність одночасно мати низький опір для постійного струму і надзвичайно великий опір для змінного струму, що дозволяє використовувати його для боротьби з ожеледицею на проводах, не надмірно навантажуючи трансформатори систем автоблокування на тягових підстанціях, які живлять навантаження, створене пристроями автоблокування і підключеними до лінії двома дроселями. Випробування показали, що додаткова імпеданс, яку додається від живильного трансформатора системи автоблокування двома дроселями потужністю 320 кВА кожен, складає приблизно 12 кВА, що не призводить до надмірного навантаження трансформаторів живлення ліній електропередачі, які зазвичай мають потужність від 30 до 50 кВА.

Для виготовлення спеціальних дроселів можна використовувати трифазні потужні трансформатори, проведши відповідне перемотування їх високовольтної обмотки та перепайку її виводів. Дроселі для ЛЕП, де використовуються біметалеві або кольорові металеві проводи, повинні мати велику потужність, що складає приблизно 1000 кВА.

Комутація аналізованої схеми подібна до тієї, яку було показано на попередньому рисунку. Однак у цій схемі не потрібні установки захисту ЗП (захисту від замикання проводів) під час підігріву проводів, оскільки функції захисту виконуються самими дроселями.

Фактично, при від'єднанні одного з проводів лінії або при замиканні між ними порушується симетрія магнітної системи дроселя, що призводить до його насичення постійним магнітним потоком через значну різницю величин випрямленого струму в окремих проводах. Це призводить до різкого зниження опору обох дроселів для змінного струму, що в свою чергу призводить до збільшення навантаження трансформатора, що живить лінію електропередачі автоблокування. Це викликає спрацьовування реле максимального захисту

відповідного фідера системи автоблокування на тяговій підстанції. Одночасно з відключенням масляного вимикача фідера системи автоблокування контактами вихідного реле цього захисту замикається ланцюг виконавчого реле, що викликає відключення швидкодіючого вимикача ланцюга випрямленого струму підігріву. Таким чином, в аварійному режимі відбувається відключення лінії електропередачі автоблокування як зі сторони змінного, так і зі сторони випрямленого струму. Заземлення однієї з фаз лінії є аварійним режимом для дроселя, оскільки напруга на незаземлених проводах відносно землі підвищується до лінійного рівня.

Для можливості автоматичного відключення лінії електропередачі автоблокування зі сторони змінного струму в цьому випадку необхідно перевести функції захисту від замикання проводів лінії на землю від сигналу до відключення масляного вимикача відповідного фідера системи автоблокування тягової підстанції. Одночасно повинно проводитися відключення швидкодіючого вимикача в ланцюгу струму підігріву при спрацьовуванні вихідного реле замикання на землю, що впливає на кола управління вимикача. Протягом усього часу підігріву проводів, автоматичне відновлення і автоматичний резервний ввід відповідного фідера системи автоблокування необхідно вимкнути з роботи.

Включення схеми підігріву проводів ЛЕП автоблокування може призвести до відгалуження частини випрямленого струму у високовольтні обмотки вимірювальних трансформаторів напруги на тяговій підстанції. Це може вплинути на правильну роботу цих трансформаторів і призвести до виходу їх з ладу. Для запобігання цьому, між нульовою точкою цих трансформаторів і контуром заземлення рекомендується включити конденсатори ємністю близько 1 мф. Ці конденсатори допоможуть відвести частину випрямленого струму від вимірювальних трансформаторів, зберігаючи їх функціональність.

Для уникнення резонансних явищ важливо також послідовно з цими конденсаторами підключити активний опір з величиною приблизно 10 кОм.

Це допоможе зменшити можливі резонанси і перешкоди, які можуть виникнути в системі під впливом випрямленого струму.

Навіть при наявності великого вхідного опору ЛЕП автоблокування, в несприятливих умовах, зокрема при близькому розташуванні ЛЕП та повітряних ліній зв'язку, важливо враховувати, що відсутність фільтрації випрямленої напруги, що живить ланцюг підігріву, може призвести до помітного збільшення перешкод у повітряних лініях зв'язку. Це особливо важливо в тих випадках, коли підігрів проводів проводиться одночасно на декількох міжпідстанційних зонах. Тому необхідно враховувати ці аспекти і можливість впливу схеми підігріву на інші системи при розробці та експлуатації цієї схеми.

Вирішення питання про необхідність захисту повітряних ліній зв'язку від індуктивного впливу, що може виникати через схему підігріву проводів ЛЕП автоблокування, дійсно варто визначати на практиці в конкретних місцевих умовах після комісійних випробувань, проведених енергетиками та зв'язківцями. Випробування дозволять виявити, як ця схема впливає на якість зв'язку і чи необхідно вживати заходів для зниження цього впливу.

Як варіант рішення проблеми може бути встановлення згладжувальних пристроїв, таких як реактори. У якості реактора може бути використаний індивідуальний реактор, який виділено випрямленому агрегату, або реактор спеціальної конструкції.

Якщо реактор спеціальної конструкції обрано як варіант, то можна виконати реактор, використовуючи дві-три котушки резонансного першого контуру, налаштованого на частоту 300 Гц. Такий реактор може мати високу індуктивність, що допоможе знизити ємність фільтра і уникнути індуктивного впливу на повітряні лінії зв'язку.

Практичні випробування розглянутої схеми на Південній і Донецькій дорогах підтвердили її ефективність, що підкреслює важливість вирішення цього питання на практиці і у відповідності до конкретних умов.

Виправлення впливу індуктивності на повітряні лінії зв'язку через додаткові дроселі та спеціальні схеми може бути ефективним підходом. Однак, цей підхід може створити додаткові вимоги до електромережі та її обладнання.

Згідно із схемою, яку ви описали, для плавці ожеледиці та профілактичного підігріву проводів на довгих зонах встановлюють додаткові дроселі в середині зони боротьби з ожеледицею. Це може призвести до збільшення кількості дроселів і загальної потужності у 2 рази, а це може призвести до перевантаження трансформаторів, які живлять лінію.

Схема з використанням виділених агрегатів і нормальною і зворотною полярністю може бути іншим варіантом рішення. При цій схемі використовується різнополярне двостороннє живлення ланцюга боротьби з ожеледицею. Однак, перед впровадженням такої схеми, важливо ретельно розрахувати і перевірити її вплив на електричну систему, зокрема, на трансформатори та інше обладнання. Також слід ретельно забезпечити правильне підключення виділених агрегатів для досягнення бажаних результатів.

Кожна конкретна ситуація може вимагати індивідуального підходу, і рішення має бути прийняте після аналізу усіх важливих аспектів та врахування всіх вимог і обмежень.

Схема з використанням проводів ПСО-5 і метод плавки ожеледиці відзначається ефективністю в профілактичному підігріві проводів і плавці ожеледиці на довгих ділянках лінії електропередачі. Вона дозволяє враховувати особливості кожного випадку, де знаходиться лінія і які зв'язки впливають на роботу автоблокування.

Схема також призводить до збільшення напруги між проводами ЛЕП автоблокування і землею під впливом випрямленої напруги, створеної струмом боротьби з ожеледицею. Ця результуюча напруга є результатом накладення амплітуд фазової робочої напруги і напруги випрямленого агрегату.

Важливо враховувати цю змінну напругу при проектуванні та обслуговуванні системи, особливо в умовах низьких температур і можливої ожеледиці. Такі напруги можуть впливати на роботу обладнання і вимагати додаткових заходів для забезпечення надійності і безпеки системи.

Зміна полярності ізоляції і інші аспекти, пов'язані із змінною напругою та випрямленням напруги, дійсно важливі при роботі зі схемами, які використовуються для боротьби з ожеледицею на лініях електропередачі. Важливо дотримуватися правил і норм, що стосуються ізоляції та безпеки обладнання в таких схемах.

Зміна напруги і напруги випрямленого струму може вплинути на безпеку обслуговування обладнання і роботу ізоляційних систем. В проектуванні і експлуатації системи необхідно враховувати ці аспекти, а також забезпечити надійну ізоляцію і безпеку всіх частин обладнання та інфраструктури.

Схема з використанням зрівняльних струмів і двостороннього живлення лінії зі суміжних тягових підстанцій з трансформаторами зі змінним зсувом лінійних напруг, як описано вами, може бути ефективним рішенням для протиожеледісного підігріву ЛЕП автоблокування та плавки ожеледиці без припинення електропостачання споживачів.

Ця схема дозволяє створити зрівняльні струми в лінії, що стимулюють плавку ожеледиці, але важливо врахувати всі технічні та безпекові аспекти при проектуванні та впровадженні такої системи. До цих аспектів входить відповідність стандартам та нормам безпеки, правильний розрахунок та налагодження обладнання, а також забезпечення безперебійності подачі електроенергії споживачам під час використання цієї схеми.

Важливо також забезпечити належну обслуговуваність і регулярну перевірку обладнання для забезпечення надійності та ефективності системи протиожеледісного підігріву.

Ви правильно вказали, що переєднання зовнішніх висновків трансформаторів для досягнення зсуву в лінійних напругах може бути

використаною альтернативою для забезпечення протиожеледісного підігріву ЛЕП автоблокування. Зміна групи з'єднання обмоток на групу Y/ $\Delta$ -11 дійсно змінює фазовий зсув лінійних напруг між сусідніми тяговими підстанціями на кут  $60^\circ$ ел.

Ця зміна фазового зсуву дозволяє використовувати зрівняльні струми, які обумовлені різницею векторів лінійних напруг, для протиожеледісного нагріву проводів ЛЕП. Ця схема має свої переваги, зокрема вона дозволяє використовувати наявні трансформатори без потреби у встановленні спеціальних трансформаторів зі змінним зсувом лінійних напруг. Важливо правильно спроектувати та налагодити систему, а також врахувати всі технічні та безпекові аспекти, щоб забезпечити надійну та ефективну роботу протиожеледісного підігріву ЛЕП автоблокування.

Розглядаючи векторну діаграму лінійних напруг і розподіл напруги вздовж ЛЕП автоблокування між тяговими підстанціями, можна зрозуміти, що напруга зменшується з віддаленням від живильних трансформаторів. У центрі міжпідстанційної зони, напруга досягає мінімального значення, і вона збільшується до максимального біля тягових підстанцій.

Важливо враховувати цей розподіл напруги при проектуванні системи протиожеледісного підігріву і при встановленні трансформаторів і анцапф на живильних трансформаторах. Як ви зазначили, компенсація зниження напруги може бути досягнута відповідною перестановкою анцапф. Важливо, щоб напруга, що підводиться до первинних обмоток трансформаторів, не перевищувала нормальний рівень більш ніж на 5%, оскільки це може вплинути на надійність та безпеку системи.

Таблиця з величинами опорів для сталелегюмінієвих проводів також важлива для правильного розрахунку системи протиожеледісного підігріву і визначення параметрів трансформаторів і трансформаторів анцапф. Урахування цих опорів допоможе забезпечити належний рівень напруги і підігріву проводів ЛЕП автоблокування в різних частинах мережі.



З врахуванням вашого опису, робочої напруги ЛЕП автоблокування і конкретних метеорологічних умов, очевидно, що можливий деякий діапазон довжини зони протижелезідного підігріву проводів. При зниженні напруги до 6 кВ, як ви вказали, довжина зони зменшується, і для забезпечення необхідного підігріву потрібно використовувати трансформатори меншої потужності (близько 250 кВА), щоб ефективно використовувати потужність та забезпечувати підігрів.

Коригування розрахунків для врахування конкретних метеорологічних умов, таких як температура і швидкість вітру, дозволяє оптимізувати довжину зони підігріву. Залежно від умов, це може призвести до збільшення допустимої довжини зони на 20-25%, що полегшує управління системою протижелезідного підігріву проводів.

Якщо необхідно забезпечити одночасний підігрів проводів на двох суміжних міжпідстанційних зонах, потужність трансформаторів живлення слід подвоїти, щоб вони могли надавати необхідну потужність для обох зон. Забезпечення потрібної потужності для підігріву на декількох зонах може вимагати уваги до ефективного розподілу трансформаторів і анцапф.

Для забезпечення необхідної потужності трансформаторів живлення на тягових підстанціях для системи протижелезідного підігріву проводів, трансформатори можуть бути підключені безпосередньо до шин 6 або 10 кВ тягової підстанції. Ця схема може бути корисною в тих випадках, коли живлення від шин власних потреб підстанції недостатнє для встановлених трансформаторів.

Для забезпечення захисту лінії під час підігріву використовують струмові реле, розміщені на фідерах підігріву. Вони відключають масляні вимикачі живильних трансформаторів при спрацюванні. Перевагою цієї схеми є відсутність впливу підвищеної напруги на ізоляцію лінії і обладнання, а також відсутність додаткового впливу на повітряні лінії зв'язку та рейкові ланцюги автоблокування.

Ця схема може бути ефективною і безпечною для використання під час протиожеледісного підігріву проводів ЛЕП автоблокування, забезпечуючи необхідну потужність і забезпечуючи захист від надлишкового струму і підвищеної напруги. При проведенні підігріву проводів вздовж лінії можливе змінення фазового кута лінійної напруги. Зважаючи на те, що довжина рейкового ланцюга автоблокування становить зазвичай 1-2 км, різниця в фазовому куті напруги між її кінцями невелика, всього кілька градусів. Це не може спричинити порушення роботи двоелементних реле системи централізації та блокування (СЦБ).

Проте на ділянках, які межують з кінцем і початком зони боротьби з ожеледицею, у випадку використання двоелементних реле в рейкових ланцюгах необхідно встановити по два лінійних трансформатори на ЛЕП автоблокування для забезпечення можливості живлення пристроїв даного рейкового ланцюга від однієї фази. Це пов'язано з можливим зсувом фазового кута лінійних напруг на  $60^\circ$  при роботі схеми підігріву на вказаних ділянках.

У випадках, коли можливе подання електроенергії на лінію з високовольтною лінією передачі всередині довгого міжпідстанційного відрізка, застосування зазначеного методу профілактичного підігріву проводів (а також іноді для плавки ожеледиці на них) може бути значно розширене. З метою забезпечення цього, схему можна змінити так, щоб всередині зони живлення лінії, при використанні протиожеледневого підігріву проводів або при плавці ожеледиці, живлення надавалося з ЛЕП-10 (35) кВ через знижувальний трифазний трансформатор відповідної потужності (або безпосередньо з ЛЕП-6 кВ). На кінцях зони боротьби з ожеледицею на тягових підстанціях встановлюють трансформатори живлення з однаковою групою з'єднання обмоток. Знижувальний трансформатор всередині лінії (або ЛЕП-6 кВ) та трансформатори на тягових підстанціях повинні бути фазовані так, щоб забезпечити зсув між лінійними напругами на кут  $60^\circ$  електричних.

Ця схема відзначається високою оперативністю, здатною переходити від робочого режиму до режиму профілактичного підігріву проводів і назад

протягом хвилини. У випадку обладнання телеуправлінням цю схему можна легко впровадити в дію безпосередньо енергодиспетчером. Протягом усього періоду підігріву проводів, пристрої автоматичного повторного вмикання (АПВ) та автоматичного вмикання резерву (АВР) повинні бути вимкнені.

Схема, в якій для підігріву проводів ЛЕП автоблокування використовується накладання однофазного струму через дроселі, є ще однією ефективною стратегією боротьби з ожеледицею без припинення електропостачання споживачів. Ця схема дозволяє підігрівати проводи для запобігання утворенню ожеледиці.

Сутність цієї схеми полягає в тому, що однофазний струм з частотою 50 Гц накладається на всі три дроти ЛЕП автоблокування через дроселі, підключені до нульової точки кожного з них. Це дозволяє створити струм, який протікає через проводи та підігріває їх, запобігаючи утворенню ожеледиці. Ключовим моментом в цій схемі є правильне зсування фазового кута напруги трансформаторів на сусідніх підстанціях на кут  $180^\circ$  електричних. Це забезпечує оптимальне співпрацю та сумує напруги для створення необхідного струму підігріву проводів.

Способи підігріву і захисту ЛЕП автоблокування від ожеледиці визначаються конкретними умовами і технічними можливостями лінії. Кожен спосіб має свої переваги та обмеження, і вибір залежить від специфічних вимог та обставин.

Описана схема пристрою плавки голольоду (ППГ) з використанням швидкодіючого високовольтного дугового короткозамикача (БДВК) є важливим елементом для забезпечення надійного захисту та уникнення серйозних наслідків несиметричних коротких замикань в електроенергетичних системах (рис. 2.10).

Основна принципова схема включає в себе наступні компоненти:

- швидкодіючий високовольтний дуговий короткозамикач (БДВК). Цей компонент відіграє ключову роль у системі. Він здатен переводити несиметричні короткі замикання в трифазне замикання

з меншими струмами. Це робить систему більш стабільною та надійною;

- допоміжні електроди. Допоміжні електроди використовуються для створення електричної дуги між силовими електродами в разі активації системи захисту;
- тиристорний контактор (ТК). Тиристорний контактор відповідає за введення сигналу на відмикання і активацію системи ППГ. Він живиться від шин 0,4 кВ.
- система працює наступним чином: коли виникає несиметричне коротке замикання, пристрої захисту віддають сигнал на відмикання ТК. Це призводить до створення електричної дуги між допоміжними електродами, яка шунтує проміжки між силовими електродами, тим самим виробляючи трифазне замикання з меншими струмами. Це допомагає запобігти серйозним пошкодженням системи та забезпечити безпеку електромережі.

Важливо дотримуватися відповідних стандартів та правил для належної роботи системи ППГ і забезпечення безпеки електропостачання.

Підтримка необхідної напруги для тиристорного контактора (ТК) є важливою для його надійної роботи. За вказівкою, напруга на шинах 0,4 кВ, яка живить ТК, не повинна знижуватися нижче 70% номінальної напруги при короткому замиканні між полюсами перетворювача. Ця вимога до напруги важлива для забезпечення стабільної роботи ТК і, відповідно, ефективної роботи пристрою плавки голольоду (ППГ) в системі захисту.

Напруга, яка живить ТК, має бути належним чином підтримана на встановленому рівні, щоб у разі потреби він міг надійно активуватися та виконувати функцію забезпечення захисту системи від коротких замикань.



### 3 ПРИСТРОЇ ПЛАВЛЕННЯ ЛЬОДУ ДОДАТКОВИМИ ЗАСОБАМИ

Боротьба з ожеледицею за допомогою трансформатора або перетворювача, підключеного до шин 6-10 кВ.

На жаль, я не маю змоги переглядати або аналізувати конкретні схеми або рисунки, оскільки ця система обмежується текстовими запитами. Проте, ви можете продовжити задавати питання або надавати текстовий опис схем або рисунків, і я намагатимусь відповісти на них або надати загальну інформацію або поради на основі наданої інформації. Схема накладання однофазного струму через дроселі показана на рисунку 3.1.

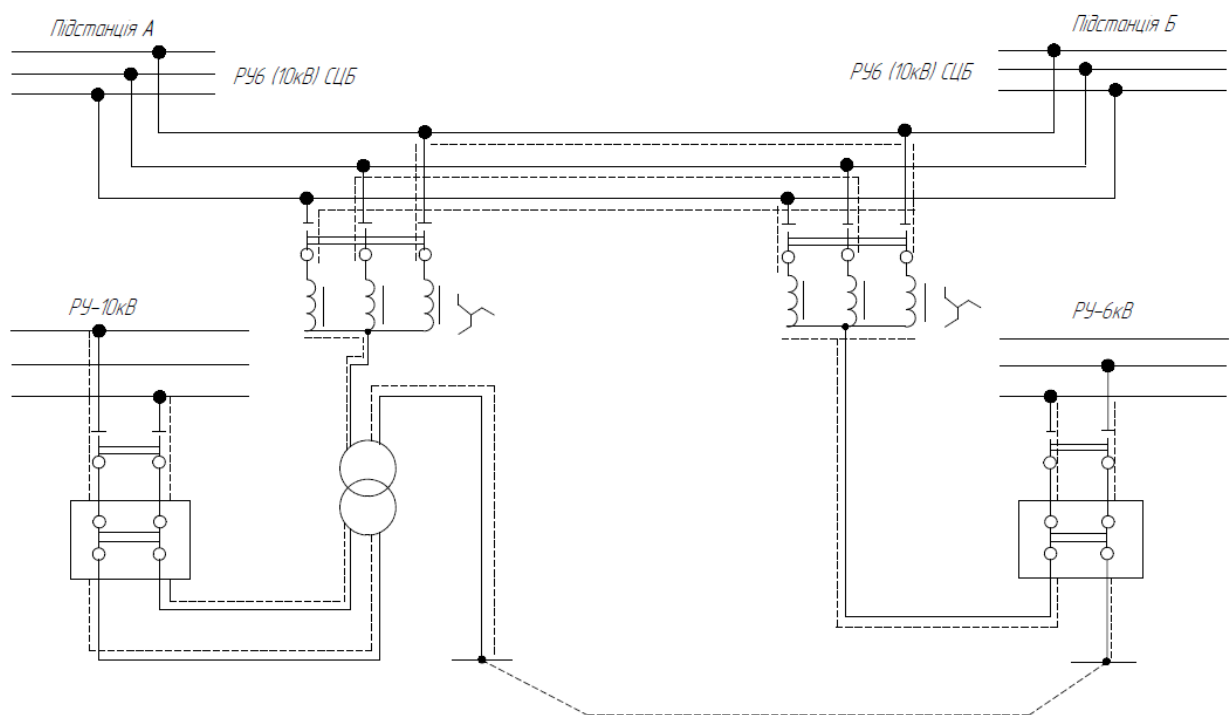


Рисунок 3.1 – Схема накладання однофазного струму через дроселі

Максимальне значення результуючої напруги між кожним дротом, лінією та землею при напрузі 6 кВ, що живить зону підігріву, становить 14,2 кВ. Це значно менше пробивної напруги розрядників РВП-6, яка дорівнює 22,6 кВ. Таким чином, при використанні розглянутої схеми не потрібно відключати ці розрядники від лінії під час боротьби з ожеледицею. Вплив цієї

результуючої напруги на ізоляцію кабельних вводів і вставок ЛЕП автоблокування під час боротьби з ожеледицею може бути прийнятною, оскільки вона не перевищує величину випробувального змінного напруги кабелів, яка в 1,65 рази більше їх лінійної робочої напруги. Для однофазних і трифазних трансформаторів, підключених до лінії, випробувальна напруга змінного струму з частотою 50 Гц вища, ніж для кабелів. Згідно з чинними нормами, амплітуда цієї випробувальної напруги приблизно в 2 рази перевищує амплітуду максимальної результуючої напруги між проводом лінії і землею під час підігріву проводів. Проте, враховуючи, що тривалість застосування випробувального напруги становить всього 1 хв, для підвищення надійності ізоляції доцільно замінити лінійні трансформатори, підключені до ЛЕП автоблокування, на трансформатори відповідної потужності, напругою 10 кВ на високій стороні і 220 В - на низькій, на відстані близько 10 км від кожної тягової підстанції. При підключенні до лінії 6 кВ ці трансформатори будуть мати на низькій стороні 127 В.

Заміна бака трансформаторів ОМ-6 баками від трансформаторів ОМ-10 для підвищення ізоляції є раціональним заходом для підвищення надійності та безпеки електромережі. Використання високовольтних ізоляторів і відповідних деталей дозволяє підняти рівень ізоляції та покращити безпеку у випадку ожеледиці і інших експлуатаційних умов.

Щодо проведення інших заходів для зменшення впливу струму підігріву на інші частини системи, важливо ретельно розглянути всі аспекти і можливі наслідки. Наприклад, встановлення понижуючого трансформатора для забезпечення підігріву проводів у тих випадках, де він необхідний, потребує правильного проектування та обслуговування.

Заходи, такі як заміна ізоляції та зміна схеми для забезпечення ефективного підігріву проводів, можуть покращити безпеку та надійність системи передачі електроенергії. Важливо, щоб всі ці заходи були ретельно продумані і виконані відповідно до стандартів та нормативів електробезпеки.

У випадку наявності РУ-6 кВ (підстанція Б) на тяговій підстанції, схема комутації спрощується, оскільки дросель, який розділяє, підключається до РУ-6 кВ без понижуючого трансформатора.

Розрахунки вказують на те, що при номінальній напрузі, створюючи струм підігріву в розмірі 6,3 кВ, зазначена схема (зображена на рисунку), може забезпечити протижеледний підігрів проводів ЛЕП автоблокування з напругою 6 кВ і частотою 75 Гц на відстані близько 40 км між тяговими підстанціями змінного струму. Потужність понижуючого трансформатора або відбирається так, що потужність від шин 6 (10) кВ тягової підстанції становить приблизно 500 кВА, а дросель, який розділяє, може бути створений на базі трифазного трансформатора потужністю 320 кВА.

Більша відстань між суміжними тяговими підстанціями, величина струму в проводах ЛЕП автоблокування, необхідна для профілактичного підігріву, може бути забезпечена в розглянутій схемі, якщо напруга, що живить ланцюг підігріву на одній з підстанцій, дорівнює 10 кВ, тоді як на іншій - 6 кВ. З аналізу графіка зміни напруги вздовж зони підігріву видно, що на першій підстанції та на відстані 15 км від неї слід провести заміну кабельних вводів і вставок високовольтним кабелем (або повітряною лінією) з напругою 10 кВ. Це обумовлено тим, що максимальна результуюча напруга між кожним дротом лінії та землею приблизно в 1,4 рази перевищує випробувальну напругу кабельних вводів і вставок. На зазначеній ділянці міжпідстанційної зони рекомендується вимкнути розрядники від ЛЕП автоблокування. Для підвищення надійності ізоляції також доцільно замінити лінійні трансформатори з напругою 6 кВ на трансформатори з напругою 10 кВ.

Заміна високовольтних кабелів і лінійних трансформаторів, підключених до ЛЕП автоблокування, стає необхідною у випадках значного обсягу робіт та великих витрат. Це також викликає важкості з експлуатацією і зменшує надійність роботи системи. З урахуванням цих обставин, варто віддавати перевагу двосторонньому живленню ланцюга підігріву проводів за схемою з напругою 6 кВ при боротьбі з ожеледицею.



Схема плавки ожеледиці на ЛЕП автоблокування за допомогою однофазного струму від суміжних тягових підстанцій змінного струму є ще одним варіантом для забезпечення профілактичного підігріву проводів і боротьби з ожеледицею. Вона передбачає використання трансформаторів для створення потрібної напруги для підігріву проводів. Ця схема може бути корисною, коли наявність РУ-10 кВ в тягових підстанціях дозволяє легко надавати необхідну напругу для підігріву (рис. 3.2).

Важливо враховувати, що будь-які зміни в інфраструктурі та схемах плавки ожеледиці повинні бути обгрунтованими та безпечними для експлуатації. Проведення ретельних розрахунків і забезпечення дотримання стандартів та норм безпеки є обов'язковими. Також, співпраця зі спеціалістами в галузі електроенергетики та інженерії може бути корисною для розробки і впровадження оптимальних рішень. Обрана схема може бути вартісною, але вона може забезпечити ефективний підігрів проводів та захист від ожеледиці на ЛЕП автоблокування, що є важливим для надійності та безпеки залізничного руху.

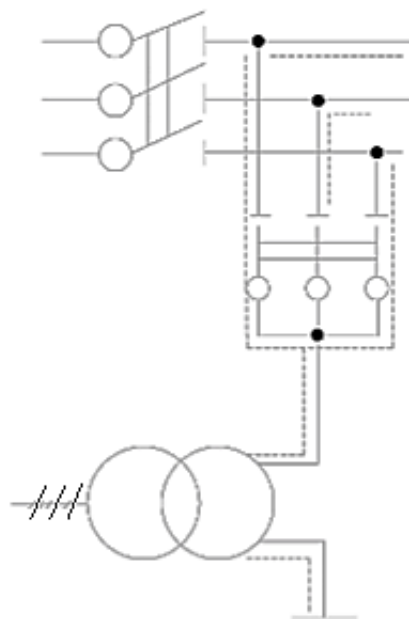


Рисунок 3.2 – Схема плавки ожеледиці на відключеній ЛЕП однофазним струмом при двосторонньому живленні

Зазначені схеми плавки ожеледиці за допомогою однофазного струму одностороннього живлення дійсно можуть бути ефективними для боротьби з ожеледицею на проводах ЛЕП автоблокування. Вони передбачають використання струму плавки ожеледиці для профілактичного підігріву проводів у разі небезпеки ожеледиці. Важливо, що при цих схемах немає необхідності відключати розрядники та інше обладнання на ЛЕП автоблокування, що покращує надійність роботи та спрощує процес боротьби з ожеледицею.

Мінімальна та максимальна довжини зон, в яких може бути отриманий необхідний струм для плавки ожеледиці, залежать від декількох факторів, включаючи напругу живлення, потужність трансформаторів, що створюють необхідну напругу, і характеристики проводів ЛЕП.

Для забезпечення безпеки та надійності системи плавки ожеледиці важливо використовувати захисти, які вимикають систему в разі перевищення максимального допустимого струму або в разі аварійних ситуацій. Диференціальний захист, який вимикає ланцюг плавки при виявленні навіть невеликого розходження струмів у проводах, може бути корисним для підвищення безпеки та захисту системи.

Ці схеми можуть бути ефективними в умовах боротьби з ожеледицею, але їх реалізація повинна відповідати всім вимогам та нормам безпеки, і вони повинні бути належним чином розроблені та впроваджені спеціалістами з відповідними знаннями в галузі електроенергетики та інженерії. Схема плавки ожеледиці на відключеній ЛЕП однофазним струмом односторонньому живленні (рис. 3.3).

Зазначена схема плавки ожеледиці за допомогою одностороннього живлення від РУ-6 (10) кВ ланцюга короткого замикання, утвореного трьома проводами ЛЕП та автоблокуванням, є варіантом для забезпечення плавки ожеледиці на проводах ЛЕП. Ця схема дозволяє застосовувати плавку ожеледиці на всій довжині міжпідстанційної зони або на половині її, в залежності від потреб та умов конкретного випадку.

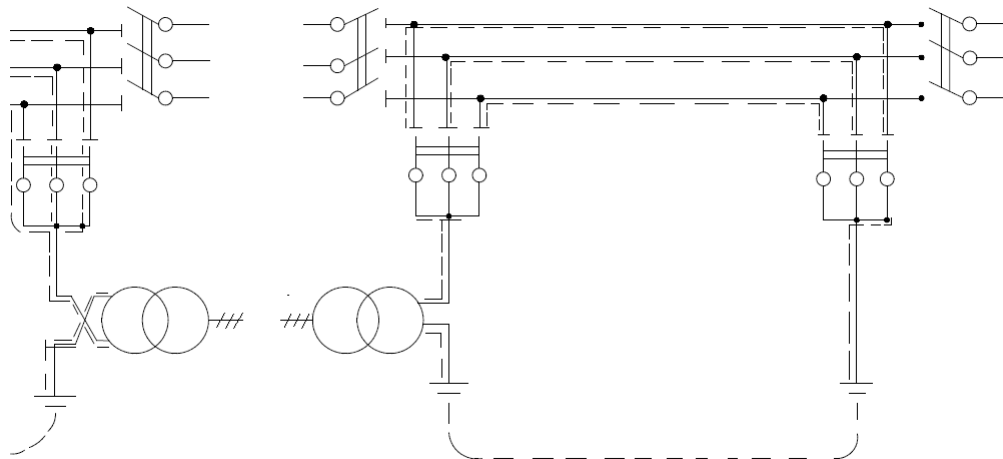


Рисунок 3.3 – Схема плавки ожеледиці на відключеній ЛЕП однофазним струмом при односторонньому живленні

Для забезпечення безпеки та надійності роботи цієї схеми важливо враховувати можливий індуктивний вплив на лінії зв'язку та інше обладнання, зокрема у разі використання землі як зворотного проводу. Проведення перевірки і аналізу індуктивного впливу допоможе визначити можливі ризики та необхідні заходи для забезпечення нормальної роботи системи.

Ця схема може бути ефективною у боротьбі з ожеледицею, але її розробку та впровадження слід проводити відповідно до вимог та норм безпеки, а також з урахуванням специфіки конкретних умов та обладнання на лінії.

Розглянута схема для профілактичного підігріву проводів ЛЕП автоблокування 6 (10) кВ з частотою 50 Гц та електропостачання індивідуальних статичних перетворювачів частоти для живлення рейкових ланцюгів автоблокування сигнальним струмом з частотою 25 Гц може бути ефективною у роботі з ожеледицею та забезпечити нормальне живлення інфраструктури залізниць.

Застосування розділяючих дроселів дозволяє накладати однофазний струм плавки ожеледиці на працюючу ЛЕП автоблокування. При цьому необхідно враховувати величину випробувального змінного напруги, яка

становить 37 кВ для трансформаторів підключених до ЛЕП автоблокування. Це може вимагати підвищення ізоляції та безпеки обладнання для впровадження цієї схеми.

Застосування цієї схеми вимагає обережного розгляду та виконання всіх необхідних технічних та безпекових вимог для ефективного та безпечного підігріву проводів ЛЕП автоблокування.

Боротьба з ожеледицею на додатковому дроті або його попереджувальний обігрів без відключення електропостачання для пристроїв системи контролю блокування може бути здійснений через двостороннє різнофазне живлення цього дроту від шин 27,5 кВ. За умовами досягнення необхідного рівня струму в додатковому дроті, довжина зони розтаєння ожеледиці, як вказано нижче, повинна складати 100-120 км, що відповідає подвоєній відстані між тяговими підстанціями змінного струму. Профілактичний обігрів дроту може бути впроваджений при живленні ланцюга від тягових підстанцій, віддалених на 150-180 км одна від одної, що еквівалентно трьом міжпідстанційним зонам.

Отже, для використання запропонованого методу для боротьби з ожеледицею необхідно забезпечити живлення додаткового проводу в зоні міжпідстанційного розташування від відповідних шин 27,5 кВ тягових підстанцій.

Для цього кожен другу тягову підстанцію необхідно обладнати відповідними роз'єднувачами та вимикачем для можливості використання зазначеної схеми живлення додаткового дроту. З векторної діаграми видно, що напруга між кінцями додаткового дроту і між ним і рейками на кінцях зони плавки дорівнює лінійному напрузі живлення. Протягом зони плавки напруга між додатковим проводом і рейками зменшується по мірі віддалення від тягових підстанцій. За геометричними співвідношеннями векторної діаграми модуль напруги між додатковим проводом і рейками в будь-якому перерізі лінії, не враховуючи втрат напруги від робочого навантаження пристроїв СЦБ, може бути розрахований за вищезазначеною формулою. Мінімальний рівень

напруги відповідає середині зони плавки ожеледиці і становить 0,87 від лінійної напруги живлення.

Розрахунки показали, що максимальний рівень напруги ( $U_{\max}$ ) становить 13-11% від напруги, що живить ланцюг плавки ожеледиці. Для підвищення рівня напруги, це можливо досягти шляхом підняття її на 3-5% за допомогою пристроїв регулювання напруги (РПН) на трансформаторах підстанцій. Тимчасове зниження напруги у частини споживачів СЦБ на 8-10% може бути прийнятним під час процесу плавки ожеледиці.

Під час плавки ожеледиці, система додаткових проводів отримувала двостороннє живлення від шин 27,5 кВ тягових підстанцій А (типу II) і В (типу I), розташованих на відстані 112 км один від одного. З'єднання додаткового дроту між сусідніми фідерними зонами було здійснено на тяговій підстанції Б, розташованою між підстанціями А і В. Струм в додатковому проводі марки АС-35 був вимірний в трьох точках вздовж зони плавки і становив 180 А. Імітація штучного ожеледиця була виконана перед проведенням експерименту на трьох ділянках додаткового проводу довжиною 2-3 метри з різною товщиною льоду. Плавлення ожеледиці на всіх цих ділянках почалося через 3 хвилини після підключення струму до цього проводу. Процес плавки закінчився і провід висох при ожеледиці з різною товщиною: 1,5 мм за 6 хвилин, 3 мм за 10 хвилин і, нарешті, 10 мм за 15 хвилин. Температура дроту, що не був покритий ожеледицею, становила +25 °С при зовнішній температурі -10 °С після включення схеми. Таким чином, перегрів дроту досягав 35 °С.

Схема двостороннього живлення зі зсувом фаз на 60° електричного струму є найбільш доцільною для боротьби з ожеледицею на лініях передачі електроенергії напругою 6 (10) кВ, особливо, коли використовуються проводи з кольорового металу, які потребують значної потужності для підігріву. Ця схема дозволяє проводити профілактичний підігрів або плавку ожеледиці без припинення електропостачання споживачів, які підключені до цих ліній. Нагрів проводів при цій схемі здійснюється за допомогою струмів, які виникають у проводах лінії під час двостороннього живлення від

трансформаторів, які мають зсув фаз лінійних напруг на  $60^\circ$  електричного струму.

Лінії передачі електроенергії напругою 6 (10) кВ зазвичай отримують живлення безпосередньо від шин 6 (10) кВ тягових підстанцій постійного струму. Напруга на ці шини подається з вторинних обмоток головних понизливих трансформаторів тягової підстанції, загальна потужність яких зазвичай становить кілька мегавольт-ампер. Ця схема дозволяє проводити профілактичний підігрів або плавку ожеледиці на проводах таких ліній без необхідності встановлення додаткових трансформаторів.

Система, яка включає в себе датчики для фіксації початку ожеледиці і зміни температури проводів, є дуже корисною для контролю та регулювання антиожеледного процесу на ЛЕП. За допомогою таких датчиків можна автоматизувати процес плавки ожеледиці і підтримувати оптимальну температуру проводів, щоб забезпечити надійну роботу системи живлення.

Сигнали про зміну температури і утворення ожеледиці, які передаються до енергодиспетчерського пункту, дозволяють операторам отримувати інформацію про стан ліній і приймати рішення щодо включення режиму плавки ожеледиці відповідно до поточних умов. Це дозволяє забезпечити ефективну та оперативну реакцію на зміни погодних умов та забезпечити безперебійне живлення споживачів.

Також важливою є можливість автоматичного або ручного перемикання між режимом підігріву і режимом плавки на тяговій підстанції шляхом зміни схем міжпідстанційних зон або схем контактної підвіски станції. Це дозволяє точно регулювати антиожеледний процес відповідно до поточних умов і забезпечити оптимальне використання ресурсів та збереження електроенергії.

Загалом, така система контролю і регулювання допомагає забезпечити ефективний та надійний антиожеледний захист для ЛЕП і підтримувати стабільність живлення споживачів навіть у складних погодних умовах.

Використання індивідуальних індивідуальних схем із контролем щільності струмів підігріву і плавлення, які регулюються зворотним температурним зв'язком, є дієвим підходом для оптимізації процесу антиожеледного захисту ЛЕП. Це дозволяє забезпечити більш точний та ефективний контроль температури проводів і уникнути надмірного навантаження.

Щодо вимірювання температури проводів, використання датчиків, які працюють за принципом безпосереднього вимірювання температури дроту або з непрямим виміром з інфрачервоного випромінювання, може бути дуже корисним. Такі датчики надають можливість отримувати точні дані про температуру проводів і реагувати на зміни в реальному часі.

Використання мікропроцесорних пристроїв і радіопередавачів для передачі даних про температуру може допомогти в реалізації системи моніторингу і управління, що забезпечує зручний та оперативний контроль. Довготермінова робота від літєвої батареї також додає зручності і ефективності вимірювань.

Загалом, використання сучасних технологій для контролю та регулювання температури проводів у системі антиожеледного захисту може сприяти підвищенню надійності та ефективності такої системи, особливо в умовах змінних погодних умов.

## ВИСНОВКИ

У даній роботі були розглянуті і вивчені проблеми, пов'язані з утворенням ожеледиці та морозу на проводах ліній автоблокування та поздовжнього електропостачання. Було підкреслено важливість цих питань, оскільки недостатні знання щодо ожеледиці та морозу можуть призвести до значних народногосподарських збитків. У роботі були наведені фотографії, які ілюструють серйозність проблеми утворення ожеледиці та необхідність вивчення та боротьби з нею.

У роботі розглянуто і проведено порівняльний аналіз різноманітних схем для боротьби з ожеледдю для ліній електропередач, систем енергопостачання та ліній СЦБ.

За результатами розрахунків було встановлено, що найбільш вигідною схемою для плавки ожеледиці є схема з трифазним коротким замиканням, оскільки вона має найменший час плавки, наприклад, протягом 15 хвилин та найнижчі економічні витрати на витрачену енергію для середніх кліматичних умов. Це свідчить про її значну перевагу перед іншими схемами та методами плавки, а також підкреслює її надійність та ефективність.

Додатково, в роботі була запропонована антиожеледну систему, яка відповідає сучасним потребам та є економічно вигідною. Застосування цієї системи може значно покращити надійність електромереж та забезпечити їх тепловий захист.



## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Закон України "Про енергозбереження" від 01.07.94 р. № 74/94–ВР, зі змінами та доповненнями.
2. ДСТУ 2339-94. Енергозбереження. Основні положення.- К.: Держстандарт України, 1994.- 4 с.
3. Radian Belu Smart Grid Fundamentals / Boca Raton: CRC Press. 2022. – 486 p.
4. Новиков М. А. Проектирование автоблокировки на железных дорогах. М.: Транспорт, 1979. – 289 с.
5. Плешков П. Г. Енергетичний інжиніринг та менеджмент. Проектування ефективних енергетичних систем: навч. посіб. - Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 156 с.
6. Сулейманов В.М. Электричні мережі та системи: підручн. / В.М. Сулейманов, Т.Л. Кацадзе. – Киев: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с. – ISBN 978-966-622-300-8.
7. Афанасьев Е. А. Экономика и организация хозяйства сигнализации и связи. М.: Трансжелдориздат, 1989. – 98 с.
8. Бургсдорф В. В. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильно гололедных районах. М. Л.: Госэнергоиздат, 1987. – 125 с.
9. Anco S. Blazev Power Generation and the Environment / 1st Edition. New York: River Publishers/ 2014/ - 1333 p.
10. Dale R. Electrical power systems technology / Dale R. Patrick, Stephen W. Fardo. – The Fairmont Press, 2009. – 486 pp. – ISBN 0-88173-585-X.
11. Разгонов А. П. Методология повышения надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Харьков,: 1999. – 98 с.
12. El-Hawary M.Introduction to electrical power systems. – John Wiley & Sons, 2008. – 394 pp. – ISBN 978-0470-40863-6.
13. Порцелан А. А. Борьба с гололедом на электрифицированных железных дорогах. М.: Транспорт, 1970. – 218 с.

14. Iliadis N. Handbook of power systems I / Iliadis N., Pardalos P., Pereira M., Rebennack S. – Springer, 2010. – 494 pp. – ISBN 978-3-642-02492-4.
15. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1/ Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 26 с.
16. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.2/ Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 26 с.
17. Корниенко В.В., Котельников А.В., Доманский В.Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. К.: Транспорт Украины. 2004. – 196 с.
18. Martinez-Velasco Juan A. Power system transients. Parameter determination / Juan A. Martinez-Velasco. – CRC Press, 2010. – 633 pp. – ISBN 978-1-4200-6529-9
19. Транспорт Дніпропетровщини: європейський шлях розвитку/ Під заг. ред. Г. М. Кірпи. – Д.: ТОВ «ЕНЕМ», 2003. – 112 с.
20. Rofalsky K-H. Power system engineering / K-H Rofalsky, J.Schlabbach. – Wiley-VCH, 2008. – 337 pp. – ISBN 978-3-527-40759-0.
21. «Вимоги до окремих видів пристроїв» ГОСТ 12.2.007.3-75 (2001) «ССБТ. Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности».
22. ДСТУ 2155-93.Енергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів по енергозбереженню. – Чинний від 01.01.95-К.: Держстандарт України - 20 с.
23. ДСТУ 4110-2002. Енергоощадність. Методика аналізу та розрахування питомих витрат енергоресурсів. – Чинний від 01.07.03. – К. : Держстандарт України, 2003.
24. Мельник Л.Г. Економіка енергетики: Навч. посіб. / Л.Г. Мельник, О.І. Карінцева, І.М. Сотник - Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. - 238с.