

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**для виконання контрольної роботи**

**з освітнього компонента**

***«ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК***

***ТА ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ»***

**для здобувачів спеціальності G3 «Електрична інженерія»**

**денної та заочної форм здобуття вищої освіти**

**Харків – 2026**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 20 квітня 2026 р. протокол №14.

Рекомендовано для виконання контрольної роботи здобувачам спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітньої програми «Електропостачання та ресурсозберігаючі технології» денної та заочної форм здобуття освіти.

Укладачі:

доценти Ю. О. Семененко,  
О. І. Семененко

Рецензент

доц. О. Є. Зінченко

## ЗМІСТ

Вимоги до оформлення контрольної роботи	4
1 Вивчення теоретичного матеріалу освітнього компонента	5
1.1 Завдання 1	5
1.2 Перелік питань з освітнього компонента «Ізоляція електроустановок та захист від перенапруг»	6
1.3 Приклади відповідей на теоретичні питання	8
1.3.1 Газоподібні діелектрики	8
1.3.2 Особливості рідкого та твердого стану діелектрика	14
2 Визначення основних параметрів ізоляції ВРУ підстанції та ПЛЕП	19
2.1 Вихідні дані до завдання 2	19
2.2 Приклад рішення задачі 1	21
2.3 Приклад рішення задачі 2	23
Список літератури	32

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольну роботу потрібно оформити у вигляді пояснювальної записки на аркушах паперу формату А4 відповідно до вимог державних стандартів України. На титульному аркуші вказують назву міністерства, вищого навчального закладу та кафедри, назву контрольної роботи, ініціали і прізвище здобувача та викладача, який буде перевіряти роботу, дату виконання.

Пояснювальну записку з контрольної роботи виконують за допомогою комп'ютерної техніки. Рекомендовано використовувати текстовий редактор *Microsoft Word*. У роботі, вирішуючи задачі, необхідно вказувати найменування кожної розрахункової операції. Після цього записують розрахункову формулу в загальному вигляді та підставляють чисельні значення величин і записують результат. У разі потреби зробити пояснення до виконаних розрахунків або графіків, сформулюйте їх коротко і самостійно. Точність розрахунків має бути не нижче 0,1 %, тобто округлення виконують до трьох значущих цифр.

Виконану контрольну роботу після її зарахування зберігають до іспиту. Для складання іспиту кожен здобувач повинен бути готовим відповісти на будь-яке із перерахованих нижче питань.

## 1 ВИВЧЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОГО МАТЕРІАЛУ ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТА

Виконання завдання 1 покликане закріпити отримані здобувачами теоретичні знання. В результаті засвоєння матеріалу освітнього компонента «Ізоляція електроустановок та захист від перенапруг» [1-7] згідно з тематикою, що передбачена програмою, в контрольній роботі здобувачі повинні надати відповіді з указаних нижче питань.

### 1.1 Завдання 1

На першій сторінці роботи потрібно записати номер варіанта за двома останніми цифрами навчального шифру. Відповідні варіанту завдання номери питань слід взяти із таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до завдання 1

Остання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер питання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номер питання	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Передостання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер питання	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Номер питання	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Номер питання	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50

## **1.2 Перелік питань з освітнього компонента «Ізоляція електроустановок та захист від перенапруг»**

- 1 Особливості зовнішньої та внутрішньої ізоляції.
- 2 Види іонізації газів.
- 3 Лавина електронів.
- 4 Умова самостійності розряду в однорідному полі.
- 5 Пробивна напруга газу в однорідному полі. Закон Пашена.
- 6 Стримерна теорія розряду.
- 7 Розвиток розряду у неоднорідному полі.
- 8 Вплив полярності електродів на пробивну напругу.
- 9 Статистичні властивості розряду.
- 10 Коронний розряд на повітряних лініях (ПЛ) при постійній та змінній напрузі. Способи обмеження втрат на корону.
- 11 Електропровідність твердих діелектриків. Міграційна поляризація.
- 12 Втрати в діелектриках.
- 13 Розряд уздовж поверхні твердих діелектриків в однорідному полі.
- 14 Розряд уздовж поверхні твердих діелектриків у різко неоднорідному полі.
- 15 Розряд по зволоженій та забрудненій поверхні твердих діелектриків.
- 16 Розподіл напруги по гірлянді ізоляторів.
- 17 Призначення та типи ізоляторів.
- 18 Вибір числа ізоляторів у гірлянді.
- 19 Регулювання електричних полів у внутрішній ізоляції.
- 20 Часткові розряди у газових включеннях твердої ізоляції.
- 21 Часткові розряди у паперово-олійній ізоляції.
- 22 Часткові розряди в маслобар'єрній ізоляції.
- 23 Теплове старіння внутрішньої ізоляції. Тепловий пробій.

- 24 Електричний пробій внутрішньої ізоляції.
- 25 Ізоляція силових трансформаторів та високовольтних вводів.
- 26 Ізоляція силових кабелів різного класу напруги.
- 27 Ізоляція обертових машин.
- 28 Ізоляція силових конденсаторів.
- 29 Блискавка як джерело грозових перенапруг.
- 30 Захист від прямих ударів блискавки.
- 31 Захисні розрядники. Захисні проміжки.
- 32 Вентильні розрядники. Нелінійні резистори вентильних розрядників.
- 33 Обмежувачі перенапруг.
- 34.Заземлення в електричних установках високої напруги. Вимоги до заземлення станцій та підстанцій.
- 35 Загальна характеристика перенапруг. Види перенапруг.
- 36 Електромагнітна хвиля на лінії без втрат.
- 37 Заломлення та відображення хвиль у вузлових точках лінії. Типові форми хвиль.
- 38 Грозозахист повітряних ліній електропередавання (ПЛЕП).
- 39 Прямий удар блискавки в лінію без тросів.
- 40 Прямий удар блискавки в лінію з тросами.
- 41 Грозозахист станцій та підстанцій.
- 42 Грозозахист машин, що обертаються.
- 43 Загальна характеристика внутрішніх перенапруг.
- 44 Перенапруги, що встановилися, при короткому замиканні.
- 45 Обмеження перенапруг за допомогою вентильних розрядників.
- 46 Перенапруги при відключенні ємностей та ненавантажених ліній.
- 47 Перенапруги при автоматичному повторному увімкненні.
- 48 Ферорезонансні явища в електричних установках.
- 49 Дугові замикання на землю ПЛЕП.
- 50 Обмеження внутрішніх перенапруг.

## 1.3 Приклади відповідей на теоретичні питання

### 1.3.1 Газоподібні діелектрики [2, 4, 6]

Діелектриками називають матеріали, що знаходяться в нормальних умовах у різних агрегатних станах – газоподібному, рідкому і твердому.

Газоподібний стан речовини. Гази складаються з окремих атомів і молекул, відстані між якими відносно великі, а сили взаємодії малі. Середня відстань між молекулами

$$d = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}, \quad (1.1)$$

де  $n$  – концентрація частинок у  $1 \text{ м}^3$  газу.

Тому основну частину всього часу безупинного неупорядкованого теплового руху кожна з частинок знаходиться далеко одна від одної і рухається прямолінійно доти, доки не відбудеться зіткнення частинки з іншою чи зі стінками судини, у якій міститься газ.

Статична система, частинки якої взаємодіють одна з одною тільки в процесі зіткнень, а решту часу перебувають у хаотичному русі, зветься ідеальним газом.

Стан ідеального газу описується рівнянням Менделєєва-Клапейрона

$$P = \rho \cdot RT/M; \quad (1.2)$$

або законом Бойля-Маріотта і Гей-Люссака

$$PV = RT, \quad (1.3)$$

де  $P$  – тиск газу;

$R$  – газова стала,  $R = 8,31 \cdot 10^3$  Дж/(моль·°К);

$M$  – молекулярна вага газу;

$\rho$  – густина газу;

$T$  – абсолютна температура, °К;

$V$  – об'єм, що містить 1 кмоль газу за заданих значень  $P$  та  $T$ .

Використовуючи рівняння (1.2) та (1.3), одержимо вираз для тиску газу в такому вигляді:

$$P = knT. \quad (1.4)$$

Просторовий розподіл концентрації газу відповідно до статистики Максвелла-Больцмана є рівномірним, якщо відсутнє зовнішнє електричне поле. Швидкість частинок у газі, що не піддається впливу зовнішніх сил, може приймати різні значення від малих величин, близьких до нуля, до дуже великих. У стані рівноваги, тобто за постійних у часі параметрах, що характеризують стан газу ( $P$ ,  $T$ ), можна вважати, що імовірність певного значення швидкості залежить тільки від значення цієї швидкості, тобто можна скористатися основним законом розподілу швидкостей Максвелла:

$$P(\omega) = N(\omega)d\omega = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{\omega^2}{\omega_0^3} \exp\left(-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) d\omega, \quad (1.5)$$

де  $P(\omega)$  – імовірність того, що частки будуть мати швидкості, що змінюються від  $\omega$  до  $(\omega+d\omega)$ ;

$N(\omega)d\omega$  – кількість молекул із загальної кількості, що мають швидкість від  $\omega$  до  $(\omega+d\omega)$  незалежно від напрямку цієї швидкості в просторі;

$\omega_0$  – найбільш імовірна швидкість, що являє собою значення швидкості, що найчастіше зустрічається, тобто швидкість, властиву за даних умов найбільшій кількості молекул.

Величину її визначають за максимального значення функції (1.5), ця швидкість безпосередньо зв'язана з температурою газу

$$m\omega_0^2 = 2kT,$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/°К;

$m$  – маса частинки.

Середнє значення функції (1.5) дає середнє значення швидкості молекул, що характеризує швидкість молекул всього об'єму газу, тобто воно визначає середню кінетичну енергію молекул газу за даних умов. За високих температур максимум функції зміщується в область великих значень швидкостей. Наприклад, середня швидкість молекул водню  $H_2$  вище ніж у кисню  $O_2$  внаслідок меншої молекулярної маси  $H_2$ . Середнє арифметичне значення швидкості частинки, якщо

$$\varepsilon_{\text{кін}} = 3kT/2,$$

де  $k = R/N_o$ ,  $mN_o = M$  можна визначити з виразу

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (1.6)$$

Якщо прийняти, що

$$\varepsilon = m\omega^2/2 \quad \text{та} \quad d\varepsilon = m\omega \cdot d\omega,$$

то можна одержати аналогічний вираз для імовірного розподілу частинок за енергіями, де  $\varepsilon$  – енергія частинки:

$$F(\omega) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\varepsilon^{0,5}}{\sqrt{\pi}(kT)^{1,5}} \left( -\frac{\varepsilon}{kT} \right). \quad (1.7)$$

Гази розрізняються структурою молекул та атомів, різним може бути і їх фізичний стан – тиск і температура. Газ знаходиться при нормальних умовах, якщо його тиск  $P_0 = 760$  мм рт. ст. і температура  $T_0 = 20$  °С. Нормальним атмосферним умовам відповідає нормальна щільність газу, прийнята за одиницю. Відносна щільність газу при  $P$  і  $T$ , що відрізняються від нормальних,

$$\delta = \frac{PT_0}{P_0T} = 0,386 \frac{P}{T}, \quad (1.8)$$

де  $T$  – температура, що вимірюється в градусах Кельвіна.

Велику роль відіграє значення довжини вільного пробігу, здійснюваного молекулами газу до зіткнення з іншими молекулами. Припустимо, що молекула газу  $M_1$ , діаметром  $d_1$ , зіштовхнеться з іншою молекулою  $M_2$  діаметром  $d_2$  (рис. 1.1).

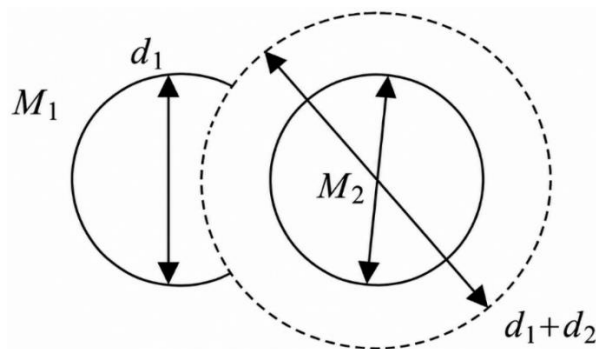


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення зіткнення двох молекул

Відстань між їхніми центрами при зближенні має зменшитися принаймні до значення

$$r_{12} = (d_1 + d_2)/2.$$

Отже, частинка  $M_1$  зіштовхується з частинкою  $M_2$  тоді і тільки тоді, коли її центр знаходиться в межах або на межі кола, що проєктується на напрямок руху площею

$$\sigma_3 = \pi \cdot r_{12}^2. \quad (1.9)$$

Реальні частинки мають нетверді межі, а поле взаємодії, тому переріз  $\sigma_3$  – це ефективний переріз взаємодії, і він може бути різним для різних процесів. Нехай у  $1 \text{ м}^3$  газу знаходиться  $n$  молекул. На глибині  $dx$  зустрічаються  $n dx$  молекул, а їхня загальна площа дорівнює  $\pi d^2 n dx$ . Якщо молекула пролітає через площу розміром у  $1 \text{ м}^2$ , то отриманий вираз і являє собою імовірність зіткнення. Молекула, що рухається в газі з визначеними  $P$  і  $T$  із середньою швидкістю  $\omega'$ , за час  $dt$  пройде шлях  $\omega' dt$ . Якщо молекула діаметром  $d$  рухається, а інші є нерухомими, тоді ця молекула переміщуватиметься уздовж циліндру діаметром  $d$  і зіштовхуватиметься з усіма частинками, що знаходяться усередині цього циліндра, об'єм якого дорівнює

$$V = \pi \omega' d^2 dt,$$

де  $d = (d_1 + d_2)$ .

Кількість зіткнень становитиме  $n \pi \omega' d^2 dt$ . Середню відстань, яку проходить частинка між двома зіткненнями за час  $dt$ , називають довжиною вільного пробігу частинки, тобто це шлях, що пройшла частинка за час  $dt$ , віднесений до числа значень,

$$\lambda = \frac{\overline{\omega dt}}{n\pi d^2 \overline{\omega dt}} = \frac{1}{n\pi d^2}. \quad (1.10)$$

Добуток  $n\pi d^2$  визначає ефективний переріз зіткнення. При постійній температурі довжина вільного пробігу частинки обернено пропорційна тиску

$$\lambda(P) = \lambda_0 \frac{P_0}{P}. \quad (1.11)$$

де  $\lambda_0$  – середня довжина вільного пробігу частинки при  $P_0$  і  $T_0$ .

Розраховуючи середню довжину вільного пробігу електрона, потрібно враховувати, що його діаметр набагато менше діаметра молекули. Приймають його рівним половині діаметра молекули.

$$\lambda_0 = \frac{4kT}{\pi d^2 P}. \quad (1.12)$$

Знаючи середню довжину вільного пробігу частинки і розміри судини, у якій знаходиться досліджуваний газ, можна оцінити, яка кількість зіткнень буде відбуватися за одиницю часу.

Нехай у заданому газі  $\lambda_e$  – середня довжина вільного пробігу електрона. На відстані 1 м молекула зіштовхується з електроном  $1/\lambda$  разів. При проходженні відстані  $dx$  відбудеться  $dx/\lambda$  зіткнень. Це і є імовірність зіткнень частинок на довжині  $dx$ .

Після проходження відстані  $dx$  відносне число молекул, що не зазнали зіткнень на довжині  $dx$ , зменшиться на  $dn$  внаслідок зіткнень на довжині  $dx$ . Оскільки  $dn/n$  також є імовірність зіткнень, що відбуваються на шляху  $dx$ , тоді можна записати

$$-\frac{dn}{n} = \frac{dx}{\lambda_e}$$

При  $x = 0$  та  $n = n_0$  одержимо

$$n = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right). \quad (1.13)$$

Приклад: Якщо  $P = 5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. і  $\lambda = 880$  м у трубці з  $x = 2,5$  мм,

то

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(-2,5 \cdot 10^{-3} / 880\right) = 1 - 1 / 3,52 \cdot 10^5 \cdot$$

Це означає, що один електрон з  $3,52 \cdot 10^5$  електронів фактично зіштовхується з молекулою.

### 1.3.2 Особливості рідкого та твердого стану діелектрика [2, 4, 6]

Рідкий стан діелектрика займає проміжне положення між двома агрегатними станами. Відстані між молекулами в рідинах набагато менші, ніж у газах, а тому взаємодія між молекулами значно сильніша. У рідкій фазі існує щільне упакування молекул, тобто об'єм рідини приблизно дорівнює об'єму, займаному самими молекулами, або середня відстань між молекулами приблизно дорівнює діаметру молекул.

Енергетично рідка фаза близька до твердої, а характерна для рідини нездатність зберігати форму і неопірність руху молекул однієї відносно одної є властивістю, типовою для газів. Газ характеризується відсутністю порядку, з погляду побудови структури – це ідеальне втілення хаосу.

У рідині існує упорядкування молекул, яке називають «ближнім порядком». Радіус дії цього порядку поширюється на обмежену область. У

кожній точці всередині рідини відбувається безупинна зміна процесів кристалізації і розчинення. У цих маленьких областях відбуваються структурні коливання кристалоподібних просторово-молекулярних сполук, тобто для рідини є характерним утворення кристалів, але тривалість їх існування обмежена за часом.

На відміну від газів взаємодія молекул рідини набагато сильніша. Тому рідина має велику густину, а тепловий рух її молекул не відбувається так вільно, як у газах. Молекула рідини коливається поблизу деякого положення рівноваги, що визначається взаємодією цієї молекули з оточуючими її іншими молекулами. Внаслідок теплової флуктуації молекула рідини переходить у нове положення рівноваги, де коливається якийсь час, який називають часом релаксації і який виражається рівнянням

$$\tau = \tau_0 \exp(-W/k), \quad (1.14)$$

де  $\tau_0$  – тривалість періоду теплового коливання;

$W$  – потенційна енергія молекули.

Молекули рідини можуть бути дипольними і недипольними, тому рідини бувають полярними і неполярними. У дипольних рідинах істотне значення має форма молекул. Молекули, форма яких близька до сфероїдальних, зазнаватимуть невеликих теплових стрибків, їхній тепловий рух можна розглядати як безупинний і поступовий. Великі витягнуті еліпсоїдальні молекули змінюватимуть свою орієнтацію, і рух визначатиметься різко вираженими стрибками.

Основним параметром діелектрика, що характеризує властивості як з точки зору його поляризації і поширення в ньому електромагнітних хвиль, так і з погляду процесів взаємодії з ним електричного поля, вважають діелектричну проникність  $\epsilon$ . Для всіх рідин  $\epsilon$  коливається від 1,5 (рідкий гелій) до 158 (синильна кислота) і 175 (плавикова кислота).

Тверді тіла мають дуже велику в'язкість і постійність розташування у просторі тих точок, поблизу яких відбувається коливальний рух частинок. Перехід частинок з цього фіксованого положення в інше фіксоване положення у твердому тілі є надзвичайно утрудненим, що знаходить своє відображення в дуже великому часі релаксації. Відрізняються лише значення енергії активації.

Особливості енергетичного стану твердого тіла описує сучасна зонна теорія. Відомо, що атоми складаються з ядра, оточеного електронами, які обертаються довкола нього по визначених орбітах. Енергія електронів, що знаходяться на різних орбітах, різна; вона зростає зі збільшенням відстані від ядра. Електрони, що знаходяться на зовнішніх орбітах, називають валентними. Відповідно до квантової теорії електрони не можуть мати будь-яке значення енергії, тому що її зміни можливі тільки визначеними порціями, квантами. Перехід на вищий енергетичний рівень відбувається за рахунок зовнішнього впливу, наприклад нагрівання, електричного поля, опромінення.

Розрізняють нормальний стан атома, який не зазнав порушення зовнішніми енергетичними джерелами, і збуджений, при якому частина електронів тимчасово здобуває додаткову енергію і переходить на вищий енергетичний рівень. При об'єднанні атомів у твердому тілі в результаті їхньої взаємодії має місце розщеплення як нормальних, так і збуджених енергетичних рівнів електронів в атомах, що приводить до утворення енергетичних зон. Розрізняють три зони: заповнену зовнішніми електронами; заборонену – відповідає рівням енергії, на яких не можуть знаходитися електрони; зону провідності, що відповідає можливим рівням енергії. Повну функцію розподілу електронів за енергіями у твердому тілі  $f(\varepsilon, T)$  можна подати у вигляді добутку двох функцій: числа станів  $n(\varepsilon)d\varepsilon$ , що припадають на інтервал енергій  $d\varepsilon$ , та імовірності  $F(\varepsilon)$  заповнення цих станів електронами:

$$f_F(\varepsilon, T) = F(\varepsilon)n(\varepsilon)d\varepsilon. \quad (1.15)$$

Імовірність заповнення електронами енергетичних рівнів у твердому тілі можна подати множником Фермі:

$$F(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp \frac{\varepsilon - \varepsilon_{f0}}{kT}}, \quad (1.16)$$

де  $\varepsilon_{f0}$  – рівень Фермі.

Властивості розподілу Фермі такі:

а) якщо  $T = 0$ , тоді  $F = 1$  при  $\varepsilon < \varepsilon_{f0}$  і  $F = 0$  при  $\varepsilon > \varepsilon_{f0}$ , тобто всі стани  $\varepsilon < \varepsilon_{f0}$  зайняті електронами, а всі стани  $\varepsilon > \varepsilon_{f0}$  вільні. Отже, енергія Фермі являє собою величину, що чисельно рівна максимальній енергії, яку можуть мати електрони при температурі абсолютного нуля;

б) якщо температура тіла більша нуля, то  $F$  близьке до одиниці при  $\varepsilon \ll \varepsilon_{f0}$ , і близьке до нуля при  $\varepsilon \gg \varepsilon_{f0}$ , а при  $\varepsilon = \varepsilon_{f0}$  дорівнює  $F = 1/2$  і швидко змінюється від одиниці до нуля при зміні енергії від значення, що на кілька одиниць  $kT$  менше, до величини, що на кілька одиниць  $kT$  більше.

Значення енергії Фермі можна знайти у такий спосіб: число електронів, що припадають на інтервал енергії  $d\varepsilon$  в одиниці об'єму твердого тіла,

$$dn = n(\varepsilon)F(\varepsilon, T)d\varepsilon,$$

тоді концентрацію електронів можна виразити так:

$$n = \int_0^{\infty} n(\varepsilon) \cdot F(\varepsilon, T) d\varepsilon.$$

При  $T = 0$  інтеграл

$$n = \int_0^{\varepsilon_{f0}} 4\pi \left( \frac{2m}{h^3} \right)^{3/2} \cdot \varepsilon^{1/2} d\varepsilon = \frac{8}{3} \pi \left( \frac{2m}{h^3} \right)^{3/2} \varepsilon_{f0},$$

звідки

$$\varepsilon_{f0} = \frac{h^2}{2m} \left( \frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3}. \quad (1.17)$$

Відомо, що в металі об'ємом  $1 \text{ м}^3$  міститься  $10^{22}$ – $10^{23}$  атомів. Це дає можливість за рівнянням (1.17) розрахувати  $\varepsilon_{f0}$ . Значення якої залежить тільки від того, як щільно упаковані електрони, і не залежить ні від об'єму, ні від форми зразка.

Стійкість і міцність кристала залежать від значення сил, що діють між частинками, і обумовленої ними потенціальної енергії кристалічних ґрат. Під дією зовнішніх умов при нагріванні, механічному впливі, впливі зовнішнього електричного поля енергія взаємодії може бути перебореною і ґрати можуть бути зруйновані.

Енергія ґрат – це значення енергії, необхідної для поділу кристалічних ґрат на окремі іони і на видалення їх на нескінченно велику відстань при температурі абсолютного нуля, чи енергія, виділювана при утворенні ґрат з вільних іонів. У першому випадку значення виразу має додатний знак, у другому – від'ємний. Значення енергії ґрат є важливим показником рівня системи. У сучасній теорії твердого тіла енергія ґрат обчислюється як алгебраїчна сума енергій електронів у зайнятих станах та енергії ядерного відштовхування.

## 2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ВРУ ПІДСТАНЦІ ТА ПЛЕП

### 2.1 Вихідні дані до завдання 2

Для рішення задач необхідно розглянути методику рішення за прикладами та виконати завдання 2 згідно з власним варіантом. Вихідні дані за варіантом слід взяти із таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунків

Остання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{ном1}/U_{ном2}$ , кВ	110/ 35	330/ 35	500/ 110	220/ 35	330/ 110	110/ 35	330/ 110	220/ 35	500/ 110	220/ 35
$I_{пр1}/I_{пр2}$ , М	210/ 140	280/ 150	320/ 200	270/ 140	300/ 190	200/ 120	320/ 200	250/ 130	330/ 200	240/ 140
$F_{мех1}/F_{мех2}$ , кН	70/ 45	105/ 40	170/ 60	85/ 50	110/ 55	60/ 40	100/ 55	90/ 45	175/ 60	75/ 50
$l_{опн1}/l_{опн2}$ , М	30/ 14	35/ 15	40/ 25	30/ 15	35/ 24	32/ 14	35/ 25	30/ 16	40/ 22	30/ 18
$C_{тр1}/C_{тр2}$ , нФ	1,5/ 0,75	3,0/ 0,8	4,5/ 1,6	2,4/ 0,8	3,0/ 1,6	1,6/ 0,70	3,0/ 1,6	2,4/ 0,8	4,5/ 1,6	2,4/ 0,8
$U_{випр}$ пігі, кВ	440/ 140	980/ 150	1280/ 460	780/ 140	950/ 450	450/4 130	920/ 420	760/ 130	1270/ 460	750/ 160
$\Delta U_k$ , %	40/ 65	30/ 60	25/ 45	35/ 60	30/ 45	45/ 65	30/ 45	35/ 60	25/ 45	35/ 60
Передостання цифра навчального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D_p$ , год/рік	35	40	50	45	55	30	60	50	40	50

Для прикладу рішення задач беруть вихідні дані, що наведені в таблицях 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для виконання прикладу розрахунків

$U_{\text{ном1}}/U_{\text{ном2}}$ , кВ	$F_{\text{мех1}}/F_{\text{мех2}}$ , кН	$D_p$ , год/рік	$l_{\text{опн1}}/l_{\text{опн2}}$ , м	$\Delta U_k$ , %
330/110	110/60	40	35/25	30/45

$U_{\text{ном1}}$  та  $U_{\text{ном2}}$  – номінальні напруги відкритих розподільних установок (ВРУ) підстанції відповідно ВРУ-1 та ВРУ-2;

$F_{\text{мех1}}$  та  $F_{\text{мех2}}$  – механічні навантаження на гірлянди ізоляторів класів напруги  $U_{\text{ном1}}$  та  $U_{\text{ном2}}$  відповідно;

$D_p$  – кількість грозових годин на рік у районі проходження ПЛЕП та розташування підстанції;

$l_{\text{опн1}}$  та  $l_{\text{опн2}}$  – відстані від об'єкту, що захищається, до обмежувачів перенапруг (ОПН) у ВРУ-1 та ВРУ-2;

$\Delta U_k$  – координаційний інтервал у відсотках від допустимої напруги.

Загальні дані для всіх варіантів:

$n_{\text{пл1}} = 1$  та  $n_{\text{пл2}} = 3$  – кількість ПЛЕП, що підходять до ВРУ-1 та ВРУ-2.

Таблиця 2.3 – Додаткові вихідні дані

$U_{\text{ном}}$ , кВ	$l_{\text{пр}}$ , м	$C_{\text{тр}}$ , нФ	$U_{\text{випр пгі}}$ , кВ
330	300	3,0	950
110	200	1,6	480

$l_{\text{пр}}$  – довжина прогону ПЛЕП;

$C_{\text{тр}}$  – вхідна ємність силового трансформатора, що захищається від імпульсних перенапруг на підстанції;

$U_{\text{випр пгі}}$  – нормовані значення випробувальної напруги повного грозового імпульсу для силових трансформаторів.

## 2.2 Приклад рішення задачі 1

Необхідно вибрати тип ізоляторів для обох класів напруги, далі згідно з ПУЕ [1] виконати розрахунок необхідного числа ізоляторів у гірлянді на проміжних опорах ПЛЕП, що підходять до ВРУ, та ізоляторів у гірлянді на порталах ВРУ. Також необхідно виконати розрахунок імпульсної напруги перекриття для обраних гірлянд.

Виходячи із значень механічних навантажень, вибирають ізолятори за даними таблиці 2.4: ПС-120Б для опор ПЛ та порталу ВРУ  $U_{ном1} = 330$  кВ; для опор ПЛ та порталу ВРУ ПС-70Е ( $U_{ном2} = 110$  кВ).

Таблиця 2.4 – Технічні дані підвісних скляних тарілчастих ізоляторів

Тип ізолятора	Механічна міцність, кН	$H$ , см	$D$ , см	$L$ , см
ПС-70Е	70	12,7	25,5	30,3
ПС-120Б	120	14,6	25,5	32,0
ПС-160Б	160	17,0	28,0	37,0
ПС-210Б	210	19,5	30,0	38,5

$H$  – будівельна висота ізолятора;

$D$  – діаметр тарілки ізолятора;

$L$  – довжина шляху витоку ізолятора;

$k_i$  – коефіцієнт використання довжини шляху витоку ізолятора.

Згідно з [1, табл. 1.9.2] для ПС-120Б  $k_i = 1,15$ ; для ПС-70Е  $k_i = 1,1$ . Згідно з [1, табл. 1.9.1] визначають питому нормативну довжину шляху витоку –  $\lambda_n = 2$  см/кВ у ізоляторів обох класів напруги. Найбільшу робочу напругу вибирають за таблицею 2.5:  $U_{\max \text{ роб1}} = 363$  кВ,  $U_{\max \text{ роб2}} = 126$  кВ.

Таблиця 2.5 – Найбільші робочі напруги ПЛ

Номінальна напруга ПЛ, кВ	Найбільша робоча напруга, кВ
35	40,5
110	126
220	252
330	363
500	550

Розраховують необхідну кількість ізоляторів у гірлянді [6]:

$$n_1 \geq \frac{k_i \cdot \lambda_n \cdot U_{\max \text{роб}1}}{L_1} = \frac{1,15 \cdot 2 \cdot 363}{32} = 26,09;$$

$$n_2 \geq \frac{k_i \cdot \lambda_n \cdot U_{\max \text{роб}2}}{L_2} = \frac{1,1 \cdot 2 \cdot 126}{30,3} = 9,15.$$

Приймають число ізоляторів у гірлянді на опорах ПЛ:  $n_{\text{ПЛ1}} = 27$  шт;  
 $n_{\text{ПЛ2}} = 10$  шт. Кількість ізоляторів у гірлянді на порталах ВРУ згідно з [1, п. 1.9.35]:

$$n_{\text{ВРУ1}} = n_{\text{ПЛ1}} + 2 = 27 + 2 = 29 \text{ шт};$$

$$n_{\text{ВРУ2}} = n_{\text{ПЛ2}} + 1 = 10 + 1 = 11 \text{ шт}.$$

Довжина гірлянди ізоляторів на опорах ПЛ [6]:

$$L_{\text{ГПЛ1}} = n_{\text{ПЛ1}} \cdot H_1 = 27 \cdot 0,146 = 3,94 \text{ м};$$

$$L_{\text{ГПЛ2}} = n_{\text{ПЛ2}} \cdot H_2 = 10 \cdot 0,127 = 1,27 \text{ м}.$$

Довжина гірлянди ізоляторів на порталах ВРУ:

$$L_{\text{ГВРУ1}} = n_{\text{ВРУ1}} \cdot H_1 = 29 \cdot 0,146 = 4,23 \text{ м};$$

$$L_{\text{ГВРУ2}} = n_{\text{ВРУ2}} \cdot H_2 = 11 \cdot 0,127 = 1,40 \text{ м}.$$

Розраховують 50 % розрядну напругу гірлянд ізоляторів на опорах ПЛ:

$$U_{50\text{ПЛ1}} = E_{\text{ср р}} \cdot H_1 \cdot n_{\text{ПЛ1}} = 5 \cdot 14,6 \cdot 27 = 1971 \text{ кВ};$$

$$U_{50\text{ПЛ2}} = E_{\text{ср р}} \cdot H_2 \cdot n_{\text{ПЛ2}} = 5 \cdot 12,7 \cdot 10 = 635 \text{ кВ},$$

де  $E_{\text{ср р}}$  – середньорозрядна напруженість [2], приймають рівною 5 кВ/см.

Розраховують 50 % розрядну напругу гірлянд ізоляторів на порталах ВРУ:

$$U_{50\text{ВРУ1}} = E_{\text{ср р}} \cdot H_1 \cdot n_{\text{ВРУ1}} = 5 \cdot 14,6 \cdot 29 = 2117 \text{ кВ};$$

$$U_{50\text{ВРУ2}} = E_{\text{ср р}} \cdot H_2 \cdot n_{\text{ВРУ2}} = 5 \cdot 12,7 \cdot 11 = 699 \text{ кВ}.$$

### 2.3 Приклад рішення задачі 2

Вибір типу опор, марки проводів та блискавкозахисних тросів для ПЛЕП. Розрахунок залежності максимальної напруги на силовому трансформаторі від крутості фронту набігаючої хвилі, визначення довжини небезпечної зони, захищеного підходу, очікуваного числа пошкоджень ізоляції обладнання на підстанції (ВРУ-1 і ВРУ-2) від ударів блискавки в проводи ПЛЕП в межах захищеного підходу.

Відповідно до номінальної напруги за таблицею 2.6 обирають опори.

Для  $U_{\text{ном1}} = 330 \text{ кВ}$  обрано опору типу ПБ330-7Н (рисунок 2.1, а).

Проводи ПЛ – 2АС-300/39, троси грозозахисні – 2С70.

Для  $U_{\text{ном2}} = 110 \text{ кВ}$  обрано опору типу ПБ110-1 (рисунок 2.1, б).

Проводи ПЛ – АС-120/19, трос грозозахисний – С50.

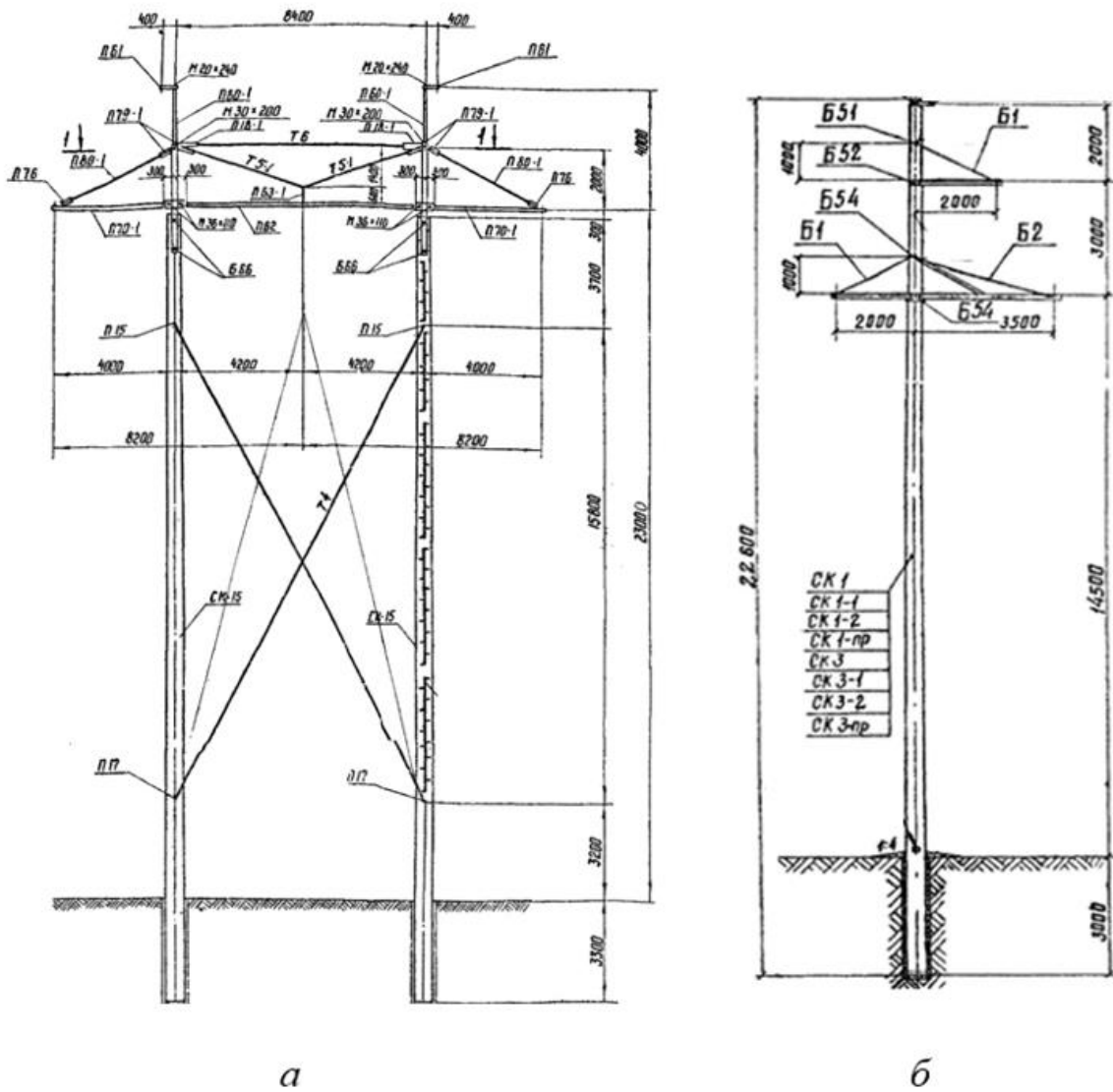


Рисунок 2.1 – Проміжні одноланцюгові залізобетонні опори  
ПБ330-7Н (а) та ПБ110-1 (б)

Таблиця 2.6 – Геометричні параметри проміжних опор типу ПБ

Тип опори	$h_{оп}$ , м	$h_{ср}$ , м	$a_T/b_T/c$ , м	$h_{T1}/h_{T2}$ , м	Марка проводів	Марка тросів
ПБ35-3	16,5	13	1,75/2,9	1,0/3,5	АС-(70-150)	С35
ПБ110-1	19,5	14,5	2,0/3,5	2,0/5,0	АС-(70-150)	С50
ПБ220-12	24	15,5	2,5/2,5	2,5/6,0	АС-(300-400)	С70
ПБ330-7Н	27	23	4,0/4,2/0,4	4,0	2АС-(300-400)	2С70
ПБ500-5Н	27,5	23	5,0/6,5/0,7	4,5	3АС-(300-400)	2С70

Для розрахунку максимального значення напруги на силовому трансформаторі скористаємося схемою заміщення, рисунок 2.2, де

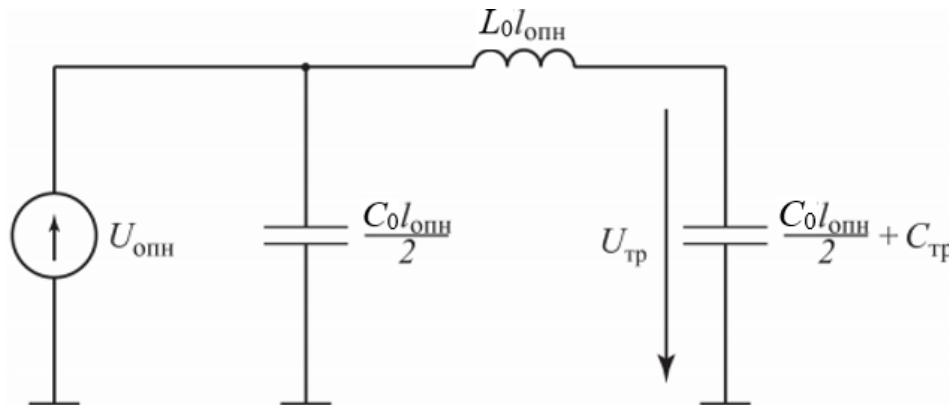


Рисунок 2.2 – Схема заміщення для визначення напруги на трансформаторі

$U_{\text{опн}}$  – напруга на ОПН;

$L_0$  – погонна індуктивність ошиновки;

$C_0$  – погонна ємність ошиновки;

$l_{\text{опн}}$  – довжина ошиновки між ОПН та силовим трансформатором;

$C_{\text{тр}}$  – вхідна ємність силового трансформатора.

Допустима напруга для ізоляції силового обладнання підстанції:

$$U_{\text{доп1}} = 1,1 \cdot (U_{\text{випр пгі}} - 0,5 \cdot U_{\text{ном1}}) = 1,1 \cdot (950 - 0,5 \cdot 330) = 864 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{доп2}} = 1,1 \cdot (U_{\text{випр пгі}} - 0,5 \cdot U_{\text{ном2}}) = 1,1 \cdot (480 - 0,5 \cdot 110) = 468 \text{ кВ}.$$

Залишкові напруги:

$$U_{\text{зал1}} = U_{\text{доп1}} \left( 1 - \frac{\Delta U_{\text{к1}}}{100} \right) = 864 \left( 1 - \frac{30}{100} \right) = 604 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{зал2}} = U_{\text{доп2}} \left( 1 - \frac{\Delta U_{\text{к2}}}{100} \right) = 468 \left( 1 - \frac{45}{100} \right) = 257 \text{ кВ}.$$

Хвильовий опір ошиновки та швидкість поширення хвилі по ній:

$$Z = 400 \text{ Ом}, \quad v = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Погонні індуктивність та ємність ошиновки на підстанції [2]:

$$L_0 = \frac{Z}{v} = \frac{400}{3 \cdot 10^8} = 1,33 \frac{\text{мкГн}}{\text{м}};$$

$$C_0 = \frac{1}{Z \cdot v} = \frac{1}{400 \cdot 3 \cdot 10^8} = 8,3 \frac{\text{пФ}}{\text{м}}.$$

Період коливань контура:

$$T = 2\pi \sqrt{L_0 \cdot l_{\text{опн}} \left( C_{\text{тр}} + \frac{C_0 l_{\text{опн}}}{2} \right)}.$$

$$T_1 = 2\pi \sqrt{1,33 \cdot 10^{-6} \cdot 35 \left( 3 \cdot 10^{-9} + \frac{8,3 \cdot 10^{-12} \cdot 35}{2} \right)} = 2,35 \text{ мкс};$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{1,33 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \left( 1,6 \cdot 10^{-9} + \frac{8,3 \cdot 10^{-12} \cdot 25}{2} \right)} = 1,45 \text{ мкс}.$$

Для різних значень  $(\tau_{\phi}/T)$  визначені відповідні відношення  $(U_{\text{сmax}}/U_{\text{зал}})$  (таблиця 2.7). Слід також розраховувати крутість фронту набігаючої хвилі [2] та максимальну напругу на силовому трансформаторі:

$$U' = \frac{U_{\text{зал}}}{T \cdot (\tau_{\phi}/T)}; \quad U_{\text{сmax}} = U_{\text{зал}} \cdot \left( \frac{U_{\text{сmax}}}{U_{\text{зал}}} \right).$$

Таблиця 2.7 – Крутість фронту набігаючої хвилі та максимальна напруга на силовому трансформаторі

$\tau_{\phi} / T$	$U_{\text{сmax}} / U_{\text{зал}}$	$U'_{1,}$ кВ/мкс	$U_{\text{сmax}1,}$ кВ	$U'_{2,}$ кВ/мкс	$U_{\text{сmax}2,}$ кВ
0	2,00	$\infty$	1209	$\infty$	514
0,5	1,66	514	1003	355	427
1	1,35	257	816	177	347
1,5	1,21	171	733	118	312
2	1,16	129	698	89	297
2,5	1,13	103	680	71	289
3	1,11	86	668	59	284
3,5	1,09	73	658	51	280
4	1,08	64	650	44	276
4,5	1,07	57	646	39	274
5	1,07	51	645	35	274
$\infty$	1	0	604	0	257

Напруга на трансформаторі  $U_{\text{сmax}}$  не має перевищувати  $U_{\text{доп}}$ , тоді

$$\frac{U_{\text{доп}1}}{U_{\text{зал}1}} = \frac{864}{604} = 1,43.$$

За даними таблиці 2.7, методом лінійної інтерполяції визначають

$$\left(\tau_{\phi}/T\right)_1 = 0,87,$$

а при  $\frac{U_{\text{доп}2}}{U_{\text{зал}2}} = \frac{468}{257} = 1,82;$

$$\left(\tau_{\phi}/T\right)_2 = 0,26.$$

Критична крутість фронту набігаючої хвилі:

$$U'_{кр1} = \frac{U_{зал1}}{T_1 \left( \tau_\phi / T \right)_1} = \frac{604}{2,35 \cdot 0,87} = 296 \text{ кВ/мкс};$$

$$U'_{кр2} = \frac{U_{зал2}}{T_2 \left( \tau_\phi / T \right)_2} = \frac{257}{1,45 \cdot 0,26} = 682 \text{ кВ/мкс.}$$

Подовження фронту під впливом імпульсної корони

$$\Delta \tau_\phi = \left( 0,5 + \frac{0,008 \cdot U_{\max}}{h_{\text{ср}}} \right) \cdot \frac{1}{k},$$

де  $h_{\text{ср}}$  – середня висота підвішування проводу;

$k_1 = 1,1$  при  $U_{\text{ном1}} = 330 \text{ кВ}$ , коли число проводів у фазі дорівнює 2 [6];

$k_2 = 1$  при  $U_{\text{ном2}} = 110 \text{ кВ}$ , коли число проводів у фазі дорівнює 1.

Амплітуда повного імпульсу:  $U_{\max1} = U_{50\text{ПЛ1}} = 1971 \text{ кВ}$ ,

$U_{\max2} = U_{50\text{ПЛ2}} = 635 \text{ кВ}$ .

Подовження фронту під впливом імпульсної корони [2]:

$$\Delta \tau_{\phi1} = \left( 0,5 + \frac{0,008 \cdot 1971}{23} \right) \cdot \frac{1}{1,1} = 1,07 \text{ мкс / км};$$

$$\Delta \tau_{\phi2} = \left( 0,5 + \frac{0,008 \cdot 635}{14,5} \right) \cdot \frac{1}{1} = 0,850 \text{ мкс / км.}$$

Довжина небезпечної зони:

$$x_{\text{кр1}} = \frac{U_{50\text{ПЛ1}}}{U'_{\text{кр1}} \cdot \Delta\tau_{\phi1}} = \frac{1971}{296 \cdot 1,07} = 6,22 \text{ км};$$

$$x_{\text{кр2}} = \frac{U_{50\text{ПЛ2}}}{U'_{\text{кр2}} \cdot \Delta\tau_{\phi2}} = \frac{635}{682 \cdot 0,850} = 1,10 \text{ км}.$$

Імовірність влучення блискавки у провід

$$P_{\alpha} = 10^{\frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{\text{оп}}}}{90} - 4}.$$

Визначення кута захисту виконують за параметрами опори ПБ330-7Н

$$\text{tg}(\alpha_1) = \frac{a_{\text{т}} - c}{h_{\text{тр}} + L_{\text{ПЛ1}}} = \frac{4,0 - 0,4}{4,0 + 3,94} = 0,453, \text{ отже } \alpha_1 = 24,4^{\circ}.$$

Визначення кутів захисту для опори ПБ110-1:

$$\text{tg}(\alpha_{21}) = \frac{a_{\text{т}}}{h_{\text{т1}} + L_{\text{ПЛ2}}} = \frac{2,0}{2,0 + 1,27} = 0,612, \text{ отже } \alpha_{21} = 31,5^{\circ};$$

$$\text{tg}(\alpha_{22}) = \frac{e_{\text{тр}}}{h_{\text{т1}} + h_{\text{т2}} + L_{\text{ПЛ2}}} = \frac{3,5}{2,0 + 3,0 + 1,27} = 0,558, \text{ отже } \alpha_{22} = 29,2^{\circ};$$

$$\text{tg}(\alpha_{23}) = \frac{a_{\text{т}}}{h_{\text{т1}} + h_{\text{т2}} + L_{\text{ПЛ2}}} = \frac{2,0}{2,0 + 3,0 + 1,27} = 0,319, \text{ отже } \alpha_{23} = 17,7^{\circ}.$$

Імовірність влучення блискавки у проводи ПЛ330 кВ

$$P_{\alpha1} = 10^{\frac{\alpha_1 \cdot \sqrt{h_{\text{оп1}}}}{90} - 4} = 10^{\frac{24,4 \cdot \sqrt{27}}{90} - 4} = 2,57 \cdot 10^{-3}.$$

Імовірність влучення блискавки у проводи ПЛ110 кВ:

$$P_{\alpha 21} = 10^{\frac{\alpha_{21} \cdot \sqrt{h_{оп2}}}{90} - 4} = 10^{\frac{31,5 \cdot \sqrt{19,5}}{90} - 4} = 3,52 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{\alpha 22} = 10^{\frac{\alpha_{22} \cdot \sqrt{h_{оп2}}}{90} - 4} = 10^{\frac{29,2 \cdot \sqrt{19,5}}{90} - 4} = 2,71 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{\alpha 23} = 10^{\frac{\alpha_{23} \cdot \sqrt{h_{оп2}}}{90} - 4} = 10^{\frac{17,7 \cdot \sqrt{19,5}}{90} - 4} = 7,38 \cdot 10^{-4};$$

$$P_{\text{прав}} = P_{\alpha 21} + P_{\alpha 22} = 3,52 \cdot 10^{-3} + 2,71 \cdot 10^{-3} = 6,23 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{\text{лів}} = P_{\alpha 23} = 7,38 \cdot 10^{-4};$$

$$P_{\alpha 2} = \frac{P_{\text{прав}} + P_{\text{лів}}}{2} = \frac{6,23 \cdot 10^{-3} + 7,38 \cdot 10^{-4}}{2} = 3,49 \cdot 10^{-3}.$$

Критичний струм блискавки [2], при якому відбудеться зворотне перекриття гірлянди ізоляторів у разі потрапляння струму блискавки в опору,

$$I_{\text{бл кр}} = \frac{U_{50\text{ПЛ}}}{R_{\text{ім}} + \delta \cdot h_{\text{оп}}},$$

де  $R_{\text{ім}}$  – імпульсний опір заземлення опори ( $R_{\text{ім}} = 15 \text{ Ом}$ ).

На опорі ПБ330-7Н кількість грозозахисних тросів – 2, тому приймається  $\delta_1 = 0,15$ ; на опорі ПБ110-1 кількість тросів – 1, тому  $\delta_2 = 0,30$ .

$$I_{\text{бл кр1}} = \frac{U_{50\text{ПЛ1}}}{R_{\text{ім}} + \delta_1 \cdot h_{\text{оп1}}} = \frac{1971}{15 + 0,15 \cdot 27} = 103,5 \text{ кА};$$

$$I_{\text{бл кр2}} = \frac{U_{50\text{ПЛ2}}}{R_{\text{ім}} + \delta_2 \cdot h_{\text{оп2}}} = \frac{635}{15 + 0,3 \cdot 19,5} = 30,5 \text{ кА}.$$

Імовірність перекриття гірлянди ізоляторів при ударі блискавки в опору:

$$P_{\text{оп1}} = e^{-0,04I_{\text{бл кр1}}} = e^{-0,04 \cdot 103,5} = 0,016;$$

$$P_{\text{оп2}} = e^{-0,04I_{\text{бл кр2}}} = e^{-0,04 \cdot 30,5} = 0,295.$$

Число перекриттів ізоляції підстанції внаслідок набігання на неї імпульсів грозових перенапруг:

$$\beta = 4 \cdot h_{\text{оп}} \cdot \left[ P_{\alpha} + (1 - P_{\alpha}) \cdot \left( \frac{4 \cdot h_{\text{оп}}}{l_{\text{пр}}} \cdot P_{\text{оп}} \right) \right] \cdot \frac{D_{\text{р}}}{100} \cdot \frac{n_{\text{ПЛ}} \cdot x_{\text{кр}}}{100};$$

$$\beta_1 = 4 \cdot 27 \left[ 2,57 \cdot 10^{-3} + (1 - 2,57 \cdot 10^{-3}) \cdot \left( \frac{4 \cdot 27}{300} \cdot 0,016 \right) \right] \cdot \frac{40}{100} \cdot \frac{1 \cdot 6,22}{100} = 0,0223 \text{ пер/рік};$$

$$\beta_2 = 4 \cdot 19,5 \left[ 3,49 \cdot 10^{-3} + (1 - 3,49 \cdot 10^{-3}) \cdot \left( \frac{4 \cdot 19,5}{200} \cdot 0,295 \right) \right] \cdot \frac{40}{100} \cdot \frac{3 \cdot 1,10}{100} = 0,122 \text{ пер/рік}.$$

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Правила улаштування електроустановок. Вид. офіційне. Міненерговугілля України. Харків: Вид-во «Форт», 2017. 760 с.
- 2 Акімов О. І., Сушко Д. Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2009. 217 с.
- 3 Бондаренко В. О., Черкашина В. В. Конструкції ліній електропередачі [для студ. усіх форм навчання електроенергетичних спец. ЗВО України]. Харків: Факт, 2020. 174 с.
- 4 Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посіб. В. О. Бржецицький та ін. Харків: НТУ «ХПІ», Торнадо, 2005. 930 с.
- 5 Основи електропостачання: конспект лекцій для здобувачів спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної і заочної форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [Електронне видання] / В. М. Козін, О. Ю. Савойський, С. В. Шашков, О. В. Рясна. Суми, 2025 308 с.
- 6 Проценко О. Р. Ізоляція електротехнічного обладнання: курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 133 с.
- 7 Проектування систем електропостачання залізниць: навч. посіб. / М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк, О. Д. Супрун, О. І. Семененко, Ю. О. Семененко. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 274 с.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
для виконання контрольної роботи

з освітнього компонента  
*«ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК  
ТА ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ»*

для здобувачів спеціальності G3 «Електрична інженерія»  
денної та заочної форм здобуття вищої освіти

Відповідальний за випуск Семененко О. І.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

Підписано до друку 05.06.2026 р.  
Умовн. друк. арк. 2,0. Тираж . Замовлення № .  
Видавець та виготовлювач Український державний університет  
залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.