

НЕБЕЗПЕКА УРАЖЕННЯ ЛЮДИНИ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ

1. [Схеми дотику людини до струмовідних частин і аналіз виниклої небезпеки.](#)
 - 1.1 [Двофазний дотик.](#)
 - 1.2 [Однофазний дотик.](#)
2. [Небезпека замикання на землю та корпус в електроустановках.](#)
 - 2.1 [Напруга дотику.](#)
 - 2.2 [Напруга кроку.](#)
 - 2.3 [Прилади для їх визначення.](#)

1 Схеми дотику людини до струмовідних частин і аналіз виниклої небезпеки

Згідно з вимогами електробезпеки (ПУЕ) всі електроустановки поділяються за напругою на установки з номінальною напругою до 1000 В і установки з номінальною напругою понад 1000 В.

Залежно від джерел живлення, електричні мережі трифазного струму можуть бути з ізолюваною або глухозаземленою нейтраллю.

Мережі з ізолюваною нейтраллю – це такі, де нейтраль трансформатора або генератора не приєднана до заземлюючого пристрою, або приєднана до нього через апарати, що мають великий опір.

Мережі з глухозаземленою нейтраллю трансформатора або генератора – це такі, де нейтраль приєднана до заземлюючого пристрою безпосередньо через апарати, що мають малий опір.

У електроустановках напругою до 1000 В застосовують як ізолювану, так і глухозаземлену нейтраль. У тих умовах, де немає можливості контролювати стан ізоляції, де вона піддається дії температури і вологи, влаштовують мережі з глухозаземленою нейтраллю.

У мережах з глухозаземленою нейтраллю ізоляція провідників не виявляє захисної дії при дотику людини до однієї з фаз мережі. У цьому випадку на організм людини буде діяти струм, обмежений лише опором заземлення нейтралі і опором тіла людини. Тому питання вибору режиму нейтралі є досить важливим заходом безпеки при обслуговуванні електроустановок.

У тих умовах, де є можливість постійно контролювати стан ізоляції, влаштовують мережі з ізолюваною нейтраллю. При справній ізоляції такі мережі більш безпечні. Їх влаштовують на земснарядах, торфорозробках, в кар'єрах та ін. (рис 2.1).

Ураження людини електричним струмом може статися при:

- 1) двофазному дотику до неізолюваних частин електроустановки, що знаходиться під напругою;
- 2) однофазному дотику неізолюваної від землі людини до струмовідних частин, що знаходяться під напругою;
- 3) дотику людини до неструмовідних частин (корпусів) електроустановок, що виявилися під напругою внаслідок замикання фази на корпус;
- 4) наближенні людини на небезпечну відстань до струмовідних частин, що знаходяться під напругою;
- 5) потраплянні під крокову напругу в зоні розтікання струму;
- 6) дії атмосферної електрики під час блискавки;
- 7) звільненні людини, що знаходиться під напругою.

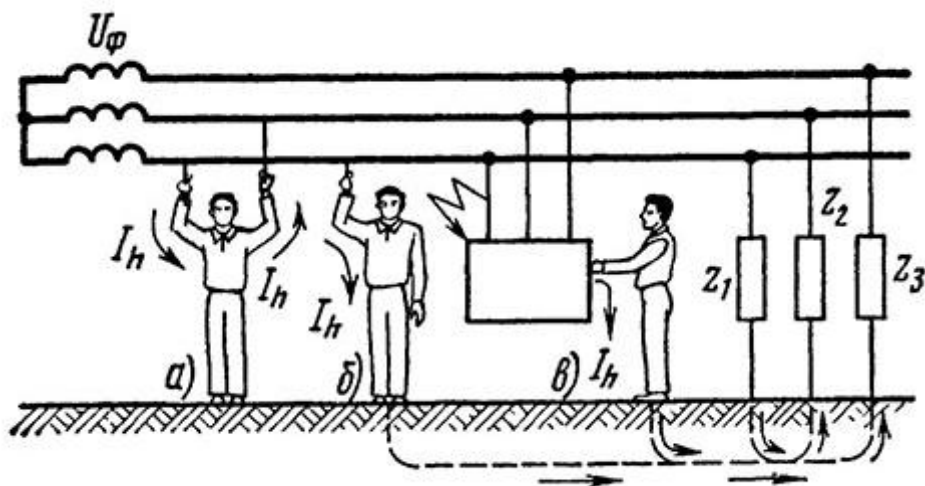


Рис. 2.1. Випадки дотикання людини до проводів трифазної електричної мережі:
 а — двофазне; б і в — однофазне дотикання Z_1 Z_2 Z_3 — повний опір дротів відносно землі,
 U_ϕ — фазна напруга, I_h — струм, що проходить крізь тіло людини

Всі випадки ураження людини електричним струмом, тобто проходження струму через тіло людини, є **наслідком його доторкання не менш ніж до двох точок електричного поля, між якими існує деяка напруга.**

Небезпека такого доторкання оцінюється струмом, що проходить через тіло людини I_h , або напругою, під якою вона опинилася, тобто напругою дотику $U_{\text{дот.}}$, і **залежить від таких факторів:**

- 1) схеми дотику людини до електромережі;
- 2) напруги мережі;
- 3) схеми самої мережі;
- 4) режиму роботи її нейтралі;
- 5) величини опору ізоляції струмовідних частин;
- 6) ємності струмовідних частин відносно землі тощо.

Розрізняють найбільш характерні **дві схеми ввімкнення в електричну мережу:**

- між двома фазами електричної мережі (**двофазний дотик**)
- між однією фазою і землею (**однофазний дотик**)

Дія електричного струму залежить від умов включення людини в електричну мережу. Схема включення тіла людини в електричне коло може бути однофазною, коли людина дотикається до однієї фази електроустановки, що перебуває під напругою, і двофазною, коли людина дотикається до двох фаз.

Двофазне доторкання, як правило, більш небезпечне, оскільки до тіла людини прикладається найбільша в даній мережі напруга — лінійна, а струм має, незалежно від режиму нейтралі, найбільше значення, A :

Випадки двофазного дотикання відбуваються дуже рідко — при роботі на щитках, повітряних лініях з несправними засобами захисту (монтерські інструменти з пошкодженою ізоляцією, діелектричні рукавиці з проколом).

Однофазне дотикання є менш небезпечним, ніж двофазне, але воно виникає набагато частіше.

Небезпека електричних мереж з ізолюваною чи глухозаземленою нейтраллю залежить від напруги та режиму (аварійний чи нормальний) роботи електричного устаткування. У електричних установках напругою до 1000 В при нормальному режимі (без обривів та пошкодженої ізоляції) мережа з ізолюваною нейтраллю безпечніша, ніж із глухозаземленою, а при аварійному режимі (обриваний провідник, що дотикається землі, або пошкоджена ізоляція) безпечнішою є мережа з глухозаземленою нейтраллю. При напрузі понад 1000 В однаково небезпечні електроустановки з ізолюваними і з глухозаземленими нейтраллями. Будь-яке одно- або двофазне дотикання до цих мереж є дуже небезпечним.

У промисловості багато виробничих процесів супроводжується електризацією, що призводить до утворення зарядів статичного струму. Напруга відносно землі при цьому досягає десятків кВ. Так, при розмолі і тонкому дробленні матеріалів $U = 10-50$ кВ, при розбризкуванні фарб $U = 10$ кВ, при русі гумової стрічки трансформатора $U = 45$ кВ. Заряди статичної електроенергії можуть накопичуватися і на людях, при цьому потенціал ізолюваної від землі людини може сягати 7 кВ.

Схема мережі, а відтак і режим нейтралі джерела струму, що живить цю мережу, вибирається за технологічними вимогами, а також за умовами безпеки.

Електричні мережі у сільському господарстві дуже розгалужені, мають значну довжину і навіть при хорошому стані ізоляції спостерігаються значні струми витікання. Надійніше реагує на погіршення стану ізоляції система з глухозаземленою нейтраллю, **в якій пошкодження ізоляції призводить до короткого замикання і пошкоджена ділянка автоматично вимикається апаратурою захисту.**

Тому у сільському господарстві при напрузі до 1000 В переважно застосовують мережі з глухозаземленою нейтраллю і нульовим проводом.

Винятком є тільки електричні мережі пересувних електроустановок, що живляться від автономного генератора, де зустрічається трифазна мережа напругою 220В з ізолюваною нейтраллю.

[Повернутися до змісту](#)

1.1. Двофазний дотик

Двофазне (двополюсне) дотик. При двофазному доторканні до струмопровідних частин (рис. 2) сила струму I_L , що проходить через тіло людини визначається за формулами:

- для мережі постійного або однофазного змінного струму

$$I_L = U_{роб} / R_L ; \quad (2.1)$$

- для трифазної мережі

$$I_L = \frac{U_{лін}}{R_L} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi}}{R_L}, \quad (2.2)$$

де R_L – опір тіла людини, Ом; $U_{роб}$ – робоча напруга мережі, В; $U_{лін}$ – лінійна напруга мережі, В; U_{ϕ} – фазна напруга мережі, В.

Двофазне доторкання є більш небезпечним, оскільки I_L залежить лише від напруги мережі та опору тіла людини. Однак такі випадки зустрічаються досить рідко і є, зазвичай, наслідками порушення правил техніки безпеки.

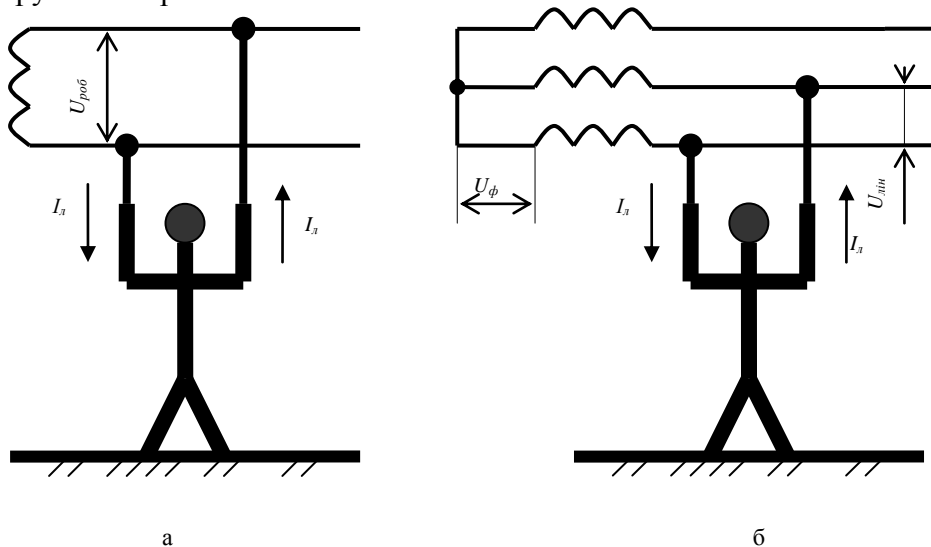


Рис. 2.2. Схема двофазного доторкання:

а – в мережі постійного або однофазного струму; б – в трифазній мережі

[Повернутися до змісту](#)

1.2. Однофазний дотик

Однофазний (однополюсний) дотик. При однофазному доторканні в мережі з глухозаземленою нейтраллю (рис. 2.3.,а) через тіло людини проходить менший струм, оскільки напруга, під якою опинилась людина не перевищує фазної, що у $\sqrt{3}$ разів є меншою ніж лінійна напруга мережі. Окрім того, загальний опір електричного кола може складатися не лише з опору тіла людини R_l , та опору заземлення нейтралі R_0 , а й з опору підлоги (основи) R_n , на якій стоїть людина та опору її взуття R_e . В загальному випадку I_l визначається за формулою:

$$I_l = \frac{U_\phi}{R_l + R_0 + R_n + R_e}. \quad (2.3)$$

При однофазному доторканні у трифазній мережі з ізолюваною нейтраллю (рис. 2.3.,б) струм, що пройде через тіло людини буде меншим ніж при аналогічному доторканні у мережі з глухозаземленою нейтраллю. Це пов'язано з тим, що до загального опору електричного кола ще додається опір ізоляції (r_a, r_e, r_c) та ємності (c_a, c_e, c_c) фаз. У такій мережі напругою до 1000 В коли значення опору ізоляції всіх трьох фаз рівні ($r_a = r_e = r_c$), а ємнісним опором можна знехтувати ($c_a = c_e = c_c$), то струм, що проходить через людину, дорівнює:

$$I_l = \frac{U_\phi}{R_l + R_0 + R_e + R_n + \frac{r}{3}} = \frac{3U_\phi}{3(R_l + R_0 + R_n + R_e) + r}, \quad (2.4)$$

$$\text{а при } R_0 = R_n = R_e = 0 \quad I_l = \frac{3U_\phi}{3R_l + r}. \quad (2.5)$$

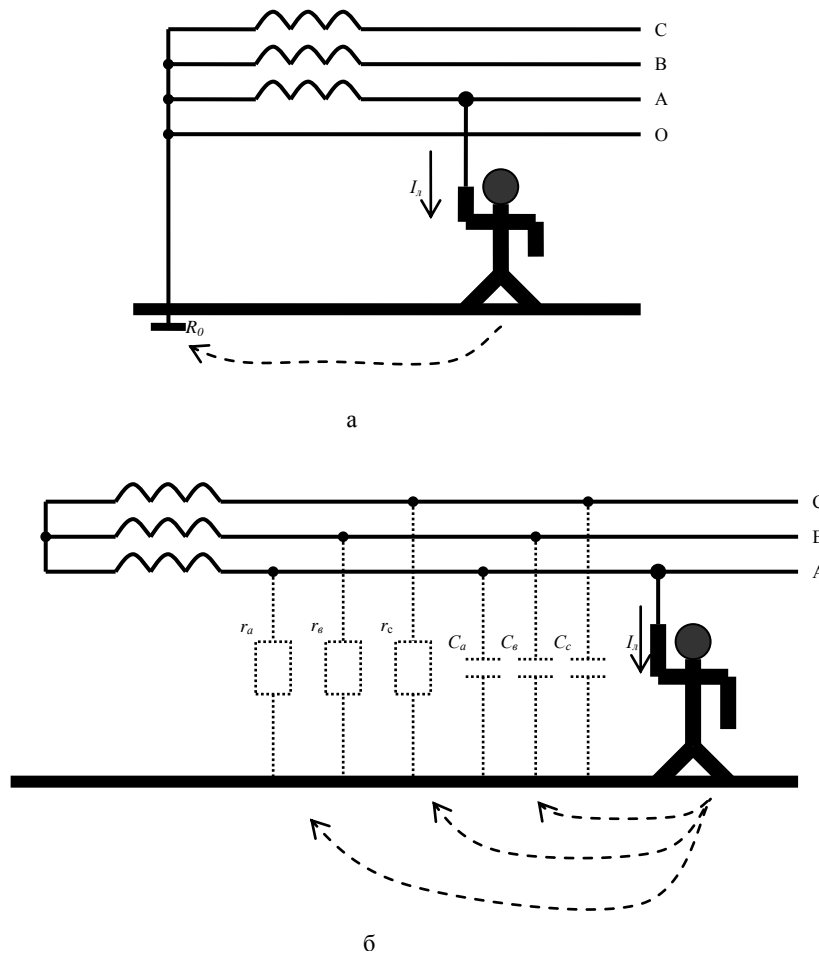


Рис. 2.3. Схема однофазного доторкання при нормальному режимі роботи:

а – у трифазній мережі з глухозаземленою нейтраллю; б – у трифазній мережі з ізолюваною нейтраллю

Необхідно зауважити, що вищенаведені міркування стосуються нормальної роботи електромережі. При аварійних режимах електромережі (замиканні на корпус або на землю) умови змінюються. Наприклад, якщо одна із фаз замикається на землю (рис. 2.4.), то струм, який пройде через тіло людини у випадку її доторкання до справної фази можна виразити такою залежністю:

$$I_l = \frac{U'_{\text{лін}}}{R_l + R_k} \quad (2.6)$$

Як правило, опір короткого замикання R_k досить малий і ним можна знехтувати, тоді

$$I_l = \frac{U'_{\text{лін}}}{R_l}, \quad (2.7)$$

де $U_\phi < U'_{\text{лін}} < U_{\text{лін}}$.

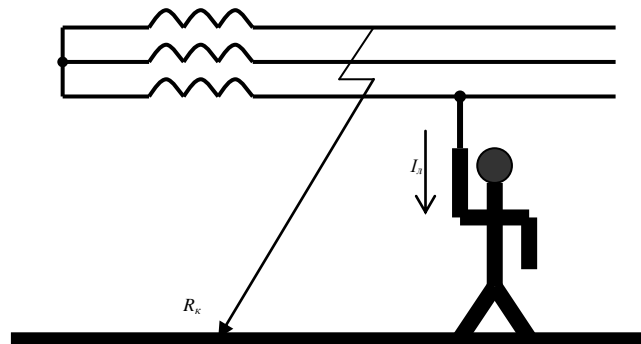


Рис. 2.4. Схема однофазного доторкання до справної фази несправної електромережі

Таким чином, проаналізувавши розглянуті умови ураження людини струмом можна зробити наступні висновки:

- найменш небезпечним є однофазне доторкання до проводу справної мережі з ізолюваною нейтраллю;
- при замиканні однієї із фаз на землю (несправна мережа) небезпека однофазного доторкання до справної фази у такій мережі більша ніж у справній мережі при будь-якому режимі нейтралі;
- при однофазному доторканні у мережі з глухозаземленою нейтраллю наслідки ураження істотно залежать від опору основи (підлоги), на якій стоїть людина та опору її взуття;
- найнебезпечнішим є двофазне доторкання при будь-яких режимах нейтралі;
- у мережах напругою понад 1000 В небезпека однофазного чи двофазного доторкання практично однакова, при цьому є висока імовірність смертельного ураження.

[Повернутися до змісту](#)

2. Небезпека замикання на землю та корпус в електроустановках

Замиканням на землю називається випадкове електричне з'єднання частин електроустановки, які знаходяться під напругою, із землею. Таке замикання може відбутися при пошкодженні ізоляції та переході фазної напруги мережі на заземлені корпуси електроустановок, при падінні на землю проводу під напругою та в інших випадках. Струм від заземлених корпусів, що опинилися під напругою переходить у землю через електрод, який здійснює контакт з ґрунтом. Спеціальний металевий електрод, який для цього використовують прийнято називати *заземлювачем*. Струм, розтікаючись у ґрунті створює на його поверхні потенціали. Оскільки заземлювач може мати різні розміри та форму, то закон розподілу потенціалів визначається складною залежністю. Окрім того, електричні властивості ґрунту неоднорідні, особливо ґрунту з різними прошарками. Для того, щоб спростити картину розтікання електричного поля приймаємо, що струм стікає в землю через

одинарний заземлювач напівсферичної форми, який знаходиться в однорідному ізотопному ґрунті з питомим опором ρ , котрий значно перевищує питомий опір матеріалу заземлювача (рис. 3.1.). Густина струму δ в точці А на поверхні ґрунту, що знаходиться на відстані x від заземлювача визначається як відношення струму замикання I_3 до площі поверхні півкулі радіусом x :

$$\delta = \frac{I_3}{2\pi x^2}. \quad (3.1)$$

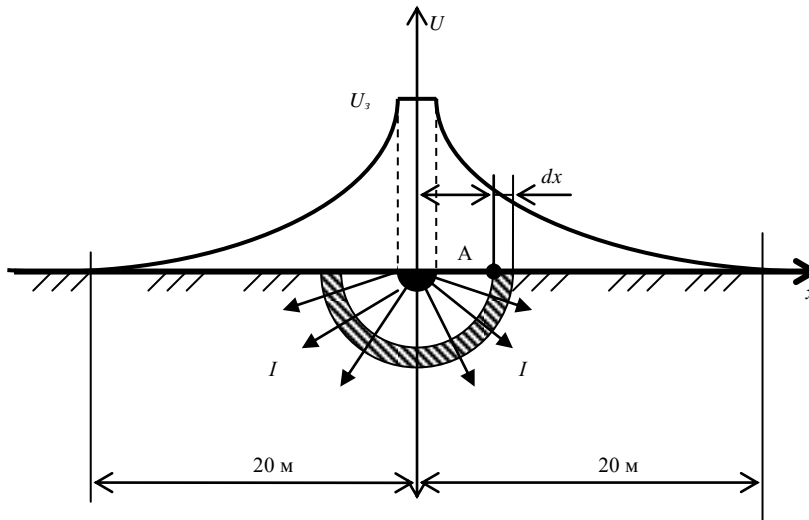


Рис. 3.1. Розтікання струму в ґрунті через напівсферичний заземлювач

Для визначення потенціалу точки А виділимо елементарний шар товщиною dx . Падіння напруги в цьому шарі становить $dU = E \cdot dx$. Потенціал точки А дорівнює сумарному падінню напруги від точки А до землі, тобто нескінченно віддаленої точки з нульовим потенціалом:

$$\varphi_A = U_A = \int_x^{\infty} dU = \int_x^{\infty} E \cdot dx. \quad (3.2)$$

Напруженість електричного поля в точці А визначається із закону Ома, який виразимо наступною формулою:

$$E = \delta \cdot \rho. \quad (3.3)$$

Підставивши це значення, одержимо:

$$\varphi_A = U_A = \int_0^{\infty} \delta \cdot \rho \cdot dx = \int_0^{\infty} \frac{I_3 \rho}{2\pi x^2} dx = \frac{I_3 \rho}{2\pi x}. \quad (3.4)$$

З формули (12) видно, що потенціали точок ґрунту в зоні розтікання змінюються за гіперболічним законом.

Зоною розтікання струму називається зона землі, за межами якої електричні потенціали, обумовлені струмом замикання на землю можна умовно прийняти за нуль. Як правило, така зона обмежується об'ємом півсфери радіусом приблизно 20 м.

Людина, що стоїть на землі чи на струмопровідній підлозі в зоні розтікання струму і доторкається при цьому до заземлених струмопровідних частин, опиняється під напругою доторкання. Якщо ж людина стоїть чи проходить через зону розтікання то вона може опинитися під напругою кроку, коли її ноги знаходяться в точках з різними потенціалами.

Повернутися до змісту

2.1 Напряга дотику

Напрягою дотику (рис.3.2) називають напругу між двома точками кола струму замикання на землю (на корпус), до яких одночасно доторкається людина, інакше кажучи, спад напруги в опорі тіла людини:

$$U_d = I_d \cdot R_{л} \quad (3.5)$$

де I_d – струм, що проходить через людину по шляху “рука – ноги”; $R_{л}$ – опір тіла людини.

В області захисних заземлень, занулень тощо дна з цих точок має потенціал заземлювача φ_3 , а друга – потенціал основи в тому місці, де стоїть людина $\varphi_{осн}$. У цьому випадку напряга дотику буде:

$$U_d = \varphi_3 - \varphi_{осн}$$

Для людини, що стоїть на землі і доторкається до заземленого корпусу, що опинився під напругою, визначити напругу доторкання $U_{дот}$ можна як різницю потенціалів між руками φ_p та ногами φ_n

$$U_{дот} = \varphi_p - \varphi_n \quad (3.6)$$

Оскільки людина доторкається до заземленого корпусу, то потенціал руки і є потенціалом цього корпусу або напругою замикання:

$$\varphi_p = U_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi x_3} \quad (3.7)$$

Ноги людини знаходяться в точці А і потенціал ніг дорівнює:

$$\varphi_n = \varphi_A = \frac{I_3 \rho}{2\pi x} \quad (3.8)$$

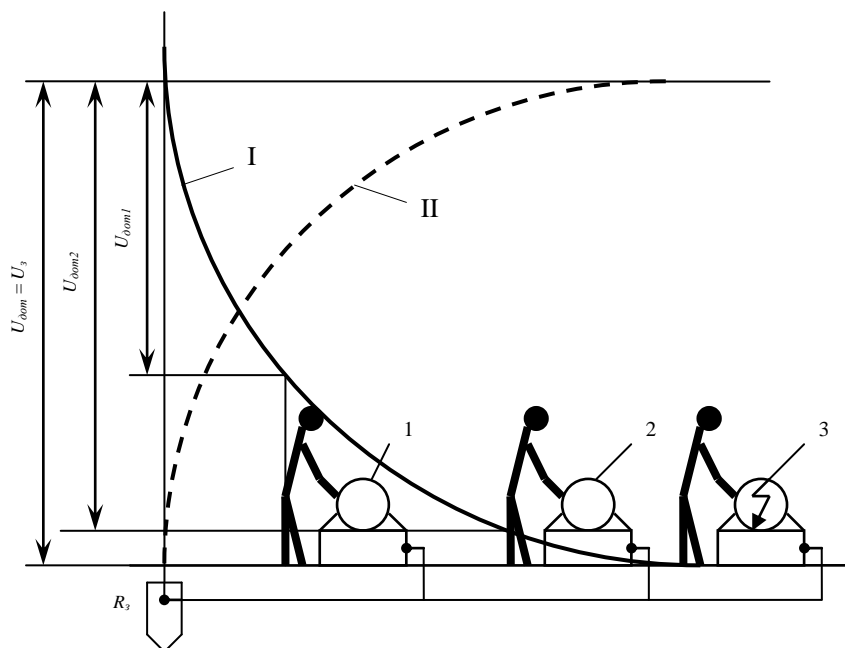


Рис. 3.2. Напряга доторкання до заземлених струмопровідних частин, що опинилися під напругою

На рис. 3.2 показано три корпуси споживачів (електродвигунів), які приєднані до заземлювача R_3 . Потенціали на поверхні ґрунту при замиканні на корпус будь-якого споживача фазної напруги розподіляються за кривою I . Потенціали усіх корпусів однакові, оскільки вони електрично з'єднанні між собою заземлювальним провідником, падінням напруги в якому можна знехтувати. Для того, щоб визначити напругу доторкання $U_{дот}$ необхідно від напруги замикання U_3 відняти потенціал тої точки ґрунту, на якій стоїть людина. Якщо людина стоїть над заземлювачем то напруга доторкання дорівнює нулю, оскільки, потенціали рук та ніг однакові і дорівнюють потенціалу корпусів (напрузі замикання). При віддалені від заземлювача напруга доторкання зростає і у людини, що доторкнулась до останнього (третього) корпусу вона стає рівною напрузі замикання,

оскільки в цій точці ґрунту потенціал ніг людини дорівнює нулю. Таким чином, напруга доторкання в межах розтікання струму є часткою напруги замикання і зменшується в міру наближення до заземлювача. В загальному випадку для заземлювачів будь-якої конфігурації

$$U_{\text{дот}} = U_3 \alpha, \quad (3.9)$$

де α – коефіцієнт напруги доторкання, який залежить від форми заземлювача і відстані від нього (приймається за таблицею).

[Повернутися до змісту](#)

2.2 Напруга кроку.

Людина, яка опиняється в зоні розтікання струму, знаходиться під напругою, якщо її ноги стоять на точках ґрунту з різними потенціалами. *Напругою кроку (кроковою напругою)* називається напруга між двома точками електричного кола, що знаходяться одна від одної на відстані кроку (0,8 м) і на яких одночасно стоїть людина. На рис. 3.3 наведено розподіл потенціалів навколо одиночного заземлювача. Напруга кроку U_k визначається як різниця потенціалів між точками 1 та 2, на яких стоять ноги людини:

$$U_k = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (3.10)$$

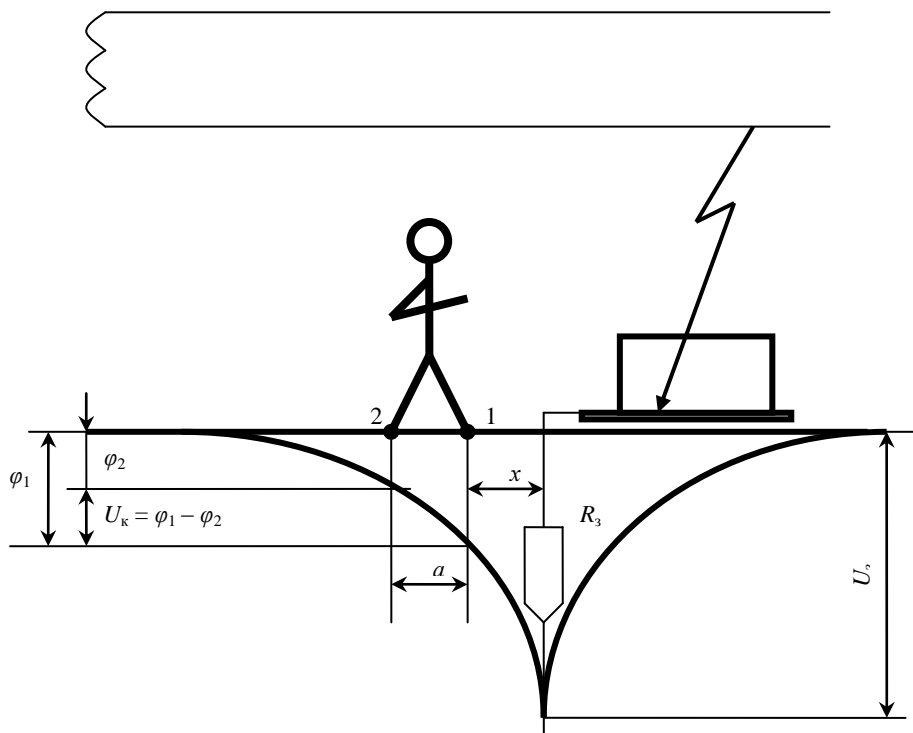


Рис. 3.3. Напруга кроку

Оскільки точка 1 знаходиться на відстані x від заземлювача, то її потенціал при напівсферичному заземлювачі дорівнює

$$\varphi_1 = I_3 \rho / 2\pi x. \quad (3.11)$$

Точка 2 знаходиться на відстані $x + a$, де a – відстань кроку людини. в такому випадку її потенціал становить

$$\varphi_2 = I_3 \rho / 2\pi(x + a). \quad (3.12)$$

Тоді

$$U_k = \frac{I_3 \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x + a} \right) = \frac{I_3 \cdot \rho \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot x \cdot (x + a)}. \quad (3.13)$$

Із формули (3.13) та рис. 3.3. видно, що напруга кроку знижується в міру віддалення від точки замикання на землю та при меншій довжині кроку людини. хоча при напрузі кроку струм проходить через тіло людини по шляху „нога – нога”, який є менш небезпечним за інші, однак відомо немало випадків ураження струмом, які спричинені саме кроковою

напругою. Важкість ураження зростає із-за судомних скорочень м'язів ніг, що призводить до падіння людини, при цьому струм проходить по шляху „рука – ноги” через життєво важливі органи. Крім того, зріст людини більший за довжину кроку, що обумовлює більшу різницю потенціалів.

У випадку обриву проводу лінії електропередач забороняється наближатися до місця замикання проводу на землю в радіусі 8 м. Виходити із зони розтікання струму необхідно кроками, що не перевищують довжини ступні. Якщо необхідно наблизитися до місця замикання проводу на землю, то для запобігання ураження кроковою напругою необхідно вдягнути діелектричні калоші чи боти.

[Повернутися до змісту](#)

2.3 Прилади для їх визначення

Безпечна експлуатація електроустановок забезпечується:

- конструкцією електроустановок;
- технічними способами та засобами захисту;
- організаційними та технічними заходами (рис. 3.4).

Конструкція електроустановок

Конструкція електроустановок повинна відповідати умовам їх експлуатації та забезпечувати захист персоналу від можливого доторкання до рухомих та струмопровідних частин, а устаткування – від потрапляння всередину сторонніх предметів та води.

За способом захисту людини від ураження електричним струмом встановлено п'ять класів електротехнічних виробів: 0, 0І, І, ІІ, ІІІ. До класу 0 належать вироби, які мають робочу ізоляцію і у яких відсутні елементи для заземлення. До класу 0І належать вироби, які мають робочу ізоляцію, елемент для заземлення та провід без заземлювальної жили для приєднання до джерела живлення. До класу І належать вироби, які мають робочу ізоляцію та елемент для заземлення. У випадку, коли виріб класу І має провід до джерела живлення, то цей провід повинен мати заземлювальну жилу та вилку із заземлювальним контактом. До класу ІІ належать вироби, які мають подвійну або посилену ізоляцію і не мають елементів для заземлення. До класу ІІІ належать вироби, які не мають внутрішніх та зовнішніх електричних кіл з напругою вищою ніж 42 В.

Технічні способи та засоби захисту

Технічні способи та засоби захисту (ТСЗЗ) підрозділяються на (рис. 3.4.):

- ТСЗЗ при нормальних режимах роботи електроустановок (ізоляція струмопровідних частин, недосяжність неізольованих струмопровідних частин, попереджувальна сигналізація, мала напруга, електричний поділ мереж, вирівнювання потенціалів);
- ТСЗЗ при переході напруги на нормально неструмопровідні частини електроустановок (захисні заземлення, занулення, вимикання);
- Електрозахисні засоби та запобіжні пристосування.

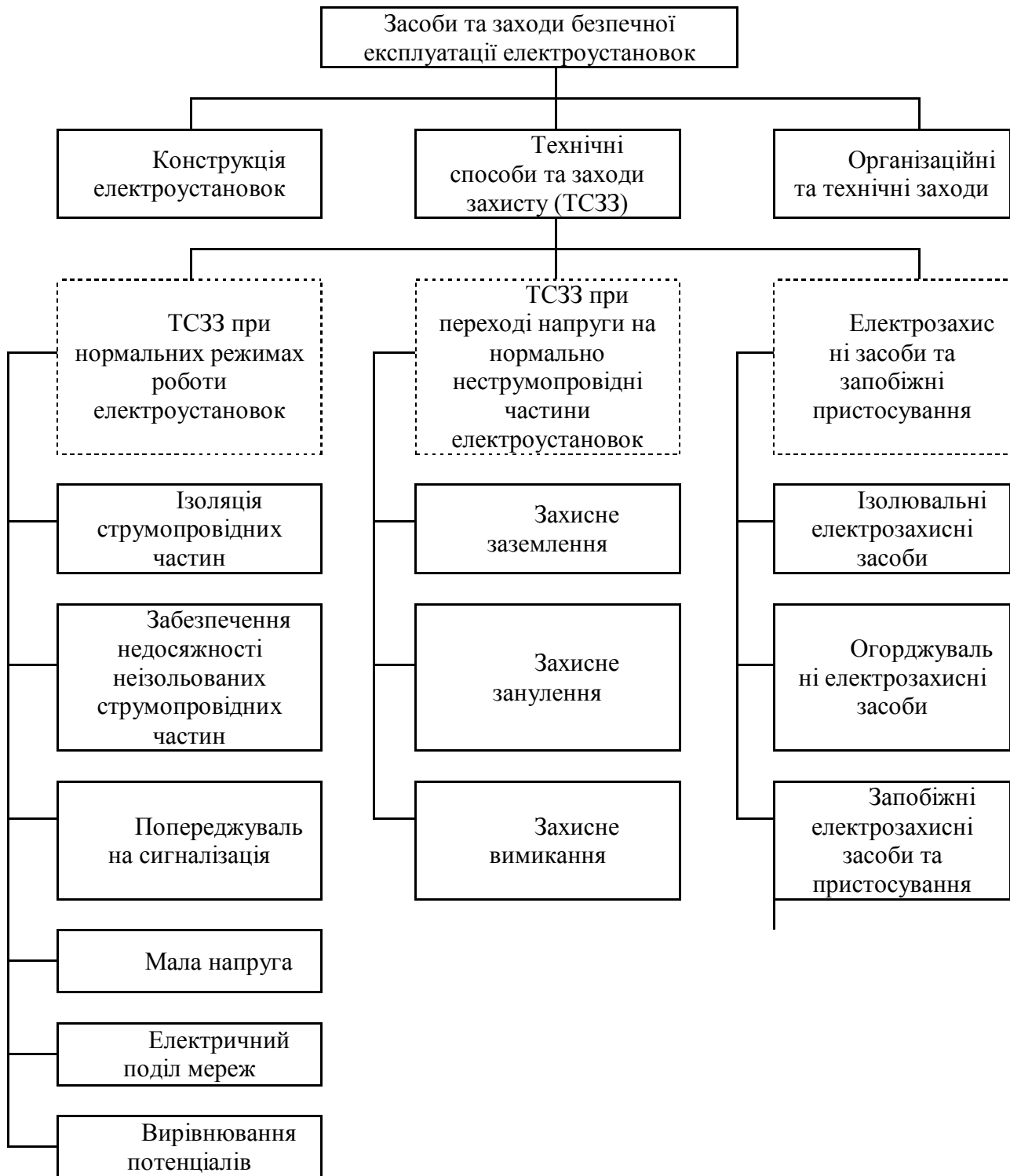


Рис. 3.4. Класифікація засобів та заходів безпечної експлуатації електроустановок

[Повернутися до змісту](#)