

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Січкарь Юрій Андрійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз особливостей будови та принципи роботи грозозахисту повітряних
ліній 6-35 кВ
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Січкарь Ю. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Фомін Миколаа Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри прикладної та
вищої математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Січкарь Ю. М. Аналіз особливостей будови та принципи роботи грозозахисту повітряних ліній 6-35 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Основною метою кваліфікаційної роботи являється вироблення пропозиції щодо вибору схем захисту ізоляції обладнання мереж 6-35 кВ від грозових перенапруг.

Основна ціль роботи зниження числа прямих ударів блискавки у фазні проводи, а значить і числа небезпечних грозових перенапруг на обладнанні мереж 6-35 кВ.

Ключові слова: грозові перенапруги, повітряні лінії, асинхронні двигуни, ізоляція.

ABSTRACT

Sichkar Yu. M. Analysis of the structural features and principles of operation of lightning protection of overhead lines 6-35 kV. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polessia National University, Zhytomyr, 2024.

The main purpose of the qualification work is to develop a proposal for the selection of insulation protection schemes for equipment of 6-35 kV networks from lightning surges.

The main purpose of the work is to reduce the number of direct lightning strikes to phase wires, and therefore the number of dangerous lightning surges on equipment of 6-35 kV networks.

Keywords: lightning surges, overhead lines, asynchronous motors, insulation.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ	7
1.1 Фізичні процеси при грозових перенапругах	7
1.2. Характеристики блискавки та грозової інтенсивності	12
Висновки по розділу 1	20
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ	21
2.1 Особливості грозозахисту ПЛ 6-35 кВ	21
2.2. Грозозахист ПЛ та їх ослаблених місць	26
Висновки по розділу 2	29
РОЗДІЛ 3. СПОСОБИ ЗАХИСТУ ВІД ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ ЕЛЕМЕНТІВ МЕРЕЖ 6-35 кВ	30
3.1. Захист підстанції від прямих ударів блискавки	30
3.2. Особливості грозозахисту електричних машин	40
3.3 Особливості грозозахисту ліній із ізольованими проводами	43
Висновки по розділу 3	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

ВСТУП

У процесі експлуатації ізоляція обладнання розподільних пристроїв (РП) піддається впливу робочої напруги, а також різних видів перенапруг, серед яких важливе місце посідають грозові (атмосферні).

Грозові перенапруги становлять реальну небезпеку для обладнання мереж практично всіх класів номінальної напруги і, отже, вимагають розробки та впровадження ефективних захисних заходів, одним із яких є застосування спеціальних захисних апаратів – вентилях розрядників (РВ) та обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН). Захисні властивості РВ і ОПН засновані на нелінійності вольтамперної характеристики їх робочих елементів, що забезпечує помітне зниження опору при підвищених напругах та повернення у вихідний стан після зниження напруги до нормального робітника. Низька нелінійність вольтамперної характеристики робочих елементів у розрядниках не дозволяла забезпечити одночасно і досить глибоке обмеження перенапруг, та малий струм провідності при вплив робочої напруги, від дії якого вдалося відбудуватися за рахунок введення послідовно з нелінійним елементом іскрових проміжків. Значно велика нелінійність окисно-цинкових опорів (варисторів) обмежувачів перенапруг ОПН дозволила відмовитися від використання їх конструкції іскрових проміжків, тобто нелінійні елементи ОПН приєднані до мережі протягом усього терміну його служби.

В даний час вентилях розрядники практично зняті з виробництва та здебільшого відслужили свій нормативний термін служби. Побудова схем захисту ізоляції обладнання як нових, так і розподільних пристроїв, що модернізуються, від грозових і комутаційних перенапруг тепер виявляється можливим лише з використанням ОПН.

Ідентичність функціонального призначення РВ і ОПН і простота конструкції останнього, що здається, часто призводять до того, що заміну розрядників на обмежувачі перенапруг проводять без перевірки допустимості та ефективності використання встановлюваного ОПН в точці мережі, що розглядається.

Разом з тим, типові схеми захисту ізоляції обладнання від перенапруг і характеристики захисних апаратів були обґрунтовані кілька десятиліть тому з використанням спрощених розрахункових моделей. оскільки можливості обчислювальної техніки були обмежені.

Розвиток комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення дозволяють на новому рівні проводити розрахунки перехідних процесів в електричних мережах для оптимізації схем захисту ізоляції обладнання від перенапруг та обґрунтованого вибору основних показників захисних апаратів.

Нижче з урахуванням сучасного рівня знань та можливостей моделювання, розглянуто основні проблеми, які необхідно вирішувати під час побудови схем захисту ізоляції обладнання РП від грозових перенапруг за допомогою захисних апаратів типу ОПН.

Метою даної роботи є вироблення пропозиції щодо вибору схем захисту ізоляції обладнання мереж 6-35 кВ від грозових перенапруг.

Основна ціль роботи зниження числа прямих ударів блискавки у фазні проводи, а значить і числа небезпечних грозових перенапруг на обладнанні мереж 6-35 кВ.

При виконанні досліджень використовувались наступні **методи**: математичного аналізу, методи системного аналізу, теоретичної електротехніки, моделювання перехідних процесів за допомогою прикладних пакетів Matlab та Multisim.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Січкарь Ю. М., Бутрик І. С. КЛАСИФІКАЦІЯ ПЕРЕНАПРУГ У МЕРЕЖАХ 6–35 кВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 72-73.

Фомін М. П., Січкарь Ю. М. ОСОБЛИВОСТІ ГРОЗОЗАХИСТУ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023». 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 106-108.

Січкарь Ю. М. ОСОБЛИВОСТІ ГРОЗОЗАХИСТУ ЛІНІЙ ІЗ
ІЗОЛЬОВАНИМИ ПРОВОДАМИ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 72-73.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ

1.2 Фізичні процеси при грозових перенапругах

У процесі експлуатації ізоляція електрообладнання знаходиться під впливом як робочої напруги, так і можливих зовнішніх і внутрішніх перенапруг, що є імпульсом або хвилею напруги, що накладається на номінальну напругу мережі [2].

Перенапруги мають різну природу. Виділяють такі види перенапруг як грозові, резонансні, ферорезонансні, комутаційні [3].

Перенапруги мають такі характеристики, як:

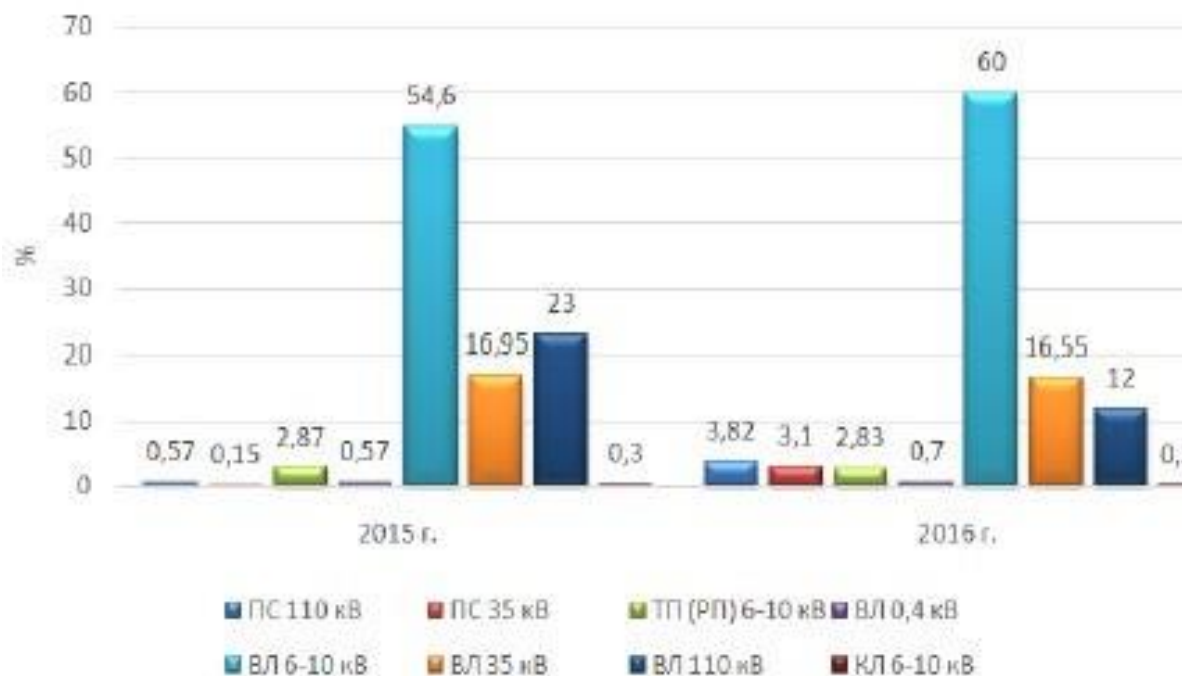
- максимальне амплітудне значення напруги;
- тривалість впливу;
- форма кривої імпульсів перенапруги;
- широта охоплення елементів мережі (відстань впливу хвилі перенапруги)

Грозові перенапруги мають найбільшу кратність, при цьому є найкоротшими за часом впливу і найбільш важкими для електроустановок. Комутаційні перенапруги, навпаки, мають невелику кратність, але можуть існувати годинами.

В результаті атмосферних впливів, згідно статистики, ушкоджується велика кількість обладнання. Удар блискавки несе загрозу для електроустановок всіх класів напруги, незалежно від їхнього пристрою.

В даний час актуальність проблеми грозових перенапруг в системах електропостачання (далі - СЕП) обумовлена ще й підвищенням грозової активності і, як наслідок, збільшенням кількості технологічних порушень (далі ТП), викликаних впливом атмосферних перенапруг. Наприклад, у мережах України кількість ТП, через атмосферні перенапруги, збільшилася вдвічі на рік проти аналогічного періоду. Причому статистика ТП різного обладнання (рис.1.1), щодо загальної кількості ТП за відповідний рік, також зазнала змін, хоч і меншою мірою. Проведено аналіз причин ТП при атмосферних перенапругах (рис 1.2).

Зменшити вплив грозових перенапруг на роботу систем електропостачання можна лише шляхом побудови комплексної системи захисту [4].



. Статистика ТП по типу обладнання

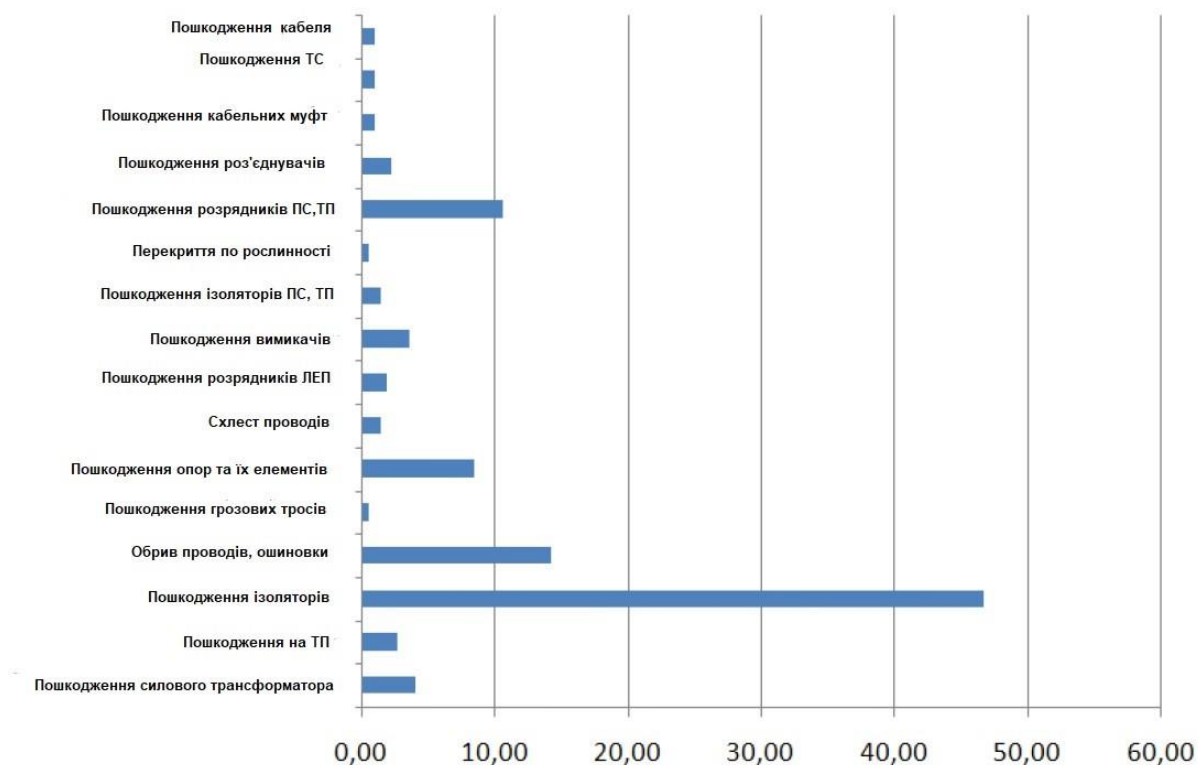
З метою пошуку вирішення цієї проблеми насамперед потрібно познайомитися з природою джерела грозових перенапруг [4].

З метою пошуку вирішення цієї проблеми насамперед потрібно познайомитися з природою джерела грозових перенапруг [3].

Електричні розряди, у великих кількостях накопичуються в хмарах, викликають грозові розряди - блискавки. Існує маса теорій, які по-різному в деталях висвітлюють електризацію хмар, але, на сьогоднішній день, ще не написана теорія, яка б давала вичерпне пояснення даному явищу. У цій статті коротко розглянемо найбільш значущі, для розуміння загальної картини фізичного явища, постулати.

Електризація хмар - накопичення, поділ позитивних і негативних зарядів пояснюється існуванням висхідних потоків повітря.

Одне з найбільш поширених припущень виходить з того, що утворення електричних зарядів в атмосфері відбувається в постійному електричному полі землі. Планета Земля має негативний заряд, у своїй середнє значення напруженості поблизу поверхні – 100 В/м. Дана напруженість обумовлена зарядами землі і практично не залежить від місця, пори року та доби.



Повітря, що оточує поверхню планети, має вільні заряди, що рухаються в напрямку електричного поля Землі. При віддаленні від поверхні, щільність заряджених частинок збільшується, як і провідність повітря. На висоті 80 км електричний опір повітря падає в 3 мільярди разів і досягає значення, порівнянного з щільністю прісної води.

З вище сказаного, можна дійти невтішного висновку – Земля та її атмосфера є кулястий конденсатор. Поверхня землі і шар атмосфери з високою провідністю - обкладки цього величезного конденсатора, а шар повітря з великим опором служить ізоляцією між «обкладками». Напруга між поверхнею Землі та провідними шарами атмосфери становить ~ 200 кВ. Потужність «конденсатора» близько 300 МВт. У цьому електричному полі

освіта грозових хмар та походження грозових явищ складає висоті 1-8 км від поверхні планети.

Грози поділяються за походженням на теплові та фронтальні.

Теплові грози викликаються нагріванням нижніх шарів повітря, тому повітряні маси розширюються і спрямовуються вгору. На висоті 2 км розігріте повітря зустрічається з областю негативних температур. Відбувається конденсація вологи і утворення грозових хмар, що складаються з дрібних електрично заряджених крапель.

Фронтальні грози утворюються за умови дотику фронтовими частинами двох різних за температурою потоків повітря. При цьому тепле повітря прямує вгору, утворює завихрення і на висоті низьких температур волога конденсується, утворюються грозові хмари.

На відміну від теплових гроз, що охоплюють малі території й утворюються лише у спеку, фронтальні грози утворюються у час доби, займають широкі площі й можуть рухатися зі швидкістю понад 150 км/год.

Конденсат, під впливом електричного поля «конденсатора», поляризується. Нижня частина крапель має негативний заряд, верхня - позитивний. Дрібні краплі висхідним потоком повітря піднімаються вгору, великі під дією сили тяжіння падають у низ. В результаті цього, що рухаються вгору краплі негативно зараженою частиною зустрічають негативні і позитивні вільні заряди. однойменні негативні відштовхуються, позитивні притягуються, краплі стають позитивно зарядженими. З великими краплями, що падають, ситуація зворотна і вони отримують негативний заряд.

Так відбувається поділ зарядів у грозовому хмарі: у верхньому шарі накопичуються позитивні заряди, у нижніх - негативні. Оскільки середня частина хмари має деякий опір, заряди якийсь час знаходяться на місці і не нейтралізуються. Далі електричне поле-хмара накладається на поле поверхні землі змінює його напрямок і стає позитивно зарядженим.

Заряди в грозовій хмарі розподілені нерівномірно в точках критичної напруженості, а при значеннях 25-30 кВ/см, створюються умови утворення блискавки.

У місці хмари з критичною напруженістю починається процес ударної іонізації, створюються лавини електронів, під дією фотоіонізації і термоіонізації виникають стрімери, які перетворюються на лідери. Розряд блискавки, як довга дуга, пробиває ізолюючу повітряну масу між хмарою і поверхнею землі. Блискавка, що утворилася, має довжину від декількох сотень метрів до декількох кілометрів.

Певною проблемою стає те, що грозовий заряд має вибірковість і при наближенні лідерного каналу до землі на його електричне поле впливають поля землі і різних штучних споруд.

За наявності під хмарою якого-небудь споруди, наприклад, опори ЛЕП, удар блискавки припадає саме в неї, тому що лідер, що розвивається, прагне досягти поверхні землі по дорозі з найменшим електричним опором.

Грозовий розряд частіше вражає ті об'єкти, які мають краще заземлення та менший опір, навіть якщо поблизу знаходяться вищі споруди.

Як вже зазначалося вище, грозові перенапруження виникають при розряді блискавки в обладнання або поруч з ними в землю. Такий удар блискавки призводить до хвилі напруг, яка поширюється по лінії і досягає обладнання електричних станцій і підстанцій. Найслабше місце повітряних ліній електропередач (далі – ПЛЕП) – ізолятори. Грози становлять небезпеку для електроустановок не тільки через перенапруги, але й тим, що при проходженні струму блискавки через будь-які об'єкти виявляються серйозні електромагнітні, термічні і механічні впливи, що може призвести до аварій та відмови обладнання [1].

Внаслідок цього, потрібне застосування комплексу спеціальних захисних засобів, що захищають електроустаткування від перенапружень.

1.2. Характеристики блискавки та грозової інтенсивності

Основною вихідною інформацією про блискавку є струм. Типова форма імпульсу струму в ураженому об'єкті блискавкою представлена на рис. 1.3.

Для грозозахисту основним параметром струму блискавки є його амплітуда I_M , яку в літературі часто називають просто струмом блискавки. Іншим параметром, що визначає поряд із струмом блискавки величину перенапруг у ураженому об'єкті, є крутість струму блискавки, т.б. швидкість наростання на фронті імпульсу $I_M' = di_M/dt$. Оскільки миттєві значення швидкості наростання струму в різних точках фронту різні, зазвичай під крутістю струму блискавки розуміють її середнє значення: $I_M' = I_M/\tau_\phi$. Тривалість фронту імпульсу τ_ϕ прийнято визначати в такий спосіб. На графіку імпульсу струму відзначають точки фронту, що відповідають значенням струму $0,3I_M$ та $0,9I_M$. Через ці точки проводять пряму до перетину з нульовим рівнем струму (віссю абсцис) та з рівнем амплітуди струму. Проекції цих точок перетину на вісь абсцис умовно приймають за моменти початку імпульсу і настання амплітуди імпульсу, а інтервал між ними – за тривалість фронту τ_ϕ .

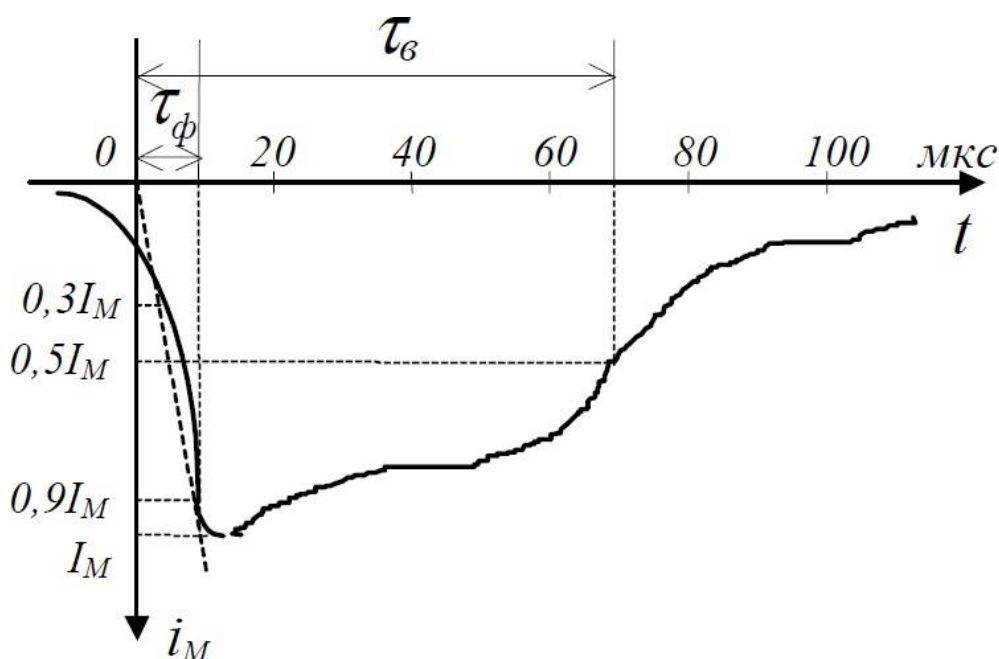


Рисунок 1.1. Осциллограма струму блискавки

Після досягнення амплітуди імпульс струму блискавки відносно спадає до нульового рівня. Довжину хвилі, або тривалість імпульсу струму блискавки,

прийнято оцінювати часом півспаду τ_{ϕ} , тобто інтервалом часу від умовного початку імпульсу до того моменту, коли крива імпульсу, що пройшла через максимум, знизиться до значення струму, рівного половині амплітуди.

Амплітуда та крутість струму блискавки можуть мати різні значення. Усереднені криві статистичного розподілу I_M і I'_M для окремих розрядів блискавки з негативним низхідним лідером наведені на рис. 2.2 та 2.3. Слід зазначити, що методика визначення значень I_M і I'_M і відповідна точність в різних дослідженнях істотно різнилися, тому нечисленні дані про розподіл крутизни струмів блискавки, як і наведені нижче дані про розподіл тривалості фронту $\tau_{\phi} = I_M / I'_M$, мають наближений характер.

На рис. 1.2 та 1.3 по осях ординат дана ймовірність того, що I_M (або I'_M) при одному розряді блискавки перевищить значення, вказане на осі абсцис. Ймовірність відповідає шкалі нормального закону, значення I_M та I'_M – логарифмічній шкалі. При такій масштабній сітці графіки приблизно апроксимуються прямими лініями. Як видно, розподіли I_M та I'_M істотно різняться для першого і наступних розрядів блискавки [2, 5].

$$P(I_M) = \int_{\lg I_M}^{\infty} \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\lg I_M - (\lg I_M)_{cp}]^2}{2\sigma_a^2} \right\} d(\lg I_M),$$

де $(\lg I_M)_{cp}$ і σ_a – відповідно середнє значення та стандарт відхилення логарифму струму блискавки. Для першого розряду $(\lg I_M)_{cp} = 1,48$; $\sigma_a = 0,27$, для повторних розрядів блискавки $(\lg I_M)_{cp} = 1,1$; $\sigma_a = 0,3$.

Крутизна струму окремих розрядів блискавки розподілена за аналогічним законом[5]:

$$P(I'_M) = \int_{\lg I'_M}^{\infty} \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\lg I'_M - (\lg I'_M)_{cp}]^2}{2\sigma_k^2} \right\} d(\lg I'_M),$$

де $(\lg I'_M)_{cp}$ - середнє значення логарифму крутизни струму блискавки; σ_k – стандарт відхилення логарифму крутості.

Для першого розряду $(\lg I'_M)_{\text{ср}} = 1,1$; $\sigma_k = 0,26$, для повторних розрядів $(\lg I'_M)_{\text{ср}} = 1,7$; $\sigma_k = 0,35$ [9].

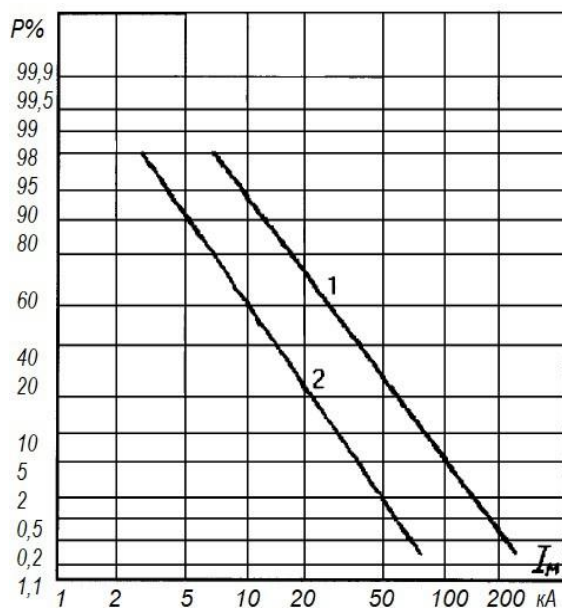


Рисунок 1.2. Статистичне розподіл амплітуд струмів блискавки при першому (1) та повторних (2) розрядах

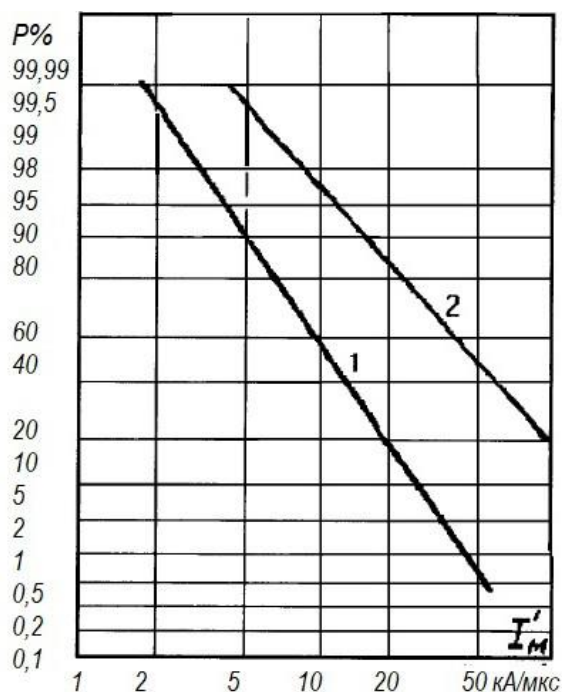


Рисунок 1.3. Статистичне розподіл крутості струмів блискавки при першому (1) та повторних (2) розрядах

Відповідно до рис. 1.2 та 1.3 амплітуда при першому розряді блискавки, як правило, вище, ніж при повторних. Зокрема, амплітуда струму блискавки, що відповідає ймовірності 50%, для першого розряду становить 30кА, для повторних – 13кА, і навпаки, крутість струму блискавки виявляється в середньому більше за повторних розрядів. При першому розряді значення I'_M , відповідне 50%, дорівнює 12 кА/мкс, а при повторних – 50 кА/мкс[8].

У наближених розрахунках використовуються усереднені розподіли ІМ та ІМ без урахування їх відмінності при першому та наступних імпульсах[8]:

$$P(I_M) = \exp(-0,04 I_M), P(I'_M) = \exp(-0,08 I'_M),$$

де $P(I_M)$ і $P(I'_M)$ – ймовірність того, що амплітуда або крутість при одному ударі блискавки перевищить задане значення.

Між I_M та I'_M спостерігається слабкий позитивний кореляційний зв'язок, тобто великим амплітудам струму відповідає велика крутість і навпаки. Проте, наявних нині даних недостатньо щоб одержати надійної кількісної оцінки зв'язку. Як перший наближення двовимірну функцію розподілу I_M та I'_M з урахуванням їх взаємозв'язку може бути представлена у вигляді[3]:

$$P(I_M, I'_M) = \exp(-\alpha \cdot I_M - \beta \cdot I'_M + \gamma \sqrt{I_M I'_M}),$$

де α , β і γ – параметри, що підбираються емпірично [11].

Зважаючи на слабкий статистичний зв'язок між I_M та I'_M у розрахунках часто вважають амплітуду та крутизну струму блискавки незалежними випадковими величинами. При цьому у

$$P(I_M, I'_M) = \exp(-0,04 \cdot I_M - 0,08 \cdot I'_M).$$

Наприклад визначимо ймовірності появи струму блискавки $I_M = 50$ кА, крутизни струму блискавки $I'_M = 30$ кА /мкс і спільної їх появи ($I_M = 50$ кА, $I'_M = 30$ кА/мкс).

$$P(I_M \geq 50 \text{ кА}) = \exp(-0,04 \cdot 50) = \exp(-2) = 0,114;$$

$$P(I'_M \geq 30 \text{ кА/мкс}) = \exp(-0,08 \cdot 30) = \exp(-2,4) = 0,096;$$

$$P(I_M \geq 50 \text{ кА}, I'_M \geq 30 \text{ кА/мкс}) = \exp(-0,04 \cdot 50 - 0,08 \cdot 30) = \exp(-4,8) = 0,001.$$

Довжина фронту τ_ϕ і довжина хвилі τ_θ грозового розряду є випадковими величинами, причому їх статистичні розподіли також суттєво різняться при першому і повторних розрядах. Перші розряди характеризуються відносно великими довжинами хвилі в порівнянні з повторними розрядами. Орієнтовні криві розподілу величин τ_ϕ і τ_θ наведено на рис. 1.4 та 1.5[11].

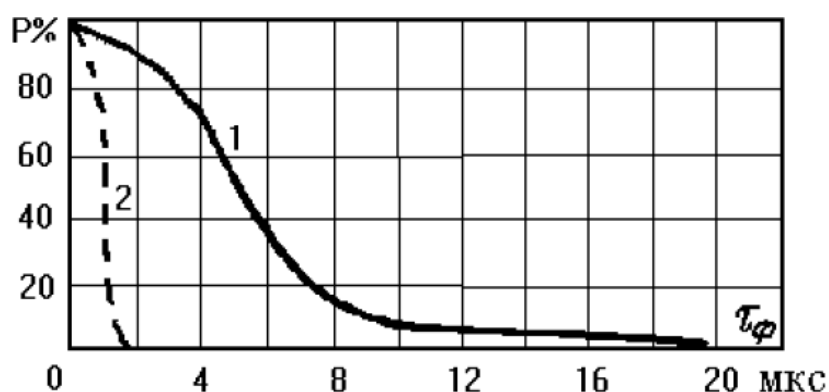


Рисунок 1.4. Статистичний розподіл тривалостей фронту імпульсів струму блискавки при першому (1) та повторних (2) розрядах

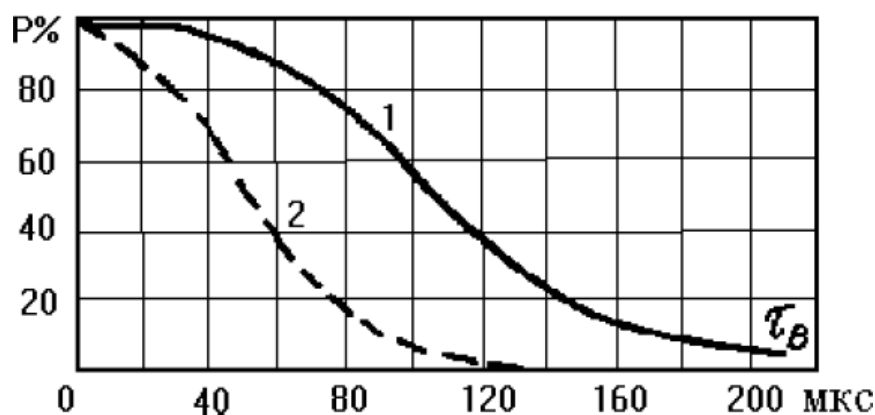


Рисунок 1.5. Статистичний розподіл тривалості напівспаду імпульсів струму блискавки при першому (1) та повторних (2) розрядах

Як видно, довжина фронту для першого розряду блискавки коливається в межах 2-10 мкс за середньої величини 5 мкс. Для повторних розрядів вона значно менша – у середньому 1 мкс. Довжина хвилі першого розряду становить 20–200 мкс при середній величині 100 мкс[11]. У повторних

розрядів вона приблизно вдвічі менша: загалом 50 мкс. Інтервали часу між повторними розрядами змінюються в межах від 0,01 до 0,5 секунди, в середньому вони становлять 0,06 секунди[11]. Одноразові блискавки спостерігаються в 50% випадків, в решті ударів кількість розрядів блискавки коливається від 2 до 10.

В окремих випадках відзначалися блискавки з числом розрядів понад 20.

Загальна тривалість блискавки становить 0,1–1 с.

Крива розподілу інтервалів часу між повторними розрядами представлена на рис. 1.6 а гістограма розподілу числа розрядів блискавки при одному її ударі - на рис. 1.7[18].

Для розрахунків перенапруг в об'єктах, уражених блискавкою, необхідно прийняти еквівалентну схему заміщення каналу блискавки зі струмом, що стікає в об'єкт. Зазвичай ділянка каналу блискавки, що розташовується на висоті кількох сотень метрів над поверхнею землі і грає основну роль у формуванні амплітуди струму блискавки в об'єкті, в розрахунках прийнято заміщати однорідною однопровідною лінією без втрат з хвильовим опором Z_M , по якій набігає хвиля з амплітудою напруги $0,5 I_M Z_M$ або джерелом струму I_M з власною провідністю $Y_M = 1/Z_M$.

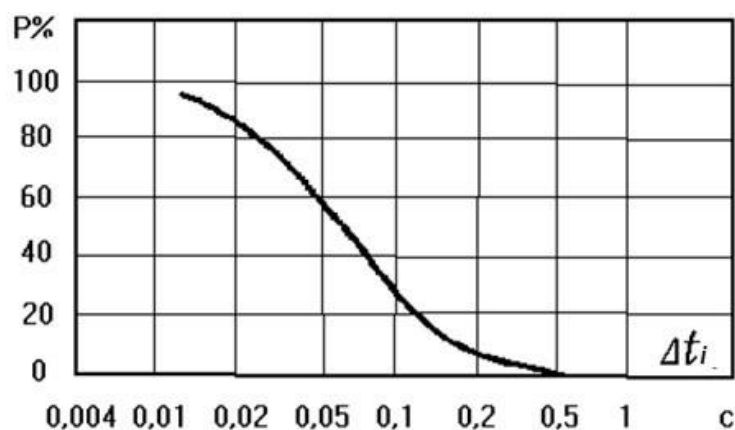


Рисунок 1.6. Крива розподілу інтервалів часу між повторними розрядами блискавки

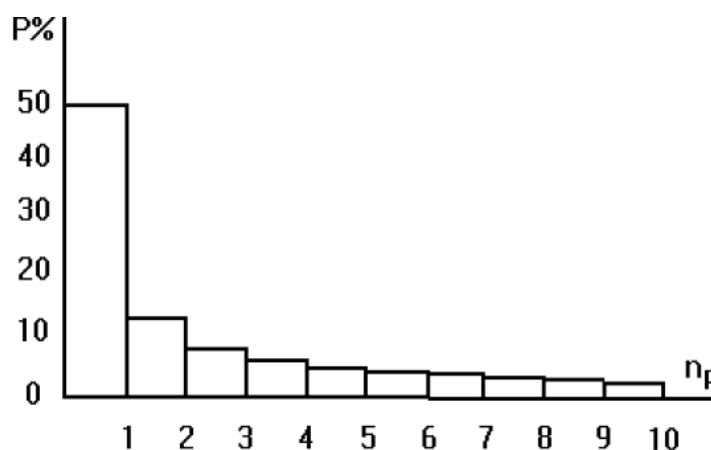


Рисунок 1.7. Гістограма розподілу числа розрядів блискавки за одного удару

Хвильовий опір каналу блискавки z_M є умовною величиною, оскільки канал головної стадії формується в процесі наростання струму блискавки і змінює свої характеристики в залежності від часу та величини струму блискавки, а також від висоти ділянки каналу, що розглядається.

Непрямі експериментальні дані та теоретичні дослідження показують, що z_M змінюється від 1-10 кОм (при малих струмах) і до 300-600 Ом (при гранично великих амплітудах струму блискавки). Оскільки найбільшу небезпеку становлять удари блискавки з великими амплітудами струму, у розрахунках грозозахисту рекомендується приймати найменше із зазначених величин $z_M=300$ Ом. Швидкість переміщення вершини головної стадії розряду від ураженого об'єкта до хмари не дорівнює швидкості світла, а становить 7-50% цієї величини, причому в землі вона приблизно в 1,5 рази вище, ніж у середньому по всій довжині.

Інтенсивність грозової діяльності найбільше об'єктивно оцінюється числом ударів блискавки на 1 км^2 земної поверхні n^* за 1 грозовий сезон. Для оцінки цієї величини необхідно знати число грозових годин T_r або днів T_d для місцевості, де знаходиться підстанція або ПЛ.

При грубих оцінках припускають, що з 1 грозову годину у середньому відбувається $n^*=0,06 \div 0,1$ ударів блискавки на 1 км^2 земної поверхні. Тому

середня кількість ударів на 1 км^2 протягом року може бути оцінена за формулою [17]:

$$n = n^* \cdot T_r = 1,5 \cdot n^* \cdot T_d.$$

Розподіл гроз на земній поверхні нерівномірний. Тому показник грозової діяльності зазвичай наводиться у вигляді спеціальних карт. Проте загалом аналіз показує, що у екваторіальних районах є зони, де спостерігається до 220 грозових днів у року. У країнах помірного поясу - зазвичай 20-50 грозових днів або 30-120 грозових годин. У полярних районах грози є рідкісною подією. У гірських умовах і для об'єктів великої висоти, а також у неоднорідних ґрунтах доводиться, крім того, зважати на збільшення ймовірності блискавок з висхідними лідерами, а також на вибіркочну вражаючу ділянку земної поверхні.

Число прямих ударів блискавки (ПУБ) у наземні об'єкти можна оцінити за такою формулою:

$$N_{\text{ПУБ}} = n \cdot S_p ,$$

де S_p - розрахункова площа тієї земної поверхні, з якої удари блискавки "стягуються" на об'єкт, км^2 .

Для одиночного зосередженого об'єкта заввишки h середньорічне число прямих ударів блискавки може бути обчислено таким чином:

$$N_{\text{ПУБ}} = \pi \cdot n \cdot R_{\text{екв}}^2 ,$$

де $R_{\text{екв}} = (3 \dots 3,5) h$ - еквівалентний радіус площі, з якої розряди стягуються на об'єкт. Ця формула наближено описує залежність числа поразок об'єкта блискавкою від його висоти при $h \leq 150$ м. При великих висотах зростання числа поразок об'єкта негативними блискавками сповільнюється, зате швидко збільшується число поразок блискавками з висхідними лідерами, що мають інші характеристики.

Для відкритих розподільчих пристроїв високовольтних підстанцій 3–500 кВ від прямих ударів блискавки обчислюється за формулою [12]

$$N_{\text{ПУБ}} = n \cdot S_p = n (l + 7h) \cdot (b + 7h) \cdot 10^{-6} ,$$

де h - висота блискавковідводів; l і b – довжина та ширина території підстанції, м.

Число прямих ударів блискавки на рік для протяжних об'єктів (ліній електропередачі) прийнято оцінювати за допомогою питомої кількості прямих ударів блискавки на 100 км довжини та на 100 грозових годин $N_{\text{ПУБ}}^*$.

При висотах опор $h \leq 30$ м $N_{\text{ПУБ}}^*$ визначається за такою формулою[12]:

$$N_{\text{ПУБ}}^* = (4 \div 6) \cdot h_{\text{cp}}; \quad h_{\text{cp}} = h_{\text{оп}} - 2/3 \cdot f,$$

де $h_{\text{оп}}$ - висота підвісів тросів або верхніх проводів на опорі, м; f - стріла провисання, м.

При висотах опор $h > 30$ м до розрахунку $N_{\text{ПУБ}}^*$ більш прийнятна формула

$$N_{\text{ПУБ}}^* = 5 \cdot h_{\text{cp}} + \frac{h_{\text{cp}}}{30} + b,$$

де b - відстань між тросами або верхніми фазними проводами (при відсутності тросів), м.

Як видно з обох формул для розрахунку $N_{\text{ПУБ}}^*$, удар блискавки на ПЛ не можна розглядати як рідкісне явище. Наприклад, дволанцюгова лінія 35 кВ з $h_{\text{cp}}=19,3$ м і $b=0$ м (один трос) при $T_{\text{г}}=30$ год на рік зазнає в середньому 35 ударів блискавки на кожні 100 км довжини. Без грозозахисту така лінія нормально працювати не зможе[11].

Висновки по першому розділу

Удар блискавки на ПЛ не можна розглядати як рідкісне явище. Наприклад, дволанцюгова лінія 35 кВ на рік зазнає в середньому 35 ударів блискавки на кожні 100 км довжини. Без грозозахисту така лінія нормально працювати не зможе.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

2.1 Особливості грозозахисту ПЛ 6-35 кВ

Підвіска грозозахисних тросів, що є основним грозозахисним заходом на лініях класів напруги 110 кВ і вище, мало ефективна для ліній 6-35 кВ, тому що це спричинено низькою міцністю імпульсної ізоляції 6-35 кВ. Внаслідок цього ймовірність зворотних перекриттів при ударах блискавки в опору або трос виявилися б, при звичайних значеннях опору заземлення опор, дуже значною. Тому лінії 6–35 кВ споруджуються зазвичай без тросів. Винятки становлять лише відповідальні лінії 35 кВ на металевих опорах.

Незважаючи на відсутність тросів, лінії 6–35 кВ мають ряд особливостей, що створюють більш сприятливі умови для їх грозозахисту. По-перше, ці лінії рідше піддаються прямим ударам блискавки через їхню відносно невелику висоту і протяжність. Нерідко вони виявляються частково захищеними від прямих ударів блискавки розташованими поблизу лінії об'єктами, що піднімаються: будинками, високими деревами, лініями вищої напруги і т.п.

По-друге, наявність ізольованої або заземленої через дугогасильний реактор нейтралі, в мережах 6–35 кВ полегшує боротьбу з наслідками імпульсних перекриттів ізоляції, сприяє гасінню дуги однофазного замикання на землю. Можна вважати, що випадки грозових перекриттів ізоляції лише однієї із фаз лінії не викликають її відключення. Дуга однофазного перекриття, що виникла, гасне, і небезпека для ліній 6-35 кВ становлять лише перекриття між фазами або одночасні перекриття з декількох фаз на землю. При міжфазних перекриттях залишається високою ймовірність згасання дуги, тому що градієнт робочої напруги вздовж шляху перекриття цих лініях невеликий.

По-третє, лінії 6-35 кВ часто споруджуються на дерев'яних опорах.

В цьому випадку довжина шляху грозового перекриття ізоляції збільшується за рахунок імпульсної міцності дерева траверси та стійки опори. Зменшується ймовірність перекриття та ймовірність переходу імпульсного

перекриття в дугу короткого замикання. Однак ці переваги дерев'яних опор не вдається реалізувати повною мірою через можливість розщеплення дерев'яних частин при прямих ударах блискавки. Для боротьби з розщепленням траверс і стійок опор у ряді випадків доводиться шунтувати дерев'яні частини опор струмовідвідними металевими спусками.

На відміну від ліній вищого класу напруги, лінії 6-35 кВ на металевих опорах часто відключаються внаслідок впливу індуктованих перенапруг, здатних викликати перекриття ізоляції 35 кВ, у п'ять разів більше, ніж кількість перенапруг, небезпечних для мережі 110 кВ. Причиною цього також є невисока імпульсна міцність ізоляції ліній 6–35 кВ на металевих опорах.

Для ліній 6–35 кВ сумарна кількість грозових відключень на рік дорівнює[16]

$$n_{\Sigma} = n_{\text{ПУБ}} + n_{\text{інд}},$$

де $n_{\text{ПУБ}}$ і $n_{\text{інд}}$ - питома (на 100 км і 100 грозових годин) число грозових відключень ПЛ від прямих ударів блискавки та внаслідок індуктованих перенапруження відповідно.

Ці величини визначаються за формулами[16]:

$$n_{\text{ПУБ}} = N^* \cdot \left[P_{n3} \cdot P_{\partial\Sigma} + (P_{n2} - P_{n3}) \cdot P_{\partial} \right] \cdot (1 - P_{\text{АПВ}});$$

$$n_{\text{інд}} = \left[N_{\text{інд}3} \cdot P_{\partial\Sigma} + (N_{\text{інд}2} - N_{\text{інд}3}) \cdot P_{\partial} \right] \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}),$$

де P_{n2} і P_{n3} - ймовірність двофазного та трифазного пререкриттів ізоляції ПЛ[16].

$$P_{n2} = \exp \left[-0,04 \frac{U_{\phi 50}^+}{z_{e2} (1 - k_{12})} \right];$$

$$P_{n3} = \exp \left[-0,04 \frac{U_{\phi 50}^+}{z_{e3} (1 - k_{12-3})} \right],$$

де $z_{e2} = z_m \parallel 0,5z_{np} \parallel R_{zi}$ - еквівалентний опір в точці удару при перекритті однієї фази; $z_{e3} = z_m \parallel R_{zi} \parallel \left[z_{np} (1 + k_{12}) / 4 \right]$ - та ж саме при перекритті двох фаз;

$U_{ф50}^+$ імпульсна 50%-на розрядна напруга фазної ізоляції на опорі; k_2 – коефіцієнт зв'язку між ураженою фазою та найбільш віддаленою від неї сусідньою фазою; k_{12-3} – теж саме для двох раніше перекритих фаз, з'єднаних паралельно, з третьою фазою.

Випадки двофазного та трифазного перекриття характеризується різними ймовірностями переходу імпульсного перекриття у коротке замикання. Для двофазного перекриття ця ймовірність P_d може бути приблизно визначена за формулою[6]:

$$P_d \approx 1,6 U_{роб} / l_{пер} - 0,06 ,$$

де $l_{пер}$ – сумарна довжина шляху імпульсного перекриття, см; $U_{роб}$ – ефективне значення робочої напруги вздовж шляху перекриття, кВ. Обчислену ймовірність встановлення дуги приймають рівною 0,1 якщо відповідно до розрахунку вона менше, ніж це значення. Якщо за розрахунком P_d більше одиниці, її приймають рівною 1,0. Таким чином, область ймовірностей P_d обмежується інтервалом $0,1 \leq P_d \leq 1,0$. Передбачається, що розраховане значення P_d має місце при горінні лише однієї дуги, а за наявності дуг на сусідніх проміжках (з іншими джерелами робочої напруги) їх гасіння є незалежними подіями. При цьому ймовірність встановлення хоча б однієї дуги при трифазному перекритті можна приблизно оцінити за формулою[7]:

$$P_{d\Sigma} = 2P_d(1-P_d) + P_d^2 = P_d(2-P_d).$$

Після встановлення дуги входить у дію АПВ, що з ймовірністю $P_{АПВ}$ ліквідує наслідки грозового перекриття. Згідно з досвідом експлуатації, для ліній 6–10 кВ $P_{АПВ} \approx 0,54$, а для ліній 35 кВ $P_{АПВ} \approx 0,7$ [9].

$$N_{ін02} = \frac{936 \bar{h}_{cp}}{U_{ін02}} \exp(-U_{ін02} / 260);$$

$$N_{ін03} = \frac{936 \bar{h}_{cp}}{U_{ін03}} \exp(-U_{ін03} / 260);$$

$$U_{in02} = U_{\phi50}^+ \cdot \frac{R_{zi} + 0,5z_{np}}{(1 - k_{12}) \cdot 0,5z_{np}};$$

$$U_{in03} = U_{\phi50}^- \cdot \frac{R_{zi} + z_{np} \cdot \frac{(1 - k_{12})}{4}}{(1 - k_{12-3}) \cdot \frac{(1 - k_{12})}{4}}.$$

де $\bar{h}_{cp} = h_{on} - 2/3 \cdot f$ - середня висота підвісу верхнього дроту; h_{np} – висота його підвісу, f - провісу.

Наприклад розглянемо розрахунок питомої кількості (на 100 км і 100 грозових годин) відключень лінії 35 кВ на металевих опорах (тип проміжної опори П35-2). Для такої лінії: число ланцюгів на опорі – 2, висота опори – $h_o=23$ м, висота підвісу верхнього проводу на опорі $h_{np}=19,3$ м, розрахункова довжина прольоту $l_{np}=250$ м, індуктивність опори $L_o=13,8$ мкГн, взаємна індуктивність каналу блискавки та опори $M_o=4,6$ мкГн, марка проводу АС-120, радіус проводу $r_{np}=0,0076$ м, розрахункова стріла провісу проводу $=3$ м, імпульсний опір заземлення опори $R_{zi} = 20$ Ом.

Середню висоту верхнього дроту над землею h_{cp} визначаємо за формулою:

$$h_{cp} = h_{on} - 2/3 \cdot f = 19,3 - \frac{2}{3} \cdot 3 = 17,3 \text{ м.}$$

Неважко переконатися, що для ПЛ 35 кВ на проміжних опорах П-35-2, що мають три ізолятори типу ПС 6-Б, хвильовий опір з урахуванням корони $z_{np}=450$ Ом, коефіцієнт зв'язку провід – другий провід $k_{12}=0,29$, раніше перекритих двох фаз із третьою фазою $k_{12-3}=0,33$, 50 %-на розрядна напруга фазної та міжфазної ізоляції при позитивній та негативній полярностях дорівнює відповідно $U_{cp50\%}^+ = 425$ кВ, $U_{mf50\%}^+ = 740$ кВ, $U_{mf50\%}^- = 850$ кВ.

Еквівалентний опір у точці удару при перекритті однієї і двох фаз:

$$z_{e2} = z_m \parallel 0,5z_{np} \parallel R_{zi} = 300 \parallel 0,5 \cdot 450 \parallel 20 = 17,3 \text{ Ом}$$

$$z_{e3} = z_m \parallel R_{zi} \parallel \left[\frac{z_{np}(1 + k_{12})}{4} \right] = 300 \parallel 20 \parallel 450 \cdot (1 + 0,29)/4 = 16,6 \text{ Ом.}$$

Імовірності двократного та трикратного перекриттів ізоляції ПЛ:

$$P_{n2} = \exp \left[-0,04 \cdot \frac{U_{\phi 50}^+}{e2} \cdot \frac{z}{1-k} \right] = \exp \left[-0,04 \cdot \frac{450}{17,3 \cdot (1-0,29)} \right] = 0,256;$$

$$P_{n3} = \exp \left[-0,04 \cdot \frac{U_{\phi 50}^+}{e3} \cdot \frac{z}{1-k} \right] = \exp \left[-0,04 \cdot \frac{450}{16,6 \cdot (1-0,33)} \right] = 0,219.$$

Ймовірність переходу імпульсного перекриття у коротке замикання

$$P_d \approx 1,6 U_{\text{роб}} / l_{\text{пер}} - 0,06 = 1,6 \cdot (35 / \sqrt{3} \cdot 51) - 0,06 = 0,57.$$

Ймовірність встановлення хоча б однієї дуги при трифазному перекритті:

$$P_{d\Sigma} = 2P_d(1-P_d) + P_d^2 = P_d(2-P_d) = 0,57 \cdot (2-0,57) = 0,815.$$

Ймовірність успішності АПВ у мережах 35 кВ прийемо $P_{\text{АПВ}} \approx 0,7$. Тоді коефіцієнт неуспішності АПВ дорівнюватиме $1-P_{\text{АПВ}} = 1-0,7 = 0,3$.

Питома кількість ударів блискавки на рік при $T_r=100$ год та $l=100$ км

$$N_{\text{ПУБ}}^* = 1,6 \cdot \dot{n}_{\text{сп}} = 1,6 \cdot 17,3 = 103,8;$$

тому кількість грозових відключень ПЛ 35 кВ від прямих ударів блискавки

$$n_{\text{ПУБ}} = N_{\text{ПУБ}}^* \cdot \left[P_{n3} \cdot P_{\partial\Sigma} + (P_{n2} - P_{n3}) \cdot P_{\partial} \right] \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}) =$$

$$= 103,8 \cdot [0,219 \cdot 0,815 + (0,256 - 0,219)] \cdot 0,3 = 6,7 \text{ відк./год.}$$

Розглянемо другу складову n_{σ} , тобто $n_{\text{інд}}$. Величина $U_{\text{інд}2}$ і $U_{\text{інд}3}$ дорівнює:

$$U_{\text{інд}2} = U_{\phi 50}^+ \cdot \frac{R_{zi} + 0,5z_{np}}{(1-k_{12}) \cdot 0,5z_{np}} = \frac{425 \cdot (20 + 0,5 \cdot 450)}{(1-0,29) \cdot 0,5 \cdot 450} = 651 \text{ кВ}$$

Питомі числа двофазних та трифазних перекриттів:

$$U_{\text{інд}3} = U_{\phi 50}^- \cdot \frac{R_{zi} + z_{np} \cdot \frac{(1-k_{12})}{(1-k)}}{1-k_{12-3} \cdot \frac{12}{4}} = 740 \cdot \frac{20 + 450 \cdot \frac{1+0,29}{4+0,29}}{(1-0,33) \cdot 450} = 1257 \text{ кВ,}$$

Тому величина пінд дорівнюватиме:

$$N_{\text{інд}2} = \frac{936 \cdot 17,3}{651} \exp(-651/260) = 2,28;$$

$$N_{\text{інд}3} = \frac{936 \cdot 17,3}{1257} \exp(-1257/260) = 0,12.$$

Тому величина пінд дорівнюватиме:

$$n_{\text{інд}} = [N_{\text{інд}3} \cdot P_{d\Sigma} + (N_{\text{інд}2} - N_{\text{інд}3}) \cdot P_d] (1 - P_{\text{АПВ}}) =$$

$$=[0,12 \cdot 0,815 + (2,28 - 0,12) \cdot 0,57] \cdot 0,3 = 0,4 \text{ відкл/рік.}$$

Таким чином, сумарна кількість грозових відключень лінії 35 кВ.

$$n_{\sigma} = n_{\text{ПУМ}} + n_{\text{інд}} = 6,7 + 0,4 = 7,1 \text{ відкл / рік.}$$

Розрахунки за цими формулами показують, що n_{σ} мають значення:

- для ПЛ 6–10 кВ на дерев'яних опорах – у межах від 2 до 6;
- для ПЛ 6–10 кВ на залізничних опорах – у межах від 10 до 30;
- для ПЛ 20-35 кВ на дерев'яних опорах - в межах від 5 до 15.

2.2. Грозозахист ПЛ та їх ослаблених місць

Лінії 35 кВ на металевих опорах захищаються тросами лише в особливо відповідальних випадках. Зазвичай вони і без тросів виявляються грозостійкими. Як зазначалося вище, основними грозозахисними заходами тут є використання ізольованої нейтралі або дугогасного реактора, а також АПВ. Для цих ліній деяка частка відключень визначається індукованими перенапругами.

Лінії 35 кВ на дерев'яних опорах мають більш високу надійність грозозахисту за рахунок використання високої імпульсної міцності дерева. Оцінки їх питомої кількості відключень мають орієнтовний характер, оскільки імпульсна міцність дерева, за літературними даними, може змінюватись у два-три рази залежно від ступеня зволоження та стану деревини. Крім того, опір заземлення залізобетонних пасинків на дерев'яних опорах, що не мають спусків, не нормується, що може призвести до великого розкиду його значень на реальній лінії.

Лінії 6-20 кВ як на металевих, так і на дерев'яних опорах також не мають тросового захисту і захищаються від грозових впливів за допомогою реактора, що дугогасить, або ізольованої нейтралі і АПВ. На опорах з ослабленою ізоляцією або з підвищеною ймовірністю грозового враження встановлюються іскрові проміжки або вентильні розрядники.

Вище при розрахунку очікуваного річного числа грозових відключень ПЛ 6–35 кВ передбачалося, що вздовж лінії ізоляція однорідна і немає окремих

місць із ослабленою ізоляцією. Однак, на реальних лініях завжди є такі місця, які за відсутності відповідних заходів захисту може призвести до значного збільшення очікуваного річного числа грозових відключень.

В останні роки все частіше на ПЛ 6–35 кВ для захисту ослаблених місць встановлюються нелінійні обмежувачі перенапруг.

Окремі місця ліній потребують додаткових заходів захисту. До таких місць відносяться [19]:

- перетини ліній електропередач між собою;
- перетини ліній електропередач з лініями зв'язку, трамвайними лініями та лініями електрифікованої залізниці;
- опори ліній електропередач зі зниженою електричною міцністю ізоляції;
- високі опори перехідних прольотів;
- відгалуження до підстанцій на відпайках та секційні роз'єднувачі на лініях.

Захист перетинів ліній електропередач викликаний необхідністю запобігти важким аваріям у разі грозового перекриття з верхньої лінії на нижню лінію електропередачі або лінію зв'язку. Такі перекриття можуть спричинити хибну роботу релейного захисту та системні аварії, пошкодження електрообладнання ліній нижчої напруги та навіть спричинити людські жертви. Найбільшу небезпеку становить удар блискавки у проліт перетину. Відстань між проводами ліній, що перетинаються, в цьому прольоті повинна бути досить великою, а амплітуда перенапруг обмежена розрядниками або ГНН, розташованими якомога ближче до місця перетину. Тому в прольоті перетину доцільно зняти грозозахисний трос з нижньої лінії та вибрати точку перетину далі від середини прольоту верхньої лінії.

Якщо відстань від місця перетину до найближчої опори не перевищує 40 м, то розрядники або ГНН можна встановлювати лише на найближчій опорі. На лініях до 35 кВ, що мають пристрій АПВ замість розрядників допускається встановлення захисних проміжків. Опір заземлення опор прольоту перетину

має бути вище 10...20 Ом. Якщо опори дерев'яні, то рекомендується встановлювати паралельно гірляндам трубчасті розрядники чи ОПН, чи іскрові проміжки, з'єднані спусками із заземлювачами опори.

Необхідна відстань S по вертикалі між проводами ліній, що перетинаються, залежить від номінальної напруги верхньої лінії, опору заземлення опор, довжини прольоту і відстані між місцем перетину і найближчою опорою (табл. 2.1). Як очевидно з таблиці, встановлення захисних засобів дозволяє зменшити відстань S на 20–30 %[12].

Таблиця 2.1 Мінімальні допустимі відстані між проводами повітряних ліній

Напруга верхньої лінії, кВ	Довжина прольоту пересікаючої лінії, м	Найменші допустимі відстані S між проводами пересікаючих ліній, м			
		при найменшій відстані від міста перетину до найближчої опори верхньої лінії з розрядником, м			при відсутності спеціальних засобів грозозахисту перетину
		30–70	70–100	100–150	
35	До 200	3,0	3,0–4,0	–	5,0
	200–300	3,0–4,0	4,0–4,5	4,5–5,0	
6–20	До 100	2,0	–	–	4,0
	100–150	2,0–2,5	–	–	

Окремі металеві та залізобетонні опори ліній, виконаних головним чином на дерев'яних опорах без тросів, є місцем зі зниженою імпульсною електричною міцністю ізоляції.

Ці місця доцільно захистити трифазними комплектами вентильних розрядників чи нелінійних обмежувачів перенапруг.

Високі перехідні прольоти ПЛ є джерелами підвищеної кількості грозових відключень. Це пов'язано з великою висотою опор і проводів над землею (водою), що призводить до збільшення кількості ударів блискавки в проліт, зниження ефективності захисту тросом, збільшення кількості зворотних перекриттів через велику індуктивність опор. Зниження імпульсного опору заземлення опор у разі стає недостатнім.

Розрахунок очікуваного числа відключень ПЛ з високими перехідними прольотами утруднений необхідністю обліку складного рельєфу місцевості під прольотом і великої різниці висоти проводу над землею окремих ділянках прольоту. Тому грозозахист відповідальних прольотів розраховується індивідуально. Як показують розрахунки, найбільш ефективним засобом захисту високих переходів є встановлення РВ або ГНН у верхній частині перехідних опор або на опорах, сусідніх з перехідними.

Висновки по другому розділу

Високі перехідні прольоти ПЛ є джерелами підвищеної кількості грозових відключень. Це пов'язано з великою висотою опор і проводів над землею (водою), що призводить до збільшення кількості ударів блискавки в проліт, зниження ефективності захисту тросом, збільшення кількості зворотних перекриттів через велику індуктивність опор.

РОЗДІЛ 3

СПОСОБИ ЗАХИСТУ ВІД ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ ЕЛЕМЕНТІВ МЕРЕЖ 6-35 кВ

3.1. Захист підстанції від прямих ударів блискавки

Грозозахист підстанцій ускладнюється тим, що за рахунок багаторазових відображень хвиль перенапруги на підстанції можуть бути вищими, ніж на лінії. Для забезпечення досить високої надійності роботи підстанції під час грозових впливів необхідно виконати комплекс захисних заходів. Розглянемо загалом кожне з цих заходів окремо.

Прямий удар блискавки становить небезпеку для відкритих розподільних пристроїв (ВРП), будівель машинного залу, пульта управління, закритих розподільчих пристроїв (ЗРП), оливно- та нафтогосподарств, градирень, димових труб та інших наземних споруд електростанцій та підстанцій.

Захист будівель та споруд, що мають металеві несучі конструкції або металеву покрівлю, досить надійно забезпечується шляхом заземлення металевих частин. Цегляні, бетонні та залізобетонні споруди, а також металеві опори, що підтримують проводи на підстанції, захищають блискавковідводами, що встановлюються на цих спорудах, або блискавковідведеннями, що стоять окремо. Зона захисту блискавковідводів, встановлених на території ВРП, повинна охоплювати всю територію разом з об'єктами, що піднімаються. Тим самим забезпечується досить мала ймовірність прориву, тобто прямого удару блискавки в об'єкти, що захищаються.

Для захисту пожежо- або вибухонебезпечних об'єктів необхідно передбачити також захист від іскроутворення між усіма металевими частинами, що стикаються, шляхом забезпечення надійного зварного контакту між ними.

Тросові блискавковідводи на основній території підстанції застосовувати не рекомендується, тому що у разі обриву троса він може впасти на збірні

шини та вивести з ладу відразу всю підстанцію. Їх використовують для захисту від прямих ударів блискавки лише повітряних перемичок між окремими частинами станції чи підстанції.

Якщо блискавковідведення встановлено на трансформаторному або шинному порталі, то при ударі блискавки на ньому виникає висока напруга і може статися зворотне перекриття гірлянди з порталу на провід. Коли встановлені окремі блискавковідводи або використовуються прожекторні щогли, то перекриття може відбутися повітрям між блискавковідводом і проводами або обладнанням. Для захисту від таких перекриттів необхідно забезпечити досить малий імпульсний опір заземлення блискавковідводів та високу імпульсну міцність гірлянд ізоляторів та повітряних проміжків. У деяких випадках доцільно видалити блискавковідведення від об'єктів, що захищаються, на безпечну відстань.

Виникає також небезпека пробоя в землі між індивідуальним заземленням окремого блискавковідводу та іншими підземними пристроями: кабелями, трубопроводами и т. д. При такому пробі на робоче заземлення підстанції висока імпульсна напруга із заземлюючого пристрою може потрапити на корпус трансформатора та пошкодити ізоляцію його обмотки низької напруги. Для захисту від таких пошкоджень необхідно встановити вентильні розрядники або нелінійні обмежувачі перенапруг між виводами обмотки НН і корпусом трансформатора, а також забезпечити достатнє видалення провідників електрообладнання, що заземлюють від заземлення та струмовідвідного спуску блискавковідводу.

В даний час для визначення меж зони захисту рекомендуються формули, уточнені за результатами досвіду експлуатації. Для одиночного стрижневого блискавковідводу висотою $h \leq 150$ м зона захисту є круговим конусом (рис. 3.1) з висотою на висоті $h_0 < h$, перетин якого на висоті h_x має радіус r_x [20].

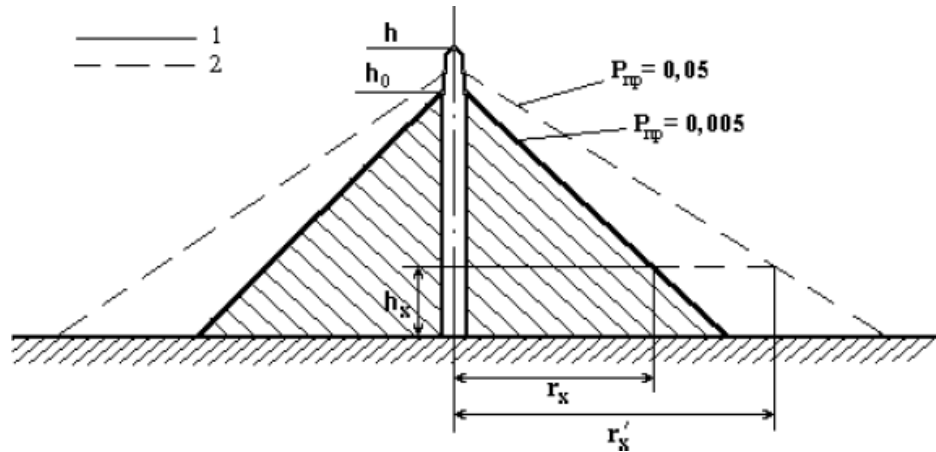


Рисунок 3.1. Зони захисту стержневого блискавковідводу: 1 – для $P_{\text{пр}}=0,005$; 2 – для $P_{\text{пр}}=0,05$

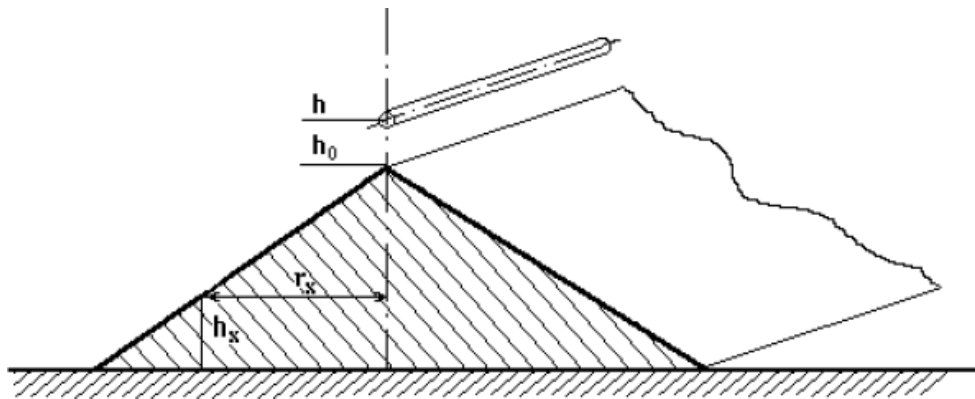


Рисунок 3.2. Зона захисту тросового блискавковідводу

Кордон зони захисту, що відповідає ймовірності прориву $P_{\text{пр}}=0,005$, знаходиться за формулами[20]:

$$h_0 = 0.85 \cdot h;$$

$$r_x = (1.1 - 0.002 \cdot h) \left(h - \frac{h_x}{0.85} \right).$$

де значення $h_0 < h$ враховує можливість прориву блискавки не згори, а збоку.

Якщо визначається межа зони захисту, що відповідає більшій ймовірності прориву: $P_{\text{пр}}=0,05$, використовуються формули[20]:

$$h'_0 = 0.92 \cdot h; \quad r_x = 1,5 \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right).$$

Висота орієнтування блискавок зазвичай розташовується нижче 150 м. Якщо висота блискавководу понад 150 м, то підвищується ймовірність проривів блискавки не зверху, а збоку від блискавководу. Тому збільшення висоти одиночного блискавководу понад 150 м практично не розширює його зону захисту.

Якщо два стрижневі блискавководи знаходяться поблизу один від одного (на відстані менше $3...5h$), конфігурація межі зони захисту між ними визначається відповідно до рис. 3.3. Виникає додатковий обсяг зони захисту, зумовлений спільною дією двох блискавководів. Габаритні розміри зони подвійного стрижневого блискавководу розраховуються за формулами[20]:

а) для $P_{пр}=0,005$:

$$h_c = \begin{cases} h_0 & \text{при } L \leq h, \\ \left(0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h \right) (L - h) & \text{при } L \geq h; \end{cases}$$

$$r_{cx} = \begin{cases} r_x & \text{при } L \leq h, \\ r \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right) / h & \text{при } L \geq h; \end{cases}$$

б) для $P_{пр}=0,005$:

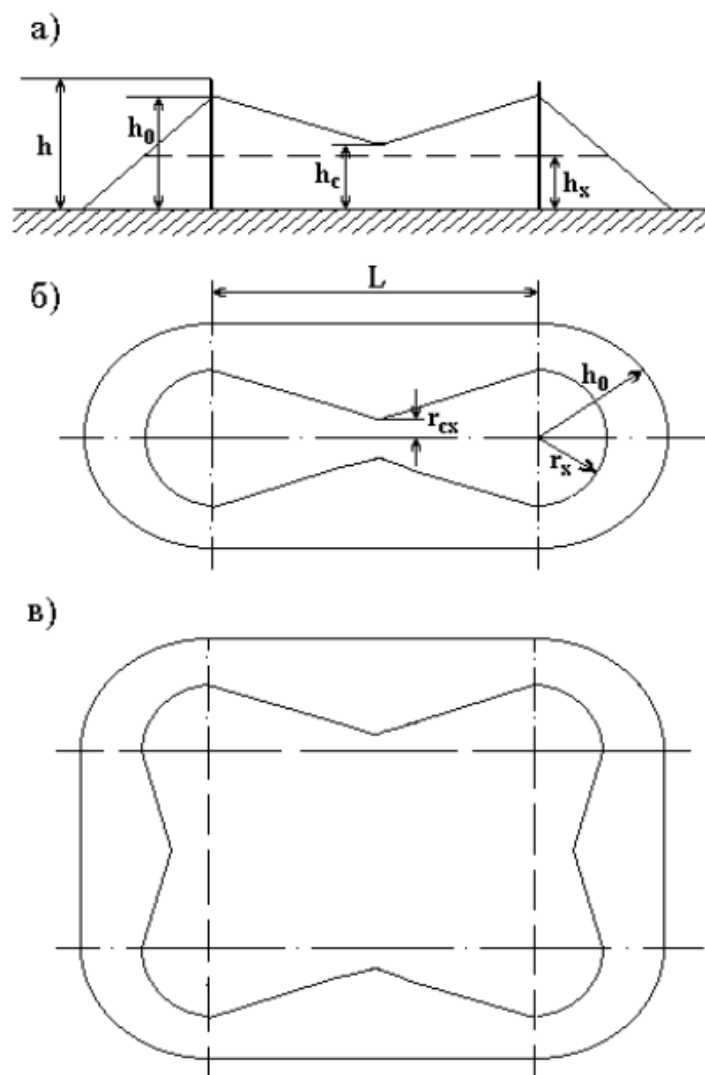
$$h^c = \begin{cases} h_0 & \text{при } L \leq 1,5h, \\ h - 0,14 \cdot (L - 1,5h) & \text{при } L \geq 1,5h; \end{cases}$$

Якщо відстань L між блискавководами перевищує $3h$ ($P_{пр}=0,005$) або $5h$ ($P_{пр}=0,05$), кожен із блискавководів умовно розглядається як одиночний.

$$r_{cx} = \begin{cases} r_x & \text{при } L \leq 1,5h, \\ r \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right) / h & \text{при } L \geq 1,5h; \end{cases}$$

Декілька близько розташованих блискавководів (наприклад, три-чотири) сприяють взаємному посиленню захисної дії і утворюють "багаторазове" блискавководення. Його зона захисту визначається попарними зонами захисту трьох найближчих блискавководів. При цьому

вважається, що внутрішні зони захищені так само надійно, як і одиночна зона блискавковідведення (рис. 3.3, в).



Рисеујг 3.3. Зони захисту подвійного (а, б) и групового (в) блискавковідводів

Для захисту протяжних об'єктів використовуються тросові блискавковідводи, що являють собою провідні троси, натягнуті над об'єктом, що захищається, і заземлені на опорах. На лініях електропередачі сталеві або сталеві алюмінієві троси підвішують на спеціальних тросостойках, встановлених на вершинах опор[12].

Конфігурація зони захисту одиночного тросового блискавковідведення (рис. 3.2) визначається за формулами[20]:

а) якщо $P_{np} = 0,005$,

$$h_0 = 0.85 \cdot h; \quad r_x = (1,35 - 0,0025h) \left(h - \frac{h_x}{0,85} \right);$$

б) якщо $P_{np} = 0,05$,

$$h_0 = 0.95 \cdot h; \quad r_x = 1,7 \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right).$$

Для системи двох тросових блискавковідводів, розташованих паралельно на відстані L , найменша висота зони захисту між ними h_c може бути оцінена за формулою[20]:

при $L \leq h$

$$h_c = 0.95 \cdot h_0;$$

при $L > h$

$$h_c = h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot h) \cdot (L - h).$$

При використанні тросів для захисту лінії електропередач зазвичай потрібно не тільки перевірити, чи знаходяться всі фазні проводи в зоні захисту тросів, але і визначити ймовірність проривів блискавки на фазні проводи повз троси. Приймається, що можливість прориву на середній провід дорівнює нулю. Для визначення ймовірності прориву на два крайні проводи P_{np} можна скористатися емпіричною формулою, отриманою на підставі досвіду експлуатації [20]:

$$\lg P_{np} = \alpha \sqrt{h_0} / 90 - 4;$$

де h_0 - висота підвіски троса на опорі; α – кут тросового захисту на опорі, який визначається як кут між вертикаллю та лінією трос-провід.

Для типових ліній високої напруги величина P_{np} має порядок $10^{-2} \dots 10^{-4}$.

Аналогічна структурою формула з дещо відмінними параметрами запропонована в [12]:

$$\lg P_{np} = \alpha \sqrt{h_0} / 75 - 3,95.$$

Для уточнення цієї залежності необхідні додаткові дані спостережень, а також методика розрахунку ймовірності попадання блискавки в об'єкт, що захищається за наявності блискавковідводу.

Відкриті розподільчі пристрої підстанцій захищають від прямих ударів блискавки системою стрижневих блискавковідводів, що охоплюють своїми зонами захисту (з урахуванням їхньої колективної дії) все обладнання підстанції. Установка блискавковідводів безпосередньо на конструкціях ВРП, що підтримують проводи ошиновування підстанції, дозволяє найбільш ефективно використовувати їхню зону захисту, зменшити витрати на їх спорудження і зробити ВРП більш компактними. Проте протікання струму блискавки по конструкціях, що підтримують, створює небезпеку виникнення високого потенціалу на них та зворотних перекриттів на струмопровідні елементи підстанції. З метою запобігання зворотним перекриттям на таких підстанціях розроблено спеціальні заходи. У тих випадках, коли ймовірність зворотних перекриттів не вдається знизити до досить малої величини, встановлюють стрижневі блискавковідводи, що окремо стоять, з відокремленими заземлювачами.

Необхідність спорудження блискавковідводів, що окремо стоять, визначається номінальною напругою ізоляції ВРП, питомим опором ґрунту і величиною імпульсного опору заземлення конструкцій ВРП. В ВРП 35 кВ окремі блискавковідводи встановлюють при $\rho > 750 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а також при значеннях ρ від 500 до 750 $\text{Ом} \cdot \text{м}$, якщо площа заземлювального контуру менше 10000 м² [17].

На трансформаторних порталах встановлювати стрижневі блискавковідводи недоцільно, оскільки деяка частка їх потенціалу при протіканні струму блискавки передається на бак трансформатора, при цьому

можуть виникати зворотні перекриття з бака на обмотки, заземлені в інших точках мережі. При $\rho > 350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, така небезпека стає відчутною, і Правила влаштування електроустановок у цьому випадку не допускають використання трансформаторних порталів для встановлення блискавковідводів. На підстанціях з вищою напругою 20 та 35 кВ встановлювати блискавковідведення на трансформаторному порталі дозволяється лише за умови, якщо опір заземлювального пристрою $R_{zi} \leq 4 \text{ Ом}$ (без урахування заземлювачів поза контуром заземлення ВРП) [17], та при виконанні рада заходів щодо захисту від зворотних перекриттів.

Орієнтовну оцінку очікуваного числа прямих ударів блискавки в обладнання підстанції можна отримати, помноживши річну кількість ударів блискавки в підстанцію $N_{\text{ПУБ}}$ на ймовірність прориву блискавки всередину зони захисту відводів блискавки $P_{\text{пр}}$. Число $N_{\text{ПУБ}}$ пропорційно площі земної поверхні S_p , з якої удари блискавки "стягуються" на підстанцію[20]:

$$S_p \approx (l + 7h)(b + 7h),$$

де h - висота блискавковідводів; l і b – довжина та ширина території підстанції. При цьому отримуємо[20]:

$$N_{\text{ПУБ}} = n \cdot T_r \cdot S_p,$$

де $n = 0,06 \dots 0,1$ - середня кількість ударів блискавки на 1 км^2 земної поверхні за грозову годину; S_p - зазначена вище "розрахункова" площа підстанції, км^2 ; T_r – кількість грозових годин на рік.

Прорив блискавки всередину зони захисту призводить до аварії лише в тому випадку, якщо амплітуда струму блискавки виявиться достатньою для перекриття ізоляції (з ймовірністю $P_{I \text{ пр}}$), а імпульсне перекриття, що виникло, або пробом створять силову дугу або незворотну зміну внутрішньої ізоляції (з ймовірністю P_d). Відповідно до цього число аварій від проривів блискавки на рік $n_{\text{пр}}$ можна розрахувати за такою формулою[21]:

$$n_{\text{пр}} = N_{\text{ПУБ}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot P_{I \text{ пр}} \cdot P_d.$$

Враховуючи досвід експлуатації, добуток $P_{\text{пр}} \cdot P_{I \text{ пр}} \cdot P_{\text{д}}$ приймають рівним $10^{-3} \cdot 10^{-4}$. При цьому вважають, що більшість обладнання розміщується не на кордоні, а в глибині зони захисту, де ймовірність ураження менша.

Наприклад розглянемо підстанцію 35 кВ, що у районі з кількістю грозових годин на рік $T_{\text{г}}=50$ год. Ширина і довжина площі підстанції $b=100$ м, $l=150$ м, висота блискавковідводів, встановлених її захисту, $h=30$ м.

Розрахункова площа такої підстанції

$$S_{\text{р}} = (l + 7h)(b + 7h) \cdot 10^{-6} \text{ км}^2 = (150 + 7 \cdot 30)(100 + 7 \cdot 30) \cdot 10^{-6} \approx 0,115 \text{ км}^2.$$

Тому кількість аварій від проривів блискавки на рік:

$$n_{\text{пр}} = N_{\text{ПУБ}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot P_{I \text{ пр}} \cdot P_{\text{д}} = 0,1 \cdot 50 \cdot 0,115 \cdot 10^{-3} = 5,75 \cdot 10^{-4}, \text{ а } \tau_{\text{пр}} = \frac{1}{n_{\text{пр}}} \approx 1740 \text{ років.}$$

Прямий удар блискавки в блискавковідвід або іншу заземлену металеву конструкцію на підстанції призводить до появи на ній імпульсу напруги, амплітуда якого може бути підрахована за формулою[21]

$$U_0 = I_{\text{М}} R_{\text{зі}} + I_{\text{М}}' L_0,$$

де $I_{\text{М}}$ та $I_{\text{М}}'$ – амплітуда та крутість струму блискавки; $R_{\text{зі}}$ - імпульсний опір заземлення конструкції; L_0 – її індуктивність. Для стрижневого блискавковідводу L_0 мкГн приблизно дорівнює $0,6h$, де h - висота блискавковідводу, м. Наприклад, якщо висота блискавковідводу $h = 30$ м, а опір заземлення $R_{\text{зі}} = 40$ Ом, то при середніх значеннях параметрів грозового розряду $I_{\text{М}} = 20$ кА, $I_{\text{М}}' = 10$ кА/мкс потенціал на його вершині досягне величини $U_0 = 20 \cdot 40 + 0,6 \cdot 30 \cdot 10 = 980$ кВ. Оскільки середня пробивна напруженість у повітрі становить близько 500 кВ/м, об'єкти, розташовані ближче двох метрів від блискавковідводу можуть бути пошкоджені при таких розрядах блискавки внаслідок зворотних перекриттів з блискавковідводу. З цього прикладу видно, що запобігти зворотним перекриттям можна шляхом зниження імпульсного опору заземлення блискавковідводу $R_{\text{зі}}$ і видалення об'єктів, що захищаються від блискавковідведення на безпечну відстань.

У правилах пристрою електроустановок рекомендується витримувати відстань між обладнанням, що захищається, і блискавковідведенням по повітрю $S_{\text{п}}$ (в метрах), виходячи з наступних співвідношень[18]:

$$S_{\text{п}} > 0,12R_{\text{зі}} + 0,1h_{\text{х}}; S_{\text{п}} \geq 5 \text{ м},$$

де $h_{\text{х}}$ - висота розташування об'єкта. У землі відстань між електродами відокремленого заземлювача блискавковідводу і заземлюючим пристроєм ВРП рекомендується не менше $S_{\text{з}} = 0,2 R_{\text{зі}}; S_{\text{з}} \geq 3 \text{ м}$.

Заземлюючі провідники укладають біля стійки конструкції, на якій встановлено блискавковідведення, що розходяться в двох-трьох різних напрямках, щоб послабити екранування та зменшити коефіцієнт імпульсу заземлювача.

Для зниження імпульсного опору заземлення блискавковідводу з відривом трохи більше 3...5 м від місця його приєднання до заземлювачу встановлюють додаткові заземлюючі електроди. Такий захід обов'язковий в ВРП 110...150 кВ, а також і на підстанціях вищих класів напруги у разі встановлення блискавковідведення на трансформаторному порталі.

При встановленні блискавковідводу в комірці трансформатора звертають увагу на достатнє видалення між місцями приєднання до заземлюючого контуру блискавковідводу та бака трансформатора (не менше 15 м).

Крім того, у цьому випадку рекомендується наблизити точки підключення розрядників на стороні ВН і особливо НН до введення трансформатора. Ці заходи спрямовані на запобігання зворотним перекриттям з бака трансформатора на обмотки, які можуть бути заземлені в іншій точці і не брати участь у імпульсному підйомі потенціалу бака трансформатора при протіканні струму блискавки його заземлювачу.

Річна кількість аварій від зворотних перекриттів визначається за формулою[18]

$$n_0 = N_{\text{ПУБ}} \cdot P_0 \cdot P_{\text{д}},$$

де P_0 - ймовірність зворотного перекриття ізоляції при прямому ударі блискавки в блискавковідвід; P_d - можливість переходу імпульсного перекриття ізоляції в силову дугу при зворотних перекриттях.

При виконанні зазначених вище рекомендацій величина річного числа аварій внаслідок зворотних перекриттів n_0 виявляється дуже малою.

3.2. Особливості грозозахисту електричних машин

Грозозахист електричних машин (генераторів, синхронних компенсаторів та високовольтних електродвигунів) має свої особливості:

а) рівень електричної міцності ізоляції у машин, що тривалий час в експлуатації, значно нижчий, ніж у іншого електроустаткування;

б) відсутні вентильні розрядники, які б забезпечити досить високу надійність захисту такої ізоляції від перенапруг;

в) грозові пошкодження ізоляції машини дуже значні, тому що через місце пробою ізоляції машини продовжує протікати аварійний струм за рахунок ЕРС залишкового намагнічування навіть після зняття збудження машини, відключеної від мережі;

г) вихід з ладу електричних машин зумовлює велику шкоду народному господарству.

З урахуванням зазначених особливостей для надійного грозозахисту електричних машин доводиться використовувати спеціальні заходи.

Зокрема, на підході лінії встановлюють додаткові розрядники, що відводять частину струму хвилі, що набігає в землю і знижують таким чином імпульсну напругу на машині. Крім того, використовується захисна дія кабельних вставок на підходах. Щоб зменшити крутість фронту імпульсів перенапруги на затискачах машини, паралельно з нею підключають конденсатори. Зниженню крутості фронту сприяють фідерні реактори, встановлені для обмеження струмів короткого замикання.

За наявності у схемі грозозахисту машини кількох комплектів розрядників виникає необхідність забезпечити їхнє надійне спрацювання. Для цього

додаткові розрядники включають на деякій відстані від основного у межах довжини захищеного підходу лінії. Підвищує надійність їхнього спрацьовування також і наявність послідовних реакторів між розрядниками.

Завдання грозозахисту набагато спрощується, якщо електрична машина приєднується до повітряної мережі не безпосередньо, а через трансформатор. У цьому випадку трансформатор суттєво обмежує амплітуду та крутість імпульсів грозових перенапруг на затискачах машини.

Як критерій ефективності грозозахисту електричних машин найчастіше використовують показник надійності грозозахисту, що є числом років безаварійної роботи при грозових ситуаціях.

Ізоляція машини має високу початкову електричну міцність, що перевищує у 8-10 разів максимальну допустиму робочу напругу, причому коефіцієнт імпульсу для неї становить $K_i = 1,3-1,6$ [6].

У процесі експлуатації електрична міцність ізоляції сильно знижується з різних причин: вібрації, корони, електродинамічних зусиль, що виникають за к. з.; випаровування летких речовин та пересихання; розтріскування і т. д. При цьому K_i падає до 0,7-1,0 і нижче [6, 13].

Ізоляція не рідше одного разу на один-два роки повинна відчуватися змінною напругою $(1,5-1,7)U_n$ або постійною напругою $(2,5-3,0)U_n$, де U_n – номінальна напруга машини. У зв'язку з цим прийнято, що для головної ізоляції електричних машин допустима величина грозових перенапруг $U_{\text{доп}} = (1,5-1,7) \sqrt{2} U_n = (2,2-2,4)U_n$ (таблиця 3.1) [6].

У таблиці 3.2 наведено основні характеристики найкращих нині вентиляльних розрядників захисту машин. Порівняння даних таблиць 3.1 і 3.2 показує, що імпульсна розрядна напруга розрядників $U_{\text{пр}}$ і напруга $U_{\text{зал.}}$, що залишається, навіть при струмі 3 кА більше амплітуди допустимих грозових перенапруг $U_{\text{доп}}$ на 20–30 %. Це дозволяє зробити висновки про те, що для забезпечення умови $U_{\text{зал.}} \leq U_{\text{доп}}$ струм через вентиляльні розрядники має бути ще меншим (таблиця 3.2).

Крім того, при цьому не забезпечується умова $U_{\text{пр}} \leq U_{\text{доп}}$.

Таблиця 3.1- Допустима величина грозових перенапруг для головної ізоляції машин та трансформаторів ($U_{\text{доп}}$)

$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	$U_{\text{доп}}, \text{кВ}$	
	для машин	для трансформаторів
3,15	6,7–7,6	46,0
6,3	13,4–15,5	59,2
10,5	22,5–25,5	77,0
15	32,3–36,6	110
20	43,0–48,0	132
24	51,6–57,6	232

Таблиця 3.2 - Характеристики вентильних розрядників РВМ (ІІ група)

$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	$U_{\text{пр}}, \text{кВ}$	$U_{\text{зал}}, \text{кВ}$ при струмах		
		3 кА	5 кА	10 кА
3	7	9	9,5	11
6	15,5	17	18	20
10	23,5	28	31	37
15	57	47	51	57
20	74	62	67	74
24	80,5	75	82	94

Таблиця 2.3 - Значення імпульсного струму через вентильні розрядники РВМ, відповідні умові $U_{\text{зал}} = U_{\text{доп}}$

Номинальна напруга машин, кВ	Струм через РВ при $U_{\text{доп}}, \text{кВ}$	
	$U_{\text{доп}} = 1,5\sqrt{2}U_{\text{н}}$	$U_{\text{доп}} = 1,7\sqrt{2}U_{\text{н}}$
3,15	0,3	0,75
6,3	1,1	1,3
10,5	0,6	1,5
15	0,4	0,75
20	0,8	1,3
24	0,9	1,3

Перше завдання вирішується шляхом встановлення нелінійних обмежувачів перенапруг або вентильних розрядників безпосередньо на затискачах машини, а також приєднання до них ємності порядку 0,5 мкФ на фазу.

Друге завдання вирішується шляхом підключення машини до повітряної мережі через трансформатор. Однак у ряді випадків це не вигідно і доводиться її підключити до мережі безпосередньо, при цьому потрібне встановлення додаткових захисних апаратів на підході, і використовувати по ходу хвилі кабельні вставки та реактори, що обмежують струм.

3.3 Особливості грозозахисту ліній із ізольованими проводами

Ізольовані або, як їх іноді ще називають «захищені» проводи, складаються з алюмінієвого крученого проводу та захисної оболонки (див. рис. 3.4). У деяких конструкціях ізольованих проводів застосовується сталєалюмінієвий дріт, тобто провід, що складається з осердя у вигляді сталєвого троса з навитого на нього алюмінієвими дротиками. Алюмінієві проводи можуть мати форму неправильних багатокутників із округленими кромками для збільшення щільності заповнення перерізу проводу активним провідниковим матеріалом (алюмінієм). Як захисна оболонка використовується, в основному, світлостабілізований поліетилен.

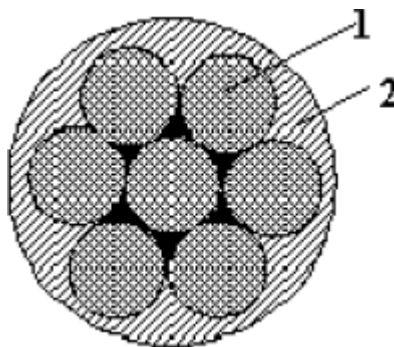


Рисунок 3.4. Переріз ізольованого проводу

1 – алюмінієвий кручений провід; 2 – захисна оболонка

Захисна оболонка забезпечує короткочасну ізоляцію проводу у разі дотику до нього гілок дерева, при схльостуванні проводів під впливом вітру або при випадкових дотиках до них сторонніх предметів (наприклад, вудки рибалки тощо). Повітряні лінії з ізольованими проводами мають більшу надійність роботи, ніж лінії із неізольованими проводами.

У промислово розвинених країнах ПЛ з ізольованими проводами набувають широкого поширення. У Японії, наприклад, всі ПЛ 6,6 кВ виконані із ізольованими проводами. В останні роки в Україні також ведеться будівництво ПЛ 6-10 кВ з ізольованими проводами, в основному при проходженні трас ліній через ліс або в населеній місцевості.

При впливі грозової перенапруги на ПЛ із неізольованими проводами відбувається перекриття ізолятора (див. рис. 3.5,а). З великою ймовірністю під впливом робочої напруги грозове перекриття перетворюється на дугу промислової частоти. Внаслідок електродинамічних сил дуга переміщається по проводу. Дуга горить доти, доки лінія не буде відключена або не відбудеться мимовільне згасання дуги. Завдяки тому, що дуга переміщається неізольованим проводом перепали проводів силовою дугою відбуваються відносно рідко.

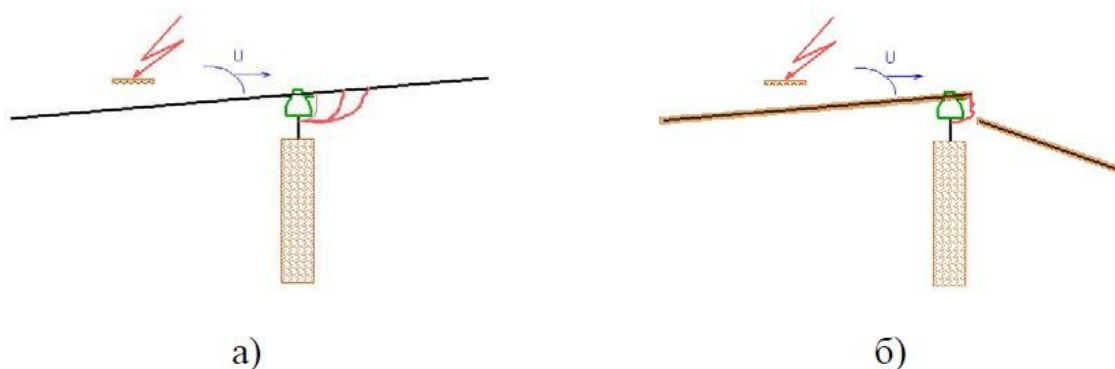


Рисунок 3.5. Встановлення силової дуги промислової частоти внаслідок грозового перекриття ізолятора

- а) на лінії з неізольованими проводами;
- б) на лінії із ізольованими проводами

На ПЛ із ізольованими проводами при грозовій перенапрузі відбувається перекриття ізолятора лінії, а потім – пробій твердої ізоляції проводу (див. рис. 3.5,б). Дуже часто грозове перекриття переходить у дугу промислової частоти, яка горить у місці пробію ізоляції, доки лінія не буде відключена. У разі великих струмів к. з. або тривалого горіння дуги це призводить до перепалу проводу [5,15], тобто до серйозної аварії на лінії.

Огляд існуючих систем грозозахисту

У США [14] запропоновано для грозозахисту ПЛ із ізольованими проводами видаляють тверду ізоляцію на ділянці лінії поблизу опори, а на межі ізоляції встановлювати масивні затискачі (рис. 3.6).

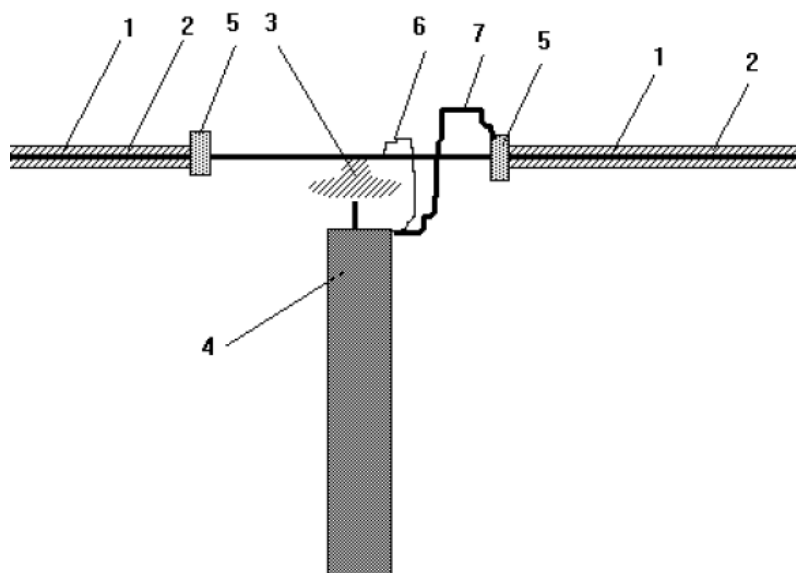


Рисунок 3.6. Захист лінії від дугових ушкоджень за допомогою масивних затискачів (Американська система, [14])

1 – провід, 2 – ізоляція, 3 – ізолятор, 4 – опора, 5 – масивний затискач, 6 – грозове перекриття, 7 – дуга

При перенапрузі відбувається грозове перекриття 6 ізолятора 3 на неізольовану ділянку проводу 1. Це перекриття переходить у силову дугу 7, яка під дією електродинамічних сил переміщається по проводу до тих пір, поки не дійде до межі ізоляції, на якій встановлено масивний затискач 5. Далі дуга не переміщається та продовжує горіти, спираючись одним зі своїх кінців на затискач 5, доки лінія не буде відключена. У разі системи із заземленою нейтраллю (як, наприклад, США) струми к. з. дуже великі, і автоматика відносно швидко реагує на к. з. та відключає пошкоджену лінію. Однак відбувається значне обгорання затискачів 5, що визначає необхідність їх періодичної заміни. Крім того, утворення силової дуги призводить до необхідності вимикання лінії.

У Фінляндії [15] для грозозахисту використовується система, показана на рис. 3.7.

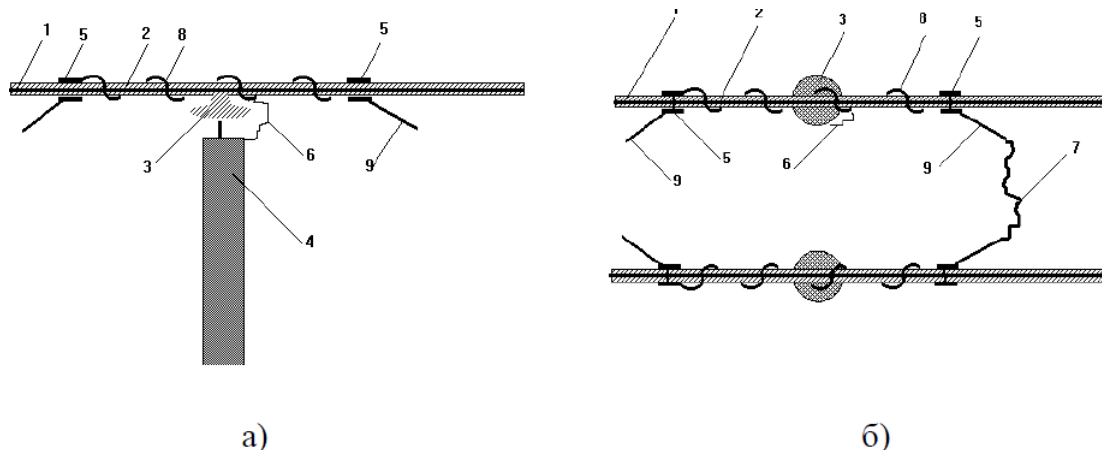


Рисунок 3.7. Захист лінії від дугових ушкоджень за допомогою "рогів" (Фінська система, [15]) а) вид збоку; б) вид зверху;

1 – провід, 2 – ізоляція, 3 – ізолятор, 4 – опора, 5 – проклюючий затискач, 6 – грозове покриття, 7 – дуга, 8 – спіраль, 9 – рог

При перенапрузі відбувається однофазне покриття 6 на землю, і утворюється дуга 7, яка переміщується по металевій спіралі 8, навитої поверх ізоляції 2 дроти 1. Під дією електродинамічних сил дуга 7 переходить на рог 9 і далі перекидається на розташований поблизу (на відстані приблизно 30 -40 см) рог 9 сусідньої фази (рис. 3.7 а).

Таким чином однофазне к. з. переводиться у двофазне. Дуга двофазного к. з. горить між рогами 9 доки лінія не буде відключена, що призводить до значного обгорання рогів. Тому необхідна їхня періодична заміна. Крім того, двофазні к. з. створюють сильні електродинамічні удари по обмотках трансформаторів, що призводить до прискореного зносу їхньої ізоляції та всього обладнання загалом. Часті комутації збільшують також витрати на профілактичні ревізії устаткування, що комутує.

У Японії [13, 14] стала вельми поширеними для грозозахисту повітряних ліній отримали нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) (рис. 3.8). Понад 6 млн. штук вже встановлено лише у одній з енергосистем Японії [13].

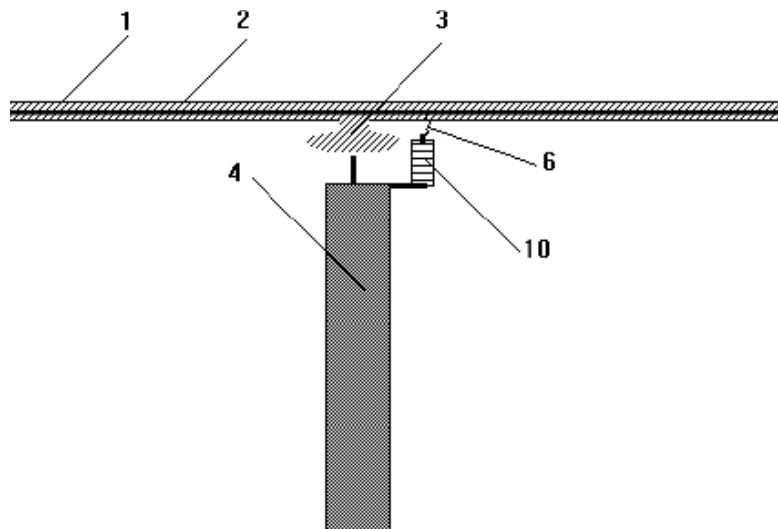


Рисунок 3.8. Захист лінії від грозових перенапруг за допомогою ОПН (Японська система, [13, 14]) 1 – провід, 2 – ізоляція, 3 – ізолятор, 4 – опора, 6 – грозове покриття, 10 – ОПН

ОПН підключається через іскровий проміжок та розрахований на струм грозового перенапруги 2,5 кА. ОПН ефективно обмежують індуктовані перенапруги. Але у разі перевищення струму грозового перенапруги понад розрахунковий рівень вони ушкоджуються.

Для найефективнішого вирішення проблеми грозозахисту дуже бажано встановлювати ОПН паралельно кожному ізолятору. При масовій установці головним недоліком ОПН стає їхня висока вартість.

Все вищезгадане визначає необхідність пошуку нових технічних рішень, що підвищують надійність та економічну ефективність грозозахисних заходів.

Висновки по третьому розділу

Сьогодні виникає необхідність пошуку нових технічних рішень, що підвищують надійність та економічну ефективність грозозахисних заходів.

ВИСНОВКИ

В даний у певній мірі назріло питання про зміну підходів до вибору схем захисту обладнання РУ від грозових перенапруг.

Зважаючи на всі зростаючі вимоги до надійності електропостачання, нові схеми захисту обладнання від грозових перенапруг, побудовані з використанням сучасних захисних апаратів типу ОПН, повинні забезпечувати підвищену захищеність всього обладнання РП, трансформаторних підстанцій та електричних машин від грозових перенапруг.

Враховуючи це, актуальними видаються викладені в даній роботі пропозиції щодо вибору схем захисту ізоляції обладнання мереж 6-35 кВ від грозових перенапруг, які базуються на наступні основні висновки, отримані в результаті проведених досліджень:

- найбільшу небезпеку для обладнання мереж 6-35 кВ становлять грозові перенапруги, спричинені ударами блискавки у фазні проводи приєднаних ПЛ;
- для зниження числа прямих ударів блискавки у фазні проводи, а значить і числа небезпечних грозових перенапруг на обладнанні мереж 6-35 кВ, необхідна установка тросового захисту;
- у деяких випадках на підходах ПЛ 35 кВ допустимо не встановлювати трос, тому що ОПН лінійного осередку бере на себе виконання ролі троса зі зниження кількості небезпечних хвиль, що проходять на розподільний пристрій;
- кількість грозових хвиль, що набігають на трансформаторні підстанції, викликаних ударами блискавки в опори і троси приєднаних ПЛ, істотно залежить від опору заземлення опор на підходах ПЛ до ТП; отже, захищеність обладнання ТП від грозових перенапруг так само істотно залежить від опору заземлення опор на підходах ПЛ до ТП;
- оскільки число ударів блискавки в опори та троси принаймні на порядок більше числа проривів блискавки на фазні проводи, то найважливішим

завданням захисту обладнання ТП від грозових перенапруг є забезпечення якнайнижчих опорів заземлення опор ПЛ на підходах до ТП;

- найважливіше забезпечення мінімальних опорів заземлення 2-3 найближчих до РП опор приєднаних ПЛ;

- у разі неможливості забезпечення малих опорів заземлення найближчих до ТП опор приєднаної ПЛ високої захищеності обладнання ТП і РП від грозових перенапруг можна досягти встановленням захисного апарату (розрядника або ОПН) у лінійному осередку цієї ПЛ.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок/ МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.

2. В.Ф Мануйлов, Перенапруги в мережах 6(10) – 35 кВ при комутаціях вимикачами. Процеси в дугастих системах і електричних мережах 6(10) – 35 кВ при комутаціях вимикачами //Кіровоградський національний технічний університет/ Наукові записки, вип.10, част.І
<https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/a9896ab0-3d26-463d-9d53-b683911dc6a5/content>

3. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.

4. Дригачевський С. І. ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКОВАНИХ ПЕРЕНАПРУГ НА ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАПРУГОЮ 6-35 КВ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРОВІДІВ // Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

5. Сабарно Л. Р., Кошман В. І., Севастюк І. М. ДОСЛІДЖЕННЯ ДУГОВИХ ПЕРЕНАПРУГ У ВИПАДКУ ОДНО- І ДВОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ У РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ// Інститут електродинаміки Національної академії наук України (м. Київ)/
<https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/6860/1/6.pdf>

6. З.М. Бахор, Б.І. Дурняк, А.Я. Яцейко, Р.А. Похна Перенапруги під час вимкнення двигунів// Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003.-120с.

7. А.Я. Яцейко, К.В. Козак ВПЛИВ РЕЖИМУ НЕЙТРАЛІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ 6 – 35 КВ НА РІВНІ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ// Національний університет “Львівська політехніка”, - 2013./
<https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/a7860453-58b4-4ae2-8184-fbe70507af25/content>

8. Веприк Ю.Н., Лебедка С.Н., Петровский М.В. Перенапряжения в электрических сетях 6–35 кВ и современные средства их ограничения при замыканиях на землю // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2008. – № 4. – С. 59–69.

9. Коломієць В. Дослідження режимів роботи нейтралі розподільних електричних мереж 6-35 кВ на основі квазі-фізичного моделювання. / В. Коломієць – Харків, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, 2020. – 33 с.
<https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp>

10. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с.

11. Собчук В. С. Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах :навчальний посібник [Текст] / В. С. Собчук, Н. В. Собчук, О. Б. Бурикін. – Вінниця : ВНТУ, - 2010, – 145 с.

12. СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-100:2014 Інструкція із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ. - Видання офіційне. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України,- 2014, - 29 с.

13. В. І. Романовський і С. М. Лебедка, «АНАЛІЗ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ 6 КВ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБУ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ», Вісник ВПІ, вип. 1, с. 101–104, Листоп. 2010.

14. Шевченко С. Ю. Особливості вибору обмежувачів перенапруги в мережах 6-35 кВ / С. Ю. Шевченко, О. М. Довгалюк, О. Є. Піротті // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2013. - № 2. - С. 224-230. - Режим доступу:
http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vcndtn_2013_2_35.

15. О. Є. Рубаненко В.В. Гасич ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАМИКАНЬ В МЕРЕЖАХ 6-35 кВ ТА РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВІД НИХ// Вінницький

національний технічний університет. - Режим доступу::
<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/41189/17201.pdf?sequen>

16. Ліщак І. В. Оцінка надійності схем грозозахисту повітряних ліній електропередавання / І. В. Ліщак, Т. В. Бінкевич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2014. – 785 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 39-45.

17. Журахівський А. В. Імпульсний опір заземлення опор повітряних ліній та його вплив на надійність грозозахисту / А. В. Журахівський, І. В. Ліщак, Т. В. Бінкевич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2016. - № 1. - С. 74-78.

18. Журахівський А. В. Дослідження впливу миттєвого значення робочої напруги на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній / А. В. Журахівський, І. В. Ліщак, Т. В. Бінкевич // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Техніка та електрофізика високих напруг – Харків, 2016. – № 36 (1208). – С. 23-27.

19. Журахівський А. В. Дослідження впливу метеорологічних умов на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання / А. В. Журахівський, Т. В. Бінкевич, І. В. Ліщак // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Техніка та електрофізика високих напруг. - 2017. - № 15. - С. 39-43.

20. Захист об'єктів енергетики від перенапруг [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://ukrbukva.net/page,7,44131-Zashita-ob-ektov-energetiki-otperenapryazheniiy.html>

21. Кириленко О.В. Аналіз надійності функціонування електроенергетичних об'єктів [Текст] / Кириленко О.В., Кінаш Б.М., Гудим В.І.// Ін-т електродинаміки НАН України; Львівський держ. ун-т безпеки життєдіяльності МНС України. – К.: Фоліант, 2008, – 224 с.