

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
денної і заочної форм здобуття освіти
за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Електронний ресурс

Харків – 2025

Рецензенти:

Ю. С. Олійник – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія»;

О. Ю. Єгорова – кандидат. технічних наук, теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

*Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням
Науково-методичної ради Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 7 від 28 лютого 2025 року)*

Т 38

Техніка високих напруг : методичні вказівки до виконання практичних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм здобуття освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / уклад.: П. В. Васюченко, І. Г. Кирисов, О. М. Пономаренко. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – (PDF 52 с.)

Методичні вказівки містять основні теоретичні положення, що допомагають студентам глибше зрозуміти фундаментальні принципи роботи високовольтних систем. Розглядаються питання, пов'язані з генерацією, передачею та розподілом електроенергії на високих напругах, а також захистом обладнання від перенапруг.

Методичні вказівки включають практичні завдання та методи їх вирішення, які спрямовані на закріплення теоретичних знань та набуття практичних навичок роботи з високовольтним обладнанням. Студенти мають можливість ознайомитися з методами вимірювання високих напруг, тестуванням ізоляції, виявленням дефектів та іншими аспектами, які є критичними для безпечної та ефективної роботи високовольтних систем.

Особлива увага приділяється розвитку професійних компетенцій студентів, підготовці їх до виконання складних інженерних завдань в галузі електроенергетики та електротехніки, а також забезпеченню високого рівня готовності до практичної діяльності. Матеріали методичних вказівок сприяють формуванню системного мислення та аналітичних навичок, що є необхідними для успішної кар'єри в сфері енергетики.

УДК 621.316(0.75.5)

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2025

© Васюченко П. В., Кирисов І. Г.,
Пономаренко О. М. уклад., 2025

ЗМІСТ

Вступ	8
1 Перелік практичних робіт.....	10
Практична робота № 1 Визначення пробивної напруги повітряних проміжків	10
Практична робота № 2 Розрахунок втрат активної потужності на корону.....	16
Практична робота № 3 Електрична міцність твердих діелектриків.....	21
Практична робота № 4 Розрахунок параметрів генератора імпульсних напруг і струмів.....	28
Практична робота № 5 Атмосферні перенапруги та захисні функції блискавковідводів	34
Практична робота № 6 Розрахунок повітряних ліній електропередач на стійкість до дії грозових розрядів	40
Практична робота № 7 Розрахунок внутрішніх перенапруг.....	48
2 Критерії оцінювання знань студентів.....	54
Перелік використаних джерел.....	55

ВСТУП

Викладання навчальної дисципліни «Техніка високих напруг» дозволяє ознайомити студентів із технікою високих напруг у системах електроспоживання та засобами, які забезпечують нормальну та безпечну експлуатацію електроустановок високої напруги в системах електроспоживання.

Метою навчальної дисципліни є ознайомлення студентів з технікою високих напруг у системах електроспоживання, забезпечення бази інженерної підготовки, випробувань засобів захисту від високих напруг, застосування теоретичних знань для розв'язання практичних завдань із захисту електроустаткування від негативних чинників, що спричиняє висока напруга.

Головне завдання навчальної дисципліни полягає у набутті навичок майбутнього інженера (наукового співробітника) до аналізу засобів техніки високої напруги в системах електроспоживання, розрахунку параметрів і показників, вибору елементів для забезпечення раціональної роботи енергосистеми. Навчальна дисципліна «Техніка високих напруг» забезпечує підготовку студентів на підґрунті базових фахових дисциплін – «Фізика», «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні машини» та забезпечує вивчення навчальних дисциплін: «Електротехнологічні установки та пристрої», «Контроль і управління якістю електричної енергії».

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

знати:

- основні елементи техніки високих напруг у системах електроспоживання;
- теорію електричних розрядів у газоподібних, рідких, твердих і комбінованих діелектриках;
- конструювання зовнішньої ізоляції ліній електропередач, підстанцій

та іншого обладнання високої напруги;

- методи випробування високовольтної ізоляції;
- випробувальні установки високої напруги;
- принципи вимірювання високої напруги;
- внутрішні і гзові перенапруги в електричних системах, засоби та

міри захисту від них;

вміти:

– формулювати вимоги до високовольтних пристроїв, правильно класифікувати та визначати їх основні параметри;

– застосовувати інженерні методи розрахунку і вибору засобів захисту від високої напруги в системах електроспоживання;

– вибирати високовольтні ізоляційні пристрої для ліній електропередач, підстанцій та іншого обладнання високої напруги;

– визначати необхідність проведення організаційно-технічних заходів щодо надійності елементів високої напруги та підвищення безпеки в системах електроспоживання.

1 ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

Практична робота № 1

Тема. Визначення пробивної напруги повітряних проміжків

Мета: набуття навичок розрахунку пробивної напруги повітряних проміжків між стрижнями та кульовими електродами.

Короткі теоретичні відомості

У нормальних умовах, для яких прийнято атмосферний тиск у 760 мм рт. ст., температуру 293°K (20°C) і вологу 11 г/м^3 , повітря, що є сумішшю електрично нейтральних газів, являє собою діелектрик з об'ємним опором, що дорівнює нескінченності.

Струм наскрізної провідності через такий діелектрик практично неможливий. Ідеальним діелектриком міг би виявитися абсолютний вакуум, проте навіть у разі технічно досяжного розрідження в 10^{-6} мм рт. ст. зберігається ще досить велика кількість газових молекул та умови для утворення заряджених частинок.

Під час впливу на газовий проміжок електричного поля з достатньою напруженістю газ втрачає свої ізолювальні властивості та стає провідним у вузькому каналі або в певній зоні.

Процес короткочасної втрати газом діелектричних властивостей під дією прикладеної до газового проміжку напруги називається електричним пробоем газу.

Величина середньої напруженості електричного поля, за якої виникає пробій, називається пробивною напруженістю E_{np} . Пробій газового середовища пояснюється рядом процесів, з яких основними є процеси ударної іонізації, поверхневої іонізації, термоіонізації та фотоіонізації.

Пробій між кульовими електродами. Електричне поле між сферичними електродами з відносно великими відстанями майже рівномірне. У таких полях вплив полярності та заземлення незначний і може бути врахований коефіцієнтом нерівномірності поля u . Якщо кулі слугують для вимірювальних

цілей, то точність вимірювання ними дорівнює $\pm 3\%$ від розрахункової величини, при цьому відстань між кулями не повинна перевищувати їх діаметра. Не рекомендується і надмірно зближувати кулі менше, ніж на $0,52 \sqrt{r}$. Аналітичної залежності, за якою можна визначити пробивну напругу між кулями довільного діаметра, немає, тому використовуються дослідні дані, значення яких утворюють градувальні характеристики кульових розрядників.

Пробій газового проміжку між стрижнями. Пробивна напруга повітря з відстанями між стрижнями до 30 см змінюється за кривою, близькою до параболічної, а з великими відстанями – за лінійною залежністю.

Це пояснюється впливом коронного розряду поблизу вістря й об'ємних зарядів, які суттєво вирівнюють електричне поле, тому з відстанями в межах від 100 до 200 см можна користуватися напівемпіричними залежностями, запропонованими Ротом і Вайкером:

– для змінного струму частотою 50 Гц:

якщо електроди ізолювані

$$U_{np} = 15 + 3,8a \text{ кВ діюч.}, \quad (1.1)$$

де a – відстань між стрижнями;

якщо один електрод заземлений

$$U_{np} = 15 + 3,75a \text{ кВ діюч.}, \quad (1.2)$$

– для імпульсу додатньої полярності

$$U_{np} = 75 + 5,56a \text{ кВ макс.}, \quad (1.3)$$

– для імпульсу від'ємної полярності

$$U_{np} = 110 + 6a \text{ кВ макс.}. \quad (1.4)$$

Відповідно до залежностей (1.1–1.4) можна оцінити величину пробивної напруги повітряного проміжку (a , см) між елементами електроустановки, умовно приймаючи їх за стрижні та забезпечуючи цим деякий запас міцності. Для розрахунку пробивної міцності проміжку (a , м) між електродами стрижень – стрижень з $1 < a < 4$ м використовується напівемпірична залежність

$$U_{np} = (1,45\sqrt{a} - 0,93)10^3 \text{ кВ макс}, \quad (1.5)$$

яка забезпечує точність у межах $\pm 2,5 \%$. Для проміжку стрижень – площа з $a < 9$ м застосовується залежність

$$U_{np} = (1,62\sqrt[3]{a} - 1,1)10^3 \text{ кВ макс}, \quad (1.6)$$

яка забезпечує точність у межах $\pm 5 \%$.

Вплив температури, тиску і вологості на міцність газового проміжку. Зростання температури та зниження атмосферного тиску щодо величин, прийнятих за нормальні, призводять до зменшення щільності газових частинок у проміжку між електродами, що сприяє утворенню пробою. Це враховується здебільшого в районах, підвищених над рівнем моря.

Коефіцієнт відносної щільності повітря:

$$\delta = \frac{0,386p}{273 + t}, \quad (1.7)$$

де p – тиск, мм рт. ст.; t – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Пробивна напруга прямо пропорційна до коефіцієнта δ :

$$U_{\delta} = U_0\delta. \quad (1.8)$$

Зі збільшенням вологості електрична міцність газового проміжку зростає, оскільки зважені частинки вологи з'єднують рухомі електрони, зменшуючи їх рухливість. Вологість або вагова кількість водяної пари, що містяться в одиниці об'єму повітря, залежить від температури. Для кожної температури існує певна межа вологості.

Відношення вологи, що фактично міститься, до її граничної величини називається відотною вологістю $f\%$. За нормальну вологість повітря прийнята величина 65% , що відповідає змісту 11 г води в кубічному метрі повітря. Зміна пробивної напруги газу відносно нормальних умов урахується коефіцієнтом K .

Приблизно для частоти 50 Гц та напруги пробою 141 кВ макс і вище поправочний коефіцієнт K може бути визначений за формулою:

$$K = 1,15 - 0,15\frac{f}{11}, \quad (1.9)$$

де f – фактична вологість повітря.

Отже, пробивна міцність газового проміжку з урахуванням тиску, температури та вологості визначається з виразу:

$$U'_{np} = U_{np} \frac{\delta}{K}, \quad (1.10)$$

де U_{np} – пробивна напруга проміжку за умов, прийнятих за нормальні.

Приклади розв'язання завдань

Приклад 1.1. Визначити пробивну напругу між двома ізольованими стрижнями, які віддалені один від одного в повітрі на відстані 120, 220, 800 см. Вміст води 20 г/м³, температура повітря 30 °С і тиск 740 мм рт. ст.

Розв'язання. Визначимо відносну густину повітря для заданих умов:

$$\delta = \frac{0,386 p}{273 + t^{\circ}C} = \frac{0,386 \cdot 740}{273 + 30} = 0,945.$$

Для розрахунку пробивної напруги між електродами, віддаленими на 120 см, використаємо вираз (1.1):

$$U_{np} = (15 + 3,8a)1,41 = (15 + 3,8 \cdot 120)1,41 = 660 \text{ кВ макс};$$

для відстані 220 см вираз (1.5):

$$U_{np} = (1,45\sqrt{a} - 0,93)10^3 = (1,45\sqrt{2,2} - 0,93)10^3 = 1220 \text{ кВ макс};$$

для відстані 800 см скористаємося:

$$U_{np} = 2740 \text{ кВ макс.}$$

Збільшення пробивної напруги за рахунок підвищення вмісту води врахуємо за рахунок коефіцієнта $K = 0,91$. Із залежності (1.10) отримаємо остаточне значення пробивної напруги:

$$U'_{np} = U_{np} \frac{\delta}{K};$$

при 120 см

$$U'_{np} = 660 \frac{0,945}{0,91} = 685 \text{ кВ макс};$$

при 220 см

$$U'_{np} = 1270 \text{ кВ макс};$$

при 800 см

$$U'_{np} = 2850 \text{ кВ макс.}$$

Приклад 1.2. Ізольовані кульові електроди діаметром 5 см з відстанню між ними 2 см, розташовані у повітрі з температурою 27°C , вологістю 5 г/м^3 і тиском 760 мм рт. ст. Визначити напругу частотою 50 Гц, за якої відбудеться розряд між сферами, та величину середньої й максимальної напруженості електричного поля в момент розряду.

Розв'язання. Пробивна напруга для нормальних умов дорівнює 58,3 кВ макс. Поправочний коефіцієнт на вологу $K = 1,016$. Відносну густину повітря для заданих умов:

$$\delta = \frac{0,386p}{273 + t^{\circ}\text{C}} = \frac{0,386 \cdot 760}{273 + 27} = 0,98.$$

Пробивна напруга проміжку для заданих умов відповідно до (1.10)

$$U'_{np} = U_{np} \frac{\delta}{K} = 58,3 \frac{0,98}{1,016} = 56,5 \text{ кВ макс.}$$

Приймаючи електричне поле між кулями рівномірним, визначаємо його середню напруженість:

$$E_{np} = \frac{U'_{np}}{2} = \frac{56,5}{2} = 28,2 \text{ кВ макс/см.}$$

Максимальну напруженість електричного поля у поверхні куль з урахуванням коефіцієнта нерівномірності визначимо із залежності:

$$E_{\max} = \frac{U'_{np}}{a} y_1 = 28,2 \cdot 1,28 = 36,0 \text{ кВ макс/см,}$$

де $y_1 = 1,28$ – визначений для $\frac{a}{r} = \frac{2}{2,5} = 0,8$;

$$K = 1 + 0,04 \frac{58,3}{141} = 1,016.$$

Завдання до теми

1. Визначити пробивну напругу між двома ізольованими стрижнями, які віддалені один від одного в повітрі на відстані a_1, a_2, a_3 (см). Вміст вологи

20 г/м³, температура повітря t (°C) і тиск p (мм рт. ст.). Вихідні дані до завдання наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	a_1 , см	a_2 , см	a_3 , см	t , °C	p , мм рт. ст
1	100	250	850	25	720
2	130	200	700	35	730
3	90	230	750	40	745
4	95	190	820	45	750
5	110	225	830	37	710
6	125	235	840	42	700
7	85	240	790	50	725
8	135	260	780	38	735
9	115	265	810	32	755
10	105	245	815	40	715

2. Ізольовані кульові електроди діаметром d (см) з відстанню між ними a (см), розташовані у повітрі з температурою t (°C), вологістю 5 г/м³ і тиском p (мм рт. ст.). Визначити напругу частотою 50 Гц, за якої відбудеться розряд між сферами, та величину середньої й максимальної напруженості електричного поля в момент розряду. Вихідні дані до завдання наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	d , см	a , см	t , °C	p , мм рт. ст	y_1
1	7	1,5	25	720	1,137
2	10	2,5	28	730	1,173
3	6	3	30	745	1,359
4	8	3,5	40	750	1,321
5	9	4	37	710	1,321
6	4	1,5	29	700	1,283
7	11	5	22	725	1,321

Продовження табл. 1.2

8	7	2,5	24	735	1,258
9	6	3,5	32	755	1,359
10	8	4	42	715	1,359

Контрольні питання

1. Чому збільшення вмісту вологи в газі підвищує електричну міцність газового проміжку?
2. Чому заземлення одного з електродів у більшості випадків знижує електричну міцність газового проміжку?
3. Чому в однакових умовах проміжок стрижень – стрижень виявляється міцнішим проміжку стрижень – площина?

Література: [1, с. 53–63; 2, с. 78–92; 3, с. 103–124].

Практична робота № 2

Тема. Розрахунок втрат активної потужності на корону

Мета: набуття навичок розрахунку втрат активної потужності на корону в лінії електропередач.

Короткі теоретичні відомості

Для ліній електропередач 110 і 220 кВ корона усувається застосуванням проводів перерізом не менше, ніж у АС-50 і АС-240, тому втрати на корону враховуються для зазначених перерізів тільки у високогірних районах, а для звичайних районів – починаючи з 330 кВ і більше. Втрати на корону не повинні перевищувати 2–5 % від активних втрат у самому проводі. Під час дощу втрати в лініях електропередач напругою 500 кВ можуть досягати 50–100 кВт/км, під час ожеледиці – 10–15 кВт/км, у хороших умовах – 0,1–0,5 кВт/км.

Як приклад, розглянемо широко відому формулу Піка.

Втрати віднесені до одного проводу на 1 км довжини трифазної лінії з симетрично розташованими проводами, а напруга прийнята фазна діюча:

$$\Delta P_{\kappa} = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (U_{\phi} - U_0)^2 \cdot 10^{-5}, \quad (2.1)$$

де f – частота змінного струму, Гц; δ – відносна щільність повітря; r – радіус проводу, см; D – відстань між проводами, см; U_0 – умовна напруга, яка називається критичною і визначається із залежності:

$$U_0 = E_0 r \ln \frac{D}{r}$$

або з формули:

$$U_0 = 21,2 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D}{r}, \quad (2.2)$$

де $m_1 = (0,98 - 0,83)$ – коефіцієнт негладкості проводу; $m_2 = 0,8$ – коефіцієнт похмурої погоди.

Критична лінійна напруга може бути отримано з виразу:

$$U'_0 = 84,6 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D}{r}. \quad (2.3)$$

Втрати на корону відбуваються у разі рівності лінійної або фазної напруги лінії, відповідній критичній лінійній або фазній напрузі, та посилюються зі збільшенням дійсної напруги над критичною.

При розташуванні проводів у горизонтальній площині корона на крайніх проводах виникає з напругами на 6 % більшими, а на середньому проводі – на 4 % меншими від критичної, що визначаються за залежностями (2.2) і (2.3).

Втрати на корону у всіх трьох проводах з частотою змінного струму 50 Гц визначаються з виразу:

$$\Delta P_\kappa = \frac{0,18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U'_0)^2, \quad (2.4)$$

де U і U'_0 – відповідні лінійна та критична напруга.

Отже, розрахунок проводів лінії на корону зводиться до визначення критичної напруги та встановлення наявності або відсутності корони зі співвідношення:

- при $U < U'_0$ втрат на корону немає;
- при $U > U'_0$ втрати на корону є.

Після чого за формулою (2.1) розраховують величину втрат на корону.

Ефективним засобом зниження втрат на корону є застосування розщеплених проводів на два, три і навіть чотири проводи в кожній фазі.

Еквівалентний радіус розщепленого провода можна отримати із виразу:

$$r_{екв} = \sqrt[n]{r_0 a^{n-1}}, \quad (2.5)$$

де r_0 – радіус одиночного проводу; n – число проводів у розщепленій фазі; a – відстань між проводами в розщепленій фазі.

Велике практичне застосування має розрахунок корони для системи, що складається з двох коаксіальних циліндрів, тобто таких, що мають суміщені осі. За одних обставин, коли конструкція являє собою циліндричний конденсатор, завданням розрахунку є неприпустимість виникнення корони, за інших, наприклад в установках з очищення димових газів, – використовується саме ефект корони.

Приклади розв'язання завдань

Приклад 2.1. Для повітряної лінії електропередач трифазного струму з лінійною напругою 115 кВ використовуються проводи М-70 з розрахунковим радіусом 10,6 мм. Проводи розташовані рівностороннім трикутником з відстанню між ними 400 см. Коефіцієнт негладкості становить 0,85, відносна щільність повітря – 1, частота струму – 50 Гц. Визначити, у скільки разів збільшаться втрати потужності на корону в лінії під час похмурої погоди (коефіцієнт погоди 0,80) порівняно з втратами у разі ясної погоди.

Розв'язання. Для розрахунку скористаємося виразом (2.4):

для $m_2 = 1$

$$\Delta P_{\kappa} = \frac{0,18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U_0)^2;$$

для $m_2 = 0,8$

$$\Delta P'_{\kappa} = \frac{0,18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U'_0)^2.$$

Відносне збільшення втрат визначається зі співвідношення:

$$k = \frac{\Delta P'_{\kappa}}{\Delta P_{\kappa}} = \left(\frac{U - U'_0}{U - U_0} \right)^2 = \left(\frac{115 - 87}{115 - 109} \right)^2 = 21,8,$$

де $U = 115$ кВ діюч; U_0' і U_0 – критичні напруги, які визначаються з залежностей (2.3) для ясної та похмурої погоди:

$$U_0' = 84,6 m_0 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D}{r} = 84,6 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 0,53 \cdot \lg \frac{400}{10,6} = 87 \text{ кВ діюч};$$

$$U_0 = 84,6 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,53 \cdot \lg \frac{400}{10,6} = 109 \text{ кВ діюч}.$$

Приклад 2.2. Визначити втрати активної потужності на корону для лінії електропередач з напругою 154 кВ, якщо протяжність лінії 100 км, провід АС-50 з радіусом 0,48 см, провoda розташовані трикутником з відстанню між ними 500 см. Температура повітря становить 0 °С, тиск – 710 мм рт. ст., коефіцієнт негладкості – 0,85, погода ясна.

Розв'язання. Вплив атмосферних умов на корону вирахуємо за допомогою величини відносної щільності повітря:

$$\delta = \frac{0,386 p}{273 + t^{\circ}\text{C}} = \frac{0,386 \cdot 710}{273} = 1,02.$$

Використовуючи вираз (2.2), визначимо критичну фазну напругу:

$$U_0 = 21,2 \cdot 1,02 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,48 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{500}{0,48} = 61,0 \text{ кВ діюч}.$$

Робоча фазна напруга мережі:

$$U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{154}{1,73} = 89 \text{ кВ діюч}.$$

Оскільки робоча напруга виявилась більшою критичної, то корона буде відбуватися.

Для розрахунку втрат потужності на 1 км провoda лінії скористаємося формулою Піка (2.1):

$$\Delta P_k = \frac{241}{1,02} (50 + 25) \sqrt{\frac{0,48}{500}} (89 - 61,0)^2 \cdot 10^{-5} = 4,36 \text{ кВт/км}.$$

Втрата потужності на всі три провoda:

$$\Delta P_{k(3)} = 3 \Delta P_k = 13,1 \text{ кВт/км}.$$

Втрати потужності на всю лінію заданої довжини:

$$P_{\kappa} = \Delta P_{\kappa(3)} l = 13,1 \cdot 100 = 1310 \text{ кВт.}$$

Величина знайдених втрат показує, що застосування проводу АС-50 на цій лінії неприпустиме.

Завдання до теми

1. Для повітряної лінії електропередач трифазного струму з лінійною напругою U (кВ) використовуються проводи з розрахунковим радіусом r (мм). Проводи розташовані рівностороннім трикутником з відстанню між ними D (см). Коефіцієнт негладкості становить 0,85, відносна щільність повітря – 1, частота струму – 50 Гц. Визначити, у скільки разів збільшаться втрати потужності на корону в лінії під час похмурої погоди (коефіцієнт погоди 0,80) порівняно з втратами під час ясної погоди. Вихідні дані до завдання наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	U , кВ	r , мм	D , см
1	100	12	420
2	130	10	380
3	120	11,5	480
4	95	12,4	550
5	110	10,2	320
6	125	11,8	460
7	160	11,6	510
8	135	9,8	300
9	110	12,2	360
10	140	10,8	430

2. Визначити втрати активної потужності на корону для лінії електропередач з напругою U (кВ), якщо протяжність лінії l (км), провід з радіусом r (см), проводи розташовані трикутником з відстанню між ними D (см). Температура повітря становить 0 °С, тиск – 710 мм рт. ст., коефіцієнт негладкості – 0,85, погода ясна. Вихідні дані до завдання наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	U , кВ	l , км	r , см	D , см
1	160	150	0,68	450
2	180	120	0,52	350
3	190	90	0,74	400
4	200	80	0,8	480
5	115	200	0,42	370
6	145	130	0,4	420
7	185	140	0,5	530
8	165	160	0,7	550
9	175	110	0,72	600
10	120	95	0,84	410

Контрольні питання

1. Поясніть послідовність розрахунку втрат активної потужності на корону за узагальненими характеристиками та формулами.
2. Перерахуйте основні технічні способи, що застосовуються для обмеження втрат потужності на корону.
3. У чому полягає позитивна та негативна роль коронного розряду в електроустановках?

Література: [1, с. 71–83; 2, с 107–132; 4, с. 140–162].

Практична робота № 3

Тема. Електрична міцність твердих діелектриків

Мета: набуття навичок розрахунку напруги розрядів ковзання і пробивної напруги твердих діелектриків.

Короткі теоретичні відомості

Тверда високовольтна ізоляція, що розділяє струмопровідні частини, має обмежені розміри й укладена в ізолювальне середовище, яким є повітря або трансформаторне масло.

Під дією різниці потенціалів між провідними частинами в усіх ізолювальних середовищах установлюється електричне поле. Вектор напруженості цього електричного поля в кожній точці можна умовно розкласти відносно поверхні розділу на складові E_n і E_t . Перший з цих векторів спрямований перпендикулярно до роздільної поверхні, а другий – по дотичній.

Використовуючи аналогію із заломленням світлових променів, можна довести, що з переходом вектора напруженості з одного середовища в інше він підпорядковується закону заломлення.

Якщо межа розділу двох ізолювальних середовищ не розміщена нормально до силових ліній електричного поля, то вектор напруженості електричного поля зазнає з переходом у суміжне середовище заломлення так, що відношення кута падіння α_1 до кута заломлення α_2 дорівнює відношенню відносних діелектричних проникностей дотичних середовищ. При цьому тангенціальні складові заломлюючого і зламаною векторів рівні між собою $E_{1t} = E_{2t}$, а нормальні складові підпорядковуються співвідношенню:

$$\frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_2'} = \frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2}. \quad (3.1)$$

Нормальна складова вектора напруженості електричного поля є причиною наскрізного пробою ізоляції, а тангенціальна – причиною розряду вздовж поверхні. Завершена форма останнього називається перекриттям ізоляції. Перекриття не призводить до руйнування ізоляції й тільки короткочасно порушує її ізолювальні властивості. Достатня для перекриття напруженість електричного поля залежить від форми та стану поверхні діелектрика, ступеня її забрудненості, зволоження та нерівномірності електричного поля.

Для перекриття ізоляції в умовах нерівномірного поля величина середньої напруженості електричного поля 0,1–0,2 кВ/мм може виявитися достатньою, а в рівномірному – 0,6–0,8 кВ/мм і більше. Якщо перекриття відбувається вздовж поверхні l , то напруга перекриття визначиться залежністю

$$U_{nep} = \int_0^l E_t dt = E_{t(cp)} l. \quad (3.2)$$

За досить великих відстаней між електродами або за наявності штучно розвиненої поверхні, що ускладнює перекриття, розряд уздовж поверхні може прийняти стійку форму розряду ковзання.

Розряд ковзання у цих випадках передусь перекриттю, супроводжується короною у електродів і має вигляд іскрових пагонів, що залишають на поверхні органічної ізоляції сліди у вигляді випалених борозен.

Дослідженнями встановлено, що поверхня твердого діелектрика, що покрита адсорбованими негативними іонами, є відносно іонної хмари своєрідним обкладанням конденсатора, що дозволило ввести поняття питомої поверхневої ємності C_0 Ф/см².

У результаті багатьох досліджень установлено, що напруга, за якої починається розряд ковзання, залежить від величини цієї ємності:

$$U_{ск} = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{(C_{02})^{0,44}}, \quad (3.3)$$

де C_0 – поверхнева питома ємність, яка визначається для циліндричних тіл залежністю:

$$C_0 = \frac{C}{2\pi r l} = \frac{\varepsilon 2\pi l}{2\pi r_2 l \ln \frac{r}{r_1}} = \frac{\varepsilon}{r_2 \ln \frac{r}{r_1}} = \frac{\varepsilon' 7,7 \cdot 10^{-14}}{D \lg \frac{D}{d}}, \quad (3.4)$$

де D і d – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри циліндричного ізолятора, см; ε – відносна діелектрична проникність.

Під пробоєм твердого діелектрика розуміють місцеве руйнування ізоляції, що відбувається під дією сил електричного поля.

На відміну від пробою рідкого або газового середовища, у яких порушення ізолювальних властивостей є тимчасовим станом, у разі пробою твердої ізоляції провідний канал у ній зберігається і після зняття напруги.

Численні досліди показують, що в твердій ізоляції можуть бути дві форми пробою: електричний і тепловий.

Електричний пробій настає в той момент, коли нормальна складова вектора напруженості електричного поля досягає граничного для цієї ізоляції значення.

Ознаками електричного пробою є:

- сталість пробивної напруги незалежно від температури діелектрика;
- відсутність видимого нагрівання ізоляції дугою в місці пробою у разі швидкого зняття напруги;
- мінімальна тривалість часу, необхідна для формування пробою;
- залежність величини пробивної напруги від форми електродів, тобто. від ступеня неоднорідності поля;
- незалежність амплітуди пробивної напруги від частоти і роду струму.

Зі зміною товщини діелектрика, що знаходиться в нерівномірному електричному полі, величина пробивної напруги визначається з квадратичної залежності:

$$U_{np(2)} = U_{np(1)} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}, \quad (3.5)$$

де $U_{np(1)}$ – пробивна напруга, визначена дослідним шляхом, для зразка довільної товщини a_1 ; $U_{np(2)}$ – пробивна напруга для зразка товщиною a_2 .

Напруга електричного пробою може бути розрахована, з огляду на табличні значення пробивної напруженості, за формулами для визначення напруженості електричного поля в конденсаторах найпростіших конструкцій. Наприклад, для конденсатора циліндричної конструкції справедлива залежність:

$$U_{np} = E_{np} r 2,3 \lg \frac{R}{r}, \quad (3.6)$$

де E_{np} – розрахункове значення середньої пробивної напруженості основних ізоляційних матеріалів у рівномірному електричному полі знаходиться згідно із довідковими даними.

Якщо твердий діелектрик піддається довготривалому впливу напруги, величина якої недостатня для електричного пробою, але близька до неї (85–90 %), то в ньому під дією струмів наскрізної провідності буде виділятися

тепло, відведення якого ускладнено. Під дією місцевого розігрівання структура діелектрика змінюється, провідність збільшується і прогресуюче нагрівання спричиняє пропалювання або оплавлення ізоляції. Пробій такої форми називається тепловим пробоем.

Приклади розв'язання завдань

Приклад 3.1. Циліндричний прохідний маслонаповнений вхід з порцеляною оболонкою має радіус струмопровідного стрижня 2 см, радіус фланця 6 см, товщину стінки порцелянової оболонки 2,5 см. Визначити напругу розрядів, що ковзають, якщо відносна діелектрична проникність порцеляни 5,7, а масла 2,35.

Розв'язання. За виразом (3.4) визначимо питомі поверхневі ємності зовнішнього порцелянового та масляного шарів:

$$C_{01} = \frac{\epsilon'_l \epsilon_0}{r_2 \cdot 2,3 \lg \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2,35 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{3,5 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{6}{2}} = 10,6 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}^2;$$

$$C_{02} = \frac{5,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{6 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{6}{3,5}} = 15,6 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}^2.$$

Знаючи ємність зовнішнього шару, визначимо напругу, за якої виникають розряди ковзання,

$$U_{ск} = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{(C_{02})^{0,44}} = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{(15,6 \cdot 10^{-14})^{0,44}} = 60,7 \text{ кВ.}$$

Використовуючи значення ємностей шарів, знайдемо співвідношення між їх напругами та загальну напругу, необхідну для створення розрядів ковзання:

$$U = U_1 + U_2;$$

$$U_1 = \frac{U_2 C_{02}}{C_{01}};$$

$$U = U_2 \left(1 + \frac{C_{02}}{C_{01}} \right) = 60,7 \left(1 + \frac{15,6}{10,6} \right) = 150 \text{ кВ.}$$

Приклад 3.2. Визначити пробивну напругу ізоляції одножильного кабелю з радіусом жили 0,9 см і товщиною поясної ізоляції 1,1 см, якщо пробивна напруженість ізоляції за довідниковими даними дорівнює 80 кВ/мм.

Розв'язання. Одножильний кабель можна розглядати як циліндричний конденсатор, для якого зв'язок між прикладеною напругою і напруженістю електричного поля виражається залежністю:

$$U_{np} = E_{np} r \cdot 2,3 \lg \frac{R}{r}.$$

За заданою товщиною ізоляції визначимо зовнішній радіус:

$$R = r + a = 0,9 + 1,1 = 2 \text{ см.}$$

Використовуючи задану пробивну напруженість електричного поля та геометричні розміри, визначимо шукану напругу

$$U_{np} = 800 \cdot 0,9 \cdot 2,3 \lg \frac{2}{0,9} = 576 \text{ кВ.}$$

Завдання до теми

1. Прохідний циліндричний ізолятор має зовнішній радіус бакелітової втулки r_2 (см), а радіус струмопровідного стрижня r_1 (см). Визначити напругу розрядів ковзання по зовнішній поверхні бакеліту, якщо його відносна діелектрична проникність дорівнює 4.

Вихідні дані до завдання наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	r_2 , см	r_1 , см
1	0,8	0,4
2	0,6	0,2
3	1,1	0,8
4	1,0	0,5
5	1,2	0,7
6	0,75	0,35
7	0,95	0,65

Продовження табл. 3.1

8	1,15	0,8
9	0,85	0,52
10	1,3	0,64

2. Визначити пробивну напругу ізоляції одножильного кабелю з радіусом жили r (см) та товщиною поясної ізоляції a (см), якщо пробивна напруженість ізоляції за довідниковими даними дорівнює E_{np} (кВ/мм).

Вихідні дані до завдання наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	r , см	a , см	E_{np} , кВ/мм
1	0,7	0,9	75
2	0,8	1,0	78
3	1,15	1,4	80
4	1,2	1,5	79
5	0,95	1,2	76
6	0,85	0,95	74
7	1,05	1,3	72
8	1,25	1,45	76
9	0,75	0,9	70
10	1,1	1,35	71

Контрольні питання

1. Поясніть різницю в поняттях: пробій, перекриття та розряд ковзання.
2. Чому в газовому та рідкому діелектриках після пробою відновлюються ізолювальні властивості, а в твердому – ні?
3. Чому величина напруги теплового пробою залежить від частоти і температури діелектрика?

Література: [1, с. 83–94; 3, с. 147–153; 5, с. 178–187].

Практична робота № 4

Тема. Розрахунок параметрів генератора імпульсних напруг і струмів

Мета: набуття навичок розрахунку параметрів генераторів імпульсних напруг і струмів.

Короткі теоретичні відомості

Генератором імпульсних напруг (ГІН) називається пристрій, що слугує для створення аперіодичних імпульсів напруги тривалістю в кілька мікросекунд.

Простота пристрою, надійність роботи та можливість отримання надвисоких напруг для випробування ізоляції, зняття характеристик розрядників, дослідження зон захисту блискавковідводів на моделях і т. д. – зумовило широке поширення ГІН у заводських і дослідницьких лабораторіях.

Амплітудне значення напруг, створюваних ГІН типових конструкцій, знаходиться в межах від 500 до 5000 кВ. Основними елементами ГІН є конденсатори, що заряджаються в паралельному, а розряджаються в послідовному з'єднанні.

Під коефіцієнтом використання ГІН розуміють відношення максимальної напруги на об'єкті $U_{2\max}$ до теоретично можливої напруги, яка рівна сумарній напрузі всіх конденсаторів у момент закінчення їх заряду:

$$U_0 = nU, \quad (4.1)$$

де n – кількість конденсаторів.

Наступні залежності (4.2) і (4.3) пов'язують між собою чотири постійні величини контуру:

– C_0 – еквівалентну ємність конденсаторів усіх каскадів у разі їх послідовного з'єднання. Цю ємність називають ємністю в ударі, зазвичай вона має величину $20 \div 50 \cdot 10^{-9}$ Ф;

– $C_{об}$ – ємність розрядної частини схеми, що складається з ємності об'єкта випробування $C_{об}$ і додаткової ємності розрядного конденсатора C_p ;

– R_1 – сумарний опір демпфірувальних опорів, сполучних порогів і дуг між іскровими проміжками;

– R_p – розрядний високоомний опір:

$$\tau_\phi = \frac{\ln 7T_2}{0,6} = 3,24C_{об}R_1, \quad (4.2)$$

де T_2 – постійна часу в момент формування фронту імпульсу,

$$\tau_n = T_1 \ln 2 \approx 0,7C_0R_p, \quad (4.3)$$

де T_1 – постійна часу в момент формування хвостової частини імпульсу.

Із виразу (4.3) отримаємо зв'язок між тривалістю хвилі та параметрами ГІН.

Напруга хвилі, створюваної ГІН, зазвичай на 20 – 30 % менша сумарної напруги всіх послідовно з'єднаних конденсаторів. Це пояснюється тим, що частина накопиченої енергії витрачається на підзаряд конденсаторів, підключених на виході схеми, а частина переходить у втрати активної потужності в опорах.

Зазначені втрати враховуються коефіцієнтом використання β , що залежить від співвідношень між величинами C_0 , $C_{об}$, R_1 і R_p :

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{C_{об}}{C_0} + \frac{R_1}{R_p}}. \quad (4.4)$$

Для отримання коефіцієнта використання, рівного 0,75 – 0,85, рекомендується вибрати величини ємностей $C_0 \geq 10 C_{об}$, а опір – $R_p \geq 10 R_1$.

Для розрахунку параметрів ГІН досить задати лише ємність об'єкта випробувань, яка в сукупності з ємністю розрядного конденсатора C_p утворює ємність $C_{об}$.

Генератором імпульсних струмів (ГІС) називається пристрій, що слугує для створення струмів 30 – 200 кА короткочасної дії. Можливість отримання великих струмів у розрядній частині схеми обмежується індуктивністю контуру, яка повинна бути по змозі мінімальною, що і забезпечується компактністю конструкції.

У тому випадку, коли для досліджень, наприклад для імітації дії грозового розряду, необхідно одержати великий струм при надвисокій напрузі, можна застосувати комбіновану схему, що складається з паралельно ввімкнених ГІН і ГІС. При цьому ГІН слугує для пробою ізоляції та створення шляху розряду, а ГІС – для створення великого струму в каналі.

Розрахунок ГІС проводиться за схемою заміщення, що складається з послідовно з'єднаних конденсаторів, індуктивного й активного опорів контуру і об'єкта випробування.

З теоретичних основ електротехніки відомо, що розряд конденсаторів у такій схемі має аперіодический характер тільки в тому випадку, якщо витримується співвідношення:

$$R \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}},$$

де R – повний активний опір розрядної схеми, що містить додатковий опір, опір об'єкта і шунта, напруга з якого подається на осцилограф.

За умови

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.5)$$

амплітуда розрядного струму визначається залежністю

$$I = 0,736 \frac{U}{R}. \quad (4.6)$$

Максимум струму в колі настає через час

$$t = \sqrt{LC}. \quad (4.7)$$

Приклади розв'язання завдань

Приклад 4.1. Розрахувати параметри генератора імпульсних напруг, що складається з імпульсних конденсаторів типу ИМ-60-0,03. Номінальна напруга кожного конденсатора 60 кВ, ємність 0,03 мкФ. Для збільшення ємності конденсатори з'єднуються попарно паралельно. ГІН повинен створювати стандартну хвилю напруги з амплітудою 1000 кВ. Об'єкт випробування з ємністю 250 пФ має додаткову ємність 250 пФ.

Розв'язання. Підсумовуючи ємності об'єкта і додаткову ємність, увімкнену паралельно об'єкту, отримаємо загальну ємність вихідної частини схеми

$$C_{об} = C_{он} + C_p = 250 + 250 = 500 \text{ пФ} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ мкФ}.$$

Прийнявши значення для коефіцієнта використання ГІН $\beta = 0,8$, визначимо потрібне число конденсаторів зі співвідношення

$$U_0 = U_{1,5/40} = nU\beta,$$

звідки

$$n = \frac{1000}{60 \cdot 0,8} = 21 \text{ шт.}$$

За паспортної ємності конденсаторів з урахуванням їх попарного з'єднання знайдемо ємність схеми в ударі

$$C_0 = \frac{2C}{n} = \frac{0,06}{21} = 0,0028 \text{ мкФ}.$$

Відповідно до співвідношенням (4.3) визначимо величину розрядного опору

$$R_p = \frac{\tau_u}{0,7C_0} = \frac{40}{0,7 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3}} = 20,4 \text{ кОм}.$$

Використовуючи співвідношення (4.2), знайдемо величину сумарного демпфірувального опору, розподіленого за каскадами,

$$R_1 = \frac{\tau_\phi}{3,24C_{об}} = \frac{1,5}{3,24 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 930 \text{ Ом}.$$

За отриманими даними зі співвідношення (4.4) визначимо дійсну величину коефіцієнта використання ГІН

$$\beta = \eta = \frac{1}{1 + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{2,8 \cdot 10^{-3}} + \frac{930}{20,4 \cdot 10^3}} = 0,82.$$

Знайдений коефіцієнт відповідає раніше прийнятому.

Приклад 4.2. Генератор імпульсних струмів складається з конденсаторів типу ІМ-50-3. Кожен з конденсаторів має ємність 3 мкФ і напругу 50 кВ. Для збільшення напруги конденсатори з'єднуються попарно послідовно й утворюють 10 паралельних гілок.

Індуктивність розрядного контуру 45 мкГн. Визначити критичний активний опір схеми, за якого розряд має аперіодичний характер, і амплітуду розрядного струму.

Розв'язання. Використовуючи вираз (4.5), визначимо критичний опір

$$R = 2 \sqrt{\frac{45}{10 \cdot \frac{3}{2}}} = 3,46 \text{ Ом.}$$

Відповідно до залежності (4.6) отримаємо значення розрядного струму ГІТ:

$$I = 0,736 \frac{U}{R} = 0,736 \frac{100}{3,46} = 21,3 \text{ кА.}$$

Амплітудне значення струму в колі відбувається через час:

$$t = \sqrt{LC_0} = \sqrt{45 \cdot 15} = 26 \text{ мкс.}$$

Завдання до теми

1. Розрахувати параметри генератора імпульсних напруг, що складається з імпульсних конденсаторів. Номінальна напруга кожного конденсатора 60 кВ, ємність 0,03 мкФ. Для збільшення ємності конденсатори з'єднуються попарно паралельно. ГІН повинен створювати стандартну хвилю напруги з амплітудою U . Об'єкт випробування з ємністю $C_{он}$ має додаткову ємність 250 пФ.

Вихідні дані до завдання наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	U , кВ	$C_{он}$, пФ	C_p , пФ
1	900	270	270
2	1200	260	280
3	1500	280	250
4	1400	300	290
5	800	220	220
6	1100	230	210
7	1300	240	240

Продовження табл. 4.1

8	1600	310	330
9	950	200	210
10	1550	210	220

2. Генератор імпульсних струмів складається з конденсаторів. Кожен з конденсаторів має ємність C і напругу U кВ. Для збільшення напруги конденсатори з'єднуються попарно послідовно й утворюють n паралельних гілок.

Індуктивність розрядного контуру L . Визначити критичний активний опір схеми, за якого розряд має аперіодичний характер, і амплітуду розрядного струму.

Вихідні дані до завдання наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	C , мкФ	U , кВ	L , мкГн	n
1	5	60	55	8
2	4	50	40	12
3	6	70	65	10
4	8	100	95	14
5	10	80	75	12
6	7	60	55	8
7	12	100	90	10
8	2	30	25	14
9	9	80	70	12
10	4	60	50	8

Контрольні питання

1. Перерахуйте основні елементи схем ГІН і ГІС, їх призначення та принципові особливості.

2. Які сфери застосування установок ГІН і ГІС?

3. Якими залежностями пов'язані параметри ГІН з параметрами створюваної хвилі?

Література: [1, с. 98–108; 2, с. 167–174; 6, с. 87–104].

Практична робота № 5

Тема. Атмосферні перенапруги та захисні функції блискавковідводів

Мета: набуття навичок розрахунку та визначення місця розташування блискавковідводів.

Короткі теоретичні відомості

Атмосферна перенапруга, тобто короткочасне підвищення напруги в електроустановці, виникає під час грозових розрядів. Розрізняють два види атмосферних перенапруг: перенапруга прямого удару, що виникає під час безпосереднього ураження блискавкою струмопровідних частин, та індуктивна, що виникає під час грозового розряду поблизу установки або під час ураження розрядом її частин, що не перебувають під напругою.

Атмосферні перенапруги можуть досягти декількох мільйонів вольт, тобто рівнів, які без додаткових засобів захисту промислова ізоляція не може витримати.

Заходи щодо захисту лінійної та апаратної ізоляцій від атмосферних перенапруг передбачають використання блискавковідводів, які, орієнтуючи розряд на себе, відводять його від струмопровідних частин, а також установлення вентильних або трубчастих розрядників та іскрових проміжків, що відводять заряд у землю.

У тому разі, коли блискавка вражає провід або трос у середині прольоту, що практично так само ймовірно, як і ураження опори, до схеми розряду додатково вводиться хвильовий опір проводу або троса. З урахуванням імпульсної корони цей опір можна прийняти рівним 300 – 350 Ом. За такої схеми розряду струм блискавки слід уважати вдвічі меншим порівняно зі струмом, прийнятим для розрядів у добре заземлені об'єкти. Унаслідок розряду

по проводу або тросу в обидва боки буде поширюватиметься хвиля перенапруги прямого удару з амплітудою:

$$U = \frac{I_m Z_k}{2}, \quad (5.1)$$

де I_m – струм блискавки; $\frac{Z_k}{2}$ – половинне значення хвильового опору проводу з урахуванням імпульсної корони.

Важливою характеристикою грозового розряду, яка використовується у розрахунках грозостійкості установки, є крутизна фронту імпульсу струму блискавки (кА/мксек), тобто швидкість його наростання.

Розряд блискавки складається здебільшого із серії імпульсів, що слідують один за одним із загальною тривалістю десяти долі секунди, у той час як кожен з імпульсів має тривалість у десятки мікросекунд.

Індуктивні перенапруги утворюються на проводах ліній під час уражень блискавкою опори, троса або розрядів у землю поблизу лінії. Індуктивні перенапруги мають амплітуду, що не перевищує 700 кВ, проте здебільшого їх величину приймають рівною 100 кВ, що значно менше величини перенапруг прямого удару блискавки. Хвиля індуктивної перенапруги характеризується великою тривалістю 100 мксек і пологим фронтом.

Для захисту протяжних об'єктів, наприклад ліній електропередач, від перенапруг прямого удару блискавок використовують тросові блискавковідводи, а для захисту споруд – стрижневі блискавковідводи.

Стрижневим блискавковідводом називається конструкція у вигляді вертикально встановленого решітчастого шпилья, труби або стрижня.

Захисна властивість стрижневих блискавковідводів полягає в тому, що вони орієнтують на себе грозовий розряд, що формується. Розряд влучає обов'язково у вершину громовідводу, якщо він формується в деякій ділянці, розташованій над блискавковідводом.

Для розрахунку радіуса захисту в будь-якій точці захисної зони, зокрема і на рівні висоти об'єкта, що захищається h_x , використовується вираз:

$$r_x = \frac{1,6h_a}{1 + \frac{h_x}{h}} p, \quad (5.2)$$

де h_a – активна частина блискавковідводу, що відповідає його перевищенню над висотою об’єкта, що захищається h_x ; h – висота блискавковідводу; p – поправочний коефіцієнт, що дорівнює 1 для блискавковідводів висотою менше 30 м і рівний $\frac{5,5}{\sqrt{h}}$ для вищих блискавковідводів.

Потенціал на блискавковідводі в момент розряду визначається як:

$$U = I_m R_{з.и} + L_0 a h_x, \quad (5.3)$$

де $R_{з.и}$ – імпульсний опір заземлення блискавковідводу 5–25 Ом; I_m – струм блискавки в добре заземленому об’єкті; a – крутизна фронту хвилі струму; L_0 – питома індуктивність громовідводу; h_x – точка блискавковідводу на висоті об’єкта.

Для розрахунку мінімально допустимого наближення об’єкта до блискавковідводу можна виходити із залежності:

$$S = \frac{U}{E_\epsilon}, \quad (5.4)$$

де E_ϵ – допустима імпульсна напруженість електричного поля в повітрі, яка приймається 500 кВ/м.

Рекомендована відстань до блискавковідводу

$$S_\epsilon \geq 0,3R_{з.и} + 0,1h_x. \quad (5.5)$$

Ця залежність справедлива зі струмом блискавки, що дорівнює 150 кА, з крутизою струму 32 кА/мксек та індуктивністю громовідводу 1,5 мкГн/м.

Незалежно від результатів розрахунку, відстань між об’єктом і блискавковідводом не повинна бути меншою 5 м.

Приклади розв’язання завдань

Приклад 5.1. Стрижневий блискавковідвід призначений для захисту будівлі підстанції шириною 10 м, довжиною 20 м, висотою 6 м.

Визначити висоту та місце розташування блискавковідводу з урахуванням його допустимого наближення до об’єкта захисту, якщо

відповідно до вказівок щодо захисту від перенапруг струм блискавки 150 кА, індуктивність блискавковідводу 1,5 мкГн/м та усереднена крутизна фронту косокутної хвилі струму 32 кА/мксек, опір заземлення блискавковідводу в імпульсному режимі 20 Ом.

Розв'язання. Розрахунок висоти блискавковідводу проводиться так, щоб з одного боку його загальна висота і радіус захисту на висоті об'єкта були найменшими, а з іншого боку усувалась імовірність вторинних перекриттів з блискавковідводу на об'єкт.

Схему установки блискавковідводу приймемо відповідно до рис. 5.1.

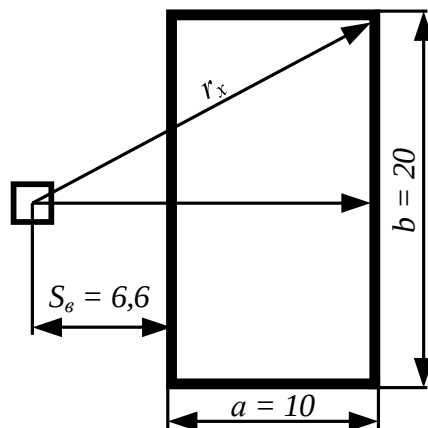


Рисунок 5.1 – Схема установки блискавковідводу

За формулою (5.3) визначимо потенціал на блискавковідвід у момент розряду на рівні висоти об'єкта:

$$U = I_m R_{з.и} + L_0 a h_x = 150 \cdot 20 + 1,5 \cdot 32 \cdot 6 = 3288 \text{ кВ.}$$

Прийнявши рекомендовану допустиму імпульсну напруженість за повітрям $E_g = 500$ кВ/м, визначимо віддалення блискавковідводу від об'єкта з виразу (5.4):

$$S_g = \frac{U}{E_g} = \frac{3288}{500} = 6,6 \text{ м.}$$

Цю саму відстань визначимо за виразом (5.5):

$$S_g \geq 0,3 R_{з.и} + 0,1 h_x = 0,3 \cdot 20 + 0,1 \cdot 6 = 6,6 \text{ м.}$$

Та відстань, яка виявилася найбільшою, приймається за розрахункову.

Радіус захисної зони визначиться виразом:

$$r_x = \sqrt{(S_g + a)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \sqrt{16,6^2 + 10^2} = 19,35 \text{ м.}$$

Припустивши, що висота блискавковідводу буде менше 30 м, і використовуючи залежність (5.2), де $p = 1$, маємо:

$$r_x = \frac{1,6(h - h_x)h}{h + h_x} = 19,35 \text{ м.}$$

Звідки, прийнявши $h_x = 6$ м,

$$h^2 - 18,1h - 73 = 0;$$

$$h = 9 \pm \sqrt{81 + 73} = 21,4 \text{ м.}$$

Приклад 5.2. Блискавка вражає не захищений тросом провід лінії. Визначити амплітуду напруги, що діє на гірлянді ізоляторів опори, найближчої до місця удару блискавки. Хвильовий опір каналу блискавки становить 300 Ом, хвильовий опір проводу з урахуванням імпульсної корони – 350 Ом. Струм блискавки (статистичний) – 100 кА.

Розв'язання. Амплітуду хвилі перенапруги, що поширюється по проводу в обидва боки і досягає гірлянди, отримаємо із залежності (5.1), вважаючи, що під час удару в провід діючий струм удвічі менший статистичного, а еквівалентний хвильовий опір двох проводів удвічі менший за опір одного проводу:

$$U = \frac{I_m}{2} \frac{z_k}{2} = \frac{100 \cdot 350}{4} = 8750 \text{ кВ.}$$

Практично такий самий результат можна отримати, використовуючи схему заміщення за Петерсеном, що містить хвильовий опір каналу блискавки й еквівалентний опір двох променів проводу:

$$\begin{aligned} U_{пр} = I'_m z_{екв} &= \frac{2U_0 z_{екв}}{z_0 + z_{екв}} = \frac{2I_m z_0 z_k}{2 \cdot 2 \left(z_0 + \frac{z_k}{2} \right)} = \frac{I_m z_0 z_k}{2z_0 + z_k} = \frac{100 \cdot 300 \cdot 350}{600 + 350} = \\ &= \frac{300 \cdot 350}{9,5} = 11100 \text{ кВ,} \end{aligned}$$

де

$$U_0 = \frac{I_m}{2} z_0 = 50 \cdot 300 = 15000 \text{ кВ}$$

напруга падаючої хвилі.

Завдання до теми

1. Стрижневий блискавковідвід призначений для захисту будівлі підстанції шириною Ш, довжиною Д, висотою В.

Визначити висоту та місце розташування блискавковідводу з урахуванням його допустимого наближення до об'єкта захисту, якщо відповідно до вказівок щодо захисту від перенапруг струм блискавки I_m , індуктивність блискавковідводу L_0 й усереднена крутизна фронту косокутної хвилі струму 32 кА/мксек, опір заземлення блискавковідводу в імпульсному режимі $R_{з.и}$. Вихідні дані до завдання наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	Ш×Д×В, м	I_m , кА	L_0 , мкГн/м	$R_{з.и}$, Ом
1	8×25×7	100	1,8	22
2	12×28×5	120	1,4	24
3	9×18×6	80	1,2	20
4	10×22×8	150	1,6	18
5	14×26×10	140	1,5	26
6	16×30×6	130	1,3	22
7	11×32×7	120	1,4	24
8	15×15×8	100	1,8	20
9	7×10×9	140	1,5	18
10	12×14×10	110	1,2	26

2. Блискавка вражає не захищений тросом провід лінії. Визначити амплітуду напруги, що діє на гірлянді ізоляторів опори, найближчу до місця удару блискавки. Хвильовий опір каналу блискавки z_0 , хвильовий опір проводу з урахуванням імпульсної корони z_k . Струм блискавки (статистичний) I_m . Вихідні дані до завдання наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	I_m , кА	z_0 , Ом	z_k , Ом
1	110	280	320
2	80	320	360
3	120	350	380
4	140	250	300
5	150	340	370
6	110	380	400
7	80	280	300
8	120	320	350
9	140	350	360
10	150	250	280

Контрольні питання

1. Перерахувати засоби захисту електроустановок від атмосферних перенапруг.
2. Які захисні характеристики стрижневого блискавковідводу?
3. Пояснити причину виникнення індуктивних атмосферних перенапруг і їх дію на фазну та лінійну ізоляції.

Література: [1, с. 135–148; 5, с. 238–250; 7, с. 133–147].

Практична робота № 6

Тема. Розрахунок повітряних ліній електропередач на стійкість до дії грозових розрядів

Мета: набуття навичок розрахунку повітряних ліній електропередач на стійкість до дії грозових розрядів.

Короткі теоретичні відомості

Грозостійкість повітряних ліній електропередач характеризує здатність лінійної ізоляції протистояти атмосферним перенапругам.

Можливість перекриття ізоляції визначається зіставленням вольтсекундної характеристики хвилі атмосферної перенапруги, що діє на ізоляцію, та відповідної характеристики ізоляції тієї ділянки, по якій може відбуватися заряд.

Для оцінювання ефективності грозозахисних пристроїв вводяться дві технічні характеристики: захисний рівень лінії та питоме число відключень лінії.

Під час розрахунків показників грозостійкості ліній за заданими конструктивними даними визначаються розміри тих ділянок лінійної ізоляції, уздовж яких очікується імпульсний розряд. До них належать: а) відстані між проводами, тросами та землею; б) довжини гірлянд, зібраних з порцелянових або скляних ізоляторів; в) довжини ділянок дерев'яних траверс між осями гірлянд.

Для порцелянових або скляних гірлянд, зібраних з ізоляторів типу П-4,5 або ПМ-4,5, імпульсна або 50-відсоткова міцність приймається із залежностей рис. 6.1.

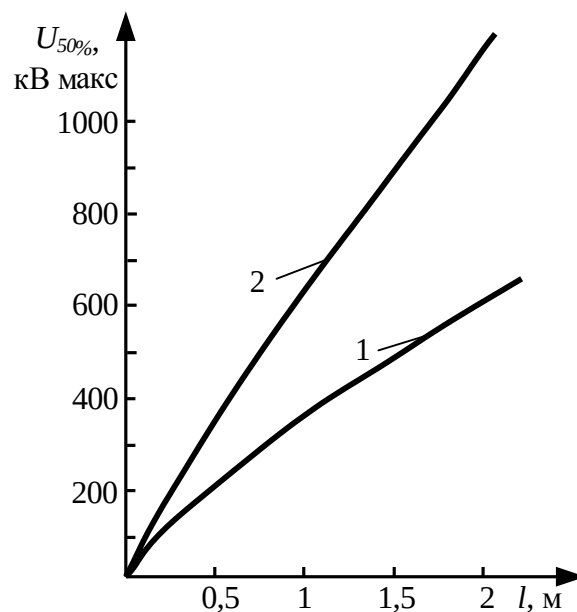


Рисунок 6.1 – Імпульсна 50-розрядна напруга ізоляторів залежно від довжини гірлянди: 1 – ізолятори типу ПМ-4,5; 2 – ізолятори типу П-4,5

Під час ураження блискавкою елементів повітряних ліній електропередач перенапруга, що виникає, складається з індуктивної напруги на проводах і з

потенціалу на ураженому елементі, обумовленому протіканням по ньому струму прямого розряду. У всіх випадках полярність індуктивної напруги протилежна полярності перенапруги прямого розряду.

Індуктивна напруга, що виникає у всіх трьох проводах під час розряду блискавки в заземлену опору без троса визначається як:

$$U_{ind} = a' h_{cp}, \quad (6.1)$$

де a' – коефіцієнт, що залежить від амплітуди струму блискавки та приймається 20 кВ/м для струмів блискавки в 100 кА і менше; h_{cp} – середня висота підвісу проводу над землею.

За наявності троса розряд у вершину опори або в тросовий проліт супроводжується протіканням розрядного струму по тросу. При цьому виникає імпульсна корона, що значно збільшує геометричний коефіцієнт зв'язку і в розрахунках враховується введенням поправочного коефіцієнта k_1 .

Під час розряду блискавки в опору, що має один трос, поправочний коефіцієнт на корону з напругами 35, 110 і 220 кВ приймають 1,2, 1,3 і 1,4 за наявності двох тросів і розряді у вершину опори – 1,1, 1,2 і 1,3. Під час розряду блискавки в середину тросового прольоту поправочний коефіцієнт k_1 може бути прийнятий 1,5, незалежно від числа тросів.

Під час ураження блискавкою опори, що несе заземлений трос, струм розтікається не тільки по тілу опори, а й по тросах у суміжних прольотах.

Для полегшення розрахунків рекомендують користуватися залежностями (рис. 6.2), за допомогою яких за добутком заданого струму блискавки (статистичного) на відомий опір заземлення опори в імпульсному режимі, знаходять потенціал у вершині опори.

За допомогою залежностей, зображених на рис. 6.2, за добутком заданого струму блискавки (статистичного) та відомого опору заземлення опори в імпульсному режимі, знаходять потенціал у вершині опори.

Під час розрахунку грозостійкості лінії повинна бути задана величина розрядної напруги гірлянди ізоляторів, або 50-відсоткова розрядна напруга ізоляції, яка прирівнюється до напруги, що діє на ізоляцію:

$$U_{50\%} = (1 - k)(I_{оп.мах}R_{з.и} + U_{инд.мах}), \quad (6.2)$$

де $U_{инд.мах}$ – індуктивна напруга на проводі, що визначається із залежності (6.1) для максимального струму; k – коефіцієнт зв'язку з урахуванням корони; $I_{оп.мах}$ – максимум струму в опорі; $R_{з.и}$ – імпульсний опір заземлення.

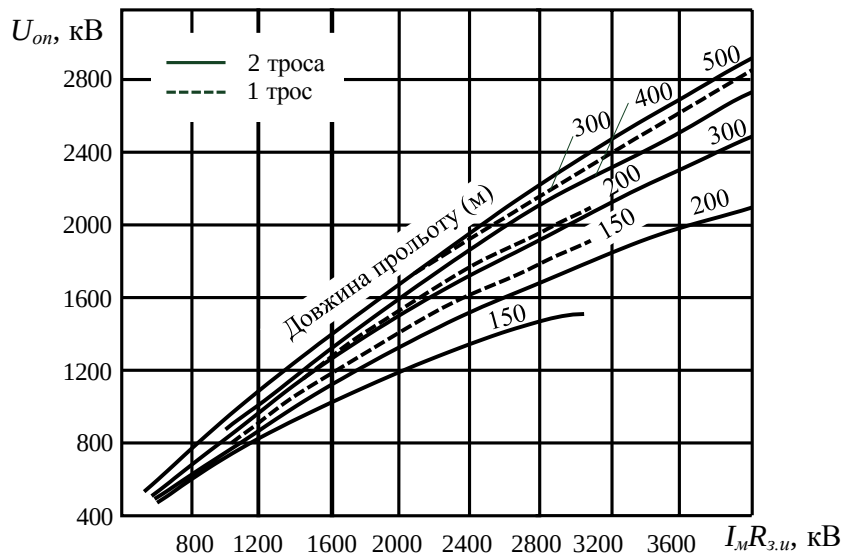


Рисунок 6.2 – Криві для визначення захисного рівня лінії під час удару у вершину опори

Із залежності (6.2) можна через задані величини виразити потенціал у вершині опори:

$$U_{он} = \frac{U_{50\%}}{1 - k} - U_{инд.мах}. \quad (6.3)$$

Отримана величина являє собою ординату однієї із залежностей (рис. 6.2), за допомогою якої можна знайти $I_m R_{з.и}$. Звідси за заданою величиною опору заземлення визначається струм блискавки або захисний рівень лінії.

Пряме ураження грозовим розрядом проводу в прольоті можливе або за відсутності тросового захисту, або у разі прориву блискавки повз тросів. Досвід показує, що у разі удару в провід або трос, струми блискавки, обмежені хвильовим опором проводу, що дорівнює з урахуванням імпульсної корони 300 – 350 Ом, знижують свою величину приблизно вдвічі порівняно зі струмами розряду в добре заземлений об'єкт.

Величина струму, що спричиняє імпульсне перекриття, тобто захисний рівень лінії визначається за виразом:

$$I_m = \frac{4U_{50\%}}{z_k(1-k)}. \quad (6.4)$$

Приклади розв'язання завдань

Приклад 6.1. Дволанцюгова лінія електропередачі напругою 110 кВ на металевих опорах з розташуванням проводів за схемою «зворотна ялинка» і прольотом 300 м захищена двома тросами. Розряд блискавки зі струмом 125 кА відбувається у вершину опори. Імпульсний опір заземлення опори дорівнює 6 Ом. Гірлянди зібрані з ізоляторів 7хП-4,5. Визначити захисний рівень лінії, якщо середня висота підвісу нижнього проводу лінії 9,2 м, а геометричний коефіцієнт зв'язку між тросами та нижніми проводами – 0,18.

Розв'язання. 1) Для двох тросів, що захищають лінію напругою 110 кВ, приймаємо поправочний коефіцієнт на корону 1,2, звідки коефіцієнт зв'язку з урахуванням корони:

$$k = k_0 k_1 = 0,18 \cdot 1,2 = 0,22.$$

2) Використовуючи стандартну висоту ізоляторів типу П-4,5, що дорівнює 170 мм, визначимо будівельну довжину всієї гірлянди;

$$\lambda = 170 \cdot 7 = 1,19 \text{ м.}$$

З характеристики імпульсної міцності ізоляції (рис. 6.1) знаходимо імпульсну міцність гірлянди (50 %), що дорівнює 750 кВ макс.

3) За отриманими величинами проводимо розрахунок величини $\frac{U_{50\%}}{1-k}$, що належить до залежності (6.3):

$$\frac{U_{50\%}}{1-k} = \frac{750}{1-0,22} = 965 \text{ кВ.}$$

4) За заданим струмом блискавки (125 кА) і крутизною хвилі $a' = 22,5$ кВ/м із залежності (6.1) знаходимо величину індуктованої на проводі напруги:

$$U_{ind} = a' h_{cp} = 22,5 \cdot 9,2 = 207 \text{ кВ.}$$

5) За формулою (6.3) визначимо потенціал у вершині опори:

$$U_{on} = \frac{U_{50\%}}{1 - 0,22} - U_{ind} = 965 - 207 = 758 \text{ кВ.}$$

6) За характеристикою (рис. 6.2) і напругою у вершині опори (758 кВ) знаходимо $I_{max} R_{з.л} = 900 \text{ кВ.}$

7) Оскільки опір заземлення опори в імпульсному режимі задано 6 Ом, визначаємо шуканий захисний рівень лінії:

$$I_{зах,р} = \frac{I_{max} R_{з.л}}{6} = 150 \text{ кА.}$$

Отже, розглянута лінія є грозостійкою за всіх струмів блискавки, що мають величину менше 150 кА. Імовірність появи великих струмів надзвичайно мала і становить 0,3 %.

Приклад 6.2. Визначити захисний рівень лінії з напругою 110 кВ на дерев'яних опорах без тросового захисту. Блискавка вдаряє в провід у середині прольоту. Хвильовий опір проводу з урахуванням імпульсної корони 350 Ом. Гірлянди зібрані з 6 ізоляторів типу П-4,5, кожен з яких має висоту 170 мм. Відстань між проводами 4 м, габарит лінії 7 м, стріла провисання 3 м.

Розв'язання. Під час розряду блискавки в провід одним із шляхів можливого імпульсного перекриття є шлях гірлянда – траверса – гірлянда. Імпульсна міцність цієї ділянки може бути визначена з конструктивної довжини гірлянд, середньої напруженості імпульсного перекриття гірлянди $E_{cp} = 6 \text{ кВ/см}$ і величини імпульсної міцності мокрої деревини ділянки траверси.

Для прийнятих у завданні розмірів імпульсна міцність:

$$U_{50\%} = 2 \cdot 17 \cdot 6 \cdot 6 + 4 \cdot 100 = 1630 \text{ кВ макс.}$$

Для розрахунку коефіцієнта зв'язку між проводами, визначаємо середню висоту їх підвісу над землею:

$$h_{cp} = h + \frac{2}{3} f = 7 + 2 = 9 \text{ м.}$$

За отриманими даними знаходимо геометричний коефіцієнт зв'язку

$$k_0 = \frac{z_{10}}{z_{11}} = \frac{100}{487} = 0,205.$$

Поправочний коефіцієнт, що враховує корону, яка виникає на проводі під час удару блискавки в проліт, прийmemo $k_1 = 1,5$, звідки коефіцієнт зв'язку:

$$k = k_1 k_0 = 1,5 \cdot 0,205 = 0,31.$$

Отримані величини введемо до залежності (6.4) і визначимо захисний рівень лінії:

$$I = \frac{4 \cdot 1630}{350(1 - 0,31)} = 26,6 \text{ кА}.$$

Завдання до теми

1. Дволанцюгова лінія електропередачі напругою U на металевих опорах з розташуванням проводів за схемою «зворотна ялинка» і прольотом l захищена двома тросами. Розряд блискавки зі струмом 125 кА відбувається у вершину опори. Імпульсний опір заземлення опори $R_{зм}$. Гірлянди зібрані з ізоляторів 7хП-4,5. Визначити захисний рівень лінії, якщо середня висота підвісу нижнього проводу лінії h_{cp} , а геометричний коефіцієнт зв'язку між тросами та нижніми проводами 0,18. Вихідні дані до завдання наведено у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	U , кВ	l , м	$R_{зм}$, Ом	h_{cp} , м
1	35	340	10	9,4
2	110	320	8	10,7
3	220	380	9	8,6
4	35	250	12	9,0
5	110	390	5	9,8
6	220	400	12	9,4
7	35	280	5	10,7
8	110	260	10	8,6
9	220	350	8	9,0
10	220	250	9	9,8

2. Визначити захисний рівень лінії з напругою U на дерев'яних опорах без тросового захисту. Блискавка вдаряє у провід у середині прольоту. Хвильовий опір проводу з урахуванням імпульсної корони z_k . Гірлянди зібрані з 6 ізоляторів типу П-4,5, кожен з яких має висоту 170 мм. Відстань між проводами l_1 , габарит лінії 7 м, стріла провисання l_2 .

Вихідні дані до завдання наведено у табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	U , кВ	z_k , Ом	l_1 , м	l_2 , м
1	110	390	5	2,5
2	220	400	3	3,5
3	35	280	6	4
4	110	390	5	4,5
5	220	400	6	5
6	35	280	3	2,5
7	110	390	6	3,5
8	220	400	3	4
9	35	280	5	4,5
10	110	250	4	5

Контрольні питання

1. Якими вихідними параметрами лінії та ізоляції користуються під час розрахунку захисного рівня?
2. Як розраховується коефіцієнт зв'язку між проводом і тросом з урахуванням впливу корони?
3. Який вплив на величину індуктивних напруг у проводі чинить заземлений трос?

Література: [1, с. 162–175; 2, с. 347–364; 8, с. 230–257].

Практична робота № 7

Тема. Розрахунок внутрішніх перенапруг

Мета: набуття навичок розрахунку внутрішніх перенапруг у лінії електропередачі.

Короткі теоретичні відомості

Ненавантажена лінія являє собою ємнісне навантаження із зарядним струмом, величина якого залежить від протяжності, напруги та питомої ємності ліній. Для повітряних ліній питома ємність може бути прийнята в межах від 8 до 12 пФ/м, причому більша величина належить до ліній меншої напруги. Для кабельних ліній величина питомої ємності приблизно в 50 разів більша, ніж для повітряних.

Схема заміщення для випадку вимкнення ненавантаженої лінії зображена на рис. 7.1, де розподілена ємність лінії замінена зосередженою ємністю $C_{\text{л}}$. Причиною перенапруг у разі відключення ємнісного навантаження є заряд, що залишається на лінії, який спричиняє повторне запалювання дуги між контактами вимикача.

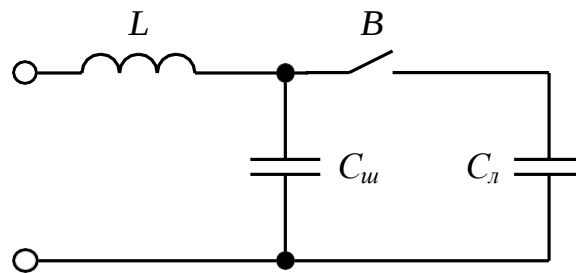


Рисунок 7.1 – Схема заміщення для випадку вимкнення ненавантаженої лінії

від шин джерела: $C_{\text{л}}$ – ємність лінії; $C_{\text{ш}}$ – ємність шин; B – вимикач;

L – індуктивність джерела

Дуга на контактах вимикача гасне з переходом зарядного струму через нульове значення, водночас на лінії зберігається напруга $U_{\text{л}}$. Через половину періоду в момент максимуму напруги $U_{\text{ш}}$ на виводах джерела та протилежній його фазі відбувається повторне запалювання дуги. Результатом цього є

паралельне з'єднання ємностей C_l і $C_{ш}$, при якому встановлюється загальна напруга (рис. 7.1):

$$U_{зан} = \frac{U_l C_l + U_{ш} C_{ш}}{C_l + C_{ш}}. \quad (7.1)$$

Рівні, що виникають на лінії або на шинах перенапруг, суттєво залежать від співвідношення ємностей шин $C_{ш}$ і ємності лінії, що від'єднується C_l і визначаються амплітудою коливань з частотою:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C_l + C_{ш})}}.$$

Величина напруги на лінії для будь-якого моменту часу визначається виразом:

$$U_l = U_{ш} - (U_{ш} - U_{зан}) \cos \omega t e^{-\delta t}, \quad (7.2)$$

де δ – коефіцієнт загасання; $U_{зан}$ – напруга, що встановлюється після перезарядження ємностей C_l і $C_{ш}$.

Коли $C_{ш} = 0$ або значно менше ємності лінії, а також за відсутності загасань напруга з $\omega_0 t = -1$ досягає потрібний кратності відносно фазної напруги за умови одноразового повторного запалення і в п'ять разів перевищує фазну напругу у разі двох повторних запалювань.

Перенапруга різко знижується зі збільшенням ємності шин, наприклад, за рахунок інших ліній, що відходять.

Від'єднання індуктивних навантажень, якими є струми холостого ходу трансформатора, двигуна або реактора, призводить до появи перенапруг на боці навантаження. Причина цих перенапруг полягає в тому, що вимикач обриває або зрізає струм до моменту його природного переходу через нульове значення. Водночас магнітна енергія, що вивільняється, переходить в електричну, додатково заряджаючи ємності на боці навантаження.

Максимально можлива перенапруга:

$$U_{mp} = \sqrt{I_{cp}^2 \frac{L_{mp}}{C_{mp}^2} + U_{cp}^2}, \quad (7.3)$$

де I_{cp} – струм зрізу; C_{mp} – ємність трансформатора; L_{mp} – індуктивність трансформатора.

Цей вираз показує, що рівень перенапруг приблизно пропорційний струму зрізу, величина якого для масляного та повітряного вимикачів знаходиться в межах 10 – 20 А.

Відключення трансформаторів під навантаженням не призводить до перенапруг, оскільки ємнісне й активне навантаження повністю поглинають енергію, що виділяється з магнітопровода.

Приклади розв’язання завдань

Приклад 7.1. Лінія електропередачі напругою 110 кВ із заземленою нейтраллю та протяжністю 100 км вимикається від шин масляним вимикачем без шунтувальних опорів. Визначити амплітуду перенапруг, що виникають на лінії, якщо питома ємність лінії 10 пФ/м, а у вимикачі відбувається одне повторне запалення дуги. Ємність шин живлення 10^5 пФ.

Розв’язання. Визначимо максимально можливу робочу напругу мережі:

$$U_{\phi} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,15 U_n}{\sqrt{3}} = \frac{1,41 \cdot 1,15 \cdot 110}{1,73} = 103 \text{ кВ макс.}$$

Відповідно до виразу (7.1) визначимо напругу на ділянці розриву в момент повторного запалення дуги у вимикачі, вважаючи, що запалення відбувається з рівними за величиною і протилежними за знаком потенціалами з боку шини та з боку лінії:

$$U_{\text{зан}} = \frac{U_{\text{л}} C_{\text{л}} + U_{\text{ш}} C_{\text{ш}}}{C_{\text{л}} + C_{\text{ш}}} = \frac{-U_{\text{ш}} (10^6 - 10^5)}{10^6 + 10^5} = -\frac{9}{11} U_{\text{ш}}.$$

За формулою (7.2) знаходимо амплітудне значення періодичної кривої перенапруги. Прийmemo

$$\cos \omega_0 t e^{-\delta t} = -1,$$

звідки

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ш}} + \left(U_{\text{ш}} + \frac{9}{11} U_{\text{ш}} \right) = \frac{31}{11} U_{\text{ш}} = 2,82 U_{\phi}.$$

Підставивши раніше визначену фазну напругу, отримаємо для заданого випадку абсолютну величину перенапруги:

$$U_n = 2,82 \cdot 103 = 292 \text{ кВ макс.}$$

Приклад 7.2. Силовий трансформатор із заземленою нейтраллю типу ТДНГ 20000/110, який має струм холостого ходу 4,5 % від номінального, відключається в режимі холостого ходу від шин живлення з напругою 110 кВ. Визначити величину очікуваних перенапруг, якщо вимкнення відбувається в момент, коли напруга близька до максимальної, а величина струму зрізу 10 А. Ємність відключаючого трансформатора і його шин живлення прийняти рівною 20000 пФ, а $U_\phi = 103 \text{ кВ макс.}$

Розв'язання. За паспортними даними трансформатора визначимо його індуктивність, використовуючи формулу:

$$L = \frac{U^2}{\omega \Delta Q_\mu} = \frac{U^2 \cdot 100}{\omega I_{xx\%} S_n} = \frac{110^2 \cdot 10^6 \cdot 100}{314 \cdot 4,5 \cdot 20000 \cdot 10^3} = 43 \text{ Гн.}$$

Підставивши задані величини до формули (7.3), маємо:

$$U_{mp} = \sqrt{10^2 \frac{43 \cdot 10^8}{2} + (103 \cdot 10^3)^2} = 475 \text{ кВ макс.}$$

Кратність перенапруги відносно фазної визначимо із виразу:

$$k_{пер} = \frac{U_{mp}}{U_\phi} = \frac{475}{103} = 4,6.$$

Завдання до теми

1. Лінія електропередачі напругою U із заземленою нейтраллю та протяжністю l_1 вимикається від шин масляним вимикачем без шунтувальних опорів. Визначити амплітуду перенапруг, що виникають на лінії, якщо питома ємність лінії $C_{л1}$, а у вимикачі відбувається одне повторне запалення дуги. Ємність шин живлення $C_{ш}$ пФ. Вихідні дані до завдання наведено у табл. 7.1.

2. Силовий трансформатор із заземленою нейтраллю типу ТДНГ 20000/110, який має струм холостого ходу $I_{xx} \%$ від номінального, відключається в режимі холостого ходу від шин живлення з напругою 110 кВ.

Визначити величину очікуваних перенапруг, якщо вимкнення відбувається в момент, коли напруга близька до максимальної, а величина струму зрізу I_{cp} . Ємність відключаючого трансформатора і його шин живлення прийняти рівною 20000 пФ, а $U_{\phi} = 103$ кВ макс. Вихідні дані до завдання наведено у табл. 7.2.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	U , кВ	l_1 , км	$C_{ш}$, пФ	$C_{л1}$, пФ/м
1	220	150	$1,1 \cdot 10^5$	12
2	35	200	$1,2 \cdot 10^5$	9
3	110	120	$1,3 \cdot 10^5$	10
4	220	140	$0,95 \cdot 10^5$	11
5	35	90	$1,05 \cdot 10^5$	13
6	110	95	$1,3 \cdot 10^5$	12
7	220	120	$0,95 \cdot 10^5$	9
8	35	140	$1,1 \cdot 10^5$	10
9	110	90	$1,2 \cdot 10^5$	11
10	35	95	$1,05 \cdot 10^5$	13

Таблиця 7.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	I_{xx} , %	I_{cp} , А
1	4	11
2	4,5	12
3	5	13
4	4,750	14
5	4,4	16
6	4	17
7	4,5	18
8	5	15
9	4,750	19
10	4,4	20

Контрольні питання

1. Які перенапруги називаються внутрішніми та від яких параметрів обладнання вони залежать?
2. Перерахуйте найбільш характерні випадки виникнення комутаційних і резонансних перенапруг і вкажіть причини їх виникнення.
3. Поясніть причини виникнення повторних запалень дуги між контактами вимикачів.

Література: [1, с. 194–208; 6, с. 258–271; 8, с. 192–205].

Практична робота № 7

Практична робота № 7

Тема. Розрахунок внутрішніх перенапруг

Мета: набуття навичок розрахунку внутрішніх перенапруг у лінії електропередачі.

Короткі теоретичні відомості

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

Кількість практичних занять – 14 годин (7 практичних занять).

Поточний контроль на практичних заняттях протягом змістових модулів:

- відвідування практичних занять – 0,5 бала за заняття (максимум 3,5 бала за умови відвідування всіх практичних занять);
- розв’язання практичних завдань згідно з методичними вказівками – 0,7 бала за практичне завдання (максимум 4,9 бала за всі завдання);
- захист практичної завдань – 0,6 бала за практичне завдання (максимум 4,2 бала за всі практичні завдання);
- опитування під час проведення практичних занять – максимум 0,34 бала за аудиторне заняття (максимум 2,4 бала за семестр).

Тобто за виконання всіх практичних занять студент може отримати максимальну кількість балів – 15.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бржезицький В. О. Техніка і електрофізика високих напруг : навч. посібн. / В. О. Бржезицький, А. В. Ісакова, В. В. Рудаков ; за ред. В. О. Бржезицького. – Харків : НТУ «ХПІ». – Торнадо, 2005. – 930 с.
2. Гажаман В. І., Погуляєв Є. С., Цимбалюк А. У. Посібник для працівників, які організовують або виконують роботи в електроустановках / В. І. Гажаман, Є. С. Погуляєв, А. У. Цимбалюк. – Харків : Форт, 2003. - 152 с.
3. Маврін О. І. Техніка та електрофізика високих напруг : конспект лекцій / О. І. Маврін, К.Б. Покровський. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 100 с.
4. Остапчук О.В., Денисюк П.Л., Матеєнко Ю.П. Електрична частина станцій та підстанцій. Навчальний посібник. – Київ: КПУ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 182 с.
5. Бардик Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання. – Київ: «Політехніка», 2022. – 250 с.

Електронне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

ВАСЮЧЕНКО Павло Вікторович
КИРИСОВ Ігор Геннадійович
ПОНОМАРЕНКО Олена Михайлівна

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
денної і заочної форм здобуття освіти
за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 28.02.2025. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 1,69. Обсяг 0,774 Мб. Зам. № 82/25.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна