

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ

Мета: ознайомитися із причинами ураження людини електричним струмом та факторами, які впливають на його наслідки; навчитись оцінювати тяжкість ураження за величиною струму та величиною напруги кроку.

Безпосередніми причинами ураження людей електричним струмом є наступні:

- дотик до неізольованих струмоведучих частин електроустановок, які знаходяться під напругою, або до ізольованих при фактично пошкодженій ізоляції;
- дотик до неструмоведучих частин електроустановок або до електрично зв'язаних з ними металоконструкцій які опинилися під напругою;
- дія напруги кроку;
- ураження через електричну дугу.

Тяжкість ураження людини у всіх перерахованих вище випадках визначається величиною струму, що проходить через її тіло. Величина струму через людину, в свою чергу, залежить від напруги під яку потрапляє людина, від опору тіла людини, від опору ізоляції фазних проводів відносно землі, від ємнісної складової мережі а також від конструкційних особливостей мережі живлення.

Опір ізоляції проводів та ємність електромережі відносно землі, як фактори впливу на величину струму через людину.

В реальній лінії електропередач (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі ($r_{із}$) розподіляється по всій довжині ліній електропередач – опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більше протяжність лінії електропередач, тим менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами і відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01 “Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок” (ПБЕ) має бути щонайменше 0,5 МОм (1 кОм на вольт напруги). Ізоляція струмопровідних ліній електропередач виконується з діелектриків, питомий опір яких внаслідок старіння ізоляції з часом, частого зволоження, забруднення, нагрівання, дії агресивного середовища тощо знижується.

Кожна ділянка лінії електропередач, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Ємнісна складова струму (C) через людину у разі потрапляння під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень.

Конструкційні особливості мережі живлення – кількість фаз і режим нейтралі.

Наслідки ураження людини електричним струмом у випадку дотику її до металоконструкцій, які опинилися під напругою залежать від конструкційних особливостей мережі живлення, а саме, від кількості фаз і режиму нейтралі – ізольованої чи глухозаземленої.

Дотик може бути одно- або двополюсним у однофазних мережах або у мережах постійного струму та одно- або двофазним у трифазних мережах.

Однофазна мережа, ізольована від землі.

В однофазній мережі, ізольованій від землі, за непошкодженої ізоляції (рисунок 7.1) величина струму через тіло людини практично не залежить від опору тіла людини і визначається опором ізоляції проводу до якого доторкнулась людина відносно землі. Знехтувавши ємнісною складовою струму через людину ($C_1 = C_2 = 0$), та за умови, що $r_1 = r_2 = r_{із}$ величину струму через людину можна визначена як:

$$I_{л} = \frac{U}{2R_{л} + r_{із}}, A, \quad (7.1)$$

де U – напруга мережі, В; $R_{л}$ – опір людини ($R_{л} = R_{тіла} + R_{взуття} + R_{підлогу}$), Ом; $r_{із}$ – опір ізоляції проводів 1 і 2 відносно землі, Ом.

В знаменнику $R_{л}$ при розрахунку струму через людину за несприятливих умов (відсутності ізолюючого взуття, підлоги) приймають як $R_{тіла}$ в межах 10^3 Ом, а $r_{із}$ відповідно до чинних нормативів на декілька порядків більше.

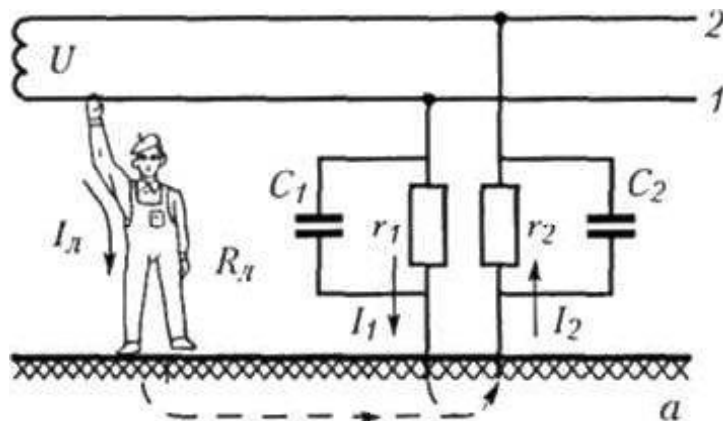


Рисунок 7.1 – Принципова схема включення людини під напругу в однофазній мережі ізольованій від землі в нормальному режимі роботи

У разі двополюсного дотику, струм через людину визначається за наступною формулою

$$I_{л} = \frac{U}{R_{Т}}, A \quad (7.2)$$

де U – напруга мережі, В; $R_{Т}$ – опір тіла людини, Ом ; $R_{Т} = 1000$ Ом.

Трифазна мережа, ізольована від землі.

У разі дотику людини до фазного проводу трифазної мережі, ізольованої від землі виникає мережа замикання на землю, більш розгалужена, ніж в однофазній. Основні елементи цієї мережі: “фазний провід С” – “людина паралельно з опором ізоляції цього проводу відносно землі $r_{с}$ ” – “земля” – “опори ізоляції проводів А і В відносно землі $r_{А}$ і $r_{В}$ ” – “фазні проводи А і В” (рисунок 7.2 а).

До цієї мережі прикладена лінійна напруга $U_{л}$, а не фазна $U_{ф}$, як у однофазній мережі.

Оскільки $U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}$, то в трифазній мережі за інших рівних факторів величина струму замикання на землю, як і величина струму, що проходить через людину при її дотику до фазного проводу, має бути більшою.

За рівності опорів ізоляції ($r_{А} = r_{В} = r_{с} = r_{із}$) і ємностей ($C_{А} = C_{В} = C_{с} = C$) струм, що проходить через людину, визначиться виразом:

$$I_{л} = \frac{U_{ф}}{R_{л} \sqrt{1 + \frac{r_{із}(r_{із} + 6R_{л})}{9R_{л}(1 + r_{із}^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2)}}}, A \quad (7.2)$$

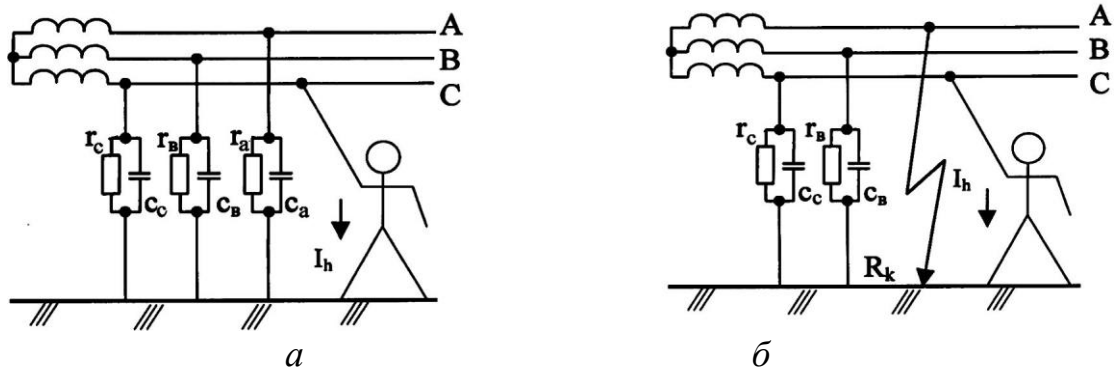
де $U_{ф}$ – фазна напруга мережі, В; $R_{л}$ – опір людини, Ом; $r_{із}$ – опір ізоляції проводів А, В і С відносно землі, Ом, ω – кутова частота мережі, Гц; C – ємність проводів відносно землі, Ф.

У випадку відсутності ємнісної складової струму, тобто коли $C_{А} = C_{В} = C_{с} = 0$ (що досить ймовірно для нерозгалужених повітряних мереж), за умови $r_{А} = r_{В} = r_{с} = r_{із}$, величина струму, що проходить через людину, визначиться виразом

$$I_{л} = \frac{3U_{\phi}}{3R_{л} + r_{із}}, A \quad (7.3)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга мережі, В; $R_{л}$ – опір людини, Ом; $r_{із}$ – опір ізоляції проводів А, В і С відносно землі, Ом.

Порівнюючи вираз (7.1) для величини струму, що проходить через людину, в нормальному режимі роботи електроустановки в однофазній мережі і вираз (7.3), бачимо, що в трифазній мережі $I_{л}$ практично, в три рази більше.



а – нормальний режим роботи мережі (відсутність замикань на землю фазних проводів);
б – аварійний режим роботи мережі

Рисунок – 7.2 Схема включення людини під напругу у випадку однофазного дотику в мережі з ізолюваною нейтраллю

У випадку однофазного дотику людини в аварійному режимі роботи мережі з ізолюваною нейтраллю, тобто, коли один із фазних проводів замкнутий на землю (рисунок 7.2 б), струм через людину визначається за формулою:

$$I_{л} = \frac{U_{л}}{R_{Т}}, A \quad (7.4)$$

де $U_{л}$ – лінійна напруга мережі, В; $R_{Т}$ – опір тіла людини.

Трифазна чотирипровідна мережа з глухозаземленою нейтраллю.

Нейтраль вторинної обмотки трансформатора, від якого живиться така мережа, заземлена через $R_0 \ll R_{л}$. У випадку дотику людини до фазного проводу С утворюється мережа струму “фазний провід С – людина – земля – R_0 – фазний провід С”, в якій всі елементи з’єднані послідовно.

Струм через людину у випадку однофазного дотику до фазного проводу за непошкодженої ізоляції інших фазних проводів (рисунок 7.3 а) визначиться виразом:

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R_0}, A \quad (7.5)$$

де R_0 – опір заземлення, Ом.

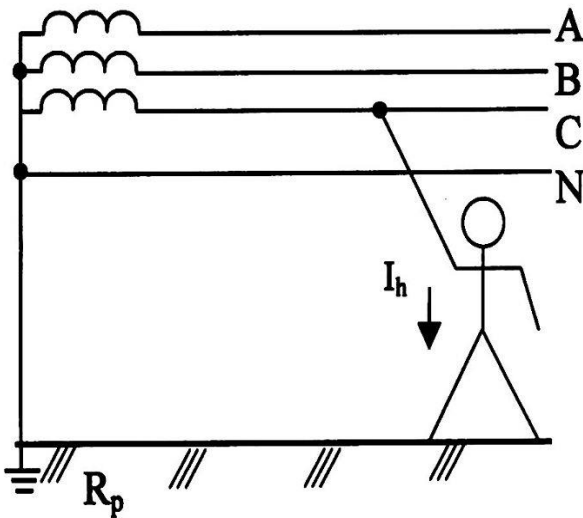
У цій мережі найбільший опір має елемент “людина” – 1000 Ом. Опір інших елементів проходженню струму знаходиться в межах 10 Ом. Тому можна вважати, що людина попадає, практично, під фазну напругу ($U_{дом} = U_{\phi}$) а величина струму залежить, в основному, від $R_{л}$.

Тому величина струму через людину у випадку її однофазного дотику до неізолюваних струмовідних частин, які знаходяться під напругою, в мережах із глухозаземленою нейтраллю має бути на два порядки більшою, ніж в мережах, ізолюваних від землі за нормального стану ізоляції (значення $I_{л}$ за (7.1) і (7.3) та (7.4)).

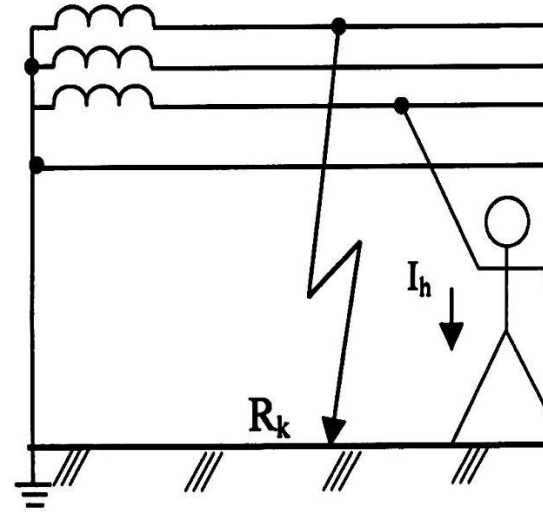
В аварійному режимі роботи мережі із глухозаземленою нейтраллю (рисунок 7.3 б), струм через людину у випадку її однофазного дотику визначиться за формулою:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{T}}}, A \quad (7.6)$$

де $U_{\text{ф}}$ – фазна напруга мережі, В; R_{T} – опір тіла людини.



а



б

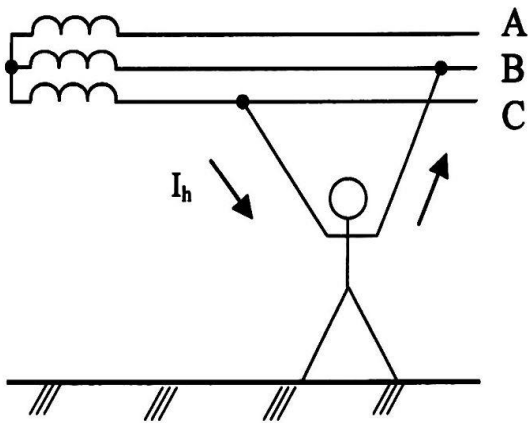
а – нормальний режим роботи мережі (відсутність замикань на землю фазних проводів);
б – аварійний режим роботи мережі

Рисунок 7.3 – Схема включення людини під напругу у випадку однофазного дотику в трифазній чотирипровідній мережі з глухозаземленою нейтраллю

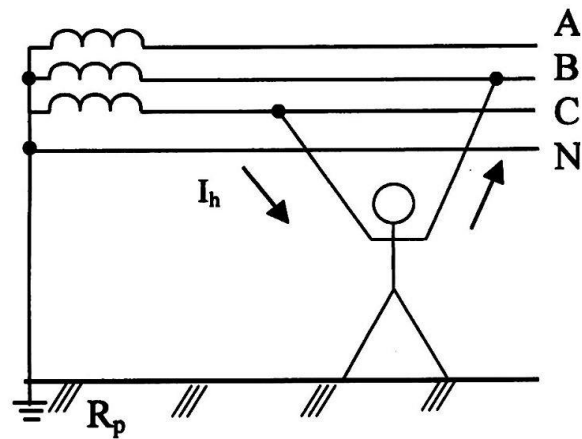
У випадку двофазного дотику людини незалежно від режиму нейтралі трансформатора (рисунок 7.4) основна частина струму проходить шляхом «рука-рука». Величина струму, який пройде через людину визначиться виразом:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\text{T}}}, A \quad (7.7)$$

де $U_{\text{л}}$ – фазна лінійна мережі, В; R_{T} – опір тіла людини.



а



б

а – мережа з ізолюваною нейтраллю;
б – мережа з глухозаземленою нейтраллю

Рисунок 7.4 – Схема включення людини під напругу у випадку двофазного дотику в трифазній чотирипровідній мережі з глухозаземленою нейтраллю

На виробництві і в побуті найчастіше застосовуються мережі із глухозаземленою нейтраллю. І тільки в гірничодобувній промисловості і на торфорозробках, відповідно до вимог електробезпеки, обов'язковим є застосування мереж, ізолюваних від землі.

Такий підхід до вибору режиму нейтралі електричної мережі обумовлений такими обставинами:

– в умовах виробничих підприємств, громадських установ, житлового сектора і т. ін. забезпечення необхідного опору ізоляції у випадку застосування мереж, ізольованих від землі, пов'язано з певними технічними і економічними проблемами;

– в мережах із глухозаземленою нейтраллю можливо забезпечити більш ефективний захист у випадку пошкодження ізоляції і переході напруги на неструмовідні частини електроустановок.

Напруга кроку.

При обриві проводів ліній електропередач і їх контакті з землею, пробіі кабельних ліній на землю, замиканні на неструмоведучі елементи електроустановок, що мають контакт з землею, доторканні людини, яка стоїть на землі, до струмоведучих частин під напругою тощо земля стає елементом електричної мережі замикання на землю.

При проходженні струму по землі на її поверхні виникає специфічне поле потенціалів, характер якого визначається конструкцією заземлювача, властивостями ґрунту тощо.

Закон розподілу потенціалів на поверхні ґрунту залежить від геометричної форми електрода і для різних заземлювачів наведений у довідниках.

Для напівсферичного заземлювача, який знаходиться на поверхні землі (рисунок 7.5) за умови однорідності і електричної ізотропності ґрунту можна вважати, що струм у всіх напрямках буде розтікатися рівномірно – як показано стрілками на рисунку 7.5, і буде дорівнювати I_3 .

Розподіл потенціалів на поверхні землі навколо напівсферичного заземлювача відповідає рівнянню гіперболи, а значення потенціалів змінюється від свого максимального значення φ_3 до нуля при віддаленні від заземлювача (рисунок 7.5).

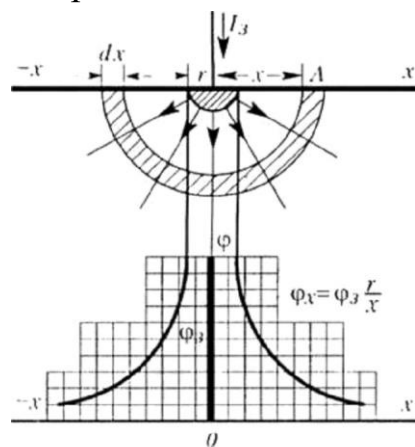


Рисунок 7.5 – Розподіл потенціалів на поверхні землі навколо напівсферичного заземлювача

Практично зона підвищених потенціалів на поверхні землі відносно її нульового потенціалу при замиканні на землю через напівсферичний заземлювач і однорідному ґрунті обмежується колом із радіусом близько 20 м. Переміщуючись в цій зоні, людина попадає під так звану *напругу кроку* – напругу між двома точками на поверхні землі, які знаходяться одна від одної на відстані кроку і на яких одночасно стоїть людина.

З наближенням до заземлювача величина крокової напруги зростає і при напрузі мережі живлення 0,4 кВ вона може бути небезпечною для людини. Тому “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів” за наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в

приміщенні без застосування засобів захисту – діелектричні боти, калоші, суха дошка тощо.

В загальному вигляді величина напруги кроку може бути визначена як різниця між φ_x та φ_{x+a} , де a – величина кроку, м (0,8 м), відповідно до чого

$$U_k = I \frac{\rho}{2\pi x} - I \frac{\rho}{2\pi(x+a)} = I \frac{\rho \cdot a}{2\pi x(x+a)}, \quad (7.8)$$

тобто величина напруги кроку прямо пропорційна силі струму замикання на землю, питомому опору провідника та величині кроку і обернено пропорційна відстані від заземлювача.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі “нога-нога”, або до різкого збільшення опору в цій петлі зі рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечної напруги кроку для надання допомоги потерпілим і т.ін. та за відсутності засобів захисту, доцільно переміщуватись в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкалися одна одної.

Напруга дотику. Дотик людини до корпусу ушкодженого обладнання або до корпусу обладнання, з'єднаного з ушкодженим загальним колом заземлення, зумовлює потрапляння людини під напругу дотику. *Напруга дотику* – це напруга між двома точками кола електричного струму, яких одночасно торкається людина, і дорівнює різниці потенціалів корпусу і точок поверхні ґрунту, де знаходяться ноги людини:

$$U_{\text{дот}} = \varphi_k - \varphi_x, \quad (7.9)$$

де φ_k – потенціал корпусу електроустановки, якої торкається людина; φ_x – потенціал в точці на поверхні ґрунту, де знаходяться ноги людини.

Напруга дотику, на відміну від напруги кроку, збільшується при віддаленні від заземлювача і за межами зони розтікання струму вона дорівнює напрузі на корпусі обладнання відносно землі. Захист від напруги дотику – вирівнювання потенціалів (встановлення електропровідної підлоги).

Таким чином, згідно з зазначеним вище, до основних факторів, які впливають на тяжкість ураження електричним струмом (на $I_{\text{л}}$) при попаданні людини під напругу, можна віднести:

- величину напруги мережі живлення, U, B ;
- величину напруги дотику $U_{\text{дот}}, B$;
- конструкційні особливості мережі живлення – кількість фаз і режим нейтралі;
- величину опору і стан ізоляції – перш за все в мережах живлення, ізольованих від землі;
- протяжність і розгалуженість мережі живлення, які впливають на $r_{\text{із}}$ і ємність відносно землі.

Завдання 7.1. Визначити силу струму, що протікає через тіло людини у випадку її однофазного дотику до оголеного проводу трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю в а) нормальному і б) аварійному режимі роботи.

Напруга живлячого трансформатора $U = 380/220$ В. Інші вихідні дані: опір тіла людини $R_{\text{тіла}}$, кОм, опір підлоги $R_{\text{підлоги}}$, кОм, опір ізоляції $r_{\text{із}}$, кОм і опір взуття $R_{\text{взуття}}$, кОм наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані до завдання 7.1

Вихідні дані	Варіанти									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_{тіла}$, кОм	1,0	0,9	1,1	1,3	1,2	0,95	1,05	0,8	1,15	0,85
$R_{підлоги}$, кОм	1,4	50	22	97	15	1,5	3,0	10	2,5	99
$r_{із}$, кОм	500	700	600	300	100	800	900	200	400	1000
$R_{взуття}$, кОм	1,5	7,5	0,5	900	25	2,0	1,0	700	0,7	80

Завдання 7.2. Визначити силу струму, що протікає через тіло людини у випадку її однофазного дотику (в нормальному і аварійному режимах) до струмопровідної частини електроустановки в мережі з ізольованою нейтраллю трансформатора. Оцінити небезпеку таких включень для людини, порівняти отримані значення з допустимими. Для розрахунку задані: лінійна напруга мережі U_L , кВ, опір ізоляції фазних проводів ($r_A = r_B = r_C = r_{із}$), ємність фазних проводів відносно землі ($C_A = C_B = C_C = C$), перехідний опір в місці замикання на землю R_K , Ом, опір тіла людини $R_{тіла}$, кОм, матеріал підшви взуття і матеріал опорної поверхні ніг (підлоги). Вихідні дані наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Вихідні дані* до завдання 7.2

Варіант	U_L , кВ	$r_{із}$, кОм	C , мкФ	$R_{тіла}$, кОм	Матеріал підшви взуття	Матеріал опорної поверхні ніг
1	6	50	0,050	2,0	Шкіра с.	Цегла с.
2	6	60	0,055	1,0	Шкіра в.	Цегла в.
3	6	70	0,060	1,8	Шкірозамінник с.	Дерево с.
4	6	80	0,065	1,7	Шкірозамінник в.	Дерево в.
5	6	90	0,070	1,6	Шкіра с.	Лінолеум с.
6	10	100	0,075	1,5	Шкіра в.	Лінолеум в.
7	10	110	0,080	1,4	Гума с.	Бетон с.
8	10	120	0,085	1,3	Гума в.	Бетон в.
9	10	130	0,090	1,2	Шкірозамінник с.	Метал.
10	10	140	0,095	1,1	Шкірозамінник в.	Метал

Примітка*. В таблиці прийняті скорочення: “с” – сухий, “в” – вологий.

Таблиця 7.3 – Значення опору взуття

Приміщення	Матеріал підшви	Опір $R_{взуття}$, кОм			
		Напруга U , В			
		$U < 65$	$U \approx 127$	$U \approx 220$	$U > 220$
Сухе	Шкіра	200	150	100	50

	Шкірозамінник	150	100	50	25
	Гума	500	500	500	500
Сире і вологе	Шкіра	1,6	1,8	0,5	0,2
	Шкірозамінник	2,0	1,0	0,7	0,5
	Гума	2,0	1,8	1,5	1,0

Таблиця 7.4 – Значення опору підлоги

Матеріал підлоги	Опір підлоги, $R_{підлоги}$, $кОм$		
	Підлога суха	Підлога волога	Підлога мокра
Бетон	2000	0,9	0,1
Дерево	30	3,0	0,3
Цегла	10	1,5	0,8
Лінолеум	1500	50	4,0
Метал	0,01	0	0

Завдання 7.3. Визначити напругу кроку при переміщенні людини в зоні розтікання струму з напівсферичного заземлювача для різної відстані від заземлювача. Ширина кроку 0,8 м. За одержаними даними побудуйте залежність $U_{кр}=f(x)$, зробіть висновки. Необхідні вихідні дані: струм замикання на землю I_3 , А, вид ґрунту, відстань від заземлювача x , м наведені в таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Вихідні дані до завдання 7.3

Варіант	I_3 , А	Ґрунт	x_1 , м	x_2 , м	x_3 , м	x_4 , м	x_5 , м
1	160	Пісок	1,2	3,2	7,2	13,7	20,7
2	170	Пісок	1,0	3,0	7,0	13,5	20,5
3	180	Супісок	0,9	2,9	6,9	13,4	20,4
4	190	Супісок	1,1	3,1	7,1	13,6	20,6
5	200	Суглинок	1,6	3,6	7,4	14,1	20,1
6	210	Суглинок	1,3	3,3	7,3	13,8	20,8
7	220	Глина	0,7	2,7	6,7	13,2	20,2
8	230	Глина	0,8	2,8	6,8	13,3	20,3
9	240	Садова земля	1,4	3,4	7,4	13,9	20,9
10	250	Садова земля	1,1	3,1	7,1	13,6	20,6

Напругу кроку розраховують за формулою:

$$\varphi_{кр} = \varphi_x - \varphi_{x+a}, \quad (7.10)$$

де $a = 0,8$ м – ширина кроку.

Для напівсферичного заземлювача формула потенційної кривої:

$$\varphi_x = I_3 \times \rho / (2\pi \times x), \quad (7.11)$$

де ρ – питомий опір ґрунту, Ом[×] м, взяти з таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Питомий електричний опір ґрунтів

Ґрунт	Питомий опір ρ , Ом [×] м	
	Межі коливань	Рекомендовано для розрахунків
Торф	-	20
Чорнозем	9 – 53	30
Садова земля	30 – 60	50
Глина	8 – 70	60
Суглинок	40 – 150	100
Супісок	150 – 400	300
Пісок	400 – 2500	500
Ґравій, щебень	–	2000
Кам'янистий ґрунт	500 – 8000	4000

Питання для самоконтролю

1. Назвіть основні причини ураження людини електричним струмом.
2. Охарактеризуйте дію електричного струму на організм людини.
3. Які фактори впливають на наслідки ураження електричним струмом.
4. Якими параметрами визначаються наслідки ураження людини електричним струмом в мережах з ізолюваною та глухозаземленою нейтраллю?
5. Дайте порівняльну оцінку небезпеки мереж з ізолюваною і глухозаземленою нейтраллю при нормальному стані ізоляції та при її пошкодженні.
6. Дайте визначення поняття “напруга дотику”? Як змінюється напруга дотику при віддаленні від заземлювача?
7. Що називають напругою кроку? Як вона виникає? Як змінюється напруга кроку при віддаленні від заземлювача? Як треба виходити із зони розтікання струму, щоб не потрапити під крокову напругу?
8. На яку відстань можна наближуватись на відкритих місцевостях і в приміщеннях до місця обриву проводу?