



**Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій
Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту**

С. А. Попадченко, О. А. Савченко

ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

Курс лекцій

**для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
денної (заочної) форми навчання
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

**Харків
2024**



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій
Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту

С. А. Попадченко, О. А. Савченко

ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

Курс лекцій

**для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
денної (заочної) форми навчання
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

Затверджено
рішенням Науково-методичної ради
факультету енергетики, робототехніки
та комп'ютерних технологій
Протокол № 4
від 29.01.24 р

**Харків
2024**

Схвалено
на засіданні кафедри електропостачання
та
енергетичного менеджменту
Протокол № 7 від 26. 01. 2024 р.

Рецензенти:

Н. Г. Косуліна, доктор техн. наук, проф. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ;

Ю. М. Хондола, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

С-31 Захист від перенапруг: Курс лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ С. А. Попадченко, О. А. Савченко/ – Електрон. дані. – Х. : ДБТУ, 2024. – 102 с.

Курс лекцій з дисципліни «Захист від перенапруг» складений відповідно до програми навчальної дисципліни. У курсі лекцій висвітлені теоретичні аспекти електродинамічних процесів в газах, явища корони на проводах ЛЕП та заходи боротьби з нею, розглянуті апарати захисту від перенапруг та методи їх вибору. Викладено розрядні процеси в повітряних проміжках при грозових перенапругах, заходи і засоби захисту від ударів блискавки та типи релейних захистів від аварійних та ненормальних режимів.

Призначено для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.31

Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник, доктор технічних наук, професор

© Попадченко С. А.,
Савченко О. А., 2024
© ДБТУ, 2024

ЗМІСТ

Вступ	5
МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ	5
Лекція № 1. Електродинамічні процеси в газах	6
Лекції № 2. Корона на проводах ЛЕП	19
Лекція № 3. Розряди в повітряних проміжках при грозових перенапругах	31
Лекція № 4. Захист електрообладнання від прямих ударів блискавки	43
Лекція № 5. Апарати захисту від перенапруг.	58
Лекція № 6. Блискавкозахист повітряних ліній.	73
Лекція № 7. Захист підстанцій від блискавки та перенапруг	86

ВСТУП

Вітаємо вас, шановні слухачі курсу Захист від перенапруг. Сучасний світ не уявляє себе без активного використання електричної енергії, що робить питання безпеки в галузі електричної інженерії надзвичайно важливими та актуальними.

Лекції з предмету "Захист від перенапруг" призначені для того, щоб надати фундаментальні знання та розуміння принципів захисту електричних мереж, підстанцій та всього електрообладнання від всіх видів перенапруг для роботи в промислових та технічних сферах. Даний курс охоплює різноманітні аспекти, починаючи від основних понять електродинамічних процесів в газах та закінчуючи технологіями захисту від атмосферних перенапруг та блискавки, захисним заземленням для забезпечення безпеки на робочому місці.

Необхідно розуміти, що правильна робота з електричним обладнанням та забезпечення безпеки під час його експлуатації є запорукою якісної та ефективної роботи в будь-якій сфері. Даний курс дає не тільки теоретичні знання, але й дозволяє розвинути здатність аналізувати ризики та вживати заходи безпеки на практиці.

Даний курс лекцій є важливим кроком у поглибленні розуміння процесів захисту від перенапруг та допоможе стати експертом в галузі електричної інженерії.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Мета вивчення дисципліни: полягає в засвоєнні необхідного обсягу теоретичних знань в галузі захисту електроустановок від перенапруг,

оволодіння вміннями і навичками, необхідними в процесі виробничої діяльності.

Ключові завдання:

- вивчення сучасних вимог та технічних рішень щодо виконання систем захисту електроустановок від прямих ударів блискавки, атмосферних індукованих перенапруг;

- знати види електричних розрядів в газах та засоби захисту електрообладнання від ударів блискавки, основні теоретичні та практичні методи рішення задач захисту електроустановок від прямих ударів блискавки та атмосферних перенапру, захисту людей та тварин в разі пошкодження ізоляції і протікання електричного струму небезпечної величини;

- вміти розраховувати захист електроустановок, підстанцій, ліній, будівель від прямих ударів блискавки, розрахувати заземлюючий пристрій електрообладнання підстанцій та ліній Електропередавання.

ЛЕКЦІЯ № 1 - ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ГАЗАХ.

1. Газові діелектрики в електроенергетиці

1.1. Переваги та недоліки газової ізоляції

1. 2. Електропозитивні та електронегативні атоми

1. 3. Лавини електронів

1. 4. Дифузія

2. Ударна іонізація

2.1. Аналітичний вираз для електростатичного радіуса лавини

2.2. Вторинна електронна емісія, автоелектронна емісія, термоелектронна емісія.

2.3. Рекombінація і ефективний коефіцієнт ударної іонізації:

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.**
- 2. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.**
- 3. Кабышев А. В. Молниезащита электроустановок систем электроснабжения: учебное пособие/А. В. Кабышев. –Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 124 с.**
- 4. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.**
- 5. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притака, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.**

1. Газові діелектрики в електроенергетиці

Гази в якості діелектриків широко використовуються в різних електроізоляційних конструкціях. Це насамперед повітря, елегаз (SF_6), азот.

До них слід віднести також вакуум.

Перевагами газової ізоляції є:

- хороші електроізоляційні властивості;
- стабільність робочих характеристик у процесі експлуатації;
- простота конструкцій електрообладнання з газовою ізоляцією.
- зниження маси і габаритів таких електроустановок;

- відносна пожежна безпека при роботі.

Недоліками повітря як ізоляції є утворення озону при електричних розрядах, що призводить до посилення корозії металевих частин електрообладнання, а також залежність його електричної міцності від атмосферних факторів: вологості, температури, тиску, забруднення.

Зокрема, недоліками елегазу є обмеження застосування через його скраплення при нормальному тиску і температурі – 45°C. Для зниження робочої температури елегазу до нього додають 6% азоту, що розширює робочий діапазон елегазової ізоляції до - 60°C (рис.1. 1).

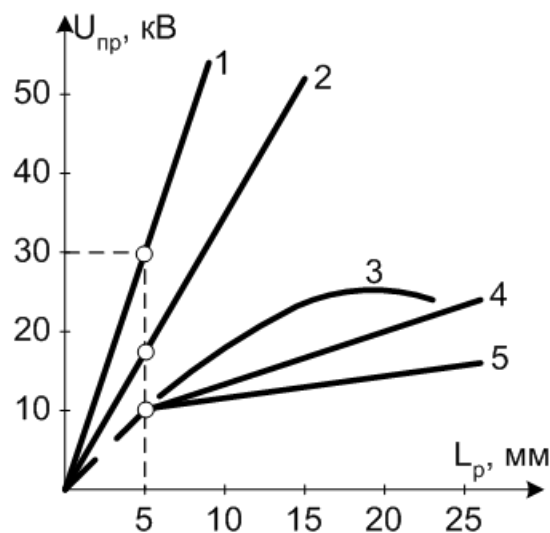


Рисунок 1. 1 - Залежність електричної міцності ізоляції від відстані між електродами:

- 1 – повітря при тиску $p = 2,8$ МПа; 2 – елегаз при тиску $p = 0,7$ МПа;
- 3 – трансформаторне масло; 4 – елегаз при тиску $p = 100$ кПа;
- 4 – повітря при тиску $p = 100$ кПа;

Атоми газу в нормальному стані є нейтрально зарядженими частинками і знаходяться в рівномірному хаотичному тепловому русі, зіштовхуючись між собою і витрачаючи кінетичну енергію. Структура атома згідно з планетарною моделлю складається з позитивно зарядженого ядра (протона), навколо якого на стаціонарних орбітах, що відповідають певним енергетичним рівням, обертається відповідна кількість негативно заряджених електронів, які компенсують позитивний заряд ядра, внаслідок чого атом в цілому залишається нейтральним.

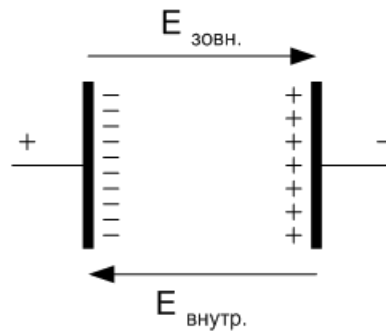


Рисунок 1. 2 - Іонізація атомів газу під дією зовнішнього електричного поля.

У сильному електричному полі E вільні електрони, що мають заряд e (деяка кількість яких завдяки природним іонізаторам (сонячне випромінювання, радіаційний фон землі та ін. завжди присутня в міжелектродному проміжку), рухаючись на шляху x , набувають кінетичної енергії $W_e = e \cdot E \cdot x$. При цьому якщо енергія електрона W_e більша за енергію зв'язку електрона з атомом, яка має назву енергії іонізації W_i , то при зіткненні такого електрона з атомом від нього відривається електрон внаслідок чого утворюються дві заряджені частинки: позитивно заряджений іон і *вільний* електрон. Якщо ж енергія $W_e < W_i$, то відбувається *збудження* атома, в результаті чого його електрони переходять на більш високі орбіти, які відповідають більшим енергіям атома.

Крім кінетичної енергії іонізація атомів може відбуватися під впливом теплової енергії (термоіонізація) та енергії випромінювання (фотоіонізація). Деякі атоми газів (хлор, фтор, кисень), які мають вільні місця на зовнішніх орбітах, можуть захоплювати вільні електрони і утворювати негативні іони. Такі гази називають **електронегативними**, і вони є хорошими діелектриками, оскільки захоплюють найбільш активних носіїв заряду якими є електрони. Атоми, які навпаки легко відєднують зі своєї зовнішньої орбіти електрони, перетворюючись в позитивно заряджені іони, - такі гази(азот, інертні гази) називають **електропозитивними**. Процес ударної іонізації призводить до різкого збільшення числа електронів n в міжелектродному проміжку за експоненціальним законом і утворення **лавини електронів**:

$$n = n_0 \cdot e^{\int \alpha dx},$$

де n_0 – число первинних вільних електронів,
 α – коефіцієнт ударної іонізації, який дорівнює відношенню числа іонізованих атомів N_i до числа зіткнень електронів з атомами N_z на шляху l см в напрямку електричного поля E : $\alpha = N_i/N_z$.

Якщо на одиниці довжини шляху переміщення відбувається Z зіткнень електрона з атомами, то середня довжина вільного пробігу l складає:

$$l = 1/Z.$$

Очевидно, вона залежить від відносної щільності газу d :

$$\delta = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}.$$

Таким чином, l зворотно пропорційна d . Тиск p_0 і температура T_0 – умовно прийняті за нормальні ($p_0 = 760$ мм.рт.ст. = 101×10^3 Па, $T_0 = 293$ К = 20 °С), p і T – дійсні на даний час параметри газу.

$$\text{За нормальних умов } d = 1, \quad (p = p_0, T = T_0); \quad \delta = 2,93 \cdot 10^{-3} \frac{p}{T},$$

p – Па, T – К). Якщо розглядати процеси у газі, то достатньо використовувати спрощену (планетарну) модель атома, не враховуючі його *хвильових* властивостей. У нормальному стані всі електрони знаходяться на стаціонарних орбітах, що відповідає мінімальному енергетичному стану атома. В електричному полі напруженістю E на заряджені частинки газу діє сила: $F = e \cdot E$, (e – заряд частинки). Імпульс зарядженої частинки в напрямку електричного поля дорівнює: $m \cdot V_0$ (m – маса частинки, V_0 – швидкість дрейфу).

Нехай n – частота зіткнень частинки з атомом, тоді *швидкість втрати* нею імпульсу дорівнює: $m \cdot V_0 \cdot n$.

Ця швидкість, відповідно до другого закону Ньютона, компенсується дією на частинку сили, тому:

$$m \cdot V_0 \cdot n = e \cdot E$$

Середній час між двома зіткненнями частинки: $t = l/V_{сер.}$ ($V_{сер.}$ – середнє арифметичне значення швидкості теплового руху).

Звідки середня швидкість теплового руху V_0 виявляється пропорційна напруженості електричного поля E :

$$V_0 = \frac{e}{m \cdot V} \cdot E = \frac{e \cdot \lambda}{m \cdot V_{сep}} \cdot E = K \cdot E. \quad (1.1)$$

Концентрація частинок газу визначається як:

$$N = \frac{P}{K \cdot T},$$

($k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К = $8,62 \times 10^{-5}$ еВ/К – постійна Больцмана).

Коефіцієнт пропорційності $m = V_0/E$ називається *рухливістю* — це швидкість дрейфу частки в електричному полі з напруженістю $E = 1$ В/см.

Враховуючі, що середня довжина вільного пробігу частинок $\lambda_{сp}$ зворотно пропорційна тиску газу p , то при постійній температурі з урахуванням (1.1) отримаємо: $\mu \cdot p = \text{const}$.

Рухливість електронів μ_e на відміну від рухливості іонів μ_i залежить від напруженості електричного поля. Припускаючи, що кінетична енергія електронів та іонів в електричному полі рівні, тоді співвідношення їх рухливостей μ буде:

$$\frac{V_e}{V_i} = \frac{\mu_e}{\mu_i} = \sqrt{\frac{m_i}{m_e}}. \quad (1.2)$$

Оскільки маса електрона та іона: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г, $m_i = 1,7 \cdot 10^{-24}$ г, то для повітря, основною складовою якого є азот (атомна маса 14): $\mu_e / \mu_i = 227$.

Зокрема, рухливість іонів у повітрі при нормальних умовах складає:

$$\mu_i = 2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}, \text{ а електронів - } \mu_e = 400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}.$$

Орбіта електрона характеризується певним рівнем потенційної енергії. У нормальних умовах усі електрони перебувають на орбітах, що відповідають мінімальній потенційній енергії атома. Перехід електрона на вищу орбіту можливий при збільшенні енергії атома на *дискретну* величину, що дорівнює різниці потенціалів енергії двох орбіт. Енергія атома стрибком змінюється на величину, вимірювану в електрон-вольтах: $1 \text{ еВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Вт} \cdot \text{с}$ (Дж).

Перехід електрона на більш віддалені орбіти означає збільшення енергії і називається *збудженням атома*, в якому він перебуває 10^{-8} с.

Повернення атома в нормальний стан супроводжується виділенням

надлишкової енергії, яка випромінюється у вигляді квантів світла - фотонів з енергією $\varepsilon = hn$ (тут h – постійна Планка, n – частота).

При цьому спостерігається світіння газу. Звичайно число збуджених частинок значно більше числа іонізованих. Якщо поглинена енергія перевищує енергію зв'язку електрона з ядром, то електрон виходить з орбіти і стає *вільним*.

При тепловому русі також відбувається переміщення частинок під дією *градієнта* концентрації в ділянку з меншою концентрацією. Цей процес називається *дифузією*.

При градієнті концентрації частинок dN/dx уздовж осі x дифузія описується рівнянням потоку дифузії:

$$j = D \frac{dN}{dx},$$

тобто число частинок j , що проходять за 1 с. через одиницю площі, пропорційне градієнту концентрації та коефіцієнту дифузії:

$$D = \frac{\lambda \cdot V}{3}.$$

Коефіцієнт дифузії залежить від маси частинок, зокрема, для електронів у повітрі він складає $12,7 \text{ см}^2/\text{с}$, а іонів - $0,05 \text{ см}^2/\text{с}$.

Зіткнення електронів з іонами призводить до відновлення нейтрального стану атома і поновлення діелектричних властивостей проміжку.

Цей процес характеризується коефіцієнтом прилипання h - це число захоплених іонами електронів на шляху 1 см.

Газ, в якому більшість атомів іонізована, називається *плазмою*.

Плазма, на відміну від газу, має велику електропровідність і спроможна відбивати електромагнітні хвилі, тому її вважають четвертим агрегатним станом речовини.

2. Ударна іонізація

Вільний електрон у сильному електричному полі E набуває кінетичну енергію W_e і, якщо ця енергія більша за енергію іонізації $W_e > W_i$, то при

зіткненні електрона з нейтральним атомом відбувається передача цієї енергії атому, внаслідок чого його електрони переходять на більш віддалені орбіти, а електрони зовнішньої орбіти відриваються від атома. Цей процес називають **ударною іонізацією**. Відстань, на якій електрон накопичує достатню енергії для іонізації:

$$x = \frac{W_1}{e \cdot E} = \frac{U_1}{E} \quad (1.3)$$

Імовірність того, що електрон пролетить шлях x без зіткнень, дорівнює

$$P(x_n) = \exp\left(-\frac{x_n}{\lambda}\right), \quad (1.4)$$

тобто це і є імовірність іонізації.

Ударна іонізація характеризується коефіцієнтом α , що дорівнює числу іонізацій, зроблених електроном на шляху в 1 см в напрямку електричного поля E .

Оскільки Z - середнє число зіткнень на одиниці шляху $Z = \frac{1}{\lambda}$, то число іонізуючих зіткнень

$$\alpha = Z \cdot P(x_n) = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{x_n}{\lambda}} = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{W_n}{\lambda \cdot e \cdot E}}, \quad (1.5)$$

або з урахуванням впливу густини газу d і температури T :

$$\alpha = \frac{\delta \cdot W_n}{\lambda \cdot e} \cdot e^{-\frac{\delta W_n}{\lambda \cdot e \cdot E}} = A \cdot \delta \cdot e^{-\frac{B \delta}{E}} \quad (1.6)$$

Ця формула не враховує, що електрон при зіткненні втрачає не всю енергію і атом може бути додатково збуджений від попередніх зіткнень.

Тому коефіцієнти A і B для кожного газу визначають експериментально.

Існує поняття *граничної* напруженості електричного поля, що обумовлює процес іонізації повітря: $E_i = 24,5 \times d$ (при нормальних умовах $d = 1$, тоді $E_i = 24,5$ кВ/см).

Якщо початкове число електронів n забезпечує на ділянці dx збільшення кількості електронів dn , тоді

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx, \quad (1.7)$$

де $n = e^{\int_{ad}^x dx}$ - це свідчить, що число електронів і іонізацій зростає за експоненціальним законом, утворюючи лавинний розряд.

Процес зростання числа електронів, що рухаються в електричному полі в напрямку до анода, називають *лавиною* електронів.

Теорію лавинного розряду в газі створив Дж. Таунсенд. При розвитку лавини електронів поряд з ними утворюються *позитивні* іони, які через значно більшу (10^4 раз) масу рухаються набагато повільніше. Знаходячись у полі E , вони спотворюють його, що впливає на рух електронів. Позитивні іони можуть бути ще раз іонізовані, в результаті чого утворюються дво- або тризарядні іони і відповідна кількість електронів. Завдяки існуванню так званого метастабільного стану атомів або молекул, час існування якого – 10^{-4} с, можливе явище *сходинкової* іонізації, наприклад, за рахунок декількох послідовних зіткнень електронів з атомом, особиста енергія кожного з яких менша за енергію іонізації. При своєму розвитку лавина електронів розширюється через дифузію і електростатичне відштовхування частинок.

Якщо вважати, що лавина має форму кулі, то зміну її дифузійного радіуса розраховують за формулою

$$r = \sqrt{6 \cdot D \cdot t}, \quad (1.8)$$

де D – коефіцієнт дифузії (Ейнштейн, Таунсенд).

Оскільки маса електрона $m_e = 9,1 \times 10^{-28}$ г., а маса протона $m_n = 1,67 \times 10^{-24}$ г., то для повітря, що складається, в основному з молекулярного азоту, $m = 14m_e$.

Із рівняння (1.1) випливає, що рухливість іонів дорівнює:

$$\mu_i = \frac{e \cdot \lambda}{m_i \cdot V}. \quad (1.9)$$

Відношення коефіцієнта дифузії до рухливості іонів складає:

$$\frac{D_i}{K_i} = \frac{\lambda \cdot V \cdot m_i \cdot V}{3e \cdot \lambda} = \frac{m_i \cdot V^2}{3e}. \quad (1.10)$$

Враховуючи кінетичну енергію теплового руху іонів:

$$\frac{m_i \cdot V^2}{2} = \frac{3}{2} k \cdot T. \quad (1.11)$$

остаточно отримаємо (співвідношення Ейнштейна):

$$\frac{D_i}{\mu_i} = \frac{k \cdot T}{e}. \quad (1.12)$$

Звідки виходить, що електрони швидше дифундують в ділянку менших концентрацій, ніж іони. Одночасна дифузія електронів і іонів має назву *амбіполярної* дифузії. Коефіцієнт амбіполярної дифузії значно менший за коефіцієнта дифузії електронів. Оскільки рухливість іонів $\mu_i = 2 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а електронів – $\mu_e = 400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, то:

$$\frac{\mu_e}{\mu_i} = \sqrt{\frac{1840 \cdot 2 \cdot 14 \cdot m_e}{m_e}} = 227 \quad (1.13)$$

Тобто рухливість електронів на 2 порядки більша за рухливість іонів. Визначимо зміну радіуса лавини через електростатичне відштовхування електронів.

Напруженість електричного поля на зовнішній границі лавини, що має форму кулі з радіусом r , дорівнює:

$$E_0 = \frac{e \cdot n}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}, \quad (1.14)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – електрична постійна.

Швидкість розширення лавини під дією поля E_0

$$\frac{dr}{dt} = \mu_e \cdot E_0 = \frac{\mu_e \cdot e \cdot n}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \quad (1.15)$$

Оскільки зсув центру лавини в зовнішньому полі E_0 за термін dt дорівнює $dx = \mu_e \cdot E_0 \cdot dt$, а збільшення за цей період числа електронів $dn = \alpha \cdot n \cdot dx$, то

$$r^2 \cdot dr = \frac{e \cdot dn}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha \cdot E_0}. \quad (1.16)$$

Інтегруючи, отримаємо аналітичний вираз для електростатичного радіуса лавини:

$$r = \left(\frac{3 \cdot e \cdot n}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha \cdot E_0} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (1.17)$$

Через різну рухливість за час прямивання лавини до анода, іони майже залишаються на місці, що дозволяє визначити їх концентрацію уздовж шляху лавини: частота іонізації позитивними іонами в 10^5 разів менше, ніж електронами.

Але бомбардуючи катод, вони вибивають з нього електрони. Це явище має назву – **вторинна електронна емісія**. Вихід електронів з катоду під дією сильного електричного поля називається **автоелектронною емісією**.

Робота виходу електрона з металу (Fe, Cu): $W_{\text{вих}} = 4,5 \text{ eV}$. Оскільки в металах електрони зовнішніх орбіт знаходяться у вільному стані, утворюючи так званий електронний газ, то під дією високої температури вони також можуть вийти з металу. Це явище має назву – **термоелектронна емісія**.

Якщо в лавині на відстані x від катода є n електронів, то на шляху dx вони створять $\alpha \cdot n \cdot dx$ позитивних іонів в об'ємі $\pi \cdot r^2 \cdot dx$.

Тому концентрація позитивних іонів у лавині:

$$N_+ = \frac{\alpha \cdot n}{\pi \cdot r^2} = \frac{\alpha \cdot e^{\alpha x}}{\pi \cdot r^2}. \quad (1.18)$$

Паралельно з процесами іонізації відбуваються зворотні процеси, які полягають в захопленні позитивними іонами вільних електронів і утворенні нейтральних атомів.

Такі явища називаються **рекомбінацією** і характеризуються відповідним коефіцієнтом η . Тому вводять поняття **ефективного коефіцієнта ударної іонізації**: $\alpha_{ef} = \alpha - \eta$, який і визначає інтенсивність розвитку лавини електронів.

Крім зовнішнього електричного поля існують також природні іонізатори: космічні промені, радіоактивне випромінювання землі, ультрафіолетове випромінювання Сонця. Якщо енергія кванта випромінювання (фотона) $\varepsilon = h\nu \geq W_i$, то відбувається явище **фотоіонізації** на катоді і в об'ємі. Це можливо в сильних електричних полях, коли

відбувається збудження іонів, які випромінюють потужні фотони з енергією, що перевищує енергію іонізації атома. При температурі порядку 5000°C можлива також *термоіонізація*. Якщо при усуненні іонізатора розряд припиняється, такий розряд є *несамостійним*. Для того, аби розряд став самостійним, необхідно, щоб після проходження первинної лавини з'явився хоча б один вторинний електрон, здатний створити нову лавину. Така нова лавина називається *вторинною*. Число *вторинних* електронів пропорційне числу первинних n і визначається здатністю міжелектродного проміжку утворювати вторинні лавини, що характеризується *коефіцієнтом вторинної іонізації* g . Цей коефіцієнт визначає внесок кожного первинного електрона у створення вторинного в процесі утворенні вторинної лавини.

Якщо в лавині n електронів, то на шляху dx кожний з них зробить $\alpha \cdot dx$ іонізацій і збільшить число електронів на $dn = \alpha \cdot n \cdot dx$.

Розділивши змінні і проінтегрувавши, отримаємо:

$$n = n_0 \exp\left(\int_0^x \alpha \cdot dx\right). \quad (1.19)$$

Для однорідного поля α не залежить від x , тоді:

$$n = \exp(\alpha \cdot L),$$

де L – відстань між електродами.

Таким чином, умова $\gamma \cdot e^{\int_0^x \alpha dx} \geq 1$ – є необхідною умовою існування самостійного розряду в загальному вигляді.

З огляду на те, що $n = e^{\int_0^x \alpha dx}$, то для однорідного поля ця умова набуває вигляду:

$$\gamma \cdot n \geq 1. \quad (1.20)$$

Для неоднорідного поля:

$$\int_0^x \alpha dx = \ln \frac{1}{\gamma} \approx const \quad (1.21)$$

Отже для виконання умови самостійного розряду необхідно, щоб число іонізацій, здійснюваних одним електроном, було не менше деякої визначеної для даного середовища величини. Для повітря при атмосферному тиску ця константа дорівнює $\approx 8 \div 20$.

Оскільки кінетична енергія електрону W_e в електричному полі залежить від довжини вільного пробігу: $W_e \sim x$, якій, в свою чергу, залежить від тиску газу p , визначимо величину розрядної напруги міжелектродного проміжку від цього параметру.

Приймаючи для однорідного поля: $\alpha L = \text{const} = K$, і $E = U/L$, отримаємо

$$U_p = \frac{B(pL)}{\ln \left\{ \frac{A(pL)}{K} \right\}} \quad (1.22)$$

Це рівняння є аналітичним виглядом закону Пашена, який встановлює залежність величини розрядної напруги від тиску газу p і відстані між електродами L (рис.1.3).

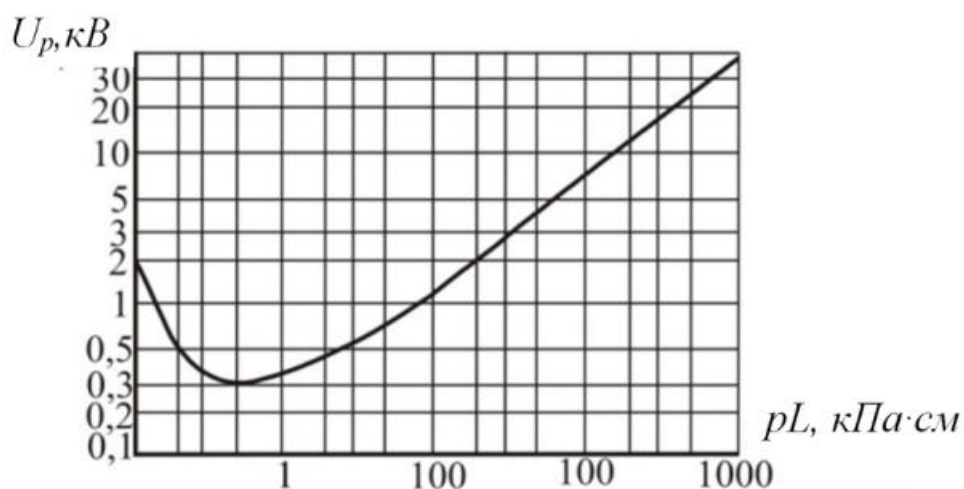


Рисунок 1.3. - Крива Пашена для повітряного проміжку з однорідним полем

Закон Пашена стверджує, що при незмінній температурі розрядна напруга газового проміжку з однорідним полем є прямо пропорційна добутку тиску p на відстань L між електродами.

Якщо знизити тиск газу (при $L = \text{const}$), відповідно знижується розрядна напруга, що обумовлено скороченням числа зіткнень електронів з атомами.

При збільшенні тиску розрядна напруга зростає за рахунок зменшення імовірності іонізацій атомів газу завдяки зменшенню кінетичної енергії електронів $W_k = e \cdot E \cdot x$ (зменшується довжина вільного пробігу x).

При дуже великих тисках спостерігається відхилення від закону Пашена у вигляді зниження розрядних напруг, що обумовлене місцевими підсиленнями напруженості електричного поля на поверхні електродів завдяки їх мікрорельєфу.

При низькому тиску експериментальні значення розрядної напруги також нижче розрахованих, що пов'язано з зміною механізму розряду завдяки тому, що основну роль починає відігравати автоелектронна емісія з електродів.

Для розрахунку величини розрядної напруги повітряного проміжку з однорідним полем, прийнявши для умови самостійного розряду: $\alpha \cdot L = K = 8,2$, використовують зручну формулу:

$$U_p = 24,5 \cdot \delta \cdot L + 6,4 \sqrt{\delta} \cdot L. \quad (23)$$

Величина розрядної напруги в повітряному проміжку $L=1$ см при нормальних атмосферних умовах ($T=24^\circ\text{C}$, $p=760$ мм.рт.ст.) складає 30,9 кВ/см, а при збільшенні проміжку - E_p наближається до 24,5 кВ/см.

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні переваги й недоліки газової ізоляції.
2. Як впливає щільність повітря на розрядну напругу ?
3. Поясніть фізичну суть процесу іонізації, та її різновиди.
4. Поясніть умови іонізації в об'ємі газу.
5. Сформулюйте основні положення теорії лавинного розряду.
6. Дайте визначення коефіцієнта ударної іонізації.
7. Сформулюйте закон Пашена, і його практичне значення.
8. Сформулюйте умови виникнення самостійного розряду.
9. Поясніть суть механізму вторинної електронної емісії.
10. Що таке рекомбінація, які її наслідки для міцності ізоляції?

ЛЕКЦІЯ № 2. КОРОНА НА ПРОВОДАХ ЛЕП

1. Механізм виникнення коронного розряду
2. Методи запобігання коронному розряду
3. Запитання для самоконтролю

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.
2. Єрмолаєв С.О. Проектування систем електропостачання в АПК/ С. О. Єрмолаєв, В. Ф. Яковлєв, В. О. Мунтян, В. В. Козирський, І. П. Радько, Ю. М. Куценко – Мелітополь: видавництво Люкс , 2009 р. – 570 с.
3. Коваленко О. І. Основи електропостачання сільського господарства: Навчальний посібник / О. І. Коваленко, Л. Р. Коваленко, В. О. Мунтян, І. П. Радько. – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2011 – 462 с.
4. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.
5. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притака, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.

1. Механізм виникнення коронного розряду

Якісно фізичний процес виникнення коронного розряду обумовлений наявністю високого градієнта потенціалу (напруженості поля E) біля загостреного електрода (проводу):

$$\vec{E}_x = \text{grad}_x \varphi = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} . \quad (2. 1)$$

Ця висока напруженість електричного поля може бути достатньою для виникнення самостійного розряду в локальній зоні міжелектродного проміжку. Фазна напруга ЛЕП-110 кВ, між землею та проводом дорівнює:

$\frac{110}{\sqrt{3}}$ кВ. При великій відстані L проводів до землі цієї напруги недостатньо

для виникнення самостійного розряду.

Однак біля проводу на відстані ~ 1 см існує дуже високий градієнт, де напруженість перевищує $25 \div 30$ кВ/см, що більше значення критичної напруженості для повітря – $24,5$ кВ/см і тут виникає локальний самостійний розряд – **корона**.

Початкову напруженість розряду – напруженість появи корони обчислюють за формулою:

$$E_{нк} = 24,5 \cdot \delta \cdot \bar{m} \cdot \left[1 + \frac{0,65}{(r \cdot \delta)^{0,38}} \right], \quad (2. 2)$$

а при малих радіусах проводів використовують формулу Піка

$$E_{нк} = 30,3 \cdot \delta \cdot \bar{m} \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \text{ кВ/см, при } r < 1 \text{ см.} \quad (2. 3)$$

Коефіцієнт \bar{m} – характеризує тут негладкість проводу.

Для скручених проводів, які застосовують в ЛЕП, $\bar{m} = 0,82 \div 0,94$.

В умовах дощу, снігу, ожеледі $\bar{m} = 0,57 \div 0,73$ і корона виникає при меншій напруженості електричного поля.

Напруга (початкова) появи корони

$$U_{нк} = E_{нк} \cdot r \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{r}, \quad (2. 4)$$

де r і H - радіус і середня висота підвісу проводу, см (або висота підвісу нижнього проводу).

Облік втрат на корону необхідно проводити, якщо робоча напруженість E біля проводу наближається до величини початкової напруженості

$$E = \frac{Q}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r}, \quad (2. 5)$$

де Q – максимальне фазне значення заряду на поверхні проводу (Кл/км), $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-9}$ Ф/км – діелектрична проникність повітря.

Виразимо заряд Q через діюче значення лінійної (номінальної) напруги лінії U_l і ємність фази C : $Q = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} C \cdot U_l$, і отримаємо величину допустимої робочої напруженості E_p , при якій корона відсутня

$$E_p = 0,0147 \frac{CU_l}{r} \text{ (кВ/см)} \quad (2.6)$$

Таким чином, якщо напруженість на проводі $E_p \geq 0,5 \cdot E_{нк}$, то втрати на корону значні і їх необхідно **обмежувати**.

Основним способом зменшення втрат на корону є збільшення діаметра проводу, що призведе до збільшення його поверхні і зменшення напруженості поля навколо нього.

Для ЛЕП 110÷220 кВ найменша розрахункова величина діаметра проводів (без корони) становить відповідно 1÷2 см.

Для ЛЕП 110 кВ діаметр = 9,5 мм;

для ЛЕП 150 кВ = 13,5 мм; для ЛЕП 220 кВ = 21,5 мм.

2. Методи запобігання коронному розряду

Виключення появи корони на проводах ЛЕП досягають двома основними способами:

- розщепленням проводів фаз;
- розширенням проводів коли замість центральної сталеві жили застосовують нейлонову або іншу непровідну (вуглепластикову), а провідникові сегменти розташовують по її периметру.

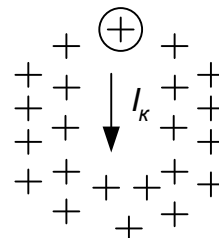


Рисунок 2. 1. - Утворення об'ємного заряду і струму корони.

При коронному розряді в результаті іонізації повітря біля поверхні проводу утворюється об'ємний заряд того ж знака, що і потенціал проводу (Рис.2.1). Напруженість поля біля поверхні проводу під час коронування

залишається рівною E_n . Збільшення напруги на проводі призводить до посилення іонізації, зростання об'ємного заряду і зниження напруженості до E_n .

При збільшенні напруженості об'ємного заряду втрати енергії на корону зростають тим більше, чим більше напруга на проводі перевершує *початкову* напругу корони E_n .

Оскільки об'ємні заряди переміщуються від проводу в напрямку до землі, напруженість поля біля проводу зростає.

Але через посилення іонізації об'ємний заряд поповнюється, напруженість падає до E_n і корона зберігається необмежено довго.

При змінній напрузі об'ємні заряди здійснюють зворотно-поступальні коливання біля проводу, поступово віддаляючись від нього в ділянку слабкого поля, де вони рекомбінують. При великих діаметрах проводів зона іонізації велика і при початковій напрузі U_n може досягати критичної довжини.

Тоді корона виникає одразу в стримерній формі.

На проводах малих діаметрів (до 1 см) корона виникає в лавинній формі.

Але при збільшенні напруги понад U_n розмір зони іонізації збільшується і корона переходить у стримерну форму.

Струм стримерної корони складається з окремих імпульсів з дуже крутими фронтами (~ десятки наносекунд). Ця високочастотна складова струму корони є джерелом інтенсивного електромагнітного випромінювання із широким спектром частот, що створюють значні перешкоди радіо- і телевізійному прийому.

При змінній напрузі корона виникає, якщо напруженість поля на проводі досягає E_n і горить, поки напруга не досягне максимуму. Потім напруженість поля на проводі стає нижче E_n і корона гасне. Оскільки позитивні іони малорухомі, то в кожен позитивний напівперіод змінної напруги об'ємний заряд підсилюється і корона запалюється раніше.

Негативний об'ємний заряд завдяки більшій рухливості електронів, що переміщуються в напрямку до землі, – значно меншій, тому він менше підсилює об'ємний заряд, внаслідок чого напруга запалювання корони в негативний напівперіод нижча.

Залежність напруги запалювання корони від величини потенціалу на проводі називають *характеристикою запалювання корони*.

При змінній напрузі коронування більш інтенсивне і втрати на корону значно більші, ніж при постійній (рис. 2. 2).

Основні втрати електроенергії від коронного розряду **обумовлені переміщенням об'ємного заряду до землі, оскільки втрати на іонізацію на порядок менші.**

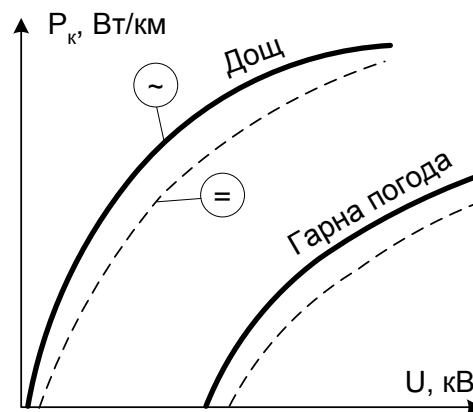


Рисунок 2. 2.- Втрати потужності від корони при змінній та постійній напрузі.

Атмосферні опади утворюють виступи на поверхні проводів, різко збільшуючи напруженість на них електричного поля. Початкова напруженість запалювання корони E_n при цьому різко падає.

Рівняння характеристики запалювання корони має вигляд:

$$U_{зан} = 2U_n - U_m \text{ (тут } U_m \text{ – амплітудне значення напруги на проводі).}$$

Через різну рухливість носіїв заряду – електронів та іонів напруга запалювання в *позитивний напівперіод* вища, ніж в негативний.

Для того, щоб виключити втрати енергії від корони і радіоперешкоди, **початкова напруга запалювання корони повинна бути не нижча найбільшої робочої напруги лінії щодо землі.**

При атмосферних опадах виключити коронування проводів практично неможливо (в тому числі з техніко-економічних міркувань), тому діаметр проводів розраховують тільки з умов виключення корони в суху погоду.

Прийmemo для спрощення $E_n \approx 30,3 \cdot \bar{m} \cdot \delta$, тоді

$$U_n \approx E_n \cdot r \cdot \ln \frac{2HL}{r \cdot 2H} = 30,3 \cdot \bar{m} \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{L}{r}. \quad (2.7)$$

Умова за якої не виникне корона:

$$30,3 \cdot \bar{m} \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{L}{r} \geq \frac{U_{ном} \sqrt{2}}{\sqrt{3}}. \quad (2.8)$$

Прийнявши коефіцієнт не гладкості $\bar{m} = 0,8$, $\delta = 1$ і $\ln \frac{L}{r} \approx 6,2$

(характерно для ліній 110÷220 кВ), отримуємо для ЛЕП 110÷220 кВ

$$d \geq 0,011 \cdot U_{ном}, \quad (2.9)$$

тобто діаметр проводів для ЛЕП-110 кВ з вимогами відсутності корони повинен бути – 1,2 см.;

а для ЛЕП-220 кВ – 2,4 см при нормальних умовах.

При $U_n \geq 330$ кВ необхідні проводи більшого діаметра, але щоб площа поперечного перерізу і діаметр були незалежні.

Ця вимога реалізується в так званих **розширених проводах**, в яких струмопровідні сегменти розташовані по периметру непровідної центральної серцевини.

Застосовують також **розщеплення фаз** – коли кожна фаза лінії складається не з одного, а декількох проводів меншого діаметра (рис. 2. 3). Це дозволяє при необхідному сумарному перерізі проводів істотно знизити максимальну напруженість поля на їхній поверхні.

При цьому заряд кожного проводу q_1 складає тільки частину загального заряду розщепленої фази q_ϕ

$$q_1 = \frac{q_\phi}{n} = \frac{C_{p\phi} \cdot U_\phi}{n}, \quad (2.10)$$

де n – число проводів у фазі; $C_{p\phi}$ – ємність одиниці довжини проводу розщепленої фази.

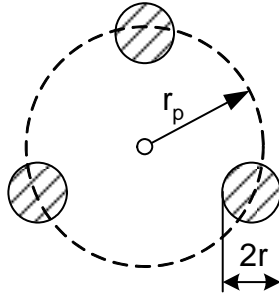


Рисунок 2. 3 - Характеристики розщепленої фази.

Якщо r_p – радіус розщеплення, то у трифазній системі ємність розщепленої фази

$$C_{p\phi} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln L} \cdot \frac{1}{r_e}, \quad (2.11)$$

де L – середньо геометрична відстань між фазами, а

$r_e = \sqrt[4]{n \cdot r \cdot r^{n-1}}$ – еквівалентний радіус одиночного проводу, який має ту ж ємність, що і розщеплена фаза.

Тоді середня робоча напруженість електричного поля на поверхні проводів розщепленої фази дорівнюватиме

$$E_{cp} = \frac{q_1}{(2\pi\epsilon_0 \cdot n \cdot r)} = \frac{U_\phi}{\left(n \cdot r \cdot \ln \frac{L}{r_e} \right)}, \quad (2.12)$$

а максимальна

$$E_{max} = k_y E_{cp} = f(n, r_p), \quad (2.13)$$

де $k_y = 1 + (n-1) \frac{r}{r_p}$ – коефіцієнт, що враховує підсилення напруже-

ності електричного поля через вплив зарядів на сусідніх проводах розщепленої фази (рис. 2. 4).

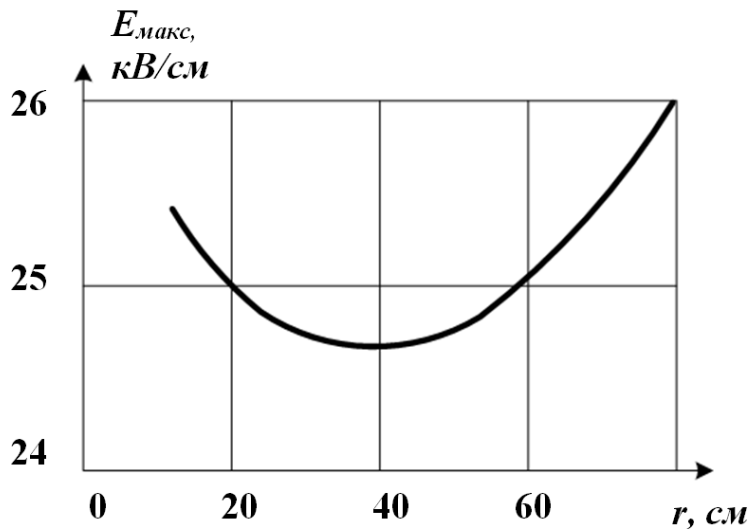


Рисунок 2. 4. - Залежність максимальної напруженості електричного поля розщепленої фази від відстані між проводами ЛЕП-500кВ ($n=3$).

При збільшенні радіуса розщеплення r_p зменшується вплив зарядів сусідніх проводів, але збільшується ємність фази і її заряд.

Таким чином, існує оптимальний радіус розщеплення, при якому E_{max} – найменша (тут r - відстань між проводами).

Отже з (2.13) випливає, що мінімальне значення напруженості E_{max} визначається оптимальним радіусом розщеплення r_p і числом одиночних проводів n .

Таким чином, наявність корони на проводах ЛЕП є негативним явищем з таких причин:

- корона супроводжується утворенням поблизу проводів ЛЕП і переміщенням до землі об'ємних зарядів, що призводить до активних втрат електроенергії, які досягають **~ 40%** втрат від нагріву проводів.

- струм коронного розряду – імпульсний зі спектром частот від 0,15 до 1000 МГц, що створює перешкоди у всьому радіо- та теледіапазоні;

- акустичний шум шкідливий для людини і вимагає збільшення зони відчуження ЛЕП;

Однак збільшенням діаметра проводів і зниженням напруженості поля на їхній поверхні неможливо виключити корону при несприятливих атмосферних умовах.

В місцях пошкодження проводів і арматури гірлянд, на елементах кріплення, (тобто в зонах місцевого посилення поля), навіть в нормальних умовах може виникнути місцева корона.

На лінії, якщо робоча напруга перевищує початкову $U_p > U_n$, то виникає загальна корона.

Загальні втрати енергії від корони розраховують на основі експериментальних даних про втрати при різних погодних умовах:

сухій погоді; сухому снігу; дощу; ожеледі; паморозі (рис.2. 5).

Для траси ЛЕП використовують дані метеорологічних спостережень про тривалість різних погодних умов у годинах:

h_{xn} – хороша погода; h_c – сніг; h_d – дощ; h_n – паморозь.

Річні втрати (в кВт·год/км) визначають за формулою

$$A_k = N^2 \cdot r^2 \cdot (P_{xn} \cdot h_{xn} + P_d \cdot h_d + P_c \cdot h_c + P_n \cdot h_n), \quad (2. 14)$$

де N – загальне число проводів у 3-х фазах лінії;

P_{xn}, P_d, P_c, P_n – потужність втрат електроенергії від корони при різних погодних умовах (рис. 2. 5).

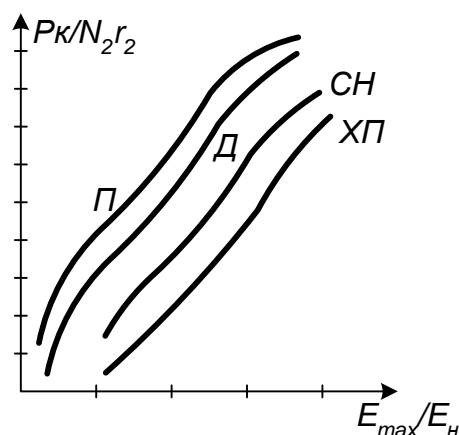


Рисунок 2. 5 - Узагальнені характеристики втрат потужності від корони при різних погодних умовах.

За співвідношенням E_{max}/E_n з графіка (рис. 2. 5) визначають потужність втрат.

Середньорічна потужність втрат від корони:

$$P_{c.p} = \frac{A_k}{8760}, \text{ кВт/км} . \quad (2. 15)$$

При проведенні техніко-економічних розрахунків необхідно враховувати втрати від корони, якщо $E_{max}/E_n > 0,5$.

Економічно прийнятні втрати від корони при умові:

$E_{max}/E_n \leq 0,9$ – це умова вибору діаметра проводів з погляду обмеження втрат від корони.

Радіоперешкоди від корони максимальні на ЛЕП надвисокої напруги в дощ і сніг. Основне джерело радіоперешкод – стримерна корона. Спектр частот радіоперешкод – від 10 кГц до 1 ГГц. Перешкоди на частотах більших за 30 МГц виникають у ЛЕП–750 кВ і заважають теле- і радіозв'язку. Інтенсивність радіоперешкод характеризується вертикальною складовою напруженості електричного поля біля поверхні землі (E_2).

Рівень радіоперешкод визначають

$$Y = 10 \lg \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 = 20 \lg \frac{E_2}{E_1}, \text{ дБ}, \quad (2. 16)$$

де E_1 – напруженість електричного поля біля провода, мкВ/м. Приймаємо за базову $E_1 = 1$ мкВ/м, тоді:

$$Y = 20 \cdot \lg E_2 \quad (2. 17)$$

Залежність рівня радіоперешкод від напруженості електричного поля на проводі лінійна і визначається емпіричною формулою

$$Y_2 - Y_1 = k_1(E_2 - E_1), \text{ дБ} \quad (2. 18)$$

де $k_1 = 1,8$ – коефіцієнт при напруженостях поля 20÷30 кВ/см.

Допустима напруженість радіоперешкод нормується на частоті 1 МГц і в хорошу погоду не повинна перевищувати 50 мкВ/м на відстані 50м від ЛЕП -330 – 750 кВ.

Як розрахункова, за рекомендацією міжнародного комітету з радіоперешкод, прийнята частота $f = 0,5$ МГц. Рівень допустимого сигналу радіоперешкод в гарну погоду не повинен перевищувати 40 дБ, що дає: $40 = 20 \cdot \lg E$, тоді $E = 100$ мкВ/м.

Це допустима напруженість електричного поля радіоперешкод на відстані 100м від проекції на землю крайнього проводу ЛЕП – 330 кВ і вище. Зі збільшенням відстані рівень радіоперешкод знижується

$$Y_2 - Y_1 = 20 \cdot k \cdot \lg \frac{l_1}{l_2}, \quad (2. 19)$$

де $k = 1.6$ – коефіцієнт загасання для частот $0,15 \div 1$ МГц.

Збільшення радіуса проводів при незмінній напруженості поля на них призводить до зростання рівня радіоперешкод, тому що спад напруженості поля в радіальному напрямку сповільнюється, а створює умови для інтенсивної стримерної корони

$$Y_2 - Y_1 = 20 \lg \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2. \quad (2. 20)$$

Тут Y_2 і Y_1 – рівні радіоперешкод при напруженостях на проводах E_2 і E_1 , кВ/см.

З підвищенням частоти рівень радіоперешкод зменшується

$$Y_f = 5,5 \cdot \left[1 - 2(\lg 10 \cdot f)^2 \right]. \quad (2. 21)$$

Перешкоди зростають також при забрудненні проводів.

Акустичний шум, що впливає на психологічний і фізичний стан людини, має дві складові:

- шипіння, що відповідає частоті 100 Гц і кратним їй частотам;
- широкопasmовий (так званий «білий») шум.

Перша складова обумовлена рухом об'ємного заряду у проводів, що двічі за період створює хвилі звукового тиску, друга - генерується стримерною короною. За санітарними нормами припустимий рівень гучності акустичного шуму дорівнює 45 дБ (А).

Виходячи з цих вимог лінії 330 кВ і вище не повинні наближатися до населених пунктів ближче, ніж на 300 м. Оцінку рівня гучності шуму корони A здійснюють за формулою

$$A = 16 + 1,14 \cdot E_{max} + 9r + 15 \lg n - 10 \lg l, \text{ дБ(А)}. \quad (2. 22)$$

Звідки виходить, що інтенсивність акустичних перешкод істотно зростає при збільшенні числа проводів у фазі і відстані між ними.

Запитання для самоконтролю

1. Фізичні причини виникнення коронного розряду ?
2. Що таке «початкова напруженість» електричного поля ?
3. Наведіть формулу Піка і дайте свій коментар щодо неї.
4. Що таке «коефіцієнт негладкості» проводу?
5. Негативні наслідки коронного розряду на проводах ЛЕП ?
6. Методи запобігання коронного розряду на проводах ЛЕП ?
7. Як впливають атмосферні фактори на виникнення корони ?
8. Що таке «характеристика запалення» корони?
9. Як розрахувати втрати електроенергії від коронного розряду ?
10. Як визначити рівень радіоперешкод від коронного розряду ?

ЛЕКЦІЯ № 3: РОЗРЯДИ В ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКАХ ПРИ ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГАХ

- 1. Параметри грозових імпульсів**
- 2. Електричні розряди в довгих повітряних проміжках**
- 3. Характеристика та параметри грозових перенапруг**
- 4. Характеристика грозової діяльності**

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.

2. Єрмолаєв С.О. Проектування систем електропостачання в АПК/ С. О. Єрмолаєв, В. Ф. Яковлев, В. О. Мунтян, В. В. Козирський, І. П. Радько, Ю. М. Куценко – Мелітополь: видавництво Люкс , 2009 р. – 570 с.

3. Коваленко О. І. Основи електропостачання сільського господарства: Навчальний посібник / О. І. Коваленко, Л. Р. Коваленко, В. О. Мунтян, І. П. Радько. – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2011 – 462 с.

4. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011-448 с.

5. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притака, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.

1. Параметри грозових імпульсів

Імпульсна перенапруга – короткотривала, має аперіодичний характер і характеризується вольт-секундною характеристикою:

$$U_p = f(\tau_i),$$

де τ_i – тривалість імпульсу перенапруги,

τ_ϕ – тривалість фронту імпульсу.

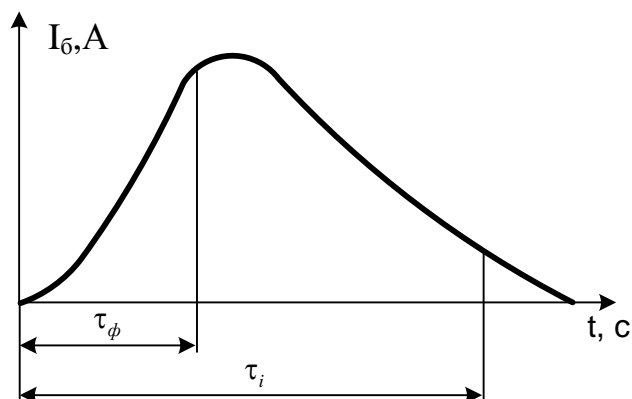


Рисунок 3. 1- Параметри імпульсу перенапруги

Електроустаткування повинно витримувати імпульсну випробувальну напругу уніфікованим грозовим імпульсом, що має такі параметри:

- тривалість фронту імпульсу: $\tau_\phi = 1,2 \pm 0,36$ мкс.

- тривалість самого імпульсу: $\tau_i = 50 \pm 10$ мкс.;
- амплітуда імпульсу: $I_0 \approx 30 \div 200$ кА;
- крутизна фронту імпульсу: $\partial I_0 / \partial t = a = 13 \div 30$ кА/мкс.

Якщо до міжелектродного проміжку прикладена напруга пробою U_n , то для розвитку і встановлення розряду необхідний деякий час t_p – тривалість розряду, що складається з таких складових:

$$t_p = t_x + t_c + t_\phi,$$

де t_x – час наростання напруги до U_n ;

t_c – статистичний час запізнювання, пов'язаний з появою ефективного електрона (випадкова подія);

t_ϕ – час розвитку і формування розряду (теж статистична величина).

Якщо тривалість прикладеної напруги менше t_p , то пробою не відбудеться. Чим вища прикладена напруга U_p , тим менше час розвитку розряду t_p . Залежність максимальної напруги розряду від часу дії імпульсу називається *вольт-секундною характеристикою* (ВСХ) ізоляції.

Оскільки початок і швидкість протікання процесу іонізації залежать від величини $U_{ном}$, то ВСХ залежить від форми імпульсу (рис. 3. 2).

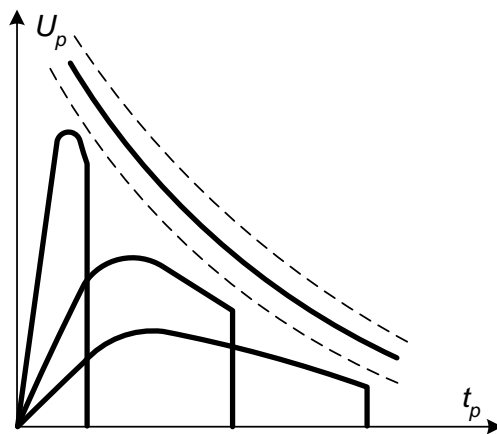


Рисунок 3. 2 - Залежність величини розрядної напруги U_p ізоляції від тривалості t_p дії імпульсу перенапруги.

Через статистичний розкид тривалості розряду t_p ВСХ має вигляд смуги, для якої вказують середню криву, а її ширина визначає межі розкиду

величини розрядної напруги (для трьох різних імпульсів). ВСХ також суттєво залежить від ступеня однорідності електричного поля (рис. 3. 3).

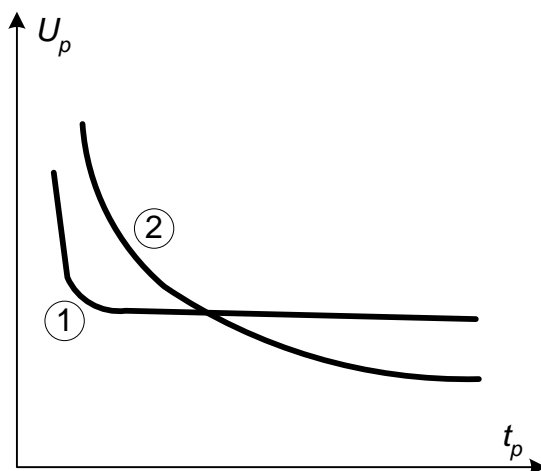


Рисунок 3. 3 - Залежність характеру ВСХ від ступеню однорідності поля;

1- однорідне поле; 2 –неоднорідне поле.

Для однорідного поля ВСХ (1) паралельна осі абсцис і тільки при $t_p \approx 1$ мкс і менше, U_p зростає. Це дозволяє використовувати такі проміжки (куля-куля), як універсальний прилад для виміру максимальних значень високої напруги U_p .

Для різко неоднорідних полів ВСХ (2) має більшу кривизну, тому що інтервал t_{ϕ} сильно залежить від величини прикладеної напруги. Для таких проміжків при грозових імпульсах характерні більші розрядні напруги U_p , ніж при змінній напрузі U_{\sim} частотою 50 Гц.

Відношення імпульсної розрядної напруги U_p до розрядної напруги на частоті 50 Гц U_{\sim} : $k_{imn} = U_p / U_{\sim}$ називається **коефіцієнтом імпульсу**.

В однорідному полі $k_{imn} = 1$. Він характеризує кількісно реакцію ізоляції на комутаційні імпульси і змінну напругу.

Найнижчі розрядні напруги має повітряний проміжок пари електродів стрижень-площина при \oplus на стрижні.

2. Електричні розряди в довгих повітряних проміжках

Найнижчу розрядну напругу має повітряний проміжок, утворений парою електродів стрижень-площина, що відповідає конфігурації ЛЕП: провід-земля. При досягненні робочою напругою величини U_n , зі стрижня розвивається пучок стримерів (рис.3. 4). Об'ємний заряд, що при цьому утворюється, *знижує* напруженість електричного поля E у стрижня і розвиток розряду припиняється. Після цього напруга на проміжку знову зростає і з'являються нові спалахи стримерів.

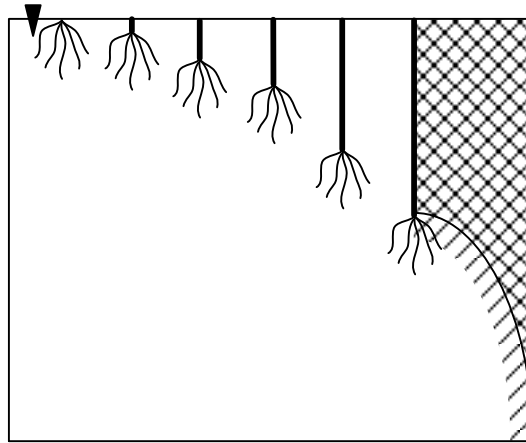


Рисунок 3. 4 - Схема утворення лідерного розряду

Через нагрівання повітря (термоіонізацію) в зоні розвитку стримерів з'являється нове утворення – канал *лідера*.

Лідер – це канал розряду, ініційований стримером. Концентрація частинок у ньому вища, ніж у стримері, що сприяє просуванню його до протилежного електроду. Швидкість розвитку лідера $t_l \gg t_{cmp}$ ($\sim 10^6$ см/с). Зростаюча напруженість на проміжку, іонізація, яскраві спалахи і проходження по каналу великого струму, призводять до початку наскрізної фази розряду. Лідер безпосередньо контактує з електродом, а наступні спалахи стримерів виникають з кінця лідера і подовжують його до протилежного електроду. Далі розвивається наскрізна фаза розряду, що характеризується різким зростанням струму в каналі.

Наскрізна фаза завершується перекриттям проміжку лідерним каналом і розвитком *головного* розряду.

Перехід від лідерної стадії до головного розряду зручно порівнювати із замиканням на землю вертикального зарядженого проводу (рис.4.5), який імітує провідний канал з щільністю заряду σ . При замиканні ключа K , відбувається нейтралізація негативних зарядів позитивними, що надходять із землі.

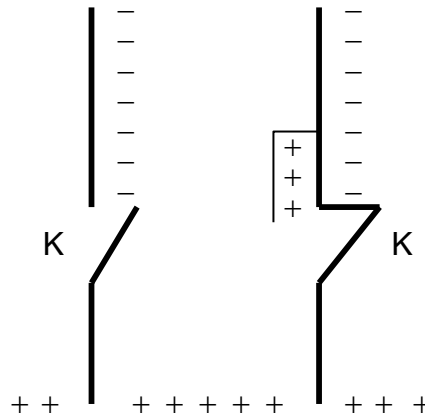


Рисунок 3. 5 - Макетне пояснення механізму утворення головного розряду.

Амплітуда струму, що розповсюджується по каналу зі швидкістю V :

$$I_{\sigma} = \sigma \cdot V.$$

Якщо заряд замикається через деякий опір R , то струм в канал

$$I_{\sigma} = \sigma \cdot V \left(\frac{Z}{Z + R} \right), \quad (3. 1)$$

де Z – еквівалентний хвильовий опір каналу блискавки.

Отже, струм блискавки залежить від опору заземлення R і еквівалентного хвильового опору каналу блискавки Z .

Із достатнім ступенем точності хвильовий опір блискавки вважають нескінченно великим, тобто блискавку розглядають як джерело струму.

Інтенсивність розвитку розряду безпосередньо залежать від крутості імпульсу перенапруги. При грозових імпульсах практично одразу починається наскрізна форма розвитку розряду.

Таким чином, пробій проміжку може бути чисто стримерним (у неоднорідному полі), або лідерним (при великих відстанях між електродами L і змінній напрузі).

У каналі лідера великими є число носіїв і густина струму.

Вирішальна умова розвитку лідера – підведення електричної енергії за рахунок лідерного струму I_l для підтримки температури термоіонізації в каналі розряду (рис.4.6).

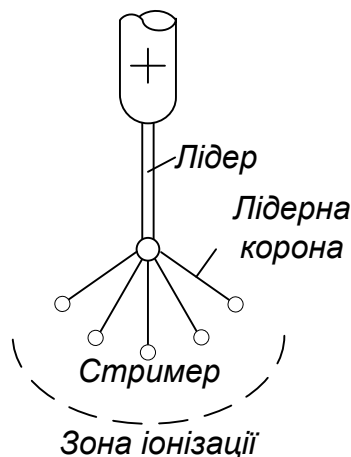


Рисунок 3. 6 - Схема утворення головного розряду.

У проміжку стрижень-площина з відстанню між електродами $L \leq 1$ м при усіх видах напруг (постійна і змінна, комутаційних і грозових імпульсах) виникає тільки стримерний пробій. Стример проходить проміжок раніше, ніж розів'ється лідер.

При великих L зберігається чисто стримерний розряд тільки при грозовому імпульсі (1,2/50 мкс) і постійній напрузі тому, що при імпульсній напрузі часу дії поля E недостатньо для процесу утворення лідера.

При постійній напрузі утворення лідера утруднене завдяки тому, що виникне стримерний розряд.

При грозових імпульсах наскрізна фаза розряду виникає практично миттєво.

Якщо маємо пару електродів – стрижень-площина з відстанню між ними $L > 1$ м, то при комутаційному імпульсі і змінній напрузі утворюється лідер,

що призводить до пробою проміжку. Напруженість електричного поля, при якій відбувається формування лідера, $E \sim 4\div 5$ кВ/см.

Величина розрядної напруги при цьому може бути розрахована за формулою:

$$U_p = E_l \cdot l_l + E_{zi} \cdot l_{zi}, \quad (3.2)$$

де l_l – довжина каналу лідера;

l_{zi} – довжина зони іонізації;

E_l – середня напруженість поля в каналі лідера;

$E_{zi} = 5$ кВ/см (середня напруженість в стримерній зоні).

Можливість утворення лідера пов'язана з розвитком стримерної зони до критичної величини $l_{кр}$, при досягненні якої, через основний канал, проходить струм, достатній для розігріву каналу і переходу його в лідер.

При грозових імпульсах довжина зони іонізації (стримерної зони) практично дорівнює міжелектродній відстані L , і тоді 50% розрядна напруга довгих проміжків може бути визначена як

$$\bar{U}_p \approx 5L, \quad (\text{тут } U_p, \text{ кВ; } L, \text{ см}). \quad (3.3)$$

Для оцінки розрядних напруг довгих повітряних проміжків необхідно визначити в момент встановлення наскрізної фази довжину зони іонізації l_{zi} і початкову напруженість в каналі лідера E_l .

Експериментально отримані значення l_{zi} показані на графіку рис. 3. 7.

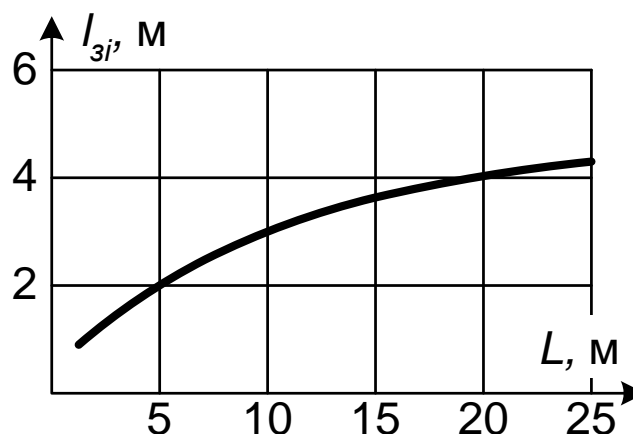


Рисунок 3. 7 - Залежність довжини стримерної зони від відстані між електродами стрижень-площина.

Ця залежність описується емпіричним рівнянням

$$l_{zi} \approx l_c = a_0 \cdot \left(1 + \ln \frac{L}{a_0} \right), \quad (3.4)$$

де a_0 – константа ($a_0 = 1,5$ – для проміжку провід-площина);

l_c – довжина стримерної зони.

Залежність середніх поздовжніх напруженостей у лідері від його довжини

$$E_l = E_{l0} \cdot \frac{a_0}{l_l} \cdot \ln \left(\frac{L}{a_0} - \ln \frac{L}{a_0} \right), \quad (3.5)$$

де $l_l = L - l_c$;

$E_{l0} = 1,5$ кВ/см – початкова напруженість у каналі лідера.

Звідки отримуємо вираз для розрахунку 50%-их розрядних напруг довгих повітряних проміжків в області мінімуму ВСХ (формула Лемке):

$$U_{\min} = E_c \cdot a_0 \cdot \left(1 + \ln \frac{L}{a_0} \right) + E_{l0} \cdot a_0 \cdot \ln \left(\frac{L}{a_0} - \ln \frac{L}{a_0} \right), \quad (3.6)$$

де E_c – середня напруженість у стримерній зоні.

3. Характеристика та параметри грозових перенапруг

Джерелом грозових перенапруг є блискавка, що являє собою електричний розряд між двома хмарами або між хмарою і землею.

Блискавка виникає завдяки нагромадженню і розподілу зарядів у грозових хмарах внаслідок існування висхідних потоків повітря. Краплини води, що випаровуються з поверхні водойм, конденсуються у хмарах і замерзають в зоні низьких температур. Замерзання починається з поверхні краплини і позитивні іони під дією різниці температур пересуваються в поверхневий шар, заряджаючи його позитивно.

Рідка серцевина при цьому набуває негативного заряду.

Коли замерзає серцевина, поверхня краплини лопається, осколки підіймаються вгору і заряджають верхню частину хмари позитивно.

Нижня частина хмари виявляється зарядженою негативним потенціалом. При збільшенні концентрації негативних зарядів в нижній частині хмари зростає напруженість електричного поля і після досягнення критичної величини (~ 24 кВ/см) починається іонізація повітря і формування грозового розряду. Тому в більшості випадків (до 90%) грозової діяльності блискавки переносять в землю негативний заряд.

На початковій стадії блискавка являє собою канал (лідер), супроводжується слабким світінням та який повільно, зі швидкістю $1,5 \cdot 10^5$ м/с, рухається в напрямку до землі.

Заряди хмари і лідера *індукують* на поверхні землі заряди протилежного знака. З наближенням лідера до землі напруженість електричного поля землі зростає і з них можуть розвиватися зустрічні лідери. Сила струму в лідерній стадії блискавки досягає сотень ампер. На відстанях $25 \div 100$ м між ними виникає висока напруженість і проміжок за декілька мікросекунд пробивається з виділенням енергії $\sim 0,5 \div 5$ МДж, яка витрачається на нагрівання і термоіонізацію.

Провідність каналу різко зростає і зона підвищеної напруженості переміщується до хмари зі швидкістю $\sim 0,5$ швидкості світла.

Струм у каналі досягає десятків і сотень тисяч ампер за $5 \div 10$ мкс. Протягом короткого часу канал розігрівається до $20 \div 30$ тисяч градусів Цельсія, швидко розширюється, що викликає утворення ударної хвилі (грім).

Середня тривалість удару блискавки не перевищує 0,1с.

При цьому відбувається нейтралізація заряду лідера.

Цей процес називається *головним розрядом* і супроводжується сильним світінням каналу розряду.

Заряд і тривалість негативної блискавки, як правило, менша, ніж позитивної. Особливістю спадаючих негативних блискавок є багаторазові розряди внаслідок того, що через $10 \div 100$ мс по іонізованому каналу першого

розряду знову розвивається повторний лідер до землі зі значно більшою швидкістю. Це так званий стріловидний лідер. У більшості випадків блискавка складається з двох – трьох розрядів, але зареєстровано в одній блискавці до 40 розрядів.

Грозивий розряд здатний викликати різні пошкодження об'єктів. Основним вражаючим фактором є *струм блискавки*, величина якого визначається еквівалентним хвильовим опором каналу розряду Z а також опором заземлення R :

$$I_{\sigma} = \sigma \cdot V \cdot \frac{Z}{Z + R}, \quad (3.7)$$

де σ - щільність заряду на одиницю довжини каналу,

V - швидкість розповсюдження розряду.

Статистика спостережень свідчить, що величина струму блискавки є випадковою величиною, але підлягає закону нормального розподілу і знаходиться в межах від 10 до 300 кА.

Іншим за значенням вражаючим фактором, що визначає індуктоване падіння напруги в провідниках і індуквані напруги в магнітно-зв'язаних ланцюгах, є *крутість фронту струму блискавки*: $a = \frac{di_{\sigma}}{dt}$, величина якої

також підлягає закону нормального розподілу.

Але для оціночних розрахунків можна використовувати усереднені значення розподілу струму й крутості імпульсу блискавки, що апроксимуються наступними експоненційними функціями:

$$P(I_{\sigma}) = \exp(-0,04 \cdot I_{\sigma}); \quad (3.8)$$

$$P(a) = \exp(-0,08 \cdot a). \quad (3.9)$$

Заряд, що переноситься струмом блискавки, має теплову й електродинамічну дію.

Енергія, що виділяється в опорній ділянці блискавки, пропорційна миттєвому значенню струму, який витрачається на нагрівання і плавлення металу в цьому місці.

Інтеграл квадрату струму блискавки $\int i^2 dt$ визначає електродинамічну дію та нагрівання струмопроводів при проходженні струму блискавки через уражений об'єкт.

Блискавка, крім первинної дії, що проявляється у вигляді теплового та механічного руйнування уражених об'єктів, може мати також небезпечні вторинні наслідки. Вони пов'язані з виникненням електрорушійних сил завдяки електростатичним та електромагнітним полям каналу блискавки, які спроможні наводити дуже високі потенціали на металевих конструкціях, трубопроводах, проводах обладнання, внаслідок чого можуть виникати вторинні розряди на землю. Можливе занесення потенціалу блискавки в споруди через наземні й підземні комунікації і враження в них персоналу.

4. Характеристика грозової діяльності.

Атмосферними перенапругами називають перенапруги, що виникають на струмопровідних частинах електроустаткування в результаті атмосферних електростатичних розрядів, які перевищують $U_{дон}$. Джерелом перенапруги є блискавка.

При розробці грозозахисних заходів необхідно враховувати такі параметри: амплітуду струму блискавки, крутість імпульсів, частоту ураження об'єктів, що визначаються числом грозових днів у році $N_{г.д.}$ для даного району (для Харкова – це 40 г.д.).

Вихідною величиною для розрахунку є число грозових годин у році $N_{г.г.}$: $N_{г.г.} = 1,5 \cdot N_{г.д.}$

Високі об'єкти через зустрічних лідерів збирають блискавки з більшої площі.

Число ударів блискавки за 100 грозових годин у споруду довжиною A , шириною B , висотою H дорівнює

$$n_{y\partial} = 6,7 \cdot (A + 7H) \cdot (B + 7H) \cdot 10^{-6}. \quad (3.10)$$

Число ударів блискавки в 100 км повітряної ЛЕП за 100 грозових годин:

$$n_{y\partial} = 6,7 \cdot 100 \cdot 6h_{cp} \cdot 10^{-3} \approx 4h_{cp}, \quad (3.11)$$

де $h_{cp} = h_{on} - \frac{2}{3} \cdot f$ – середня висота підвісу тросу або проводу, м;

h_{on} – висота опори; f – стріла прогину проводу.

Річне число ударів блискавки у лінію довжиною l при числі грозових годин у році N_2

$$n_{zod} = n_{y\partial} \frac{l}{100} \cdot \frac{N_2}{100}. \quad (3.12)$$

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть параметри стандартного грозового імпульсу.
2. З яких складових формується термін розряду?
3. Що таке «вольт-секундна» характеристика (ВСХ) ізоляції?
4. Як залежить ВСХ ізоляції від однорідності електричного поля?
5. Дайте визначення поняттю «коефіцієнт імпульсу»?
6. Який механізм утворення лідерного каналу розряду?
7. Який механізм формування головного розряду?
8. Наведіть теорію формування зарядів блискавки.
9. Прокоментуйте формулу Лемке щодо напруги розряду.
10. Назвіть вражаючі фактори грозового розряду.

ЛЕКЦІЯ № 4. ЗАХИСТ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВІД УДАРІВ БЛИСКАВКИ

- 1. Ефективність захисту електрообладнання**
- 2. Зона захисту одиночного блискавковідводу**
- 3. Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу**
- 4. Зона захисту тросових блискавковідводів**
- 5. Заземлення блискавковідводів**

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.
2. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с .
3. Кабышев А. В. Молниезащита электроустановок систем электроснабжения: учебное пособие/А. В. Кабышев. –Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 124 с.
4. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.
5. Притока І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притока, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.
6. Попадченко С. А., Савченко О. А. Захист ліній та підстанцій від блискавки та атмосферних перенапруг - Методичний посібник – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019. – 120 с.

1. Ефективність захисту електрообладнання

Ефективність захисту електрообладнання від ураження блискавкою характеризується середнім допустимим числом перекриття ізоляції внаслідок прориву блискавки в зону захисту - β_1 , зворотних перекриттів при ударах в блискавковідводи - β_2 і перекриттів внаслідок появи небезпечних перенапружень при набіганні імпульсів по лінії - β_3 .

Середнє число перекриттів ізоляції внаслідок прориву блискавки в зону захисту визначається за формулою

$$\beta_1 = \frac{n_{уд} \cdot P_{пр} \cdot P_{пер} \cdot D_z}{100}, \quad (4. 1)$$

де $n_{уд}$ - число ударів блискавки в об'єкт (підстанцію) за 100 грозових годин;

$P_{пр}$ - імовірність прориву блискавки в зону захисту об'єкта;

$P_{пер}$ – імовірність перекриття ізоляції при ударі блискавки в провід;

D_T – число грозових годин в місці розташування об'єкта.

Кількість зворотних перекриттів ізоляції при ударах блискавки в блискавковідводи дорівнює

$$\beta_2 = \frac{n_{уд} \cdot (1 - P_{пер}) \cdot P_{зв} \cdot D_z}{100}, \quad (4.2)$$

де $P_{зв}$ - імовірність зворотного перекриття при ударі в блискавковідвід, яка визначається критичним струмом $I_{кр}$, при якому стає можливим перекриття ізоляції.

Небезпечні імпульси перенапруги, що виникають внаслідок прориву блискавки через зону захисту і при зворотних перекриттях ізоляції розповсюджуються по лінії і можуть призвести до перекриття ізоляції електрообладнання.

Середнє річне число перекриттів ізоляції електрообладнання набігаючими імпульсами визначають за формулою:

$$\beta_3 = 4h_{mp} \cdot \left\{ P_a + (1 - P_a) \cdot \left[\left(4h_{on} \cdot \frac{P_{on}}{l} \right) + \left(1 - \frac{4h_{on}}{l} \right) \cdot P_{mp} \cdot \left(\frac{D_z}{100} \right) \cdot \left(m \cdot \frac{l_{zn}}{100} \right) \right] \right\}, \quad (4.3)$$

де l_{zn} – довжина захищеного підходу до об'єкта;

P_a – імовірність ураження струмопроводу;

m – число проводів;

P_{on} – імовірність перекриття ізоляції на опорі при ударі блискавки в провід,

P_{mp} – імовірність перекриття проміжку захисний трос-провід.

Показником грозостійкості об'єкта (підстанції) є число років безаварійної роботи, що визначається за форму

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}, \quad (4.4)$$

Вихідними даними для розрахунку блискавкозахисту від прямих ударів блискавки є призначення об'єкта, його значущість, ступінь вибухонебезпечності, конструктивні та технологічні особливості, габарити, електричний опір ґрунту.

По відношенню до вимог блискавкозахисту усі об'єкти класифікують за трьома категоріями вибухо- і пожежонебезпеки. Узагальнено ці ознаки характеризуються наступним чином.

До першої категорії відносять об'єкти, в яких знаходяться відкриті вибухо- та пожежонебезпечні речовини, що можуть призвести до руйнувань та людських жертв.

До другої категорії відносять об'єкти, в яких вибухо- та пожежонебезпечні речовини знаходяться у вогнестійких посудинах, але можуть вивільнитися при аварії.

До третьої категорії відносять об'єкти, в яких такі речовини взагалі відсутні.

Захист об'єктів від прямих ударів блискавки здійснюють за допомогою блискавковідводів, які поділяються на

стрижневі, тросові і комбіновані.

В останній час розробляють так звані *активні* блискавковідводи, найбільш ефективними з яких є апарати типу «Prevectron» (Франція).

Блискавковідвід – це споруда, вища за захисний об'єкт, яка сприймає прямі удари блискавки і відводить струми блискавки в землю завдяки системі заземлень.

Кожен блискавковідвід містить три основних елемента: блискавкоприймач, струмопровід, заземлення.

За характером взаємодії стрижневі й тросові блискавковідводи поділяються на одиночні, подвійні й багатократні.

Об'єкти *першої категорії* захищають стрижневими блискавковідводами, що стоять окремо або тросовими блискавковідводами.

Допускається встановлення ізольованих блискавковідводів безпосередньо на захищені об'єкти.

Об'єкти *другої категорії* захищають блискавковідводами, що стоять окремо або встановленими на спорудах неізолюваними стрижневими або

тросовими блискавковідводами, а також використанням в якості блискавкоприймача металевої покрівлі споруд.

Захист об'єктів *третьої категорії* може бути здійснений блискавковідводами будь-яких модифікацій, в тому числі металевою сіткою, що укладається на покрівлю. У всіх випадках кожен тип блискавковідводів повинен мати не менше двох струмовідводів.

При проектуванні блискавковідводів треба враховувати теплову й електродинамічну дію блискавки.

Інтеграл квадрата струму блискавки $\int i_0^2 dt$ називається імпульсом квадрата струму, що визначає механічний вплив і нагрівання (розплавлення) провідників.

Відкриті розподільні пристрої підстанцій захищають стрижневими, а лінії електропередач – тросовими блискавковідводами.

У даний час нормовані зони захисту блискавковідводів висотою до 150 м являють собою конус з вершиною на висоті $h_0 < h$, переріз якого на висоті h_x має радіус r_x (рис. 4. 1).

Зона захисту – це простір, імовірність ураження об'єктів у межах якого не перевищує 0,05 (або 1 раз за 200 років).

Зона захисту визначається відношенням:

$$\frac{H}{h}, \quad (4. 5)$$

де H – відстань розряду блискавки;

h – висота блискавковідводу.

У деяких випадках для особливо важливих об'єктів зону захисту розраховують за умови імовірності прориву не більше за 0,005.

За цією оцінкою розрізняють зону захисту типу А, яка має ступінь надійності 99,5% й вище і зону захисту типу Б - 95% й вище.

Існує два методи розрахунку зон захисту, які мало відрізняються за кінцевим результатом. Дослідження зони захисту, проведене на фізичних моделях показало, що геометрична форма захисної зони стрижневого

блискавковідводу описується гіперболічним законом, але для практичного застосування гіпербола апроксимується ламаною лінією.

2. Зона захисту одиночного блискавковідводу

Зона захисту представляє собою конус, що утворений шляхом обертання ламаної лінії навколо вертикалі (I метод), або гіперболи (II метод).

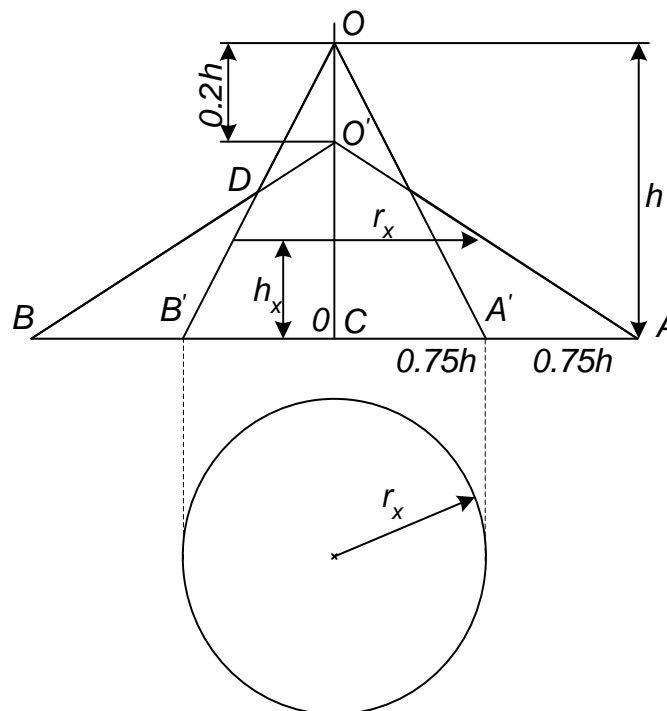


Рисунок 4.1. - Геометрична побудова зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу: h - висота блискавковідводу; h_x - висота споруди.

Послідовність побудови зони захисту по першому методу для блискавковідводів з висотою $h \leq 60$ м наступна:

1. Відкласти від вертикалі відрізки CA' , CB' на відстані $0,75h$;
2. На висоті $h_0 = 0,8 \cdot h$ поставити точку O' ;
3. Точку O' з'єднати з A і B ($CA = CB = 1,5h$)
4. Точку O з'єднати з A' і B' .

Провести ламану лінію BDO , яка є твірною зони захисту.

Для визначення радіуса зони захисту r_x на будь-якій висоті h_x використовуємо формули

$$r_x = 1,5(h - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h; \quad (4.6)$$

$$r_x = 0,75(h - h_x) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (4.7)$$

Вирішуючи ці рівняння відносно висоти h , отримаємо при заданих значеннях r_x і h_x оптимальну висоту блискавковідводу в метрах

$$h_{opt} = \frac{r_x + 1,9h_x}{1,5}, \text{ і } h_{opt} = \frac{r_x + 0,75h_x}{0,75}. \quad (4.8)$$

Для блискавковідводів з висотою $h \approx 60 \div 100$ зона захисту визначається на основі значення лімітованого радіуса основи конуса $r = 90$ м.

Тоді радіус зони захисту на висоті h_x визначають із співвідношень

$$r_x = 90(1 \div 1,25h_x/h) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h; \quad (4.9)$$

$$r_x = 45(1 - h_x/h) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (4.10)$$

Визначення r_x за II методом для блискавковідводів $h < 30$ м

$$r_x = h_a \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}}, \quad (4.11)$$

для $h > 30$ м:

$$r_x = h_a \frac{8,8}{\left(1 + \frac{h_x}{h}\right)\sqrt{h}}. \quad (4.12)$$

3. Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу.

Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів, розташованих на відстані $L < 5h$, більша за зону захисту двох окремих блискавковідводів і розраховується з відповідних геометричних побудов (рис.4. 2).

Якщо стрижневі блискавковідводи знаходяться на відстані $L > 5h$, їх треба розраховувати як окремі.

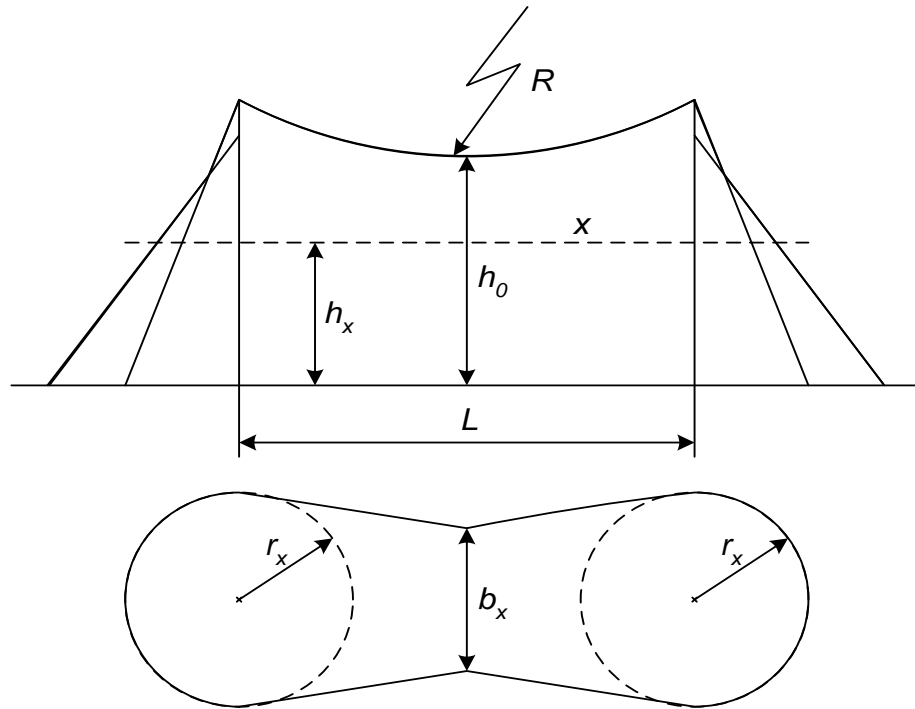


Рисунок 4. 2 - Побудова зони захисту подвійного блискавковідводу.

Блискавковідвід вважають подвійним якщо $L/h \leq 5$. Верхня межа зони захисту являє собою дугу радіуса $R = 4h - h_0$. Висоту h_0 обчислюють за емпіричною формулою

$$h_0 = 4h - \sqrt{9h^2 - 0,25L^2}, \text{ м.} \quad (4. 13)$$

Радіус кола R визначають таким чином: $R = 4h - h_0$. Якщо h_0 і L відомі, то оптимальну висоту h блискавковідводу знаходять за формулою

$$h_{opt} = 0,571h_0 + \sqrt{0,183h_0^2 + 0,0357L^2}, \quad (4. 14)$$

де h_0 обчислюють виходячи з необхідної ширини зони захисту b_x , яка визначається висотою об'єкта, що захищається, і його розмірами в горизонтальній площині

$$b_x = 3(h_0 - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h; \quad (4. 15)$$

$$b_x = 1,5(h_0 - h_x) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (4. 16)$$

Вирішуючи їх відносно h_0 , знаходимо

$$h_0 = \frac{b_x + 3,75h_x}{3} \text{ і } h_0 = \frac{b_x + 1,5h_x}{1,5}. \quad (4.17)$$

Для побудови зони захисту подвійного блискавковідводу різної висоти спочатку будують зону захисту блискавковідводу більшої висоти і торцеву частину зони захисту другого блискавковідводу. Потім з вершини блискавковідводу меншої висоти проводять горизонтальну лінію до перетину з твірною першого і вважають точку перетину вершиною фіктивного блискавковідводу. Далі, як звичайно, для двох однакових блискавковідводів будують зону захисту внутрішньої області (рис. 4. 3).

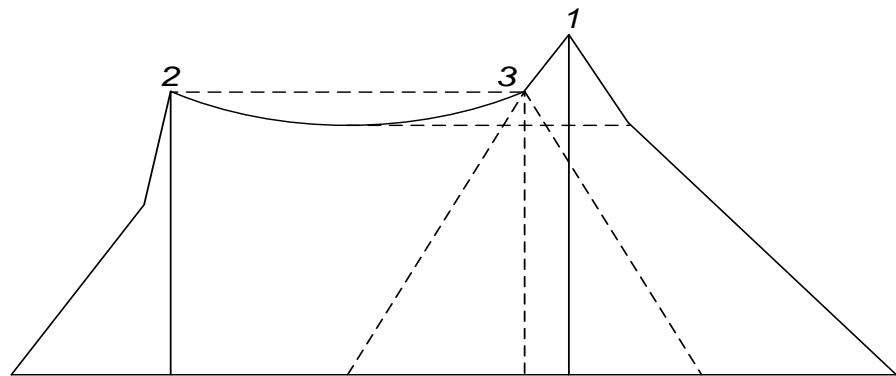


Рисунок 4. 3 - Побудова зони захисту різновисотних блискавковідводів.

Для розрахунку й побудови зовнішніх меж зони захисту використовують ті самі принципи, що й для поодиноких блискавковідводів.

При цьому блискавковідводи визначають попарно, як зони захисту подвійних блискавковідводів, у такій послідовності: 1-2, 2-3, 3-1.

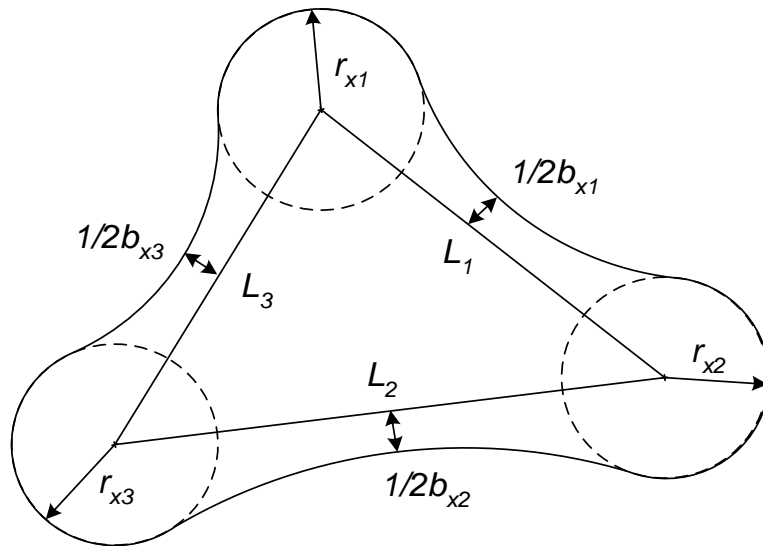


Рисунок 4. 4.- Побудова зони захисту багаторазових блискавковідводів

При використанні 4-х і більше стрижневих блискавковідводів необхідно виконання додаткових умов:

- для споруд 1-ї і 2-ї категорій треба приймати $h_0 \geq h_x$ для попарно взятих блискавковідводів за діагоналями багатокутника, утвореного одиничними блискавковідводами;

- для споруд 3-ї категорії допускається $D \leq 5h_a$ (D – довжина діагоналі багатокутника, складеного одиничними блискавковідводами);

- для блискавковідводів висотою $h > 30$ м значення D повинне бути зменшене на величину коефіцієнта $p = 5,5/\sqrt{h}$.

Умова непрориву блискавки в зону захисту має вигляд: $D \leq 8h_a$.

4. Зона захисту тросових блискавковідводів.

Розраховується першим методом таким чином

$$r_x = 1,25(h_{mp} - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h_{mp}; \quad (4.18)$$

$$r_x = 0,625(h_{mp} - h_x) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h_{mp}, \quad (4.19)$$

де h_{mp} – висота троса над об'єктом, що захищається, $h_{mp} = h - f$
 f – стріла прогину.

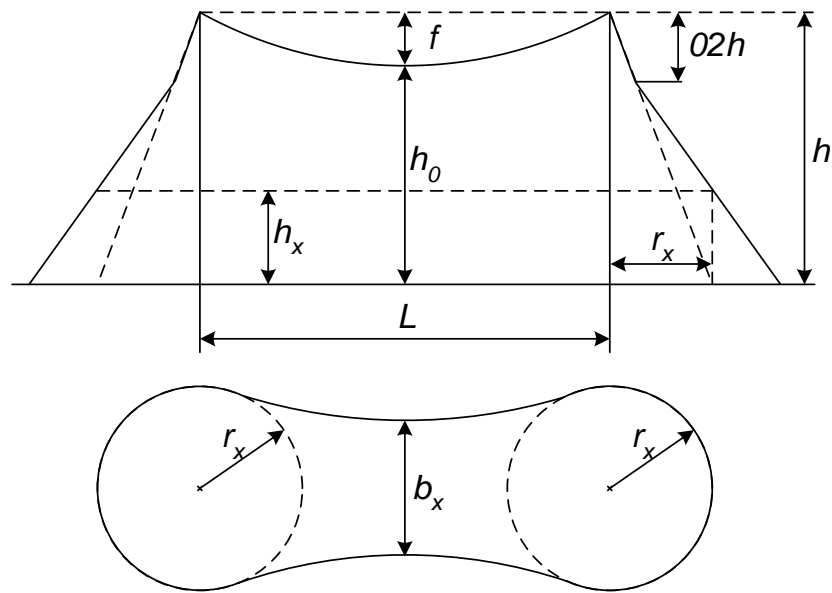


Рисунок 4. 5 - Побудова зони захисту тросового блискавковідводу

Повна ширина зони захисту при $h_x = 0$, дорівнює $2r_x = 2,5h_{mp}$.

За другим методом радіус захисту r_x визначаємо за формулою

$$r_x = h_a \frac{1,2}{1 + h_x/h_{mp}}. \quad (4.20)$$

Важливим техніко-економічним фактором є температура, що визначає стрілу прогину. За $T^{\circ}\text{C}_{\text{max}}$ приймають 40°C .

Стрілу прогину в будь-якій ділянці прогону визначають таким чином:

$$f_{np} = 4f \cdot \frac{l_1}{L} \left(1 - \frac{l_1}{L}\right) - \text{при однакових рівнях підвісу}. \quad (4.21)$$

$$f_{np} = \frac{l_1}{L} \Delta h + 4f \cdot \frac{l_1}{L} \left(1 - \frac{l_1}{L}\right) - \text{при різних рівнях ділянок підвісу}. \quad (4.22)$$

Тут Δh – різниця відміток підвісу троса, м; l_1 – відстань від несучої конструкції з більшою висотою підвісу троса до розглянутої ділянки, м. Грозі передуює вітер – трос відхиляється і об'єкт може бути уражений блискавкою.

Відхилення троса визначається співвідношенням

$$\sin \varphi = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \quad (4.23)$$

де φ – кут відхилення троса;

γ_1 – питома навантаження на трос від тиску вітру (Н/м·мм²);

γ_2 – питома навантаження від власної маси троса і тиску вітру (Н/м·мм²).

Горизонтальна проекція відхилення троса в будь-якій ділянці прогону в м:

$$c = f_n \cdot \sin \varphi. \quad (4.24)$$

Слід враховувати і збільшення висоти блискавкоприймача h_{mp} при його відхиленні Δh_{mp} від вітру

$$\Delta h_{mp} = f_n - \sqrt{f_n^2 - c^2}. \quad (4.25)$$

Тоді висота тросового блискавкоприймача у відхиленому положенні дорівнюватиме:

$$h'_{mp} = h_{mp} + \Delta h_{mp}. \quad (4.26)$$

5. Заземлення блискавковідводів.

Усі металеві частини електроустаткування, що можуть виявитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, повинні надійно з'єднуватися із землею.

Розрізняють три види заземлень:

– **захисне**, що гарантує електробезпечність при замиканні струмоведучих частин на корпус електрообладнання;

- **робоче**, що призначене для забезпечення нормальної роботи електроустаткування (заземлення нейтралей трансформаторів, генераторів, дугогасильних котушок);

- **грозозахисне** – для захисту електрообладнання від перенапруг і блискавкозахисту різноманітних об'єктів.

Звичайно заземлюючий пристрій виконує всі три функції.

Для влаштування заземлення використовують природні й штучні заземлювачі.

Штучне заземлення – це сталевий пруток Ø 10мм або оцинкований Ø 6 мм. Використовують також смугову сталь шириною 20÷40 мм і товщиною 4 мм. Розміщення заземлювачів повинно забезпечити рівномірний розподіл електричного потенціалу по всій площі, зайнятій електроустановкою.

Заземлювачі характеризуються величиною опору R_3 землі для струму, що протікає. R_3 залежить від геометричних розмірів і питомого опору ґрунту ρ .

В установках 6÷35 кВ із незаземленою нейтраллю R_3 завжди повинно бути: $R_3 \leq 250/I_3$.

Заземлюючий пристрій виготовляють з вертикальних стрижнів і горизонтальних смуг, що утворюють сітку з кроком не більше 30 м.

Опір вертикального заземлювача

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left[\frac{4l(2t + l)}{d(4t + l)} \right], \quad (4. 27)$$

де l – довжина заземлювача;

t – глибина залягання;

b – ширина смуги;

d – діаметр заземлювача.

Опір залізобетонного фундаменту

$$R = 1,7 \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{4t}{b}. \quad (4. 28)$$

Опір горизонтальної смуги

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{1}{5} \frac{l}{\sqrt{bt}}, \quad (4. 29)$$

де $\rho = k \cdot \rho_{вимір}$,

$\rho_{вимір}$ – вимірне значення питомого опору ґрунту,

k – сезонний коефіцієнт (при середній вологості $k = 1,4$, при підвищеній $k = 2,6$).

При великих імпульсних напругах блискавки густина струму дуже велика і біля поверхні електродів створюються дуже високі напруженості поля $E = j \cdot \rho$, що перевершують пробивні напруги ґрунту. Внаслідок цього навколо електродів утворюється зона іскріння, що збільшує їхній ефективний розмір, тому опір заземлення R_z зменшується. Одночасно при швидкому наростанні імпульсу струму блискавки на індуктивному опорі заземлювача виділяється напруга, що обмежує відведення струму, тобто опір заземлення R_z зростає.

Отже при постійному і імпульсному струмі опір заземлення R_z буде різним.

Відношення імпульсного і стаціонарного опору $\alpha_i = \frac{R_i}{R_{cm}}$ називається імпульсним коефіцієнтом. У результаті дії обох факторів $R_{zi} \neq R_{cm}$.

На межі іскрової зони (циліндр із r_{iz}) напруженість електричного поля

$$E_{np} = j \cdot \rho = \frac{I}{2\pi \cdot r_{iz} l} \cdot \rho, \quad (4.30)$$

звідки випливає

$$r_{iz} = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot l \cdot E_{np}}. \quad (4.31)$$

Тоді імпульсний опір заземлення

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{r_{uz}} = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{4\pi l^2 E_{np}}{I \cdot \rho}, \quad (4.32)$$

а імпульсний коефіцієнт

$$\alpha_i = \frac{\ln(4\pi l^2 \cdot E_{np} / I \cdot \rho)}{\ln 2l/r}. \quad (4.33)$$

Аналіз горизонтального заземлювача великої довжини дає такий вираз для імпульсного коефіцієнта:

$$\alpha_i = 1 + \frac{L_0 l}{3\tau_\phi R}, \quad (4.34)$$

де $L_0 = 0,2 \left(\ln \frac{l}{r} - 0,31 \right)$ – індуктивність одиниці довжини горизон-

тального заземлювача.

Для заземлювача з n труб чи смуг його імпульсний опір:

$$R_i = \alpha_i \cdot R / \eta_i \cdot n, \quad (4.35)$$

де η_i – імпульсний коефіцієнт використання заземлювача, що враховує взаємне екранування електродів, $\eta_i = (1 \div 0,75)$.

Опір заземлювача у вигляді сітки, що складається з вертикальних електродів, об'єднаних горизонтальними смугами:

$$R_3 = \rho \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n \cdot l} \right), \quad (4.36)$$

де L – сумарна довжина горизонтальних електродів;

n і l – число і довжина вертикальних електродів відповідно;

S – площа заземлювача;

A – коефіцієнт (0,25 ÷ 0,44).

Для протяжних заземлювачів імпульсний коефіцієнт дорівнює

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho + 320)(I_\phi + 45)}}, \quad (4.37)$$

де S – сумарна площа електродів заземлювача, м².

Струм блискавки I_ϕ створює падіння напруги на активному R_3 й індуктивному L опорі струмовідводу.

При крутості фронту a , на відстані l від заземлювача максимальний потенціал U_l у момент максимуму струму:

$$U_l = I_\phi \cdot R_\phi + a \cdot L_0 \cdot l, \quad (4.38)$$

де L_0 – індуктивність одиниці довжини струмовідводу $\approx 1,7$ мкГн/м.

При інженерних розрахунках прийнято: $I_\phi = 60$ кА, $a = 30$ кА/мкс.

Відстань по повітрю l_n між заземлювачем і захищеним об'єктом при розрахунковому струмові і $E_{дон} = 500$ кВ/м визначають за формулою:

$$l_n \geq \frac{60R_i + 30 \cdot 1,7l}{500} \approx 0,12R_i + 0,1 \cdot l \quad (38)$$

Відстань в землі l_3 між заземлювачем і найближчою ділянкою об'єкта, що захищається, при допустимій напруженості електричного поля в землі $E_3 = 300$ кВ/м складає:

$$l_3 = \frac{60R_i}{300} = 0,2R_i. \quad (39)$$

Отже, відстань по повітрю l_n повинна бути не менше 5 м, а відстань в землі l_3 – не менше 3 м.

На підстанціях при встановленні блискавковідводів на порталах необхідно також узгоджувати імпульсні розрядні напруги ізоляторів з напругами, що виникають в місцях приєднання їх до portalу.

Запитання для самоконтролю

1. Природа формування і виникнення грозового розряду.
2. Назвіть уражаючі фактори грозового розряду.
3. Як визначити величину струму в каналі грозового розряду?
4. Чем визначається число ударів блискавки в ЛЕП ?
5. Що таке «зворотне перекриття», коли воно виникає ?
6. Як класифікуються об'єкти за ступенем захисту від блискавки ?
7. Як захищають об'єкти від прямих ударів блискавки ?
8. Чим характеризують ефективність захисту від ударів блискавки ?
9. Наведіть принцип розрахунку зони захисту блискавковідводу.
10. Особливості розрахунку захисту подвійним блискавковідводом.
11. Принцип розрахунку захисту тросовим блискавковідводом.
12. Назвіть спосіб розрахунку грозозахисного заземлення.
13. Що таке «іскровий ефект», та як він впливає на величину опору заземлення?

ЛЕКЦІЯ № 5. АПАРАТИ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

1. Захисні проміжки (ПЗ).
2. Трубчасті розрядники (РТ)
3. Вентильні розрядники
4. Обмежувач перенапруг нелінійний (ОПН)
5. Довгоіскрові розрядники (РДІ)

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.
2. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
3. Кадомская К. П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них : учебник / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. А. Рейхердт. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. — 368 с. : ил. — (Учебники НГТУ).
3. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.
4. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притака, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.

1. Захисні проміжки (ПЗ).

ПЗ призначені для запобігання появи небезпечних для ізоляції електроустановок імпульсів перенапруги, не заважаючи їх роботі при номінальній напрузі. Найпростіший ПЗ – це іскровий проміжок ввімкнений паралельно ізоляційній конструкції (рис. 1).

При набіганні імпульсу перенапруги в точку приєднання ПЗ відбувається пробій його між електродного проміжку з різким падінням напруги на лінії і ізоляція залишається непошкодженою.

Після пробою ПЗ по його іонізованому проміжку протікає супровідний струм промислової частоти.

Якщо електричний пристрій працює в мережі із заземленою нейтраллю або пробій ПЗ відбувся у 2-х чи 3-х фазах, то дуга супровідного струму переходить у КЗ.

Тому необхідно гасити дугу супровідного струму, що є другою важливою функцією усіх захисних апаратів.

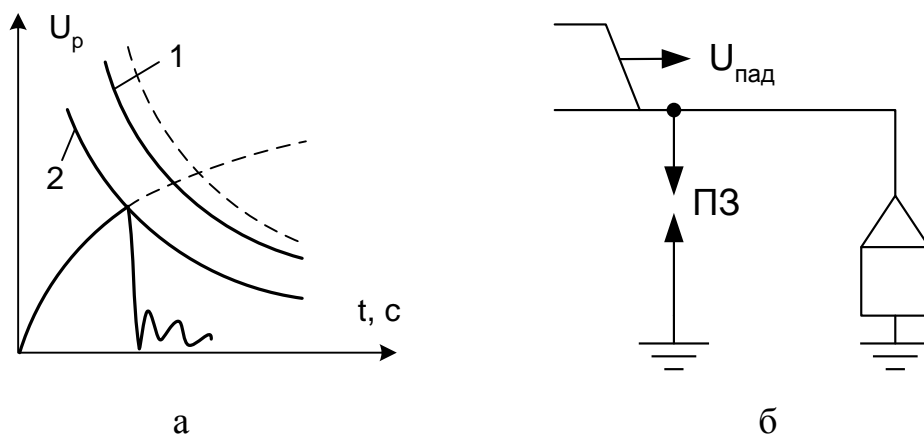


Рисунок 5. 1 - а) Вольт-секундна характеристика(ВСХ):

1–ВСХ ізоляції; 2– ВСХ ПЗ; б) схема включення ПЗ.

Захисні проміжки виготовляють із двох стрижневих електродів, закріплених у формі рогів, що створюють різко неоднорідне поле. Пробій ПЗ відбувається у нижній частині електродів, де відстань між ними мінімальна а напруженість – максимальна. Під дією електродинамічних сил та теплових потоків дуга з нижньої частини електродів піднімається по ним вгору, де розтягується і гасне, завдяки зменшенню напруженості E електричного поля в каналі розряду ($E = U/L$, де U - напруга запалення дуги; L - відстань між електродами).

ПЗ відрізняються простотою, дешевизною і широко застосовуються в мережах низької напруги. У мережах високої напруги ПЗ використовують для обмеження максимальних імпульсів перенапруги.

При виникненні дуги можливе аварійне відключення електроустановки, тому ПЗ ставлять у системи з пристроями автоматичного повторного включення (АПВ).

В установках до 35 кВ ПЗ мають невелику між електродну відстань, тому для запобігання випадковим замиканням у спусках, що заземлюють, послідовно ставлять додаткові іскрові проміжки.

Захисні апарати, що захищають електрообладнання від перенапруг і гасять дугу, називають *захисними розрядниками*.

Існують трубчасті, вентильні, довгоіскрові захисні розрядники а також нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН).

2. Трубчасті розрядники (РТ)

Основа РТ – трубка 1 з газогенеруючого матеріалу (фібробакеліт, вініпласт). Один кінець її заглушений кришкою; 2- внутрішній електрод; 3- кільцевий електрод; l_1 - дугогасний проміжок; l_2 – іскровий проміжок (рис. 5. 2).

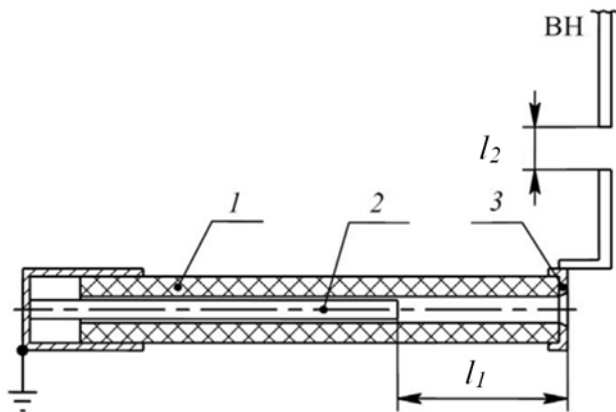


Рисунок 5. 2 - Конструкція трубчастого розрядника.

Трубка відокремлена від проводу фази зовнішнім іскровим проміжком l_2 , щоб не розкладався матеріал діелектрика від ємнісних і струмів витоку. Захисна дія РТ характеризується його ВСХ і опором заземлення.

ВСХ визначає $U_{проб}$ розрядника, а $R_{зав}$ – імпульсну напругу, що залишається на ньому.

Довжина зовнішнього іскрового проміжку регулюється залежно від умов захисту ізоляції, а довжина l_1 – const для даної робочої напруги.

При набіганні імпульсу перенапруги обидва проміжки пробиваються, протікає струм робочої частоти, запалюється дуга, яка миттєво розігріває трубку, внаслідок чого виділяється газ. Миттєво зростає тиск, який видуває (вистрелює) іонізовані частинки газу із трубки і дуга гасне при першому проходженню струму через «0».

Існує верхня межа струмів, перевищення якої може призвести до руйнування РТ.

РТ типу РТФ – це фібробакелітова трубка, РТ типу РТВ чи РТВУ – трубка з вініпласту. Останні мають більший (верхній) допустимий рівень робочого струму. Приклад маркування розрядників типу РТ.

кА(обмеження)
РТФ 110/08 ÷ 5
Напруга, кВ

При розряді внутрішній канал розрядника поступово вигоряє, і якщо більше, ніж на 25%, розрядник треба замінити або пере маркувати на іншу напругу.

Недоліком такого апарата є те, що вихлоп іонізованих газів може призвести до міжфазного перекриття або перекриття на землю, якщо він спрямований на струмоведучі частини електрообладнання. Крута ВСХ і зона вихлопу не дозволяють використовувати РТ для захисту підстанційного обладнання. Тому основна сфера застосування – захист лінійних підходів до підстанцій, електроустаткування малопотужних підстанцій. Відтепер РТ майже не використовують, завдяки малому строку служби.

3. Вентильні розрядники

Для захисту електроустаткування підстанцій масово використовують вентильні розрядники РВ і нелінійні обмежувачі перенапруги ОПН.

Основними елементами розрядника є багаторазові іскрові проміжки і з'єднані послідовно з ними нелінійні опори у вигляді дисків з віліта, що мають нелінійну ВАХ.

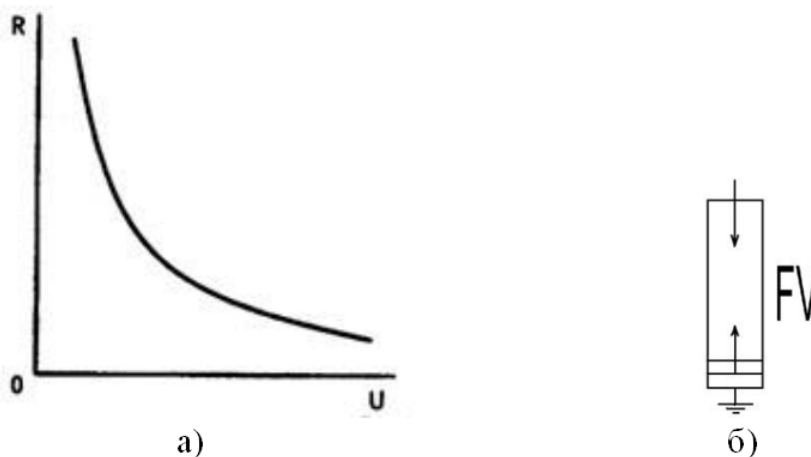


Рисунок 5. 3 - Захисна характеристика вентильного розрядника(а) та його графічне позначення(б): а – графічне позначення; б - захисна характеристика.

Термін «нелінійний опір» означає, що опір залежить від струму, що проходить по ньому. Опір віліта зменшується при зростанні струму, що проходить по ньому. Віліт не вологостійкий, тому його поміщають в герметизований фарфоровий корпус.

Грозовий імпульс пробиває іскровий проміжок і через РВ протікає струм, який створює падіння напруги на його резисторі. Завдяки нелінійній ВАХ напруга на резисторі змінюється мало при значній зміні імпульсу струму.

Важливою характеристикою РВ є залишкова напруга $U_{зал}$ на резисторі при визначеному імпульсному струмі (5÷14 кА), яка зветься *струмом координації*. Вона повинна бути, як і розрядна U_p , на 20÷25% нижче розрядної напруги ізоляції. Услід за імпульсним струмом через РВ йде супровідний струм промислової частоти уже при робочій напрузі $U_{роб}$.

При цьому опір резистора різко зростає, струм РВ обмежується і при переході через «0» дуга гасне. Цьому сприяє також багатократний іскровий

проміжок конструкція якого складається з великої кількості латунних дисків (наприклад, у РВ-35 кВ – їх 32 шт), що дозволяє охолоджувати дугу, внаслідок чого виключається явище термоіонізації.

Найбільша напруга промислової частоти на РВ, при якій надійно обривається супровідний струм, називається *напругою гасіння* $U_{гас}$, а відповідний супровідний струм – *струмом гасіння*.

Гасіння супровідного струму може здійснюватися в умовах однофазного замикання на землю. Тому як за напругу гасіння $U_{гас}$ приймають напругу на неушкоджених фазах при однофазному замиканні на землю:

$$U_{гас} = k_3 \cdot U_{ном}, \quad (5.1)$$

тут $U_{ном}$ – номінальна лінійна напруга; k_3 – коефіцієнт залежний від способу заземлення нейтралі: для пристроїв із заземленою нейтраллю $k_3 = 0,8$; для ізольованої нейтралі $k_3 = 1,1$.

Дугогасна дія іскрового проміжку РВ характеризується *коефіцієнтом гасіння*:

$$k_{гас} = \frac{U_{нр\sim}}{U_{гас}}, \quad (5.2)$$

де $U_{нр\sim}$ – пробивна напруга іскрових проміжків.

Захисна дія нелінійного резистора характеризується *коефіцієнтом захисту* $k_{зах}$, який визначається з співвідношення

$$k_{зах} = \frac{U_{ост}}{\sqrt{2} \cdot U_{гас}}. \quad (5.3)$$

Нелінійний резистор виготовлений з порошку електротехнічного карборунду SiC, частинки якого вкриті тонким непровідним шаром (~100 мкм) SiO₂. При $U_{роб}$ опір цього запорного шару $R_{шару} = 10^6$ Ом·м. При напрузі $U_{роб}$ опір стає 10^{-2} Ом·м і струм імпульса прямує в землю. Властивість матеріалу різко змінювати свій опір залежно від величини напруги, забезпечуючи проходження дуже великих струмів при високих U і малих струмів при малих U , називається *вентильним ефектом*.

Пропускна спроможність розрядника характеризується максимальним значенням імпульсу струму тривалістю $20 \div 40$ мкс і струмом прямокутної форми тривалістю 2 мс. Цей режим РВ повинен витримати не менш 20 разів.

Іскрові проміжки РВ (рис. 5. 5) розділені діелектричними (меканітовими) шайбами, де через різні діелектричні проникності ϵ повітря і меканіта виникає іонізація. Пробій відбувається при коефіцієнті імпульсу ≈ 1 . Гасіння дуги засноване на нестабільному горінні короткої дуги в проміжку з холодними електродами, якими є латунні диски. Для збільшення струму гасіння використовують *магнітне гасіння дуги* постійним магнітним полем, за рахунок її обертання та інтенсивного охолодження. У цьому випадку струм гасіння зростає на порядок (проти 100 А в проміжках з нерухомою дугою).

Для надійного захисту ізоляції підстанцій ВСХ багаторазового іскрового проміжку повинна бути пологою. Схема заміщення багаторазового іскрового проміжку представляє ємнісний ланцюжок, подібно до схеми заміщення гірлянди. Імпульсна напруга по ланцюжку розподіляється дуже нерівномірно, забезпечуючи швидкий каскадний пробій одиничних проміжків. Це, разом з попередньою іонізацією, забезпечує низькі коефіцієнти імпульсу і положистий характер ВСХ вентильного розрядника (рис. 5. 4).

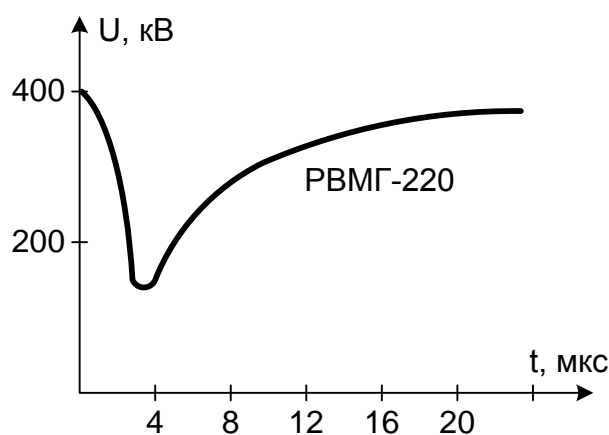


Рисунок 5. 4 - Вольт-секундна характеристика РВМГ-220

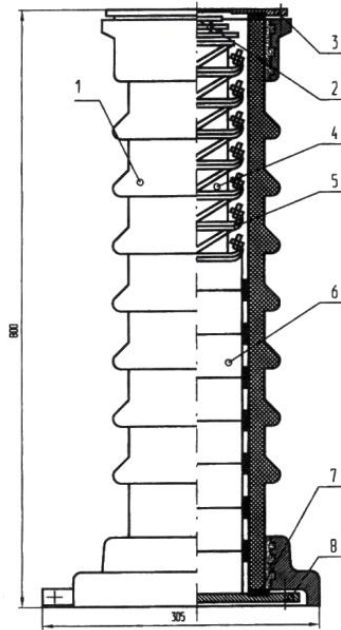


Рисунок 5. 5 - Вентильний розрядник:

1 - армована фарфорова покривка; 2 - пружина; 3 - кришка; 4 - блок іскрового проміжку; 5 - шунтуючий резистор; 6 - робочий резистор; 7 - прокладка; 8 - диск.

При крутих фронтах імпульсу нерівномірність розподілу напруги зменшує коефіцієнт імпульсу $k_i < 1$. Щоб утримати його близьким до 1, розрядники на напруги понад 1000 кВ комплектують ємнісними екрануючими кільцями, які вирівнюють розподіл напруги по іскровому проміжку.

Вентильні розрядники поділені на чотири групи.

Найкращі захисні характеристики мають розрядники типу РВ-1, бо у них найменша величина залишкової напруги $U_{\text{заль}}$, тобто глибина обмеження імпульсів перенапруги найбільша.

IV група – РВП (підстанційний) і РВО (полегшений) застосовують для захисту сільських електричних мереж на напругу 3÷10 кВ.

III група – РВС (стаціонарний) – для захисту електроустаткування напругою 15÷220 кВ.

РВМ – (3÷35 кВ) магнітний на напругу 110÷500 кВ;

II група - до неї відносяться магнітні, грозові серії РВМГ;

I група - до неї відносяться розрядники РТВ – (струмообмежуючі) і РВРД (з дугою, що розтягується).

Комбіновані розрядники РВМК (рис. 5) призначені для обмеження як грозових, так і внутрішніх (комутаційних) перенапруг 330÷750 кВ. У них частина тервітового резистора зашунтована додатковим іскровим проміжком, який при внутрішніх перенапругах не пробивається (струм менше 1,5 кА), а при струмах більше 1,5 кА частина резистора шунтується проміжком і залишкова напруга знижується.

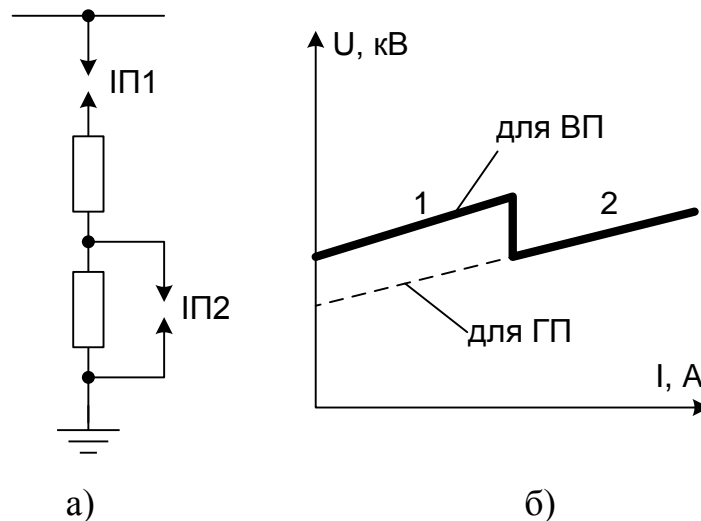


Рисунок 5. 5 - а) Схематичне зображення розрядника РВМК;
б) Вольт-амперна характеристика РВМК.

4. Обмежувач перенапруг нелінійний (ОПН)

Недоліком РВ є мала нелінійність резистора, внаслідок чого на ньому падає значна залишкова напруга, яка прикладена до лінії. Тому імпульс перенапруги обмежується лише частково і продовжує рухатись по лінії, набігаючи на електроустановку.

На основі оксиду цинку (ZnO) розроблено більш ефективний тип захисних апаратів – ОПН, перевага яких полягає в глибокому обмеженні перенапруг, у тому числі міжфазних, за рахунок значно більшої нелінійності резистора, ніж у РВ.

Апарат має малі габарити та велику пропускну здатність імпульсних струмів. ОПН комплектують у вигляді паралельно з'єднаних стовпчиків з дисків $\varnothing 28$ і висотою 8 мм. Число стовпчиків варіюється від 4 (на 110 кВ) до 30 (на 750 кВ).

Коефіцієнт нелінійності ОПН при комутаційних перенапругах дорівнює $0,03 \div 0,05$, а при грозових – $0,07 \div 0,1$. Висока нелінійність забезпечує проходження струмів від часток міліампера до декілька кілоампер, що дозволяє підключати його до мережі без іскрового проміжку.

У ОПН немає поняття напруги гасіння, але тривалий вплив резонансних перенапруг, обумовлює проходження великих струмів і може призвести до порушення теплового балансу і руйнування апарату. Тому для ОПН обмежено час впливу підвищеною напругою від 0,15 с до 20 хв. ОПН дозволяє глибоко обмежувати і міжфазні перенапруги за допомогою схеми з іскровими проміжками (рис. 5. 6).

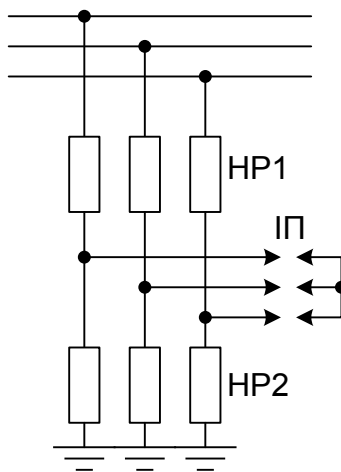


Рисунок 5. 6 - Схема підключення ОПН з іскровими проміжками.

В цьому випадку при комутаційних перенапругах, які завжди несиметричні, пробиваються іскрові проміжки ІП. Резистори НР2– з'єднуються паралельно, а резистори НР1 – попарно на міжфазні напруги. При відновленні нормального режиму струм в ІП зменшується до міліамперів і дуга в них гасне.

5. Довго-іскрові розрядники (РДІ)

При грозовому перекрытті ізоляції імовірність встановлення силової дуги P_d залежить в основному від середньої напруженості електричного поля в каналі перекрыття:

$$P_d = \left(1,59 \cdot \frac{U_\phi}{L} - 6 \right) \cdot 10^{-2} = (1,59 \cdot E - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (5.4)$$

де U_ϕ – фазна напруга в лінії;

L – довжина перекрыття, м;

$E = \frac{U_\phi}{L} - 6$ – середня напруженість електричного поля на шляху перекрыття.

Тому за рахунок збільшення L можна знизити напруженість в розрядному проміжку і виключити тим самим імовірність виникнення силової дуги P_d , скоротивши число відключень лінії. Розрядний проміжок у РДІ в декілька разів довший, ніж довжина захищеної ізоляції, але має нижчу імпульсну електричну міцність, ніж міцність самої ізоляції. Це пояснюється особливостями ковзного розряду, який розвивається по поверхні ізоляційного проміжку і має нижчу розрядну напругу, чим такої ж величини повітряний проміжок.

Внаслідок великої довжини L каналу імпульсного ковзного розряду, імовірність встановлення дуги короткого замикання дорівнює нулеві.

Згідно формули для визначення напруги ковзного розряду:

$$U_p = I^{0,2} \cdot \frac{d^{0,4}}{S^{0,2}} \cdot \varepsilon^{0,4} \cdot a^{0,05}, \quad (5.5)$$

вона слабо залежить від відстані між електродами, тому великі проміжки L можуть бути перекрыті ковзним розрядом при відносно малих напругах. Цей ефект ковзного розряду покладено в основу усіх конструкцій довго-іскрових розрядників.

Розрядник типу РДІ-П (петлевий) виконано (рис. 5. 7) з металевого стрижня покритого шаром поліетиленової ізоляції і зробленого у вигляді

петлі, який за допомогою затискача кріпиться до заземленого електроду опори.

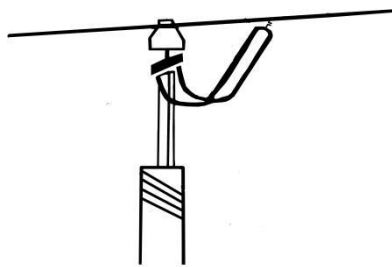


Рисунок 5. 7 - Підключення РДІ-П до лінії.

В середній частині петлі надіта металева трубка, а між нею і проводом ЛЕП встановлено іскровий проміжок. Внаслідок великої ємності між металевою трубкою і стрижнем, вся напруга виявляється прикладена між проводом та трубкою. При пробі іскрового проміжку перенапруга прикладається між трубкою та металевим стержнем, внаслідок чого з трубки вздовж поверхні ізоляції розвивається ковзний розряд до замикання його через вузол кріплення на заземлення. Завдяки великій довжині L каналу перекриття по поверхні петлі, середня напруженість електричного поля в каналі розряду від напруги промислової частоти складає ≈ 7 кВ/м.

Зокрема, при товщині поліетиленової ізоляції 4 мм і довжині петлі 80 см при дії грозового імпульсу напруга пробією розрядника складає $U_{50\%} = 100$ кВ, а ізоляції $-U_{50\%} = 130$ кВ. При струмах $I_{кз} < 300$ А силова дуга не виникає і лінія продовжує працювати без відключення. РДІ-П використовують для захисту ЛЕП 6÷10 кВ від індукованих грозових перенапруг, які найбільш поширені на таких лініях.

Різновидом такого розрядника є РДІ-М (модульний), який складається з двох відрізків кабелю з корделем, в якості якого використано напівпровідниковий матеріал.

Відрізки кабелю з'єднані таким чином, що утворюють три розрядних модулі (рис. 5. 8, б).

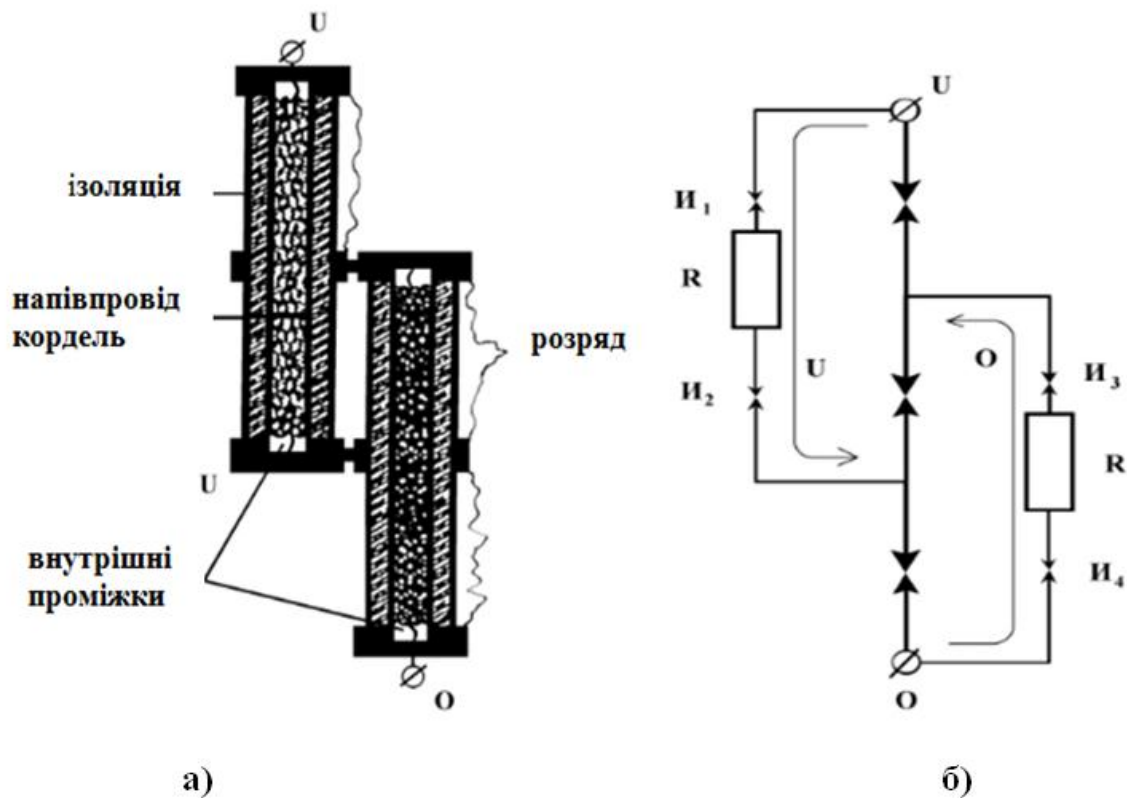


Рисунок 5. 8 - Конструкція розрядника РДІ-М(а) та схематичне зображення(б).

Відрізки резистивного корделя приєднуються до металевих кінцівників через внутрішні іскрові проміжки $И_1, И_2, И_3, И_4$. При дії імпульсу грозової перенапруги вони перекриваються і резистивний кордель верхнього відрізка кабелю, що має опір R , виносить високий потенціал U на поверхню нижнього відрізка кабелю в його середній частині. Аналогічно, резистивний кордель нижнього відрізка кабелю, що має опір R , виносить низький потенціал 0 на поверхню верхнього відрізка кабелю в його середній частині.

Таким чином, до кожного розрядного модуля одночасно прикладена повна напруга U і для всіх трьох розрядних модулів 1, 2, 3 створені умови для одночасного початку розвитку ковзних розрядів, які при перекритті відповідних модулів створюють єдиний, довгий канал перекриття.

Вольт-секундна характеристика РДІ-М розташована значно нижче, ніж у РДІ-П, тому ефективність захисту розрядника модульного типу вища, ніж петлевого.

Розрядник типу РДІ-ІТ (ізоляційна трубка) виконано у вигляді ізоляційної трубки, що розташована на проводі лінії і утворює довгий проміжок для каналу ковзного розряду по її поверхні (рис. 5. 9).

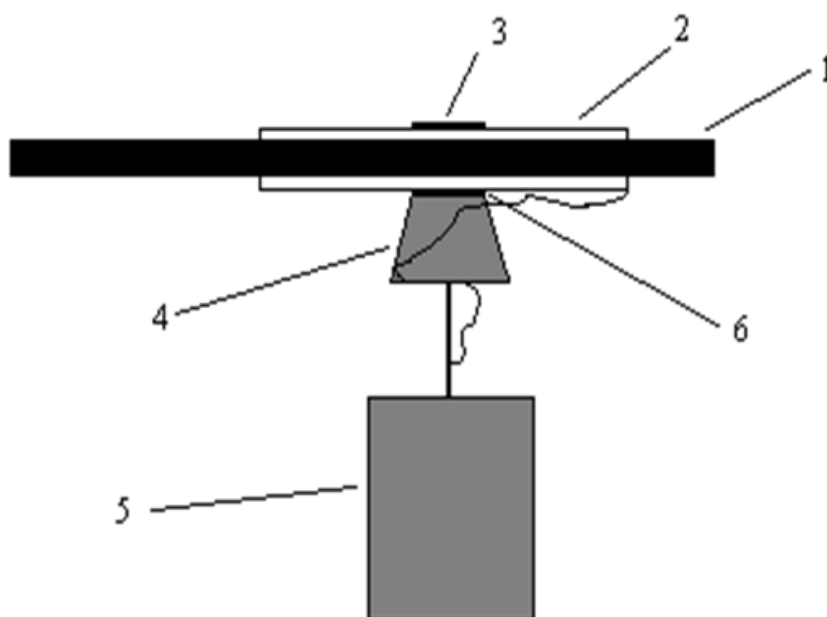
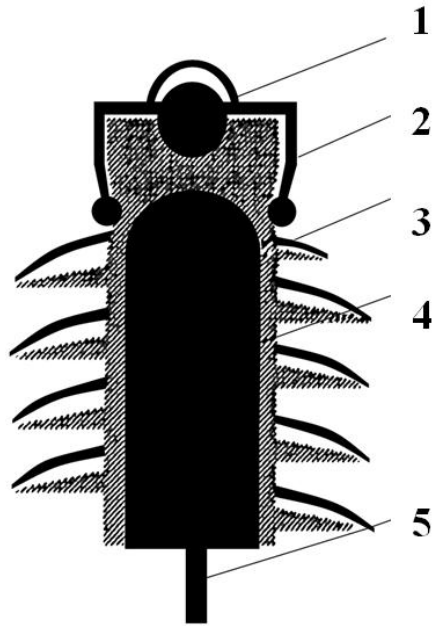


Рисунок 5. 9 - Розрядник РДІ-ІТ.

Встановлення таких розрядників на проводах ПЛ підсилює основну ізоляцію лінії і підвищує надійність її роботи. РДІ-ІТ захищає ПЛ як від індукованих, так і прямих ударів блискавки в провід.

ІРДІ (ізолятор-розрядник, рис. 5. 10) забезпечує довгий шлях проходження імпульсного перекриття по спіральному шляху навколо ізолятора зі спіральними ребрами завдяки наявності направляючого електрода, який створює високу напруженість електричного поля на початку каналу розряду, що сприяє розвитку ковзного розряду.

При цьому градієнт потенціалу в каналі перекриття дуже малий, що запобігає виникненню силової дуги.



а)

Рисунок 5. 10.- Схема ізолятора-розрядника;
 1-внутрішній електрод; 2-кріплення; 3- провід; 4- корпус; 5- заземлений електрод.

Запитання для самоконтролю.

1. Які функції виконують апарати захисту від перенапруг ?
2. Сформулюйте принцип дії захисних проміжків.
3. Опишіть конструкцію та принцип дії трубчастих розрядників.
4. Опишіть конструкцію та принцип дії вентиляльних розрядників.
5. Що таке «струм координації» та «струм гасіння» ?
6. Який зміст має параметр «коефіцієнт захисту» ?
7. Наведіть класифікацію вентиляльних розрядників.
8. Сформулюйте принцип дії нелінійних обмежувачів.
9. Принцип дії та конструкції довгоіскрових розрядників (РДІ).
10. Типи, характеристики й сфера застосування РДІ.

ЛЕКЦІЯ № 6. БЛИСКАВКОЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

- 1.Інтенсивність грозової діяльності**
- 2. Грозостійкість ЛЕП без тросів**
- 3. Удар блискавки в землю поблизу ЛЕП**
- 4. Грозостійкість ЛЕП з тросами**
- 5. Визначення імовірності перекриття ізоляції**

ЛІТЕРАТУРА:

- 6. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.**
- 7. Будзко И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль – М.: Агропромиздат, 1990 – 495 с.**
- 3. Важов В. Ф. Техника высоких напряжений: учебное пособие / В. Ф. Важов [и др.]; Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск : Изд-во ТПУ, 2009. — 232 с.: ил. — Библиография в конце глав.**
- 4. Кабышев А. В. Молниезащита электроустановок систем электроснабжения: учебное пособие/А. В. Кабышев. –Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 124 с.**
- 5. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.**
- 6. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притака, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.**
- 7. Попадченко С. А., Савченко О. А. Захист ліній та підстанцій від блискавки та атмосферних перенапруг - Методичний посібник – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019. – 120 с.**

1.Інтенсивність грозової діяльності

Повітряні ЛЕП щорічно десятки разів на кожні 100 км лінії уражаються блискавкою, викликаючи проходження великих струмів і появу високих імпульсних перенапруг. Тому на металевих опорах використовують 1÷2 заземлених троси, розташованих вище фазних проводів. Але трос не виключає можливості появи високих потенціалів на опорі при ударі блискавки, що може причинити розряд з опори на провід.

Імовірність перекриття $P_{пер}$ ізоляції ЛЕП оцінюють виходячи з параметрів лінії, імпульсної електричної міцності гірлянд ізоляторів і імовірності величини струмів блискавки.

Число можливих перекриттів визначають таким чином:

$$n_{пер} = n_{уд} \cdot P_{пер} . \quad (6.1)$$

По шляху перекриття ізоляції протікає струм робочої частоти (струм КЗ). Якщо дуга КЗ горить стійко, то лінія відключається і потрібний АПВ. При інженерних розрахунках оцінюють імовірність переходу імпульсного перекриття в стійку дугу за середньою напруженістю електричного поля $E_{ср}$ уздовж шляху перекриття $l_{пер}$ при найбільшій робочій напрузі

$$E_{ср} = \frac{U_{найб.роб.}}{l_{пер}} , \text{ кВ/м} \quad (6.2)$$

Для ліній на дерев'яних опорах і довгих повітряних проміжках імовірність виникнення стійкої дуги P_{δ} дорівнює:

$$P_{\delta} = (1.6 \cdot E_{ср} - 6) \cdot 10^{-2} . \quad (6.3)$$

Для ліній на металевих опорах при номінальній напрузі до 220 кВ приймають $P_{\delta} = 0.7$; при напругах 330 кВ і вище – $P_{\delta} = 1.0$.

Число відключень на 100 км ЛЕП в районі зі 100 грозовими годинами на рік:

$$n_{відкл} = 4h_{ср} P_{пер} P_{\delta} , \quad (6.4)$$

де $h_{ср}$ – середня висота підвісу троса або проводу.

На ЛЕП 6÷35 кВ з ізолюваною нейтраллю і металевими або залізобетонними опорами троси не використовують, оскільки при будь-якому струмові блискавки відбувається зворотне перекриття з троса на провід. Тому застосовують АПВ і встановлюють дугогасні *реактори* струму однофазного замикання на землю.

Отже існують два методи зменшення числа грозових відключень лінії:

- зменшення імовірності перекриття $P_{пер}$;
- зменшення імовірності переходу перекриття в стійку дугу КЗ - P_{δ} .

Перший метод реалізується підвіскою тросових блискавководів і створенням малого імпульсного опору заземлення.

Другий метод реалізується подовженням шляху перекриття, що призводить до зниження в ньому середньої напруженості поля, або використанням дугогасних реакторів у мережах 6÷35 кВ, які значно збільшують імовірність загасання дуги. З умов надійності електропостачання припустиме число відключень ЛЕП у рік приймають рівним:

$$n_{\text{відкл. дод}} = \frac{N_{\text{дон}}}{(1 - \beta_{\text{АПВ}})}, \quad (6.5)$$

де $N_{\text{дон}}$ – допустиме число перерв електропостачання на рік.

$N_{\text{дон}} \leq 0,1$ – без резервування;

$N_{\text{дон}} \leq 1$ – з резервуванням;

$\beta_{\text{АПВ}}$ – коефіцієнт успішності АПВ, який дорівнює 0,8÷0,9 для ЛЕП 110 кВ та більше на металевих та залізобетонних опорах.

Останнім часом дуже ефективними для даного класу робочих напруг виявилось застосування захисних апаратів типу РДІ, які повністю виключають можливість виникнення силової дуги в ЛЕП і зворотного перекриття ізоляції.

2. Грозостійкість ЛЕП без тросів

Удар блискавки в провід супроводжується розтіканням струму I_b в обидва боки, і амплітуда хвилі перенапруги дорівнює:

$$U = I_m Z_{np} / 2, \quad (6.6)$$

де Z_{np} – хвильовий опір проводу ≈ 300 Ом (з урахуванням імпульсної корони).

При коронуванні ємність проводу зростає і тому знижується Z_{np} .

На ЛЕП з металевими опорами імпульс перенапруги U при струмі блискавки 5÷10 кА (300÷3000 кВ) призводить до перекриття гірлянди. Імпульс перенапруги на ураженому проводі індуктує напругу на сусідньому проводі і між ними виникає різниця потенціалів U_{pn} :

$$U_{pn} = \frac{I_n Z_{np}}{2} (1 - k), \quad (6.7)$$

де k – коефіцієнт електромагнітного зв'язку між проводами ЛЕП який з врахуванням імпульсної корони дорівнює $0,25 \div 0,4$.

Ймовірність перекриття лінійної ізоляції $P_{пер}$ розраховують за критичним значенням струму блискавки $I_{кр}$, який визначається з умови рівності діючої напруги U , і імпульсної $U_{50\%}$ розрядної напруги ізоляції

згідно формули $I_{кр} = \frac{2U_{50\%}}{Z}$ – для металевих і залізобетонних опор.

Тут розрядний проміжок – гірлянда, тому існує ймовірність виникнення дуги P_δ і велика ймовірність перекриття ізоляції $P_{пер}$. Отже, ЛЕП- 110 кВ і вище захищають тросовими блискавковідводами по усій довжині. Критичне значення струму для дерев'яних опор

$$I_{кр} = \frac{2U_{50\%}}{Z(1-k)}. \quad (6.8)$$

Тут низьке число відключень лінії без тросів пов'язане з малою ймовірністю переходу імпульсного перекриття в стійку дугу завдяки довжині дерев'яній траверсі, яка збільшує електричну міцність ізоляції.

ЛЕП-35 кВ на металевих опорах (з ізолюваною нейтраллю) при наявності ДГК мають $P_\delta \approx 0$. Тому грозові відключення таких ЛЕП звичайно відбуваються тільки при дво- або трифазних перекриттях. Тут доцільно застосовувати додаткові штучні заземлювачі для зменшення опору заземлення опор R_i .

Якщо розряд блискавки влучає в провід на невеликій відстані від опори, то через заземлювач протікає повний струм блискавки й опора виявляється під високим потенціалом

$$U = I_\sigma \cdot R_i \quad (6.9)$$

На сусідньому проводі наводиться потенціал

$$U = k \cdot I_\sigma \cdot R_i \quad (6.10)$$

і перекриття його ізоляції відбудеться при критичному струмові

$$I_{кр} \geq \frac{U_{50\%}}{R_i(1-k)}. \quad (6.11)$$

Звідки видно, що ймовірність перекриття $P_{пер}$ тим менша, чим нижчий опір R_i або більший критичний струм $I_{кр}$. Тому на ЛЕП-35 кВ з металевими опорами без тросів необхідно використовувати додаткові заземлювачі для зменшення опору заземлення R_i .

3. Удар блискавки в землю поблизу ЛЕП

Він викликає індуковані перенапруги на проводах ЛЕП, які мають електричну і магнітну складові:

$$U_{інд} = U_{іе} + U_{ім} \quad (6.12)$$

Величина електричної складовий індукованої перенапруги пропорційна лінійної густини зарядів σ лідерного каналу, середній висоті підвісу проводу $h_{сеп}$ і зворотно пропорційна відстані b до точки удару блискавки

$$U_{і.е.} = k_e \frac{h_{сеп}}{b} I_{\sigma}, \quad (6.13)$$

де k_e – коефіцієнт пропорційності, залежний від тривалості τ фронту розряду.

Магнітна складова розряду (індукована в петлі: опора-гірлянда-провід-земля) також зворотно пропорційна відстані b :

$$U_{і.м.} = k_m \frac{h_{сеп}}{b} I_{\sigma} \quad (6.14)$$

k_m – коефіцієнт, залежний від швидкості проходження головного розряду.

Максимальне значення індукованої напруги дорівнює:

$$U_{інд} = (k_e + k_m) \cdot \frac{h_{сеп}}{b} \cdot I_{\sigma} \approx 30 \frac{h_{сеп}}{b} \cdot I_{\sigma}. \quad (6.15)$$

Статистика свідчить, що індукована перенапруга перевищує імпульсну міцність ізоляції ЛЕП-35 кВ менш ніж 2 рази на рік ($U_{50\%} = 350$ кВ), а імпульсну міцність ЛЕП-110 кВ ($U_{50\%} = 700$ кВ) – 1 раз на 5 років.

Таким чином, для ЛЕП-110 і вище індуковані перенапруги практично безпечні.

4. Грозостійкість ЛЕП з тросами

Причинами грозових відключень ЛЕП з тросами можуть бути:

- удар блискавки в трос і перекриття його на провід;
- прорив блискавки на провід;
- удар блискавки в опору і перекриття на провід.

Розглянемо удар блискавки в трос у середину прольоту.

Якщо трос заземлений ($R_i \ll Z_{mp}$) і приймаємо косокутну форму струму блискавки, то можна розрахувати наведену напругу на проводі.

До приходу імпульсів, відбитих від опору R_i заземлення сусідніх опор, напруга на тросі дорівнює:

$$U_{mp}(t) = i_o(t) \frac{Z_{mp}}{2} = a \cdot t \cdot \frac{Z_{mp}}{2}, \quad (6.16)$$

де $a = di/dt$ – крутість фронту імпульсу, кВ/мкс.

Через проміжок часу: $t = \tau = l / V$ (l – довжина прогону, V – швидкість хвилі) до місця удару одночасно підійдуть імпульси, відбиті зі зміною знаку від опору заземлення двох найближчих опор і зростання напруги припиниться. Тоді максимальна напруга на тросі складає:

$$U_{mp.max} = \frac{a \cdot Z_{mp} \cdot l}{2V}, \quad (6.17)$$

і залежить тільки від крутості імпульсу a і не залежить від амплітуди струму блискавки i_o .

Напруга між тросом і проводом:

$$U_{mp-пр} = (1 - k) \cdot \frac{a \cdot Z_{mp} \cdot l}{2V}, \quad (6.18)$$

де k – коефіцієнт електромагнітного зв'язку між тросом і проводом.

Удар блискавки в трос у середину прольоту є розрахунковим випадком для вибору відстані між тросом і проводом за умови відсутності перекриття між ними:

$$U_{mp-np} \leq U_{p50\%}, \text{ звідки: } U_{p50\%} \geq \frac{a \cdot Z_{mp} \cdot (1-k) \cdot l}{2V}. \quad (6.19)$$

Досвід свідчить, що імовірність такого перекриття досить мала, якщо відстань трос-провід складає не менше 2% довжини прольоту l , що зазвичай завжди витримується.

Розглянемо удар блискавки у вершину опори (рис.6. 1)

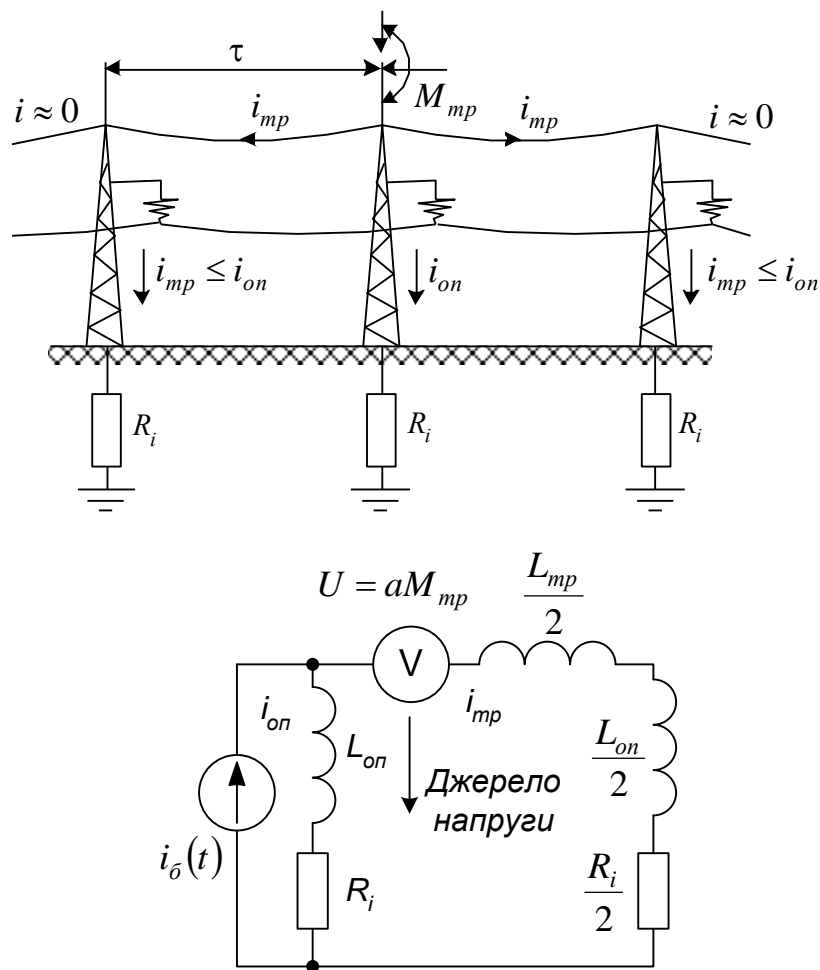


Рисунок 6. 1.- Розподіл струмів та схема заміщення при ударі блискавки в опору.

Тут M – коефіцієнт індукції; $M_{mp} \approx 0.5h_{mp}$ – джерело напруги; $i_m = a \cdot t$ – джерело струму. Частку ударів блискавки в опори можна оцінити

як $4h_{on}/l$.

Тоді число ударів блискавки в опори дорівнює

$$n_{on} = n_{y0} \frac{4h_{on}}{l}, \quad (6.20)$$

де n_{y0} – число ударів у лінію,

l – довжина прогону.

При ударі блискавки в опору весь струм спочатку йде через її тіло і заземлення. Час пробігу імпульсу по опорі на порядок менше тривалості фронту струму блискавки, тому опору в схемі заміщення представляють зосередженою індуктивністю $L_{on} = L_0 \cdot h_{on}$ і імпульсним опором заземлення R_i . Для зосереджених заземлювачів можна знехтувати їхньою індуктивністю, яка набагато менша індуктивності опори. (питома індуктивність опори $L_0 \approx 0.5$ мкГн/м).

Для реальних значень тривалості фронту імпульсу ($\tau_\phi \leq 10l/c \approx 20$ мкс) і $R_i \leq 20$ Ом достатньо враховувати відбиття від двох найближчих опор. В еквівалентній схемі обидва прольоти ліворуч і праворуч замінюються послідовним ланцюжком $L_{mp}/2$, $L_{on}/2$ і $R_i/2$.

Потенціал вершини опори:

$$U_{on} = i_{on}(t)R_i + L_{on} \frac{di_{on}}{dt} + M_{on} \frac{di_m}{dt}, \quad (6.21)$$

де M_{on} – коефіцієнт взаємної індукції каналу блискавки й опори:

$$M_{on} \approx M_0 \cdot h_{on}, \quad M_0 \approx 0.2 \text{ мкГн/м.}$$

Струм в опорі визначають за схемою заміщення з джерелом струму $i_m = a \cdot t$ і джерелом напруги - aM_{mp} , що враховує напругу, яка наводиться в петлі «трос-земля» магнітним полем каналу блискавки: $M_{mp} \approx 0.5h_{mp}$.

Струм в опорі в межах фронту імпульсу дорівнює:

$$i_{on} = a \cdot t \left[\frac{0.5L_{mp} - M_{mp}}{0.5L_{mp} + L_{on}} \right] \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha t}, \quad (6.22)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_i}{0.5L_{mp} + L_{on}}, \quad L_{mp} = Z_{mp} \frac{l}{V} = \left(0.18 \ln \frac{2h_{mp}}{r_{mp}} \right) \cdot l \quad (6.23)$$

Потенціал проводу, таким чином, буди мати три складові:

- робоча напруга;
- напруга, індукована зарядом лідера блискавки;
- напруга, індукована імпульсом, що поширюється в тросі з амплітудою U_{on} .

Вплив робочої напруги враховують, вважаючи, що хоч на одній фазі миттєве значення $U_{ном}$ протилежне напрузі на вершині опори:

$$U_{роб} = \frac{2}{\pi} \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \approx 0.5U_{ном}, \quad (6.24)$$

тобто розрахункове значення $U_{роб}$ приймають рівним середньому значенню за півперіод перенапруги;

Електрична складова індукована при ударі в опору буде такою $U_{інд} \approx E_{сер} h_{сер} (1 - k)$, тут $E_{сер} \approx 10$ кВ/см – середня напруженість електричного поля в проміжку між каналом лідера блискавки і опорою. Напруга $U_{інд}$ має полярність, зворотну полярності потенціалу опори.

Третя складова виникає на проводі при проходженні імпульсу струму по тросу: $U_{інд} = k \cdot U_{on}$. Отже, напруга на лінійній ізоляції дорівнює різниці потенціалів вершини опори і проводу в максимумі струму блискавки

$$U_{із} = U_{on} - U_{пр} = U_{on} - (-U_{раб} - U_{інд} + k \cdot U_{on}) = U_{on}(1 - k) = U_{раб} + U_{інд} \quad (6.25)$$

Звідки випливає, що $U_{із}$ залежить від крутості фронту струму блискавки α , що при заданому τ_ϕ визначає максимальне значення струму блискавки: $I_6 = \alpha \cdot \tau_\phi$.

Побудувавши залежність $U_{із}(t)$ при різній крутості фронту a , точки перетину цих кривих із ВСХ ізоляції визначають тривалість фронту струму блискавки $\tau_\phi = t_p$ і мінімальне значення амплітуди струму, при якому відбудеться перекриття ізоляції (рис. 6. 2).

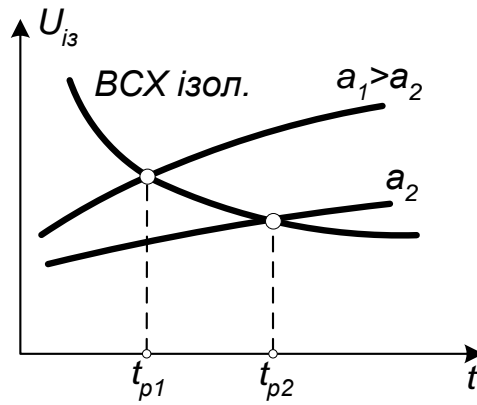


Рисунок 6. 2 - Визначення часу розряду t лінійної ізоляції при різних крутизнах фронту імпульсу a .

За цими даними можна побудувати *криву небезпечних параметрів*, що обмежує ділянку сполучення крутості і струму блискавки, при яких відбувається перекриття ізоляції лінії (рис. 3).

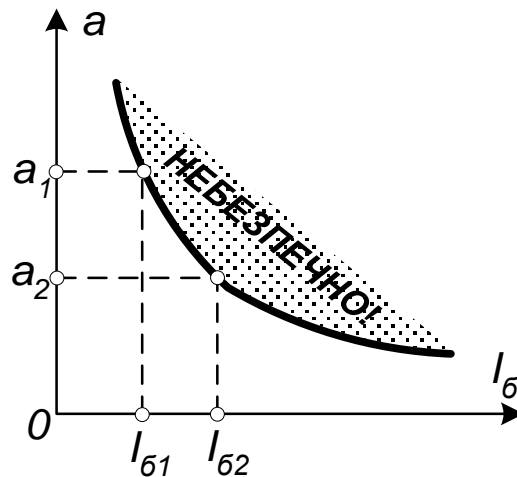


Рисунок 6. 3 - Крива небезпечних параметрів крутості і струму блискавки.

При крутості a_1 , перекриття відбувається при струмах блискавки більше за $I_{б1}$, а при крутості a_2 — при струмах більше за $I_{б2}$.

5. Визначення ймовірності перекриття ізоляції

Ймовірність перекриття ізоляції підлягає закону нормального розподілу і визначається за формулою

$$P_{on} = \iint_D f(I_{\delta}, a) \cdot dI_{\delta} \cdot da, \quad (6.26)$$

де $f(I_{\delta}, a)$ – двовимірний функція густини імовірності максимального значення крутості струму блискавки (рис. 6.4).

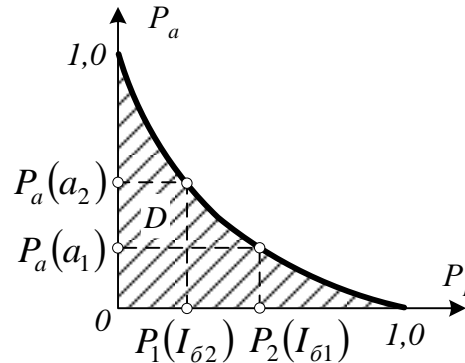


Рисунок 6.4 - Визначення імовірності перекриття ізоляції.

Спрощено імовірність перекриття при ударі блискавки в опору визначається за величиною критичного струму блискавки:

$$I_{кр} = \frac{U_{50\%}}{R_i + \delta \cdot h_{он}}, \quad (6.27)$$

де $\delta = 0.15$ - для ЛЕП з двома тросами; $\delta = 0.3$ - для ЛЕП з одним тросом. Очевидно, у ЛЕП з 2 тросами величина $I_{кр}$ більша, а збільшення висоти опори $h_{он}$ знижує $I_{кр}$.

Імовірність прориву блискавки через тросовий захист визначають згідно експериментальних даних за емпіричною формулою:

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{он}}}{90} - 4, \quad (6.28)$$

де α – захисний кут.

Існує сильна залежність імовірності P прориву блискавки від потенціалу проводу U_{np} :

- для ВЛ 500 кВ, $P = 0.287\%$;
- для ВЛ 750 кВ, $P = 0.92\%$.

Питоме число грозових відключень ЛЕП з тросами залежить від висоти опори h_{on} і опору заземлення $R_{им}$ і визначається за формулою

$$n_{відкл} = 4h_{тр} \left\{ P_a P_{np} \eta_i + (1 + P_\alpha) \left[\frac{4h_{on}}{l} P_{on} \eta_i + \left(1 - \frac{4h_{on}}{l} \right) P_{тр} \eta_2 \right] \right\}, \quad (6.29)$$

де P_α – імовірність ураження проводів;

P_{on} – імовірність перекриття ізоляції при ударі в опору;

$P_{тр}$ – імовірність пробою проміжку трос-провід при ударі в середину прогону троса;

η_i – імовірність утворення дуги при перекритті ізоляції;

η_2 – імовірність утворення дуги при пробі повітряної ізоляції.

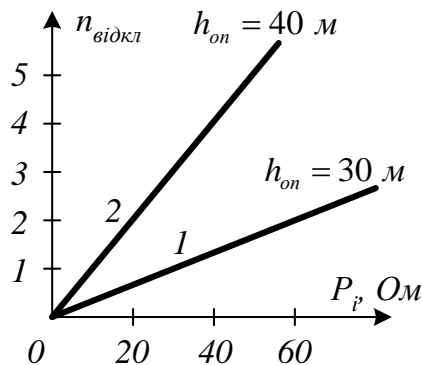


Рисунок 6. 5 - Питоме число грозових відключень одноланцюгових (1) і дволанцюгових (2) ліній залежно від імпульсного опору заземлення.

З рис. 6. 5 випливає, що дволанцюгові лінії, які мають більшу висоту підвісу, відключаються значно частіше, ніж одноланцюгові.

Прогони перетинів ЛЕП між собою необхідно захищати розрядниками по обидва боки (від амплітуди перенапруг).

Оскільки удар блискавки в прогін ЛЕП з різними номінальними напругами призводить до аварій, імпульсний опір заземлення опор прогону не повинен бути вище за 10÷20 Ом.

Запитання для самоконтролю

1. Від яких факторів залежить число відключень ЛЕП ?
2. Як можна зменшити число несанкціонованих відключень ЛЕП ?
3. Чим визначається амплітуда перенапруги при ударі блискавки ?
4. Розглянути випадок: удар блискавки в землю поблизу ЛЕП.
5. Проаналізувати випадок: удар блискавки в трос.
6. Розглянути випадок: удар блискавки в опору ЛЕП.
7. Як визначити допустиму крутизну імпульсу перенапруги ?
8. Яка методика розрахунку імовірності перекриття ізоляції ?
9. Як впливають параметри заземлення на грозостійкість ЛЕП ?
10. Чим визначається грозостійкість ЛЕП без тросів ?

ЛЕКЦІЯ № 7. ЗАХИСТ ПІДСТАНЦІЙ ВІД БЛИСКАВКИ ТА ПЕРЕНАПРУГ

- 1. Захист підстанцій від ударів блискавки**
- 2. Захист підстанцій від набігаючих імпульсів перенапруг**
- 3. Визначення довжини захищеного підходу до підстанції**
- 4. Особливості захису підстанцій різної номінальної напруги**
- 5. Ефективність захисту електрообладнання підстанцій**
- 6. Види комутаційних перенапруг**
- 7. Способи бмеження комутаційних перенапруг**

ЛІТЕРАТУРА:

- 1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.**
- 2. Кадомская К. П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них : учебник / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. А. Рейхердт. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. — 368 с. : ил. — (Учебники НГТУ).**
- 3. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.**
- 4. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притака, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.**

1. Захист підстанцій від ударів блискавки

Блискавкозахист підстанцій здійснюють стрижневими блискавковідводами на порталах, щоглах та дахах споруд. Стационарний опір протяжних заземлювачів для підстанцій 110 кВ і вище, який виготовляється у вигляді сітки з горизонтальних смуг, з'єднаних вертикальними електродами, не повинен перевищувати $R = 0.5 \text{ Ом}$.

Прийнявши імпульсний коефіцієнт $\alpha_i = 1$, для порталу $h = 15$ м при струмі блискавки 60 кА і крутості фронту 30 кА/мкс, напруга $U_n = I_0 R_i + aL_0 l$ складає 780 кВ, що перевищує імпульсну розрядну напругу гірлянд ізоляторів у відкритих ВРП-110 кВ і вдвічі нижче ніж у ВРП-220 кВ.

Тому для ВРП-220 кВ рекомендується установка блискавковідводів на порталах підстанції, а для ВРП-110 кВ потрібний розрахунок - на якій відстані безпечно їх встановлювати.

Для зменшення імпульсного опору R_3 влаштовують додаткові вертикальні електроди, які приєднують до заземлюючого контура.

У підстанціях 35 кВ нейтралі трансформаторів приєднують до землі через дугогасний реактор.

Але і при цьому опір заземлювача R_3 повинен бути $R_3 \leq 10$ Ом. Підстанційні будинки і споруди захищають заземленим залізним дахом або металевією сіткою з чарункою 5×5 м².

2.Захист підстанцій від набігаючих імпульсів перенапруг

При ударі блискавки в трос або провід імпульс перенапруги, що поширюється по лінії, деформується і загасає. За рахунок імпульсної корони й опору землі фронт імпульса подовжується і знижується його амплітуда. Зниження амплітуди U здійснюється за рахунок активних утрат струму блискавки в землю.

Основними апаратами захисту електрообладнання підстанцій від набігаючих імпульсів перенапруг є розрядники РВ й обмежувачі перенапруг нелінійні ОПН. Умова забезпечення захисту: – імпульсний струм через розрядник не повинен перевищувати струм координації, інакше U_{ocm} , яка виділяється на варисторі розрядника, буде небезпечна для ізоляції електрообладнання.

При близьких до станції ураженнях проводу струм блискавки I_0 розподіляється зворотно-пропорційно відносно опору заземлення та опору РВ.

Тоді струм, що протікає через розрядник:

$$I_{PB} = I_{\sigma} \frac{R_3}{R_{PB} + R_3}. \quad (7.1)$$

Опір РВМГ-110 при струмі координації $I_{\kappa} = 110$ кА дорівнює:

$$R_{PB} = \frac{U_{ocm}}{I_{\kappa}} = \frac{295}{10} = 29.5 \quad \text{Ом}. \quad (7.2)$$

Тоді при струмі блискавки $I_{\sigma} = 60$ кА і опорі заземлення $R_3 = 10$ Ом струм через РВ буде дорівнювати 15 кА – **що є неприпустимо!**

Таким чином, удари блискавки в лінію поблизу підстанції неприпустимі, тому ділянки лінії 1÷3 км на підході до підстанції захищають тросами (рис.б. 1).

Це так звані *захисні підходи до ПС*.

Віддалені удари блискавки в провід приводять до появи в РВ струму, меншого ніж $\frac{2U_{50\%}}{Z}$.

Так, для ПЛ-110 кВ: $R_{PB} < \frac{2 \cdot 660}{300} = 4,4$ кА, що менше за струм координації.

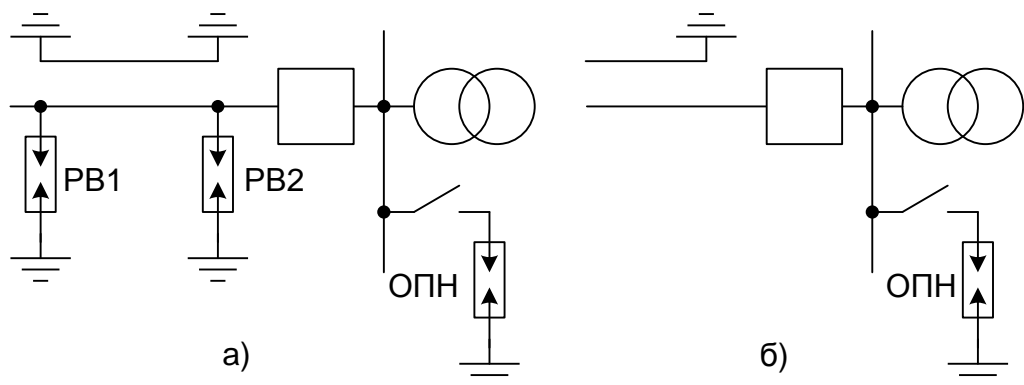


Рисунок 7. 1 - Защищенный підхід до підстанції: а – дерев'яні опори; б – металеві й залізобетонні опори.

Навіть за наявності троса біля підстанцій вживають спеціальні заходи блискавкозахисту: зменшують опір заземлення, опор і захисні кути тросових блискавковідводів.

Ще одна функція захищеного підходу – зменшення крутизни фронту імпульсу, що набігає на підстанцію, завдяки імпульсній короні. Довжина захищеного підходу має бути достатньою для зниження крутизни фронту до безпечної для захисних апаратів та електрообладнання підстанцій величини, яка визначається експериментально.

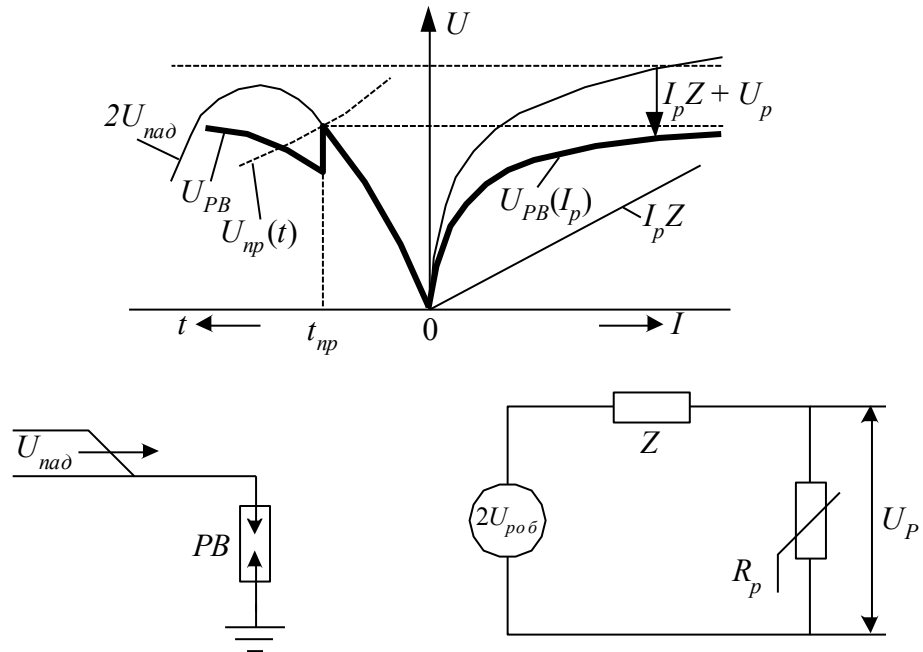


Рисунок 7. 2 - Еквівалентна схема та графік напруги на розряднику.

Для еквівалентної схеми підключення розрядника із зосередженими параметрами дійсне рівняння:

$$2U_{nod} = I_p Z + U_p, \quad (7.3)$$

де $U_{np}(t)$ – ВСХ розрядника; $U_{PB} = f(I_p)$ – ВАХ розрядника.

Сумісне вирішення цього рівняння з графічно заданим рівнянням ВАХ розрядника $U_{pв} = f(I_p)$ дає змогу визначити напругу на розряднику U_{PB} при набіганні на нього імпульсу перенапруги U_{nad} .

До пробою РВ відбувається відбиття від точки приєднання розрядника набігаючого імпульсу з тим же знаком і напруга на РВ подвоюється.

Після пробою включається нелінійний опір R_{PB} , внаслідок чого напруга на U_{PB} стає $\approx U_{ocm}$.

На підстанціях розрядники підключені на деякій відстані від електрообладнання, тому на них напруга буде вищою, ніж в точці приєднання розрядника (рис. 7. 3), що може бути небезпечним для ізоляції.

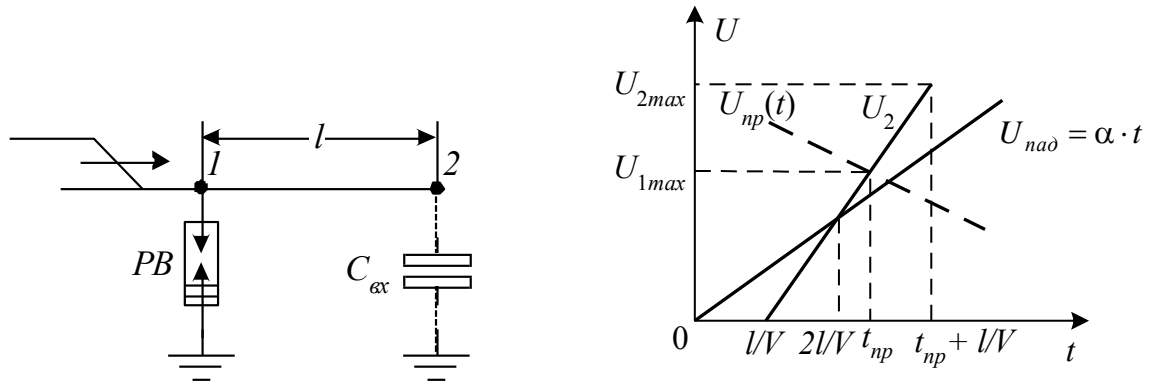


Рисунок 7. 3 - Визначення напруги на обладнанні на відстані l від РВ.

Визначимо цю різницю.

Нехай набігаючий імпульс: $U_{nad} = \alpha \cdot t$.

Для спрощення вважаємо $C_{ox} \approx 0$. Тоді через проміжок часу l/V імпульс прийде в точку 2 і відіб'ється з тим же знаком, а повернувшись в точку 1, він накладається на набігаючий імпульс.

Внаслідок цього, в момент t_p , у відповідності з ВСХ $U_{np}(t)$, відбудеться пробій РВ і напруга в точці 1 зменшиться.

Найбільша напруга на розряднику перед пробоем:

$$U_{1max} = a \cdot t_p + a \left(t_p - \frac{2l}{V} \right). \quad (7.4)$$

Напруга в точці 2 буде підвищуватися ще на протязі часу: $t = l/V$ і досягне величини: $U_{2max} = 2a \cdot t_p$, а після пробою РВ почне знижуватися внаслідок підключення в точці 1 опору РВ і зміни коефіцієнтів переломлення і відбиття α і β в точці 1.

Різниця напруг на об'єкти і розряднику РВ буде:

$$\Delta U = U_{2max} - U_{1max} = 2a \cdot t_p - a \cdot t_p - a \cdot \left(t_p - \frac{2l}{V} \right) = \frac{2al}{V}. \quad (7.5)$$

Таким чином, напруга на захищеному об'єкті залежить від відстані відключення розрядника і крутизни фронту імпульсу.

Отже, максимальна напруга на електроустановці тим більше перевищує пробивну напругу РВ, чим далі воно розташовано від РВ і має більшу крутизну фронту імпульсу.

Різниця ΔU називається *інтервалом координації ізоляції* між допустимою напругою на трансформаторі і пробивною напругою розрядника.

Оскільки $U_{проб.РВ} \approx U_{ост}$ при струмі координації I_k , задача полягає у виборі інтервалу координації між $U_{ост.РВ}$ і допустимою напругою $U_{дон}$ на ізоляції електрообладнання.

Отже, метою розрахунку блискавкозахисту електроустановки є визначення місця розміщення РВ, відносно електрообладнання, при якому напруга на електроустановці не перевищує $U_{дон}$.

Ізоляцію випробовують повними і зрізаними імпульсами, причому амплітуда зрізаного імпульсу може бути на 25% вища за амплітуду повного.

Допустима напруга на електроустановці за умовою роботи внутрішньої ізоляції визначається таким чином

$$U_{дон} = 1.1(U_{ni} - 0.5U_{ном}), \quad (7.6)$$

де 1,1 – коефіцієнт, що враховує різницю грозового і випробувального імпульсу,

U_{ni} – випробувальна напруга при повному імпульсі для трансформатора,

$U_{ном}$ – діюча величина номінальної напруги.

Допустимі напруги $U_{дон}$ ізоляції повинні знаходитись нижче ВСХ ізоляції, які визначаються за рівнянням:

$$U(t) = A \cdot \sqrt{1 + \frac{T_0}{t}}, \quad (7.7)$$

де A , T_0 – постійні, що визначаються підстановкою випробувальних напруг повним і зрізаним імпульсом при $t = 10$ мкс і $t = 2$ мкс. в вираз (7. 7).

Інтервал координації ізоляції для різних мережевих напруг коливається в межах 25÷40% пробивної напруги вентильного розрядника.

Розрядник забезпечує необхідний інтервал координації при відстані l від захищеного обладнання не більш ніж 30÷50 м, причому підстанціям з меншим $U_{ном}$ – відповідають менші відстані l .

3. Визначення довжини захищеного підходу до підстанції

Визначення довжини захищеного підходу полягає в знаходженні критичної крутизни набігаючих імпульсів перенапруги. Для цього експериментально визначають криві максимально допустимих напруг U_{max} в різних точках підстанції в залежності від крутизни набігаючих імпульсів a (рис. 7. 4).

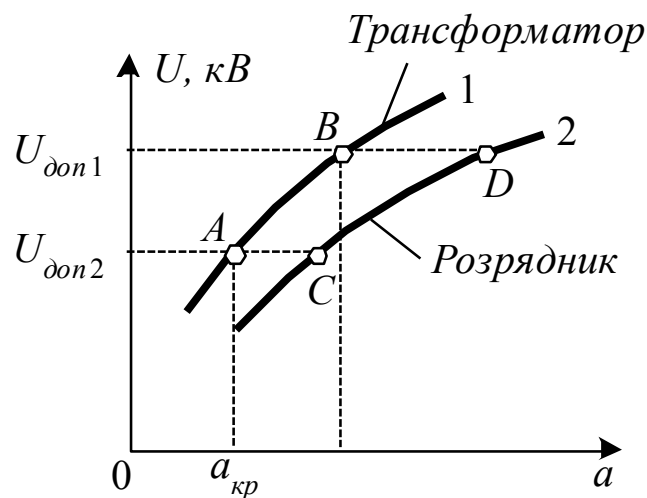


Рисунок 7. 4 - Визначення критичної крутизни набігаючого імпульсу:

$U_{дон1}$ – на внутрішній ізоляції, $U_{дон2}$ – на зовнішній.

Точки перетину A і B дають величину критичної крутизни $a_{кр}$, перевищення якої призведе до появи на ізоляції напруги, вищу за допустиму. Найменша крутизна (точка A) є критичною для всієї підстанції в цілому, тому

імовірність пошкодження ізоляції обладнання підстанції дорівнює імовірності приходу на підстанцію хвилі з крутизною $a > a_{кр}$.

Довжину захищеного підходу до підстанції знаходимо за формулою

$$l_{з.п.} \geq \frac{U_{50\%}}{a_{кр} \Delta\tau_{\phi}}. \quad (7.8)$$

4. Особливості захисту підстанцій різної номінальної напруги

На підстанціях до 110 кВ і ПС 150÷220 кВ, обладнаних трансформаторами з підвищеним рівнем ізоляції, скоординованим з характеристиками РВС, місце їх встановлення повинно забезпечити захист усього обладнання мінімальним числом розрядників.

Між РВС і трансформатором 220 кВ з основним рівнем ізоляції, а також автотрансформатором, трансформатором і шунтуючими реакторами 330÷750 кВ не припустимо встановлення комутаційних апаратів.

Обладнання підстанцій 330÷500 кВ треба захищати не менш, ніж двома комплектами РВП, а 750÷1150 кВ – трьома комплектами, – для зниження амплітуди струму і зменшення падіння напруги на розряднику.

На відміну від ЛЕП-220 кВ, в лініях СВН використовують комбіновані розрядники РВМК або ОПН, що захищають від комутаційних перенапруг кінець лінії разом з компенсуючими реакторами.

При набіганні грозових імпульсів на вхід трансформаторів з ізолюваною нейтраллю в обмотках виникають коливання, що призводять до значного збільшення напруги на нейтралі, тому до неї може бути підключений РВ з номінальною напругою на клас нижчою, ніж клас ізоляції трансформатора.

Якщо відстань між обладнанням і розрядником $l \leq 10$ м, немає потреби обмежувати крутизну набігаючого імпульсу. Це притаманно невеликим підстанціям (так званим комплектним 35÷220 кВ), приєднаним до транзитних ліній за допомогою відпайок.

Завдання захисту полягає у виключенні ударів блискавки поблизу РВ, які можуть пошкодити самий розрядник.

Якщо лінія без захисного троса, то необхідні два послідовно приєднаних розрядника, а ближче до підстанції прогон захистити тросом. Відпайку також необхідно захищати тросом по всій довжині (рис. 7.5).

Розподільчі пристрої 3÷10 кВ захищають від набігаючих імпульсів виносом додаткового комплекту розрядників на лінію.

Дуже велика відстань між розрядниками небезпечна через можливість удару блискавки між ними, а мала – через можливість неспрацьовування розрядників, винесених на лінію. Оптимальна відстань між ними повинна бути 150÷300 м.

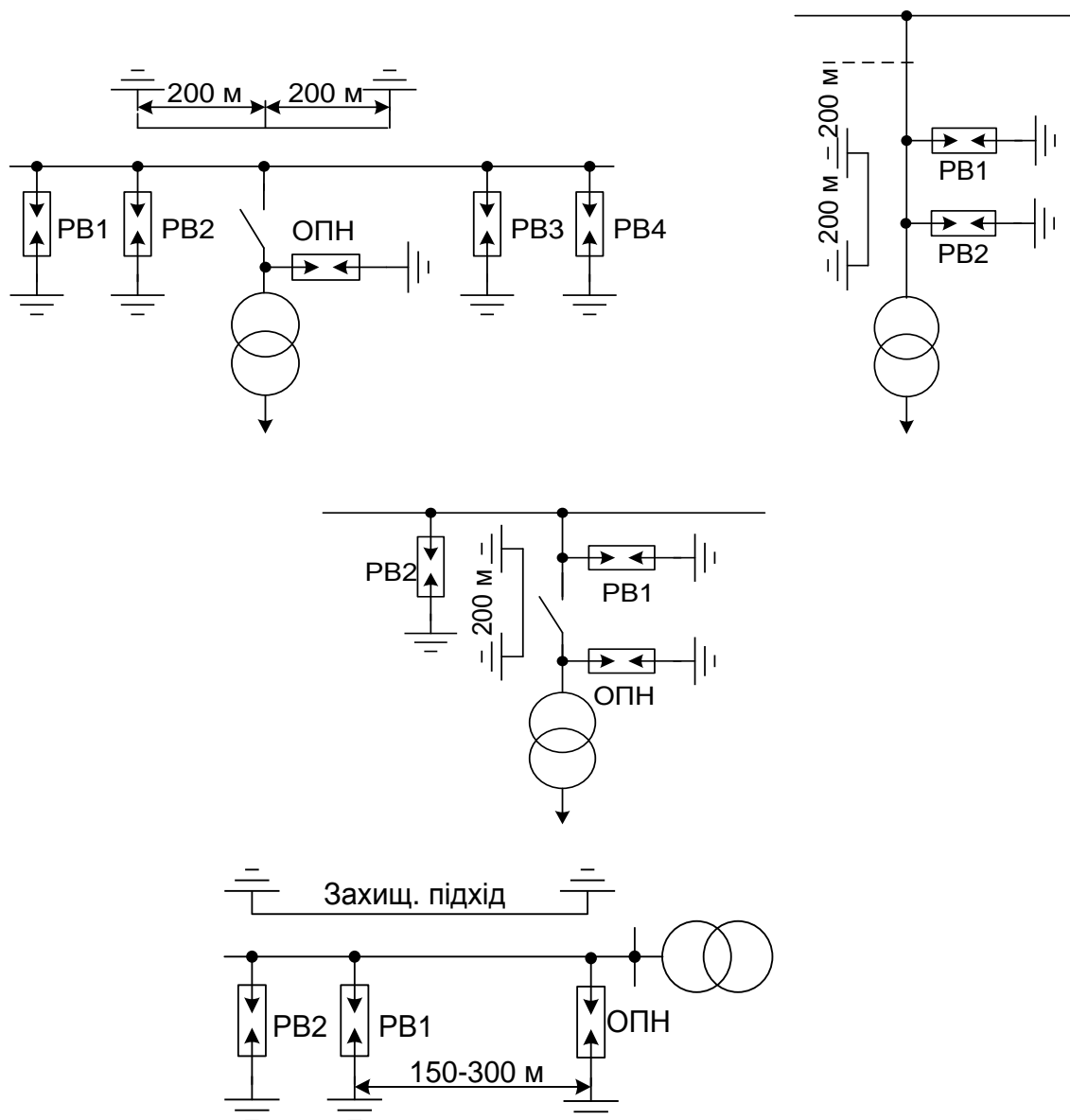


Рисунок 7. 5 - Схеми захисту підстанцій розрядниками.

5. Ефективність захисту електрообладнання підстанцій

Ефективність захисту підстанцій характеризується середнім річним числом перекриття ізоляції внаслідок прориву блискавки в зону захисту β_1 , зворотних перекриттів при ударах у блискавковідвід β_2 , перекриттів від набігаючих імпульсів β_3 . Середнє число перекриттів ізоляції підстанції через прорив блискавки в зону захисту:

$$\beta_1 = n_{\text{уд}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot P_{\text{пер}} \frac{D_2}{100}, \quad (7.9)$$

де $n_{\text{уд}}$ – число ударів блискавки в підстанцію за 100 грозових годин;

D_2 – число грозових годин;

$P_{\text{пер}}$ – ймовірність перекриття ізоляції при ударі блискавки в провід (визначене по $I_{\text{кр}}$).

Число зворотних перекриттів при ударі блискавки у блискавковідвід.:

$$\beta_2 = n_{\text{уд}} (1 - P_{\text{пр}}) P_{\text{звор}} \frac{D_2}{100}, \quad (7.10)$$

де $P_{\text{звор}}$ – ймовірність зворотного перекриття при ударі в блискавковідвід (визначається по $I_{\text{кр}}$).

Критичний струм $I_{\text{кр}}$ визначається із рівняння потенціалу, що з'являється на порталі і 50% імпульсної розрядної напруги гірлянди ізоляторів

$$I_{\text{кр}} \cdot R_i + 50 \cdot l = U_{50\%}, \quad (7.11)$$

де l – висота кріплення гірлянди на порталі;

R_i – імпульсний опір заземлення.

Середнє річне число перекриттів через набігаючі імпульси:

$$\beta_3 = 4h_{\text{мп}} \left\{ P_{\alpha} + (1 - P_{\alpha}) \left[\frac{4h_{\text{он}}}{l} P_{\text{он}} + \left(1 - \frac{4h_{\text{он}}}{l} \right) P_{\text{мп}} \frac{D_2}{100} \frac{ml_{\text{зн}}}{100} \right] \right\}, \quad (7.12)$$

де l_{zn} – довжина захищеного підходу;

m – число повітряних ліній;

P_α – ймовірність ураження проводу;

P_{on} – ймовірність перекриття ізоляції на опорі при ударі блискавки в провід;

P_{mp} – ймовірність перекриття провід-трос при ударі блискавки в трос.

Показник грозостійкості підстанції – це число років безвідмовної роботи:

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3} \quad (7.13)$$

Розрахункові значення M сучасних підстанцій складають сотні років, що на порядок більше за середнього терміну служби електроустановки.

6. Види комутаційних перенапруг.

Електричні мережі високої напруги містять сконцентровані та розподілені ємності та реактивності, тому мають коливальні властивості, завдяки запасеній електричній та магнітній енергії.

Причина коливань полягає в плановій або аварійній комутації електричної мережі або електроустановки.

Найбільш розповсюдженими випадками комутацій є відключення ненавантажених ліній, відключення ліній при асинхронному ході генератора, автоматичне повторне ввімкнення та ряд інших.

Кожна комутація призводить до виникнення перехідних процесів, які супроводжуються виникненням перенапруг. Можливі перенапруги і при нестійкому горінні дуги при однофазному КЗ в мережі з ізольованою нейтраллю.

Комутаційні перенапруги поділяються на:

- фазні, що діють на ізоляцію відносно землі;
- міжфазні, що діють на ізоляцію різних фаз;

- між контактні.

При проектуванні ізоляції конструкцій необхідно враховувати такі дані:

- кратність перенапруг: $\kappa = U_{max} / U_{найб.роб.}$;
- форму кривої перенапруги, яка визначає тривалість дії напруги на ізоляцію;
- тип електрообладнання, на яке діє перенапруга.

Оскільки ці характеристики мають статистичний розкид, то необхідно визначати ймовірність появи перенапруг на протязі певного відрізка часу.

Техніко-економічне обґрунтування захисту від перенапруг базується на оцінці статистичних характеристик можливої шкоди (математичне очікування, дисперсія) від дії перенапруги.

Ймовірність появи комутаційного імпульсу перенапруги є випадковим явищем і описується законом Пуассона:

$$P_{\tau}(1) = \lambda \cdot \tau \cdot e^{-\lambda \tau}, \quad (7.14)$$

де P_{τ} - це ймовірність появи одної перенапруги за період часу (0, τ);

$\lambda = \lim[P_{\tau, \Delta t}(1)/\Delta t]$ – інтенсивність потоку.

Річне число появи перенапруг з кратністю k дорівнює:

$$N_{k1} \approx 1,58 \cdot N_1 \cdot \exp[-A(k-k')]. \quad (7.15)$$

Тут N_1 – число перенапружень з кратністю $k \geq 1,15$ за рік; A – параметр розподілу. Цей вираз дає змогу розраховувати ймовірність пробою ізоляції з врахуванням варіації її розрядної напруги. Для ПС-500 кВ річне число появи перенапруг з кратністю $k = 1,15$ дорівнює 130.

Природа виникнення комутаційних перенапруг:

- перенапруги при відключенні конденсаторів і ненавантажених ЛЕП;
- перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів;
- перенапруги при неповнофазних режимах;
- перенапруги при почергових замиканнях на землю (нестійка дуга);
- перенапруги ферорезонансні;
- перенапруги при відключенні великих струмів (після КЗ);

- перенапруги при АПВ.

При ввімкненні блочних схем: трансформатор – ЛЕП без вимикача на стороні лінії перехідний процес супроводжується появою вільних складових коливань магнітного потоку трансформатора, співпадіння яких з вимушеною складовою, призводить через $\frac{1}{2}$ періоду промислової частоти до насичення магнітного потоку і появи висших гармонік.

Оскільки вільна складова магнітного потоку затухає повільно (десятки періодів частоти 50 Гц), - перехідний процес достатньо тривалий і супроводжується значними перенапруженнями.

Це явище є небезпечним для ізоляції, вентиляльних розрядників і ОПН і називається *перехідним резонансом*.

Розглянемо перенапруги, що виникають при вклученні розімкненої лінії (рис. 7. 6).

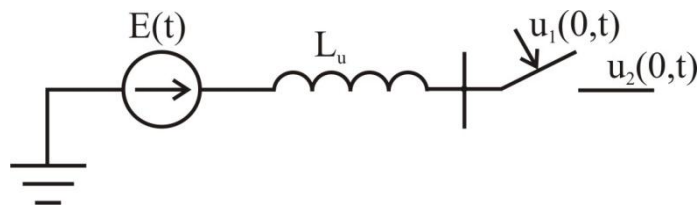


Рисунок 7. 6 - Еквівалентна схема розімкненої лінії.

Розімкнена лінія довжиною l з внутрішньою індуктивністю L і джерелом синусоїдальної напруги $E(t)$ приєднується до навантаження. Внаслідок перехідних процесів в лінії виникають вимушені та вільні коливання. Амплітуди вільних коливань утворюють знакозмінний ряд, члени якого зменшуються зі збільшенням номера гармоніки. При $t = 0$,

$$A_{уст} - A_1 + A_2 - A_3 + \dots = 0, \quad (7. 16)$$

де $A_{уст}$ – амплітуда вимушеної складової,

A_1, A_2, A_3 – амплітуди гармонік вільних складових коливань.

Звідси $A_1 > A_{уст}$, тобто амплітуда першої вільної гармоніки більша за амплітуду вимушеної складової.

В момент часу $t = \pi/\omega$ максимальна величина вимушеної і перших двох вільних складових співпадають

$$U_{max} \approx A_{уст} + A_1 + A_2. \quad (7. 17)$$

При цьому ударний коефіцієнт, що характеризує величину перенапруги $K_{уд} = (U/A_{уст}) \approx (A_{уст} + A_1 + A_2)/A_{уст} = [1 + (A_1 + A_2)/A_{уст}] > 2$. (7.

18)

Максимальна напруга на кінці лінії U_{max} визначається кутом включення φ і частотою вільних ω_l і особистих ω коливань, які визначають амплітуду вільних коливань A_i . Звідки при $\omega_l/\omega > 1$ амплітуда вільних складових максимальна при кутах включення 90° або 270° .

Це означає, що чим більше кут включення відрізняється від 90° , тим менша амплітуда особистих коливань.

При $\omega_l / \omega \leq 1$ амплітуда вільних коливань максимальна при куті ввімкнення 0 або 180° .

Це можливо при ввімкненні в ЛЕП послідовно ємностей для компенсації індуктивного опору лінії (ППК – пристрій поздовжньої компенсації), який зменшує $K_{уд}$ поблизу максимуму.

У мережах з ізолюваною нейтраллю перенапруги виникають при однофазних дугових замиканнях та нестійкому горінні дуги і супроводжуються зміщенням нейтралі системи, що може бути спричинено остаточними зарядами ємностей лінії при погасанні дуги.

При цьому максимальна напруга U_{max} досягає $3,1 \cdot U_{фазне}$ і можливі масові випадки перекриття ізоляції на здорових фазах.

Електричні мережі містять велику кількість реактивних елементів – ємностей та індуктивностей, що утворюють цілий ряд коливальних контурів і, накопичивши електричну й магнітну енергію, можуть призводити до виникнення резонансних явищ при відключеннях навантаження лінії.

Такі перенапруги називають *резонансними* і найбільш небезпечні серед них – *ферорезонансні*, що виникають при насиченні магнітопроводів трансформаторів та електричних машин. Їх небезпека полягає як у високих амплітудах перенапруг $(3,8 \div 4,2)U_\phi$, так і тривалості дії на ізоляцію, яка дорівнює часу існування неповнофазного режиму і може призводити до пошкодження РВ, ОПН і трансформаторів напруги. АПВ використовують

для ефективного гасінні дуги шляхом відключення пошкодженої ділянки лінії з обох сторін від місця КЗ.

Максимальні перенапруги виникають при повторному ввімкненні розімкненої лінії і обумовлені ємнісним ефектом та великим значенням ударного коефіцієнта.

7. Способи обмеження комутаційних перенапруг.

Комутаційні перенапруги можуть перевищувати рівні ізоляції електроустановок 330 і 500 кВ ($2,5U_{\phi}$) і 750 кВ ($2,1U_{\phi}$), тому використовують їх примусове обмеження такими заходами:

- обмеженням числа режимів (при яких можуть виникати перенапруги),

 - за допомогою схемних рішень;

- обмеження амплітуд встановлених перенапруг, що призводить до зниження амплітуд перехідного процесу;

- обмеження амплітуд комутаційних перенапруг за допомогою РВ, ОПН або вмонтованих у вимикачі шунтуючих резисторів;

- підбір таких початкових значень перехідного процесу, при яких амплітуди вільних коливань мають мінімальні величини (наприклад, прискорення стікання заряду з лінії в паузу АПВ), або керування моментом включення вимикача;

 - підключення лінії спочатку до більш потужної шини;

 - попереднє (до комутації лінії) підключення реакторів поперечної компенсації на вищій та середній напругах.

Для зниження амплітуд комутаційних перенапруг встановлюють при ввімкненні ліній знижені коефіцієнти трансформації силових трансформаторів. Обмеження амплітуд комутаційних перенапруг відбувається або за рахунок розсіювання енергії вільних коливань в нелінійних резисторах РВ, що ввімкнені між фазою та землею, або за допомогою резисторів, вбудованих в вимикачах. Дія шунтуючих резисторів полягає у демпфіруванні вільних коливань напруги при ввімкненні

ненавантажених ліній і зменшенні остаточного заряду в лінії при її відключенні або АПВ.

Ефективним захистом від перенапруг є під'єднання паралельно контактам високовольтних вимикачів відносно землі ОПН, які суттєво обмежують число повторних запалювань дуги і, тим самим, виключають можливість віртуальних зрізів струму.

Крім того, ОПН обмежує перенапруги при обриві струму. Так, при відключенні пускового струму електродвигунів 630 кВт з кабелем 250 м, відключення відбулось з 5-ма повторними пробоями, а без ОПН – з 11.

Використання ОПН можливо і для обмеження дугових перенапруг, що підтверджено експериментально при таких умовах:

- ввімкнення та відключення холодного електродвигуна;
- відключення та ввімкнення при ОДЗ зі сторони живлючої мережі;
- неповнофазні комутації електродвигуна з кабелем;
- штучне збудження дугового замикання на землю;
- відключення та миттєве ввімкнення;
- ввімкнення та миттєве відключення.

ОПН суттєво обмежує перенапруги з рівнем $2U_{\text{фmax}}$ і струмами $I_{\text{max}} \leq 100\text{А}$, при $\tau_i = 100$ мкс.

Запитання для самоконтролю

1. Які методи захисту підстанцій від набігаючих перенапруг ?
2. Як визначити довжину захищеного підходу до підстанції ?
3. Назвіть загальні причини виникнення комутаційних перенапруг.
4. Наведіть класифікацію комутаційних перенапруг.
5. Як визначити імовірність появи комутаційної перенапруги ?
6. Назвіть види комутаційних перенапруг та їх характеристики.
7. В чому причина появи *перехідного резонансу*?
8. Механізм виникнення перенапруг при комутації розімкнутої лінії.
9. Який зміст поняття «ударний коефіцієнт» при комутації лінії ?

10. У чому причина виникнення *ферорезонансних* перенапруг ?

11. Які існують методи обмеження комутаційних перенапруг ?

Навчальне видання

ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

Курс лекцій

ПОПАДЧЕНКО Світлана Анатоліївна

САВЧЕНКО Олександр Анатолійович

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. _.

Наклад ___ пр.

ДБТУ

61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

