

РОЗРАХУНОК ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Заземлення для особового складу і працівників органів і підрозділів цивільного захисту розглядається з трьох точок зору:

- спосіб захисту людини від ураження електричним струмом, наприклад при гасінні пожеж електроустановок;
- спосіб забезпечення нормального режиму роботи електроустановок (зокрема, усунення "перекосу фаз");
- спосіб запобігання виникненню іскрових розрядів внаслідок накопичування зарядів статичної електрики, дії блискавки тощо.

Улаштування заземлення регламентується вимогами глави 1.7 "Заземлення і захисні заходи електробезпеки" ПУЕ.

Заземлення – виконання електричного з'єднання між визначеною точкою системи або установки чи обладнання і локальною землею. Під *локальною землею* розуміють частину землі, яка перебуває в електричному контакті із заземлювачем і електричний потенціал якої не обов'язково дорівнює нулю. З'єднання з локальною землею може бути навмисним, ненавмисним і випадковим, а також постійним або тимчасовим.

Типи заземлення за призначенням:

– *захисне заземлення* – заземлення точки або точок системи, установки або обладнання з метою забезпечення електробезпеки (*електробезпека* – відсутність загрози з боку електроустановки життю, здоров'ю та майну людей, тваринам, рослинам і довкіллю, яка перевищує допустимий ризик);

– *функціональне (робоче) заземлення* – заземлення точки або точок системи, установки або обладнання з метою, що не пов'язана з електробезпекою (наприклад, для забезпечення електромагнітної сумісності (захисту від розрядів блискавки), захисту від розрядів статичної електрики тощо).

Функціональне заземлення для забезпечення електромагнітної сумісності (захисту від розрядів блискавки), захисту від розрядів статичної електрики спрямоване на запобігання виникненню іскрових розрядів на заземлений предмет і є важливим з погляду пожежної безпеки.

Одним з методів перевірного розрахунку заземлювача є *метод коефіцієнтів використання*.

Порядок перевірного розрахунку наступний:

Приклад 1. Розрахувати методом коефіцієнта використання заземлювальний пристрій трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ (потужність трансформатора $S_T = 250$ кВА), який передбачається виконати у вигляді замкнутого контура із сталеної штаби з прямокутним перерізом 40 x 4 мм і вертикальними електродами діаметром 0,012 м і завдовжки $l = 5,0$ м, закладеними на глибину $t = 0,8$ м від поверхні l землі з двошаровою електричною структурою:

$$\rho_1 = 220 \text{ Ом}\cdot\text{м}; \quad \rho_2 = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}; \quad h_1 = 2,8 \text{ м}; \quad m = \rho_1/\rho_2 = 220/150 \approx \approx 1,47.$$

Заземлювальний пристрій знаходиться на Півночі України (в третій

кліматичній зоні колишнього СРСР). Середньорічна тривалість гроз становить 60 год. Довжина мережі напругою 10 кВ:

- повітряної $L_n = 10$ км;
- кабельної $L_k = 0$ км.

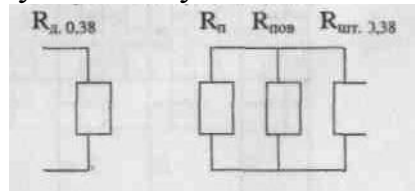
Як природний заземлювач використовується залізобетонний фундамент будівлі (площа будівлі $S_{\delta} = 50 \text{ м}^2$). Схема повітряної мережі напругою 0,38 кВ наведена на рис. 3.1.

Розв'язок Оскільки на трансформаторній підстанції використовуються електроустановки напругою до і понад 1000 В, то заземлювальний пристрій має відповідати таким вимогам:

- мережі напругою 0,38 кВ із глухозаземленою нейтраллю;
- мережі напругою 10 кВ з ізольованою нейтраллю.

1. Висуваємо до заземлювального пристрою вимоги мережі 0,38 кВ

Рисуємо схему заміщення



Для визначення допустимої величини опору заземлювального пристрою обчислюємо еквівалентний питомий опір двошарового ґрунту за формулою

$$\rho_{екв} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot l}{\rho_1 \cdot (t + l - h_1) + \rho_2 \cdot (h_1 - t)} = \frac{220 \cdot 150 \cdot 5}{220 \cdot (0.8 + 5 - 2.8) + 150 \cdot (2.8 - 0.8)} = 171.9 \text{ Ом}$$

Оскільки $\rho_{екв} > 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, то допустимий опір $R_{\delta 0,38}$ заземлювального пристрою можна перерахувати:

$$R_{\delta 0,38} < 4 \cdot \rho_{екв} / 100 = 4 \cdot 171.9 / 100 = 6.88 \text{ Ом},$$

а опір $R_{шт 0,38}$ штучного заземлювача

$$R_{шт 0,38} = 30 \cdot \rho_{екв} / 100 = 30 \cdot 171.9 / 100 = 51.57 \text{ Ом}.$$

Допустимий опір $R_{\delta 0,38}$ заземлювального пристрою, згідно зі схемою заміщення, має бути забезпечений з урахуванням опору R_n природних заземлювачів, опору $R_{шт}$ штучного заземлювача і сумарного опору $R_{пов}$ всіх повторних заземлень нульового проводу повітряних ліній 0,38 кВ:

$$\frac{1}{R_{\delta 0,38}} = \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{шт}} + \frac{1}{R_{пов}} \quad (1)$$

Визначаємо величину опору R_n природного заземлювача, в якості якого використовується залізобетонний фундамент будівлі, за формулою

$$R_n = 0.5 \cdot \frac{\rho_{ef}}{\sqrt{S_{\delta}}}$$

$$\rho_{ef} = \rho_1 \cdot \left(1 - e^{-\alpha \frac{h_1}{\sqrt{S_{\delta}}}} \right) + \rho_2 \cdot \left(1 - e^{-\beta \frac{\sqrt{S_{\delta}}}{h_1}} \right)$$

$$\rho_{ef} = 220 \cdot \left(1 - e^{-3.6 \frac{2.8}{\sqrt{50}}} \right) + 150 \cdot \left(1 - e^{-0.1 \frac{\sqrt{50}}{2.8}} \right) = 200.6 \text{ Ом}$$

де коефіцієнти $\alpha = 3.6$; $\beta = 0.1$; оскільки $\rho_1 > \rho_2$

Тоді $R_n = 0,5 \cdot 200,6 / \sqrt{50} = 14,18 \text{ Ом}$.

$$R_n = 14,18 \text{ Ом}.$$

Визначаємо величину сумарного опору $R_{нов}$ всіх заземлювальних пристроїв мережі

0,38 кВ. Для цього на заданій схемі мережі (рис. 1) розставимо заземлювальні пристрої за умовами захисту від перенапруг і повторного заземлення нульового проводу (якщо від ТП відходить тільки 1 лінія, то опір повторних заземлень у ній в розрахунку $R_{д 0,38}$ не враховується – лінію вивели в ремонт і загальний опір заземлюючого пристрою збільшується).

Допустима величина сумарного опору всіх заземлювальних пристроїв окремої повітряної лінії 0,38 кВ з урахуванням обчисленого вище еквівалентного питомого опору ґрунту не повинна перевищувати

$$R_n < 10 \cdot \rho_{екв} / 100 = 10 \cdot 171,9 / 100 = 17,19 \text{ Ом},$$

а кожного повторного заземлювача –

$$R_{пз} < 30 \rho_{екв} / 100 = 30 \cdot 171,9 / 100 = 51,57 \text{ Ом}.$$

Для зручності розрахунків приймаємо $R_{пз} = 50 \text{ Ом}$, що менше допустимого.

Визначаємо загальний опір заземлювальних пристроїв на лінії 1:

$$\frac{1}{R_{л1}} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{14}}$$

Оскільки $R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_{14}$, то

$$R_{л1} = \frac{R_{пз}}{4} = \frac{50}{4} = 12,5 \text{ Ом} < 17,19 \text{ Ом}$$

Аналогічно

$$\text{в лінії 2: } R_{л2} = \frac{R_{пз}}{3} = \frac{50}{3} = 16,66 \text{ Ом} < 17,19 \text{ Ом}$$

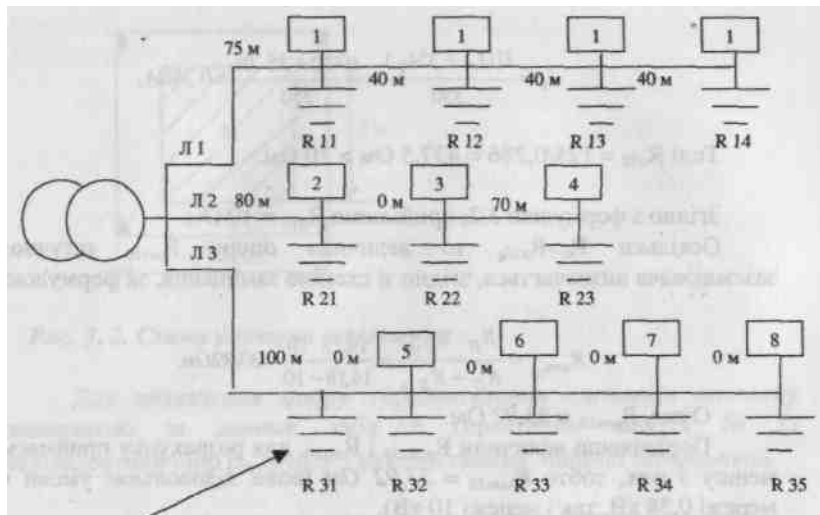
$$\text{в лінії 3: } R_{л3} = \frac{R_{пз}}{5} = \frac{50}{5} = 10,00 \text{ Ом} < 17,19 \text{ Ом}$$

Сумарний опір $R_{нов}$ всіх повторних заземлень у лініях 0,38 кВ буде:

$$R_{нов} = \frac{R_{л1} \cdot R_{л2} \cdot R_{л3}}{R_{л1} \cdot R_{л3} + R_{л1} \cdot R_{л2} + R_{л2} \cdot R_{л3}} = \frac{12,5 \cdot 16,66 \cdot 10,0}{12,5 \cdot 16,66 + 12,5 \cdot 10,0 + 16,66 \cdot 10,0} = 3,85 \text{ Ом}$$

Визначаємо сумарне значення $R_{нов}$ і R_n :

$$R_{екв} = \frac{R_n \cdot R_{нов}}{R_n + R_{нов}} = \frac{14,18 \cdot 3,85}{14,18 + 3,85} = 3,03 \text{ Ом}$$



Захист ПЛ від грозових перенапруг

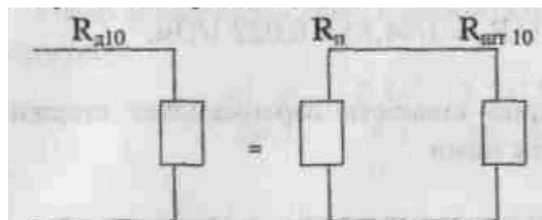
Рис. 1. Розрахункова схема мережі 0,38 кВ:

1 - корівник; 2 - кормоцех; 3 - склад; 4 - гараж; 5 - мехмайстерня; 6 - котельня; 7 - склад ПМР; 8 - теплиці.

Оскільки $\rho_{екв} = 3,03 \text{ Ом} < R_{\partial 038} = 6,88 \text{ Ом}$, то опір $R_{ум 0,38}$ штучного заземлювача приймаємо максимально допустимим за ПВЕ, тобто $R_{ум 0,38} \leq 51,57 \text{ Ом}$.

2. Висуваємо до заземлювального пристрою вимоги мережі 10 кВ

Рисуємо схему заміщення



Допустима величина опору $R_{\partial 10}$ заземлювального пристрою визначається за формулою

$$R_{\partial 10} = \frac{125}{I_3} \leq 10 \text{ Ом} \quad (2)$$

де I_3 – струм однофазного замикання на землю.

$$I_3 = \frac{U(L_n + 35L_k)}{350} = \frac{10(10 + 35 \cdot 0)}{350} = 0,286 \text{ А}$$

Тоді $R_{\partial 10} = 125/0,286 = 437,5 \text{ Ом} > 10 \text{ Ом}$.

Згідно з формулою 3.2, приймаємо $R_{\partial 10} = 10 \text{ Ом}$.

Оскільки $R_n > R_{\partial 10}$, то величина опору $R_{шт 10}$ штучного заземлювача визначається, згідно зі схемою заміщення, за формулою

$$R_{ум 10} = \frac{R_n \cdot R_{\partial 10}}{R_n - R_{\partial 10}} = \frac{14,18 \cdot 10}{14,18 - 10} = 33,92 \text{ Ом}$$

Порівнявши величини $R_{ум 0,38}$ і $R_{ум 10}$ для розрахунку приймаємо меншу з них, тобто $R_{ум 10} = 33,92 \text{ Ом}$ (вона задовольняє умови як мережі 0,38 кВ, так і мережі 10 кВ).

Тепер визначаємо опори вертикальних і горизонтальних елементів заземлювача.

Опір R_{ϵ} одного вертикального заземлювача визначаємо за формулою

$$R_{\epsilon} = \frac{K_c \cdot \rho_{\text{екв}}}{2\pi \cdot l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+1}{4h-1} \right) = \frac{1,15 \cdot 171,9}{2\pi \cdot 5} \left(\ln \frac{2 \cdot 5}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 44,83 \text{ Ом}$$

де $K_c = 1,15$ коефіцієнт сезонності;

$$h = t + 0,5 - 1 \text{ м } 0,8 + 0,5 \cdot 5 = 3,3 \text{ м.}$$

Провідність вертикального стержня буде:

$$g_{\epsilon} = 1/R_{\epsilon} = 1/44,83 = 0,022 \text{ 1/Ом.}$$

Визначаємо попередню кількість вертикальних стержнів без урахування екранування між ними

$$n = R_{\epsilon}/R_{\text{ум}} = 44,83/33,92 = 1,32.$$

Приймаємо 4 вертикальні стержні. Схема контура заземлювача у вигляді квадрата із стороною 9 м наведена нарис. 3.2, з якого видно, що довжина l_2 горизонтальних елементів заземлювача становить 36 м.

Рис. 3. 2. Схема контура заземлення

Для визначення опору горизонтальних елементів спочатку визначаємо за даними табл. 2.6 (практичне заняття № 2) еквівалентний опір $\rho_{\text{екв}}$ ґрунту з використанням лінійної інтерполяції.

$$1. \rho_1/\rho_2 = 1, \quad h_1 = 3 \text{ м} \quad l_2 = 36 \text{ м між } l_2 = 30 \text{ м і } l_2 = 40 \text{ м}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1,5 + \frac{1,48 - 1,5}{40 - 30} (36 - 30) = 1,49$$

$$2. \rho_1/\rho_2 = 2, \quad h_1 = 3 \text{ м} \quad l_2 = 36 \text{ м між } l_2 = 30 \text{ м і } l_2 = 40 \text{ м}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1,76 + \frac{1,72 - 1,76}{40 - 30} (36 - 30) = 1,74$$

$$3. \rho_1/\rho_2 = 1,47 \text{ між } \rho_1/\rho_2 = 1,0 \text{ і } \rho_1/\rho_2 = 2,0, \quad h_1 = 3 \text{ м, } l_2 = 36 \text{ м}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1,49 + \frac{1,74 - 1,49}{2 - 1} (1,47 - 1,0) = 1,61$$

Тоді $\rho_{\text{екв}} = 1,61 \cdot \rho_2 = 1,61 \cdot 150 = 241,5 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$

Тепер визначаємо опір горизонтального елемента заземлювача за формулою

$$R = \frac{k_c \cdot \rho_{\text{екв}}}{2\pi \cdot l_r} \ln \frac{2l_r^2}{b \cdot t} = \frac{2 \cdot 241,5}{2\pi \cdot 36} \ln \frac{2 \cdot 36^2}{0,04 \cdot 0,8} = 16,48 \text{ Ом}$$

де $k_c = 2$ – коефіцієнт сезонності для горизонтального елемента.

Провідність горизонтального елемента заземлювача буде:

$$g_r = 1/R_r = 1/16,48 = 0,061 \text{ 1/Ом.}$$

Значення коефіцієнта використання η знаходимо за даними табл. 2.7 (практичне заняття № 2) шляхом послідовної лінійної інтерполяції.

$$1. \rho_1/\rho_2 = 1; n = 1; h_1/l = 0,5 \quad a/l = 1,8; \text{ між } a/l = 1,0 \text{ і } a/l = 2,0$$

$$\eta = 0,505 + \frac{0,54 - 0,505}{2 - 1} (1,8 - 1,0) = 0,533$$

$$2. \rho_1/\rho_2 = 1; n = 4; h_1/l = 1,0 \quad a/l = 1,8; \text{ між } a/l = 1,0 \text{ і } a/l = 2,0$$

$$\eta = 0,505 + \frac{0,54 - 0,505}{2 - 1} (1,8 - 1,0) = 0,533$$

3. $\rho_1/\rho_2 = 1; n = 4; h_1/l = 0,56 \ a/l = 1,8$
 $\eta = 0,533$
4. $\rho_1/\rho_2 = 3; n = 4; h_1/l = 0,5 \ a/l = 1,8$; між $a/l = 1,0$ і $a/l = 2,0$
 $\eta = 0,631 + \frac{0,67 - 0,631}{2 - 1} (1,8 - 1,0) = 0,662$
5. $\rho_1/\rho_2 = 3; n = 4; h_1/l = 1 \ a/l = 1,8$; між $a/l = 1,0$ і $a/l = 2,0$
 $\eta = 0,607 + \frac{0,655 - 0,607}{2 - 1} (1,8 - 1,0) = 0,645$
6. $\rho_1/\rho_2 = 3; n = 4; h_1/l = 0,56 \ a/l = 1,8$; між $a/l = 0,5$ і $a/l = 1,0$
 $\eta = 0,662 + \frac{0,645 - 0,662}{1 - 0,5} (0,56 - 0,5) = 0,66$
7. $\rho_1/\rho_2 = 1,47$ (між $\rho_1/\rho_2 = 1,0$ і $\rho_1/\rho_2 = 3,0$); $n = 4; h_1/l = 0,56, \ a/l = 1,8$
 $\eta = 0,533 + \frac{0,66 - 0,533}{3 - 1} (1,47 - 1,0) = 0,563$

Тепер опір штучного заземлювача трансформаторної підстанції визначаємо за формулою

$$R_{um} = 1/(\eta \cdot (n \cdot g_e + g_r)) = 1/(0,563 \cdot (4 \cdot 0,022 + 0,061)) = 11,92 \text{ Ом} < 33,92 \text{ Ом}.$$

Як видно з виразу, опір розрахованого штучного заземлювача менший від допустимого опору.

Таким чином, штучний заземлювач є замкненим контуром, що включає 4 вертикальні стержні завдовжки 5 м кожний, діаметром 0,012 м, з'єднаних горизонтальною штабою перерізом 40 x 4 мм, завдовжки 36 м.

Загальний опір R_3 заземлювача з урахуванням опорів природного заземлювача і повторних заземлень нульового проводу ПЛІ при цьому буде:

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{пл}} + \frac{1}{R_{um}} + \frac{1}{R_{нов}} = \frac{1}{14,18} + \frac{1}{11,92} + \frac{1}{3,85} = 0,414 \frac{1}{\text{Ом}}$$

Отже $R_3 = 2,41 \text{ Ом} < R_{дон} = 6,88 \text{ Ом}$, що задовольняє вимоги ПУЗ-85.

Приклад 2. Розрахувати методом узагальнених параметрів заземлювальний пристрій трансформаторної підстанції 110/35 кВ, який передбачається виконати у вигляді складного контурного заземлювача з розвиненими внутрішніми горизонтальними перемичками і вертикальними електродами, розміщеними лише по периметру контура. Довжина контура заземлення 60 м, ширина 40 м. Ґрунт на території підстанції двошаровий, питомий опір верхнього шару $\rho_1 = 134 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, нижнього

$\rho_2 = 70 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, глибина верхнього шару $h_1 = 3,5 \text{ м}$. По периметру території підстанції в ґрунт на глибину 0,8 м забиті вертикальні стержні завдовжки 5 м, що з'єднані між собою сталлюю шайбою. Відстань між стержнями 5 м. Струм замикання на землю на високій стороні становить 1500 А, на низькій – 15 А. Природні заземлювачі на території підстанції відсутні.

Розв'язок. Заземлювальний пристрій повинен задовольняти вимогам мережі 110 кВ і мережі 35 кВ.

Допустима величина опору заземлювального пристрою для мережі з ефективно заземленою нейтраллю відповідно до пункту 1.7.51 ПУЗ-85 повинна бути не більше R_0
 $110 < 0,5 \text{ Ом}$.

Для мережі напругою 35 кВ з ізольованою нейтраллю допустима величина опору заземлювального пристрою відповідно до пункту 1.7.57 ПУЗ-85 визначається за формулою 2

$$R_{\partial 35} = \frac{250}{I_3} \leq 10 \text{ Ом}$$

Оскільки $R_{\partial 35} = 250/15 = 16,6$ Ом, то приймаємо $R_{\partial 35} = 10$ Ом.

Порівнюючи $R_{\partial 110} = 0,5$ Ом та $R_{\partial 35} = 10$ Ом і враховуючи, що природний заземлювач відсутній, для розрахунку приймаємо $R_3 = 0,5$ Ом.

Враховуючи, що в середині контура по його ширині прокладено п'ять і по довжині ще дві штаби, загальна довжина горизонтальних штаб буде:

$$L = 60 \cdot 4 + 40 \cdot 7 = 520 \text{ м.}$$

Оскільки $\mu = \rho_1/\rho_2 = 1,91$, то узагальнений параметр T визначається за формулою 2.12 (практичне заняття № 2)

$$T = 1 \cdot L/a \sqrt{S},$$

де S – площа заземлюючого контура, м,

$$S = 60 \cdot 40 = 2400 \text{ м}^2.$$

Тоді $T = 5 \cdot 520/5 \cdot 48,98 = 10,6$.

Визначаємо проміжні параметри K і k за формулами 2.15 і 2.16 (практичне заняття № 2)

$$K = C_1 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^m = 0,52 \cdot 1,91^{0,239+0,0693,5} = 0,707$$

$$k = C_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^p = 0,149 \cdot 1,91^{0,338+0,2453,5} = 0,321$$

Опір заземлюючого контура визначимо за формулою 2.14

$$R_3 = \rho_2 \frac{K}{\sqrt{S}} \cdot T^k = 70 \frac{0,707}{48,98} \cdot 10,6^{0,321} = 0,472$$

що менше допустимого опору – 0,5 Ом.

Напруга дотику в середині складного заземлювача буде:

$$U_{\partial} = I_3 \cdot R_a \cdot \alpha_1,$$

де I_3 – струм замикання на землю, А; α_1 , – коефіцієнт напруги дотику, що визначається як:

$$\alpha_1 = MT^{\mu},$$

де $\mu = \rho_1/\rho_2$; M – параметр, що залежить від p і визначається за даними табл. 2.4 (практичне заняття № 2) методом лінійної інтерполяції:

$$M = 0,37 \frac{0,62 - 0,37}{2 - 0,5} (1,91 - 0,5) = 0,6$$

$$\alpha_1 = 0,6 \cdot 10,6^{-1,91} = 0,006$$

Тоді напруга дотику U_{∂} буде:

$$U_{\partial} = 1500 \cdot 0,472 \cdot 0,006 = 4,25 \text{ В.}$$

Схема заземлювального пристрою наведена на рис. 3.3.