

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Системи електропостачання»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого рівня вищої освіти

Електромеханіка

за темою № 6 – Основи електробезпеки.

Харків 2021

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 23.09.2021 № 8

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу
Протокол від 22.09.2021 № 2

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 22.09.2021 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 30.08.2021 № 1.

Розробник:

1. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.

2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання КЛК ХНУВС, к.т.н., професор Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Електробезпека електричних мереж.
2. Заходи захисту від поразки електричним струмом.
3. Призначення захисного заземлення.
4. Сутність захисного відключення.
5. Занулення електроустаткування.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Шкрабець Ф. П. Основи електропостачання: Навч. посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2012.
2. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
3. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч.посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2005.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.И. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000.
5. Василега П.О. Електропостачання: Навчальний посібник. –Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.

Допоміжна література:

1. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга“, 2006. -153 с.
2. Рудницький В.Г. Внутрішньоцехове електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга“, 2007. - 280 с.
3. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Електропостачання>
2. <https://www.ukrnafta.com/sistema-elektropostachannya>
3. <https://www.pronet.ua/sistemi-elektropostachannya/>
4. <http://web.kpi.kharkov.ua/elmarsh/wp-content/uploads/sites/108/2017/04/Elektropostachannya-promislovih-pidpriyemstv.-Pidruchnik.Milih-V.I-Pavlenko-T.P.2016.pdf>
5. <https://avenston.com/solutions/mep-systems/power-supply-systems/>

Текст лекції

1. Електробезпека електричних мереж.

Надійність роботи електроустановок і систем електропостачання багато в чому залежить від режиму нейтралі джерел і приймачів трифазного струму. Електричні мережі напругою до 1000 В працюють як з ізолюваною, так і з заземленою нейтраллю. При виборі режиму роботи нейтралі враховується рівень електробезпеки мережі, як одна з основних вимог.

У відношенні електробезпеки найбільш небезпечним є випадок одночасного дотику людини до відкритих струмоведучих частин двох фаз (рис.1). Значення струму, що проходить через тіло людини, $I_{\text{л}}$ у цьому випадку визначається напругою мережі й опором тіла людини і не залежить від режиму роботи нейтралі мережі:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\text{л}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ф}}}{R_{\text{л}}},$$

де $U_{\text{л}}$, $U_{\text{ф}}$ — відповідно лінійна і фазна напруга мережі.

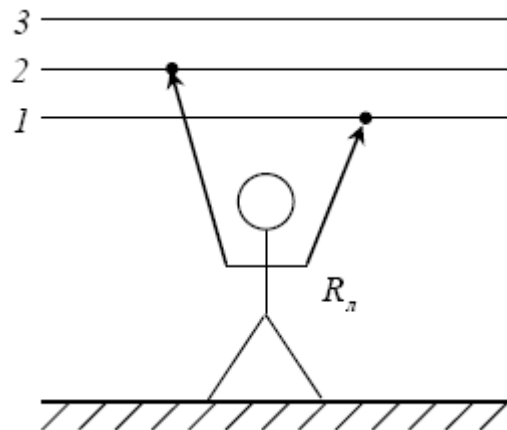


Рисунок - 1. Дотик людини до двох фаз електричної мережі

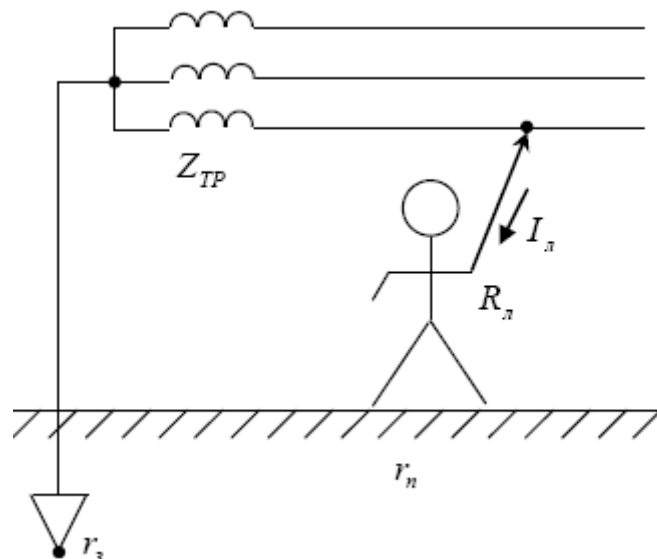


Рисунок - 2. Дотик людини до фази у мережі з заземленою нейтраллю

Однак випадок одночасного дотику до двох різних фаз мережі буває нечасто. Найбільш розповсюджений випадок дотику до однієї фази мережі або до корпусу електроустаткування, який отримав електричне з'єднання з фазою внаслідок пошкодження ізоляції. У цьому випадку струм, який проходить через тіло людини, що доторкнулась до однієї фази, а отже, і небезпека поразки струмом будуть залежить за інших рівних умов від того, заземлена чи ізольована нейтраль електричної мережі.

У мережі з заземленою нейтраллю, при нормальному опорі ізоляції напруга кожної фази щодо землі практично дорівнює фазній напрузі. Людина, що доторкнулась до будь-якої фази, виявляється під дією фазної напруги (рис. 2). Значення струму, що проходить через тіло людини в цьому випадку, якщо зневажити малими значеннями опору ґрунту $r_{\text{п}}$ і робочого заземлення $r_{\text{з}}$ у порівнянні з опором тіла людини $R_{\text{л}}$, буде:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{л}} + r_{\text{п}} + r_{\text{з}}} \approx \frac{U_{\phi}}{R_{\text{л}}}.$$

Як бачимо з рівняння, струм $I_{\text{л}}$ визначається напругою мережі й опором тіла людини. Цей струм небезпечний уже при мінімальній стандартній лінійній напрузі мережі 127 В. Основною перевагою мережі з глухо заземленою нейтраллю є простота виконання релейного захисту, тому що будь-яке замикання фази на землю є однофазним коротким замиканням, що негайно і селективно відключається максимальним захистом.

Небезпека поразки електричним струмом у випадку дотику до струмоведучих частин у системі з ізольованою нейтраллю значною мірою залежить від значення ємності мережі щодо землі. Відповідно до цього електричні мережі можна розділити на дві основні групи: з малою ємністю мережі щодо землі і з великою ємністю.

Розглянемо електричну мережу з ізольованою нейтраллю з малою (близькою до нуля) ємністю мережі щодо землі (рис. 3) при рівності опорів ізоляції фаз щодо землі $r_1 = r_2 = r_3$. При дотику людини, що має опір $R_{\text{л}}$, до

$$r'_1 = \frac{r_1 \cdot R_{\text{л}}}{r_1 + R_{\text{л}}},$$

фази 1 опір ізоляції цієї фази зменшиться до величини r'_1 , і симетрія системи порушиться. Тепер напруги кожної з фаз щодо землі виявляться різними

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \overline{AO'}; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_2 - \dot{U}_0 = \overline{BO'}; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_3 - \dot{U}_0 = \overline{CO'},$$

де $\dot{U}_1 = \overline{AO}$; $\dot{U}_2 = \overline{BO}$; $\dot{U}_3 = \overline{CO}$ — фазна напруга мережі при

нормальному режимі роботи мережі; \dot{U}_0 — напруга зсуву нейтралі мережі.

Через опори ізоляції фаз і тіло людини будуть проходити струми:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_A}{r_1} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{r_1}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_B}{r_2} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_0}{r_2}; \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_C}{r_3} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_0}{r_3}; \quad \dot{I}_\pi = \frac{\dot{U}_A}{R_\pi} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_\pi}.$$

На підставі першого закону Кірхгофа геометрична сума миттєвих значень струмів дорівнює нулю, тобто

$$\sum \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_\pi = 0.$$

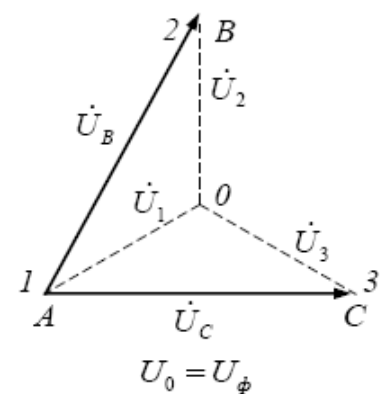
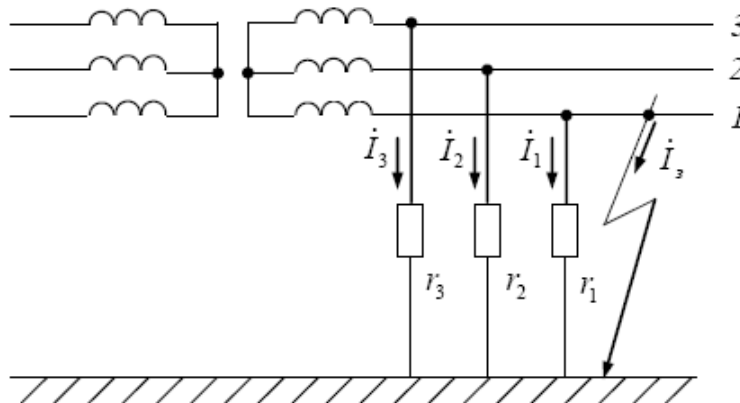
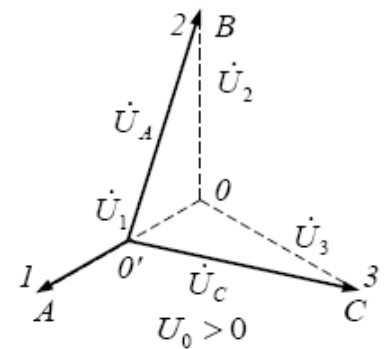
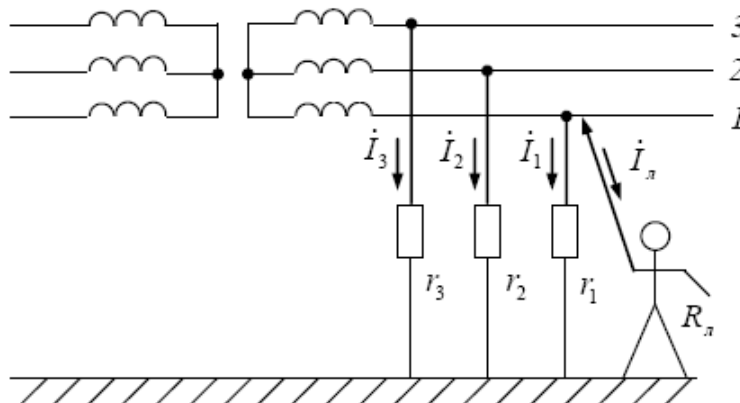
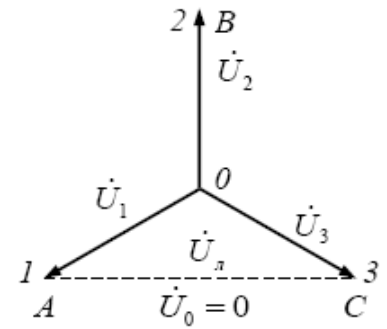
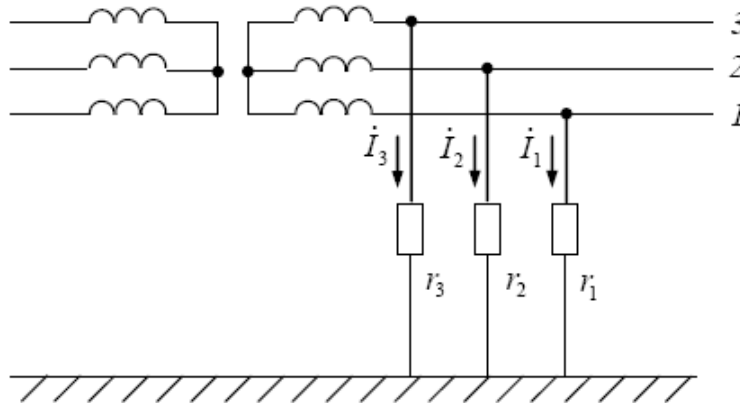


Рисунок - 3. Схеми і векторні діаграми електричної мережі з ізольованою нейтраллю без обліку ємності мережі

Підставляючи значення струмів, одержимо

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{r_1} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_0}{r_2} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_0}{r_3} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_{\text{л}}} = 0.$$

Враховуючи, що $r_1 = r_2 = r_3 = r$ і $\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0$, рівняння прийме вигляд

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_{\text{л}}} - \frac{3\dot{U}_0}{r} = 0,$$

відкіля напруга зсуву нейтралі (напруга нульової послідовності)

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 r}{3R_{\text{л}} + r}.$$

Підставляючи замість 0 U його значення, одержимо рівняння для визначення струму, що проходить через тіло людини:

$$\dot{I}_{\text{л}} = \frac{3\dot{U}_1}{3R_{\text{л}} + r}, \quad \text{або} \quad I_{\text{л}} = \frac{3U_{\phi}}{3R_{\text{л}} + r}.$$

Аналіз рівняння (6) показує, що безпека в мережах з ізолюованою нейтраллю і малою ємністю багато в чому залежить від опору ізоляції мережі. Високий опір ізоляції мережі забезпечує безпечне значення струму, що проходить через тіло людини у випадку дотику його до однієї з фаз. Приймавши $I_{\text{л}} = I_{\text{д.б}}$ з рівняння (6) можна визначити мінімальне безпечне значення ізоляції мережі:

$$r = \frac{3U_{\phi}}{I_{\text{д.б}}} - 3R_{\text{л}}.$$

Найбільш небезпечним буває дотик людини до однієї з фаз, коли яка-небудь інша замкнута на землю (наприклад, $r_2=0$). У цьому випадку струм, що проходить через тіло людини, визначається значенням лінійної напруги:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\text{л}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{R_{\text{л}}}.$$

Таким чином, дотик до однієї з фаз у мережі з ізолюованою нейтраллю виявляється небезпечним лише у випадку, коли опір ізоляції іншої фази дорівнює нулю, або ж коли опір ізоляції мережі недостатньо великий.

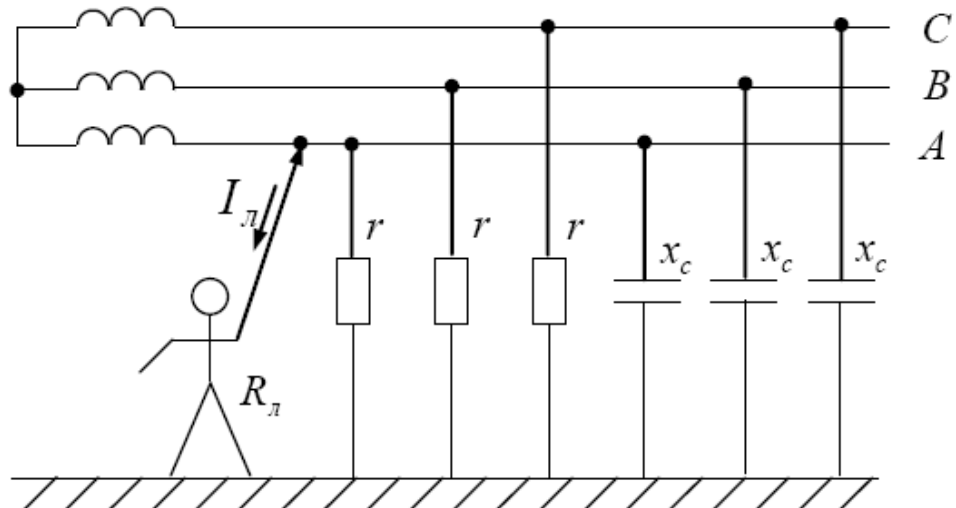


Рисунок - 4. Дотик людини до фази зі значною ємністю мережі щодо землі

Якщо врахувати наявність ємності мережі щодо землі, то ємнісні опори x_c виявляться приєднаними паралельно активному опору ізоляції мережі (рис. 4), а струм, що проходить через тіло людини, визначиться з рівняння

$$I_L = 3U_\phi Y \frac{Y_L}{3Y + Y_L},$$

де $Y = \frac{1}{r} + j\omega C$ — провідність ізоляції фази мережі на землю;

$Y_L = \frac{1}{R_L}$ — провідність тіла людини; C - ємність фази мережі щодо землі; ω — кутова частота в мережі.

У мережах високої напруги I_L визначається також по рівнянню. Однак, враховуючи, що в таких мережах значення x_c може виявитися в багато разів менше r , струмами витoku через активний опір ізоляції можна зневажити.

Тоді, думаючи, що $C_1 = C_2 = C_3 = C$,

$$I_L = \frac{3U_\phi \omega C}{\sqrt{9R_L^2 \omega^2 C^2 + 1}}.$$

При глухому замиканні фази на землю струм, що проходить через місце замикання, I_z визначиться з рівняння:

$$I_z = 3U_\phi \omega C.$$

Приблизно ємнісні струми замикання на землю визначаються виходячи із середніх значень ємності:

$$I'_z = \frac{U_L L_n}{350} = \frac{\sqrt{3} U_\phi L_n}{350},$$

- для повітряних ліній

$$I''_3 = \frac{U_{\text{л}} L_{\text{к}}}{10} = \frac{\sqrt{3} U_{\phi} L_{\text{к}}}{10};$$

- для кабельних ліній 6—10 кВ

- для змішаних повітряних і кабельних ліній

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = \frac{\sqrt{3} U_{\phi} (L_n + 35 L_{\text{к}})}{350},$$

де L_n і $L_{\text{к}}$ — довжина відповідно повітряних і кабельних ліній, електрично зв'язаних між собою, км.

Для забезпечення безпеки експлуатації мережі з ізолюваною нейтраллю першорядне значення мають високий опір ізоляції і мінімальна ємність мережі. Значення опору ізоляції визначається в основному властивостями ізоляційних матеріалів і умовами її експлуатації. Так, наприклад, значення опорів ізоляційних матеріалів знижуються при їхньому зволоженні. Для підтримки високого опору ізоляції використовують якісні ізоляційні матеріали, проводять підсушування ізоляції, а також, по можливості, створюють відповідний мікроклімат.

На відміну від методів підвищення опору ізоляції, що значною мірою залежать від прийнятих конструктивних і експлуатаційних мір, зниження ємності мережі практично не можна досягти цими заходами, якщо не враховувати можливість дроблення мережі.

Зменшити вплив ємності мережі на безпеку експлуатації можна шляхом компенсації ємнісної складової струму витoku, для чого між нейтраллю мережі і землею необхідно включити індуктивний опір. У цьому випадку через місце ушкодження, крім активної і ємнісної складової, протікає індуктивна складова, яка по фазі відрізняється від ємнісної на 180° . Сумарний струм у місці ушкодження відповідно зменшується.

Відзначимо, що за допомогою описаних методів можна лише знизити значення електричного струму, що проходить через тіло людини, і тим самим зменшити, але не попередити цілком небезпеку поразки ним.

2. Заходи захисту від поразки електричним струмом.

В даний час широко застосовуються загальні заходи попередження поразки електричним струмом, з яких основними є:

1. Роз'яснювальна робота про небезпеку електричного струму і заходи боротьби з нею.

2. Забезпечення неприступності дотику до струмоведучих частин. Цей захід здійснюється шляхом монтажу відкритих струмоведучих частин електроустановки на недоступній для випадкового дотику висоті.

3. Захист від випадкового дотику до струмоведучих частин. Цей захист забезпечується: а) закритим виконанням рудникового устаткування, тобто застосуванням оболонок (корпусів) для електричних машин і апаратів, кабельних ввідів тощо, що закривають неізолювані струмоведучі частини, і

б) застосуванням блокувальних пристроїв, що перешкоджають доступу до струмоведучих частин до зняття з останніх напруги.

4. Застосування зниженої напруги для електроустановок найбільш небезпечних у відношенні поразки електричним струмом. До таких установок відносяться переносні електричні машини й апарати (ручні електросвердла, переносні електроосвітлювальні установки, сигнальні установки та ін.).

5. Ізоляція неструмоведучих частин. Цей захід здійснюється головним чином для ручного електроінструмента. Рукоятки і тильну частину електроустаткування, з якими безпосередньо стикається людина під час роботи, покривають надійним і міцним шаром ізоляції.

6. Загальні заходи безпеки. До них відноситься застосування ізолюючих підставок, гумових килимів та ботів, рукавичок, сигналізації та ін.

Але ці загальні заходи в загальному випадку недостатні для забезпечення безпечного застосування електричної енергії. Тому застосовуються також спеціальні заходи забезпечення безпеки.

В умовах експлуатації електроустановок поразка електричним струмом може відбутися при дотику людини: а) до відкритих струмоведучих частин електроустановок, що знаходиться під напругою, і б) до металевих корпусів або частин електроустаткування, які нормально не знаходяться під напругою, але набувають небезпечний потенціал у випадку замикання фази на корпус.

Як основний засіб захисту від небезпеки поразки струмом при дотику до корпусу, що опинився під напругою щодо землі, одержало саме широке поширення захисне заземлення електроустаткування, тобто з'єднання з землею його частин, що нормально не знаходяться під напругою.

Захист від небезпеки поразки при дотику до струмоведучих частин електроустановок, що знаходяться під напругою, здійснюється за допомогою захисного відключення. Цей захід здійснює також резервний захист від небезпечних наслідків дотику до корпусу електроустаткування, що опинилось під напругою щодо землі.

3. Призначення захисного заземлення.

У мережі з ізолюваною нейтраллю при ушкодженні ізоляції одного з провідників, що знаходяться усередині металевого корпусу, останній виявляється під напругою щодо землі. Якщо до такого корпусу доторкнеться людина, що стоїть на провідному ґрунті, а корпус виявиться ізолюваним від землі, то виникаючий під дією цієї напруги струм цілком пройде через людину. Якщо і корпус і людина виявляться на провідному ґрунті (рис. 5), повний струм замикання на землю (струм витоку) виявиться рівним

$$I = 3U_{\phi} Y \frac{y_{yt}}{3Y + y_{yt}},$$

де Y_{um} - додаткова провідність відносно землі ушкодженої фази, рівна $1/r'_{um}$, r'_{um} — опір, утворений паралельним з'єднанням опору людини R_l і

$$r'_{um} = \frac{R_l r_3}{R_l + r_3}$$

перехідного опору корпусу щодо землі r_3 , тобто

У цьому випадку струм з мережі в землю розгалужується по двох шляхах. Частина цього струму проходить через людину, що доторкнулась до корпусу, а частина йде через корпус у землю.

При паралельному з'єднанні опору людини R_l і опору корпусу щодо землі r_3 протікаючий через них струми виявляється обернено пропорційними цим опорам (рис. 6):

$$I_3 = I \frac{R_l}{R_l + r_3}; \quad I_l = I \frac{r_3}{R_l + r_3}.$$

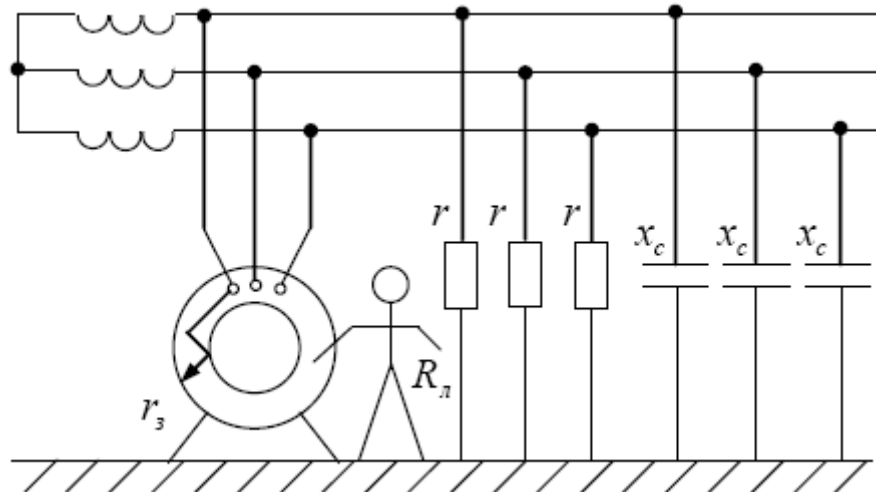


Рисунок - 5. Дотик людини до корпусу електрообладнання з пошкодженою ізоляцією

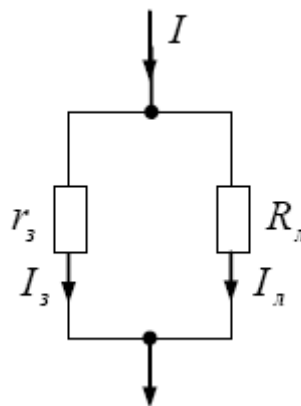


Рисунок - 6. Розподіл струмів витоків при дотику людини до заземленого корпусу електрообладнання з пошкодженою ізоляцією

Якщо співвідношення значень $R_{\text{л}}$ і $r_{\text{з}}$ буде таким, що минаюча через людину частина повного струму витoku виявиться менше граничної безпечної величини $I_{\text{д.б}}$, то дотик до корпусу буде не небезпечним.

Тому для попередження небезпеки варто максимально можливо знизити значення перехідного опору корпусу щодо землі $r_{\text{з}}$. У зв'язку з цим Правила безпеки передбачають необхідність пристрою спеціальних постійно існуючих надійних з'єднань корпусів електроустаткування з землею — захисних заземлень, що знижують значення $r_{\text{з}}$.

Оскільки при застосуванні пристроїв захисного заземлення знижується струм, що проходить через людину, напруга, під якою виявиться людина, доторкнувшись до корпусу електрообладнання, виявиться теж зниженою.

При відсутності заземлення ця напруга $U_{\text{пр}} = IR_{\text{л}}$, а при наявності заземлення $U_{\text{пр}} \approx Ir_{\text{з}}$.

4. Сутність захисного відключення.

Захисне відключення служить основною захисною мірою від небезпеки дотику людини до струмоведучих частин електроустановки, що знаходяться під напругою. Це швидкодіючий захист, що забезпечує автоматичне відключення електроустановки при досягненні струмом через тіло людини гранично безпечного значення. Існує велика кількість схем і конструкцій пристроїв захисного відключення, заснованих на різних принципах.

Принцип роботи захисного відключення в мережі з ізолюваною нейтраллю розглянемо на схемі (рис. 7), де пристрою захисного відключення (ПЗВ) показано в загальному вигляді, незалежно від його внутрішньої схеми.

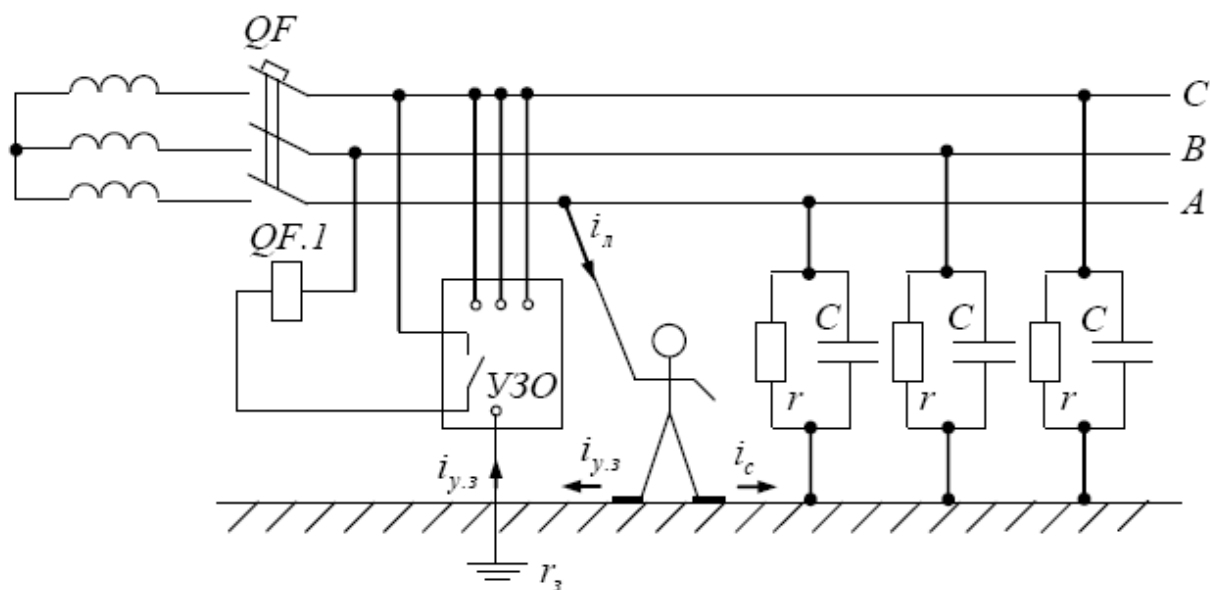


Рисунок - 7. Принципова схема захисного відключення і контролю ізоляції у мережі з ізолюваною нейтраллю

Струм через тіло людини при його однополюсному дотику до фазного проводу електричної мережі дорівнює сумі струмів

$$i_{\text{л}} = i_{\text{у.з}} + i_{\text{с}},$$

де $i_{\text{у.з}}$ - струм, що проходить через ПЗВ; $i_{\text{с}}$ - струм мережі, що проходить через опір ізоляції і ємності мережі щодо землі.

При досягненні значення струму порогу спрацьовування (уставки) ПЗВ спрацьовує і за допомогою котушки QF.1 автоматичного вимикача знімає напругу з мережі. Для правильного у відношенні безпеки налаштування захисту необхідно знати залежність $i_{\text{л}} = f(i_{\text{у.з}})$. В іншому випадку відключення може відбуватися і при досягненні струму через тіло людини вище гранично припустимого.

Велике значення з позицій безпеки і надійності мережі має час спрацьовування ПЗВ. Необхідно мати захист із найменшим часом відключення. Час відключення складається з часу дії захисту і часу дії силового автоматичного вимикача. Для ПЗВ час відключення приймається 0,1—0,2 с. Це значить, що відключення аварійної ділянки або мережі в цілому повинно здійснюватися за час не більш 0,1-0,2 с.

Захисне відключення можна застосовувати як єдину міру захисту, так і основну разом з додатковим заземленням або зануленням. Більш високі вимоги повинні пред'являтися до тих пристроїв захисного відключення, що використовуються як єдина міра захисту. У таких пристроях необхідний самоконтроль для запобігання роботі електроустановки при несправному захисному відключенні.

Аналогічно реагує пристрій захисного відключення і на зниження загального активного опору ізоляції мережі щодо землі:

$$r_{\Sigma} = \frac{r_A \cdot r_B \cdot r_C}{r_A r_B + r_B r_C + r_C r_A}.$$

При цьому струм уставки представляє функцію цього опору, тобто $i_{\text{у.з}} = f(r_{\Sigma})$. Наявний у пристрої кілоомметр вимірює загальний активний опір ізоляції мережі щодо землі.

Опір, при якому повинно спрацювати ПЗВ (опір уставки), може бути визначений з рівняння

$$r_{\text{у}} = \frac{r_{\text{кр}} r_{\text{л}}}{3r_{\text{л}} + r_{\text{кр}}},$$

де $r_{\text{кр}}$ — критичний опір ізоляції, при якому струм через тіло людини при його однополюсному дотику не перевищить гранично безпечний струм; $r_{\text{л}}$ — опір людини.

Основний недолік розглянутого принципу ПЗВ — неселективне відключення електроустановки як при однополюсному дотику людини, так і при зниженні загального активного опору ізоляції мережі щодо землі.

У системах електропостачання з глухо заземленою нейтраллю використовують ПЗВ, засновані на застосуванні фільтрів струму нульової послідовності. Їхня основна перевага — можливість селективного відключення електроустановки, до струмоведучої частини якої випадково доторкнулася людина.

5. Занулення електроустаткування.

Зануленням називається навмисне з'єднання неструмоведучих частин електроустановки, що випадково можуть виявитися під напругою, із глухо заземленою нейтраллю джерела живлення за допомогою нульового проводу. Занулення застосовується в мережах напругою до 1000 В. Корпуси електроустаткування при зануленні з'єднують не з заземлювачами, а з нульовим проводом (рис. 8, а).

При ушкодженні ізоляції (пробій на корпус) виникає струм К.З., здатний забезпечити спрацьовування захисту і, отже, автоматичне відключення ушкодженої установки від живильної мережі. Як апарати захисту застосовують плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі, магнітні пускачі та ін. Основна вимога ПУЕ до пристрою занулень — забезпечити значення струму, що викликає надійне спрацьовування захисних пристроїв з наступним відключенням аварійної ділянки мережі.

Для цього необхідно, щоб струм К.З.

$$I_{\kappa} > kI_{\text{ном}},$$

де $I_{\text{ном}}$ - номінальний струм плавкої вставки або струм уставки розчіплювача автоматичного вимикача; k — коефіцієнт, прийнятий у залежності від типу захисного пристрою (при захисті плавкими вставками або автоматичними вимикачами, що мають розчіплювачі з обернено залежною від струму характеристикою, $k = 3$).

При замиканні на занулений корпус струм проходить через опори: фази трансформатора ЗТ, фазного проводу ЗФ і нульового проводу ЗН. Комплекс струму визначається фазною ЕРС трансформатора E і повним опором кола К.З.:

$$\dot{I}_{\kappa} = \frac{\dot{E}}{Z_T + Z_{\phi} + Z_n}.$$

З виразу можна знайти діюче значення струму. Приймавши $E = 1,05U_{\phi}$, одержимо

$$I_{\kappa} = \frac{1,05U_{\phi}}{\sqrt{(r_{\phi} + r_n + r_T)^2 + (X_{\phi} + X_n + X_T)^2}},$$

де r_{ϕ} , r_n — активний опір відповідно фазного і нульового проводів;
 r_T — активний опір однієї фази трансформатора; X_{ϕ} , X_n — індуктивний
 опір відповідно фазного і нульового проводів; X_T — індуктивний опір
 розсіювання трансформатора.

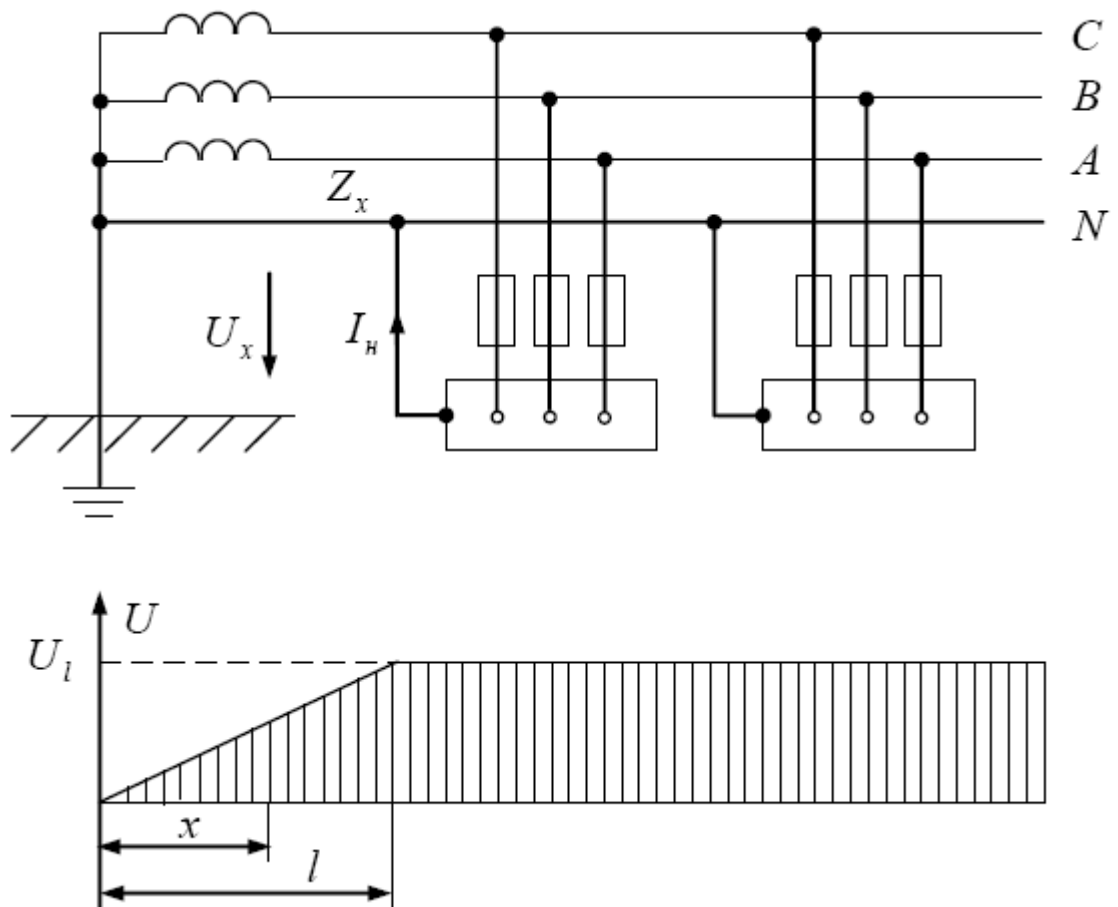


Рисунок - 8. Принципова схема занулення електрообладнання в мережі
 с заземленою нейтраллю (а)
 і діаграма напруги відносно землі на нульовому проводі (б)

При проходженні струму к.з. на занулених корпусах устаткування
 виникає напруга щодо землі, що у місці к.з. складає

$$U_l = I_{\kappa} \sqrt{r_n^2 + X_n^2} = I_{\kappa} Z_n.$$

На рис. 8, б показана діаграма напруги щодо землі на нульовому
 проводі, а, отже, і на зануленому устаткуванні при проходженні струму К.З.
 Напруга на відстані x від заземлювача нейтралі

$$U_x = I_\kappa Z_x.$$

В окремому випадку, коли індуктивними опорами зневажаємо, а $r_\phi/r_n = 0,5$ і $U_\phi = 220$ В, одержимо

$$U_l = \frac{U_\phi}{1 + r_\phi/r_n} = \frac{220}{1 + 0,5} = 145 \text{ В.}$$

З наведеного прикладу випливає, що під час проходження струму К.З. на корпусах зануленого устаткування можуть виникати значні потенціали щодо землі. Тому швидке відключення ушкодженого устаткування — основна вимога до системи занулення у відношенні безпеки експлуатації.

Для повітряних мереж ПУЕ рекомендують багаторазово заземлювати нульовий провід, оскільки в цих мережах, на відміну від кабельних, можливий обрив нульового проводу. На рис. 9,а показана схема мережі з одним повторним заземленням нейтралі. Діаграма напруги на нульовому проводі при одному повторному заземленні з опором гп (рис. 9, б) побудована по рівнянню

$$U_x = \frac{I_\kappa}{r_3 + r_n + r_n} [(r_3 + r_n)r_x - r_3 r_n].$$

При $x = 0$ ($r_x = 0$)

$$U_{x=0} = -I_\kappa \frac{r_3 r_n}{r_3 + r_n + r_n}.$$

При $x = l$ ($r_x = r_n$)

$$U_{x=l} = I_\kappa \frac{r_n r_n}{r_3 + r_n + r_n}.$$

При обриві нульового проводу ($r_n = \infty$) напруга в місці замикання $U_l = I_\kappa r_n$.

Отже, пристрій повторних заземлень дозволяє знижувати напругу на корпусах устаткування при обриві нульового проводу.

Згідно ПУЕ опір пристроїв, що заземлюють, кожного з повторних заземлень не повинен перевищувати 10 Ом, при цьому для кожної електроустановки необхідно споруджувати не менш трьох повторних заземлень.

Основні недоліки захисного занулення:

- занулення сприяє виносу потенціалу по нульовому провіднику на неушкоджене устаткування, що приводить до розширення небезпечної зони;
- відносно великий час спрацьовування апаратів захисту приводить до підвищеної небезпеки на цей час;
- відмовлення в роботі при обриві нульового проводу;

- при витдаленіх від джерела точках замикання струм К.З. може виявитися недостатнім для спрацьовування апаратів захисту, унаслідок чого створюється підвищена небезпека експлуатації.

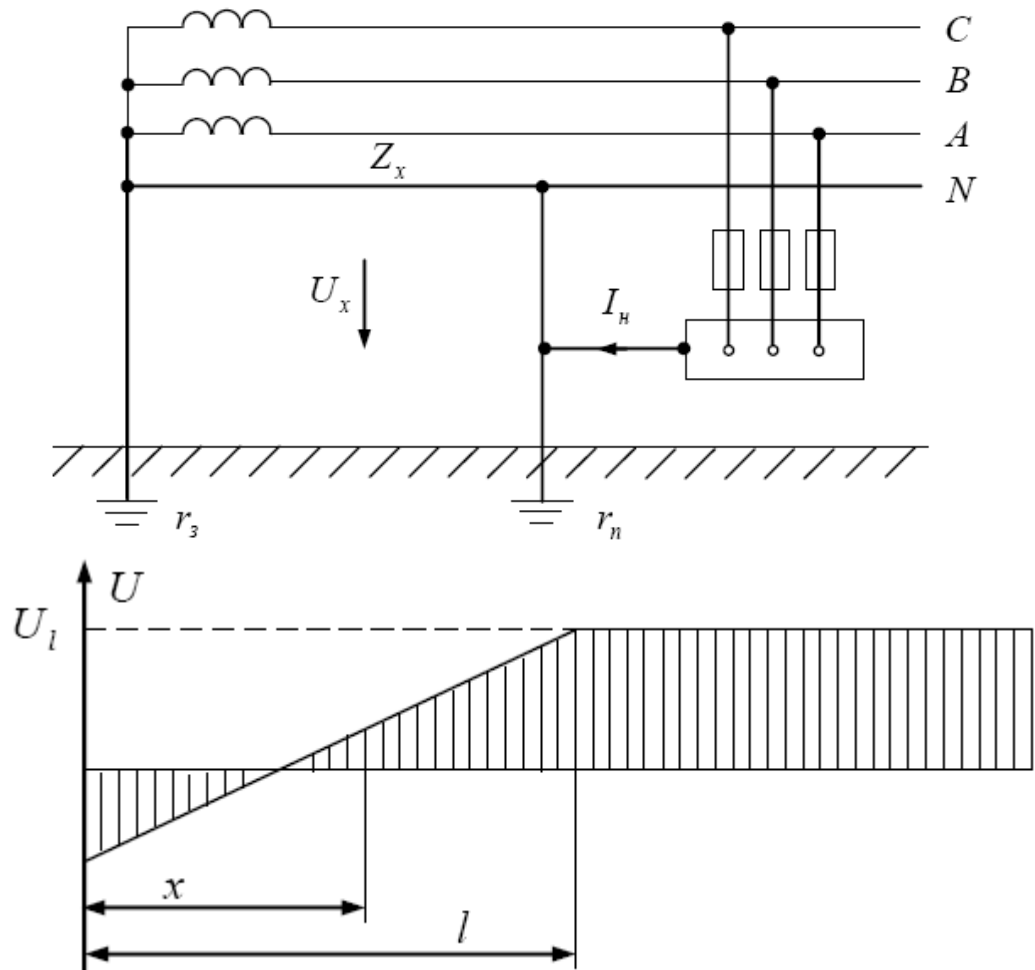


Рисунок - 9. Схема мережі з одним повторним заземленням нейтралі (а) і діаграма напруги щодо землі на нульовому проводі (б)

Контрольні питання

1. У чому суть захисту від ураження електричним струмом за допомогою захисного заземлення ?
2. У чому суть захисту від ураження людини електричним струмом за допомогою захисного вимикання ?
3. В чому суть виконання захисного вимикання?
4. Які основні вимоги до пристроїв захисного вимикання?
5. Від яких чинників залежить тяжкість електротравми?
6. Як класифікується електричний струм по ступеню дії на людину?
7. Як впливають параметри ізоляції мережі на струм через людину в мережах з різними режимами нейтралі?
8. З якою метою проводиться компенсація складової ємності струму замикання на землю?

9. Який режим настройки компенсуючого пристрою є найсприятливішим для електробезпеки?

10. Мережі з яким режимом нейтралі менш небезпечні при безпосередньому дотику людини до струмоведучих частин?