

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра охорони праці, промислової
та цивільної безпеки

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6 (РТФ, ІТС)
з дисципліни «Охорона праці та цивільний захист»

Тема роботи:
«Захисне заземлення системи TN підсистеми TN-C в
електромережах напругою до 1 кВ з глухозаземленою нейтраллю
джерела живлення»

Укладач: канд. техн. наук, доцент Каштанов Сергій Федорович
Затверджено на засіданні кафедри ОПЦБ протокол № 1 від 30.08.2018 р.

Теоретичні положення

Існуюча класифікація систем захисного заземлення

Згідно ПУЕ прийнято застосовувати такі позначення існуючих типів систем заземлення:

система TT – це система, одну точку струмовідних частин джерела живлення (ДЖ) якої заземлено, а відкриті провідні частини ЕУ з'єднано із заземлювачем, електрично незалежним від заземлювача, до якого приєднано точку струмовідних частин ДЖ (рис 1,а);

система IT – це система, в якій мережу живлення ізольовано від землі чи заземлено через прилади і/або пристрої, що мають великий опір, а відкриті провідні частини ЕУ приєднано до захисного РЕ-провідника (рис.1,б);

система TN – це система, в якій мережа живлення має глухе заземлення однієї точки струмовідних частин ДЖ, а електроприймачі і відкриті провідні частини ЕУ приєднуються до цієї точки за допомогою відповідно N- або M- і PE-або PEN-провідників (рис.1,в).

В свою чергу, системи заземлення TN поділяють на такі підсистеми (рис.2):

підсистема TN-C – це система TN, в якій N- або M- і PE-провідники поєднано в одному PEN-провіднику по всій мережі (рис.2,а);

підсистема TN-S – це система TN, в якій N- або M- і PE-провідники розділені по всій мережі (рис.2,б);

підсистема TN-C-S – це система TN, в якій N- або M- і PE-провідники поєднані в одному провіднику у частині мережі, починаючи від ДЖ (рис.2,в).

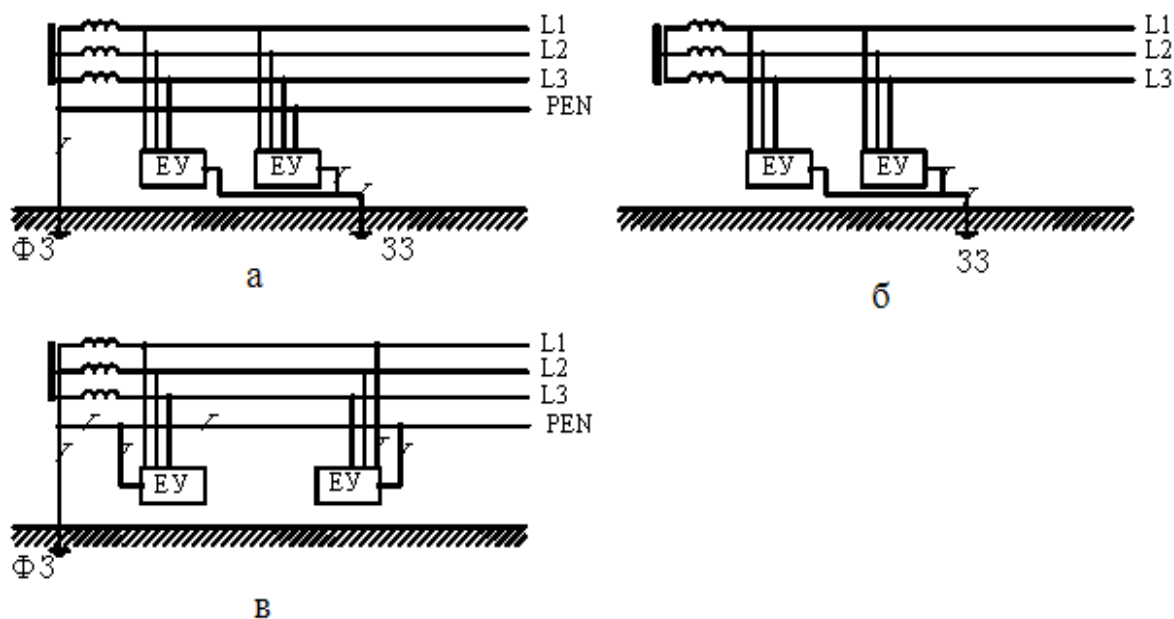


Рис.1. Схеми систем заземлення в ЕУ напругою до 1 кВ:

а – типу TT; б – типу IT; в – типу TN;

ФЗ – функціональне заземлення; ЗЗ – захисне заземлення

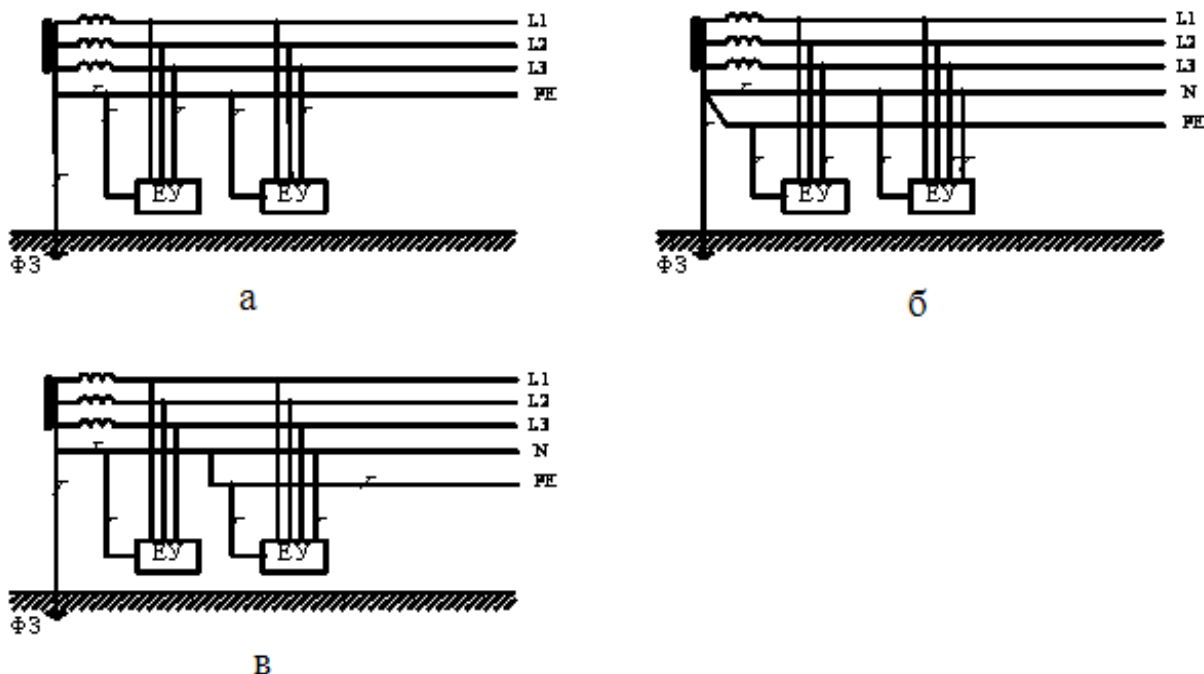


Рис.2. Схеми підсистем захисного заземлення системи TN в ЕУ напругою до 1 кВ:

а – підсистеми TN-C; б – підсистеми TN-S; в – підсистеми TN-C-S

Особливості захисної дії захисного заземлення системи TN підсистеми TN-C в ЕМ напругою до 1 кВ.

Розглянемо детальніше існуючі варіанти захисної дії захисного заземлення (ЗЗ) системи TN підсистеми TN-C (рис. 3).

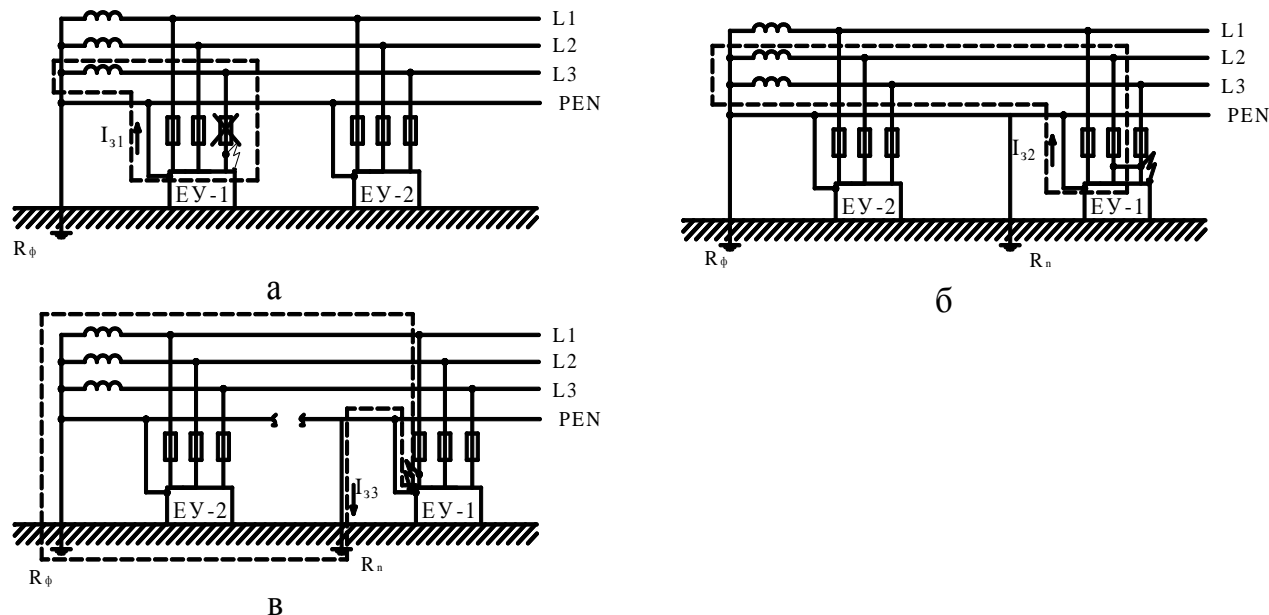


Рис.3. Електрична схема виконання захисного заземлення ЕУ напругою до 1 кВ в електричних мережах з глухозаземленою нейтраллю (заземлення системи TN підсистеми TN-C):

- а – схема без повторного заземлення PEN- провідника;*
- б – нормальний режим схеми з повторним заземленням PEN- провідника;*
- в – аварійний режим схеми з повторним заземленням PEN- провідника (обрив PEN- провідника).*

Спочатку розглянемо схему без повторного заземлення нейтрального захисного провідника (рис. 3, а).

При аварійному режимі роботи ЕУ-1, через пошкодження її робочої ізоляції має місце замикання фази на корпус. Струм замикання в ЕУ-1 (I_{31}) протікає у цьому випадку по корпусу, по заземлюючому відгалуженню до нейтрального заземлюючого провідника (PEN-провідника), по PEN-провіднику до нейтралі ДЖ, через обмотку трансформатора і по фазному провіднику L3 до точки замикання на корпус ЕУ-1. Силу цього струму можна визначити за допомогою наступної залежності:

$$I_{31} = U_L / (Z_L + Z_{N3} + Z_{TP}/3) \quad (1)$$

де: U_L – фазна напруга;

Z_L та Z_{N3} - повні еквівалентні опори фазного і нейтрального заземлюючого провідників, Ом;

$$Z_L = R_L / \cos \varphi;$$

$$Z_{N3} = R_{N3} / \cos \varphi;$$

R_L та R_{N3} - активні складові повних еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників, Ом;

φ – фазовий зсув між напругою та струмом в ЕМ ($\varphi = 0$ при відсутності реактивних складових /як індуктивного так і ємнісного характеру/ еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників Z_L та Z_{N3});

$Z_{TP}/3$ - еквівалентний опір трансформатора;

Якщо $\cos \varphi = 1$, величина струму замикання (I_{3I}) визначається за наступною формулою:

$$I_{3I} = U_L / (R_L + R_{N3} + Z_{TP}/3) \quad (2)$$

де: U_L – фазна напруга, В;

R_L та R_{N3} – активні складові повних еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників, Ом;

$Z_{TP}/3$ – еквівалентний опір трансформатора, Ом.

В інших випадках, при розрахунку величини струму замикання (I_{3I}) необхідно враховувати не тільки активні, а і реактивні (в першу чергу індуктивні) складові Z_L та Z_{N3} /див. формулу (3) /.

$$I_{3I} = U_L / \{ \sqrt{[(R_L + R_{N3})^2 + (X_L + X_{N3})^2]} + Z_{TP}/3 \} \quad (3)$$

де: U_L – фазна напруга, В;

R_L та R_{N3} - активні складові повних еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників, Ом;

$X_L = \omega \cdot L_L$ та $X_{N3} = \omega \cdot L_{N3}$ - індуктивні складові повних еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників, Ом;

L_L та L_{N3} – еквівалентні індуктивності фазного та нейтрального захисного провідників, Гн;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ - кругова частота;

f – частота струму в ЕМ, Гц;

$Z_{TP}/3$ - еквівалентний опір трансформатора, Ом.

Для спрощення аналізу даної схеми ЗЗ (рис. 3, а), будемо вважати, що в ЕМ $\cos \varphi = 1$. Це дає можливість знехтувати індуктивними складовими повних еквівалентних опорів, як для фазних (Z_L), так і для нейтрального заземлюючого (Z_{N3}) провідників і скористатися формулою (2).

Так як сума опорів у знаменнику цієї формули ($R_L + R_{N3} + Z_{TP}/3$), як правило, становить доли Ома, то струм замикання I_{3I} є струмом КЗ, від якого надійно спрацює пристрій максимального струмового захисту (МСЗ) /перегоряє плавка вставка, як показано на рис. 3, а/ і цей пристрій селективно відключає пошкоджену ЕУ-1.

За час протікання струму КЗ, який визначається часом спрацювання пристрою МСЗ, на нейтральному заземлюючому провіднику (PEN-провіднику), а значить і на корпусі ЕУ-1 буде існувати напруга, величина якої відносно землі визначається за наступною формулою:

$$U_{N3} = U_{КОРП\ EУ-1} = U_L R_{N3} / (R_L + R_{N3} + Z_{TP}/3) \quad (4)$$

де: U_{N3} - напруга на PEN- провіднику (відносно землі);
 $U_{КОРП\ EУ-1}$ – напруга на корпусі ЕУ-1 (відносно землі);
 U_L – фазна напруга;
 R_L та R_{N3} – активні складові повних еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників, Ом;
 $Z_{TP}/3$ - еквівалентний опір трансформатора.

Величина напруги на корпусі ЕУ-1, що працює в аварійному режимі роботи, залежить в основному від співвідношення опорів фазного та нейтрального заземлюючого провідників (R_L та R_{N3}). Наприклад, у разі якщо $R_L = R_{N3}$, то ця напруга буде складати приблизно $U_L/2$, а якщо $R_L > R_{N3}$ або $R_L < R_{N3}$, то ця напруга буде відповідно $< U_L/2$ або $> U_L/2$, при цьому у всіх вище перелічених випадках величина цієї напруги ($U_{КОРП\ EУ-1}$) буде значно перевищувати ті допустимі значення напруги дотику ($U_{ДОТ.ДОП}$), що визначається ГОСТ 12.1.038-82 при часі дії струму на людину > 1 сек. ($U_{ДОТ.ДОП} = 36$ В.). Також характерним є той факт, що така ж сама напруга буде існувати не тільки на корпусі пошкодженої ЕУ (у нашому випадку ЕУ-1), а й на корпусах усіх інших ЕУ (наприклад, ЕУ-2), сполучених із нейтральним заземлюючим провідником (PEN- провідником), що є небезпечним для людини.

Таким чином, захисна дія ЗЗ у мережах із заземленою нейтраллю ДЖ може бути реалізована лише у випадку застосування пристроїв максимального струмового захисту, які забезпечують відключення наруги живлення при аварійному режимі роботи ЕУ і скорочують тривалість існування напруги дотику на корпусі ЕУ, що, в свою чергу, згідно з ГОСТ 12.1.038-82 забезпечує значне підвищення допустимих значень напруг дотику. Наприклад, при часі спрацювання пристрою максимального струмового захисту менше 0,1 сек. $U_{ДОТ.ДОП} = 500$ В.

У таблиці 1 приведені допустимі значення напруги дотику ($U_{ДОТ.ДОП}$) та допустимі значення струму ($I_{ДОП}$) в залежності від часу спрацювання ($t_{СПР}$) пристроїв МСЗ (ГОСТ 12.1.038-82).

Для надійної роботи пристроїв максимального струмового захисту (МСЗ), які відносяться до засобів автоматичного відключення живлення (ЗАВЖ), необхідно виконання наступної умови: струм однофазного короткого замикання (КЗ) на землю повинен перевищувати не менш ніж в 3 рази номінальний струм спрацювання плавкої вставки запобіжника або в 1,4 рази номінальний струм спрацювання автоматів максимального струмового захисту з електромагнітним розчіплювачем, якщо струм КЗ не перевищує 100

А, і в 1,25 разів, якщо струм КЗ дорівнює або вище за 100 А (але не менше ніж в 1,1 рази у будь-якому випадку).

Таблиця 1. Допустимі значення напруги дотику ($U_{\text{дот.доп}}$) та допустимі значення струму ($I_{\text{доп}}$) в залежності від часу спрацювання пристроїв МСЗ

Вид струму: змінний 50 Гц	Час спрацювання пристроїв МСЗ ($t_{\text{СПР}}$), сек										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	>1
$U_{\text{дот.доп}}$ (В)	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
$I_{\text{доп}}$ (мА)	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6

При розрахунках електромережі на вимикаючу здатність у разі аварійного режиму роботи ЕУ, для перевірки виконання даної умови застосовується коефіцієнт кратності ($K_{\text{кр}}$) струму однофазного короткого замикання на корпус ЕУ ($I_{\text{ЗК}}$ А) до номінального струму спрацювання пристрою МСЗ ($I_{\text{НОМ.СПР.}}$, А).

$$K_{\text{кр}} = I_{\text{ЗК}} / I_{\text{НОМ.СПР.}} \quad (5)$$

Зменшення величини напруги на нейтральному заземлюючому провіднику (PEN-провіднику) і відповідно, на корпусах ЕУ за час протікання струму КЗ, може бути забезпечено за рахунок використання повторного заземлення PEN-провідника.

Повторне заземлення PEN-провідника – це заземлення PEN-провідника, що виконується на деякій відстані від функціонального заземлення (ФЗ) ДЖ з метою підвищення безпеки експлуатації ЕУ.

За наявності повторного заземлення (рис. 3, б) напруга відносно землі на PEN-провіднику, а значить і на корпусі ЕУ-1, за час протікання струму КЗ визначається залежністю:

$$U_{\text{N3}} = U_{\text{КОРП ЕУ-1}} = I_{\text{З2}} R_{\text{N3}} R_{\text{П}} / (R_{\text{Ф}} + R_{\text{П}}) \quad (6)$$

- де: U_{N3} - напруга на PEN- провіднику (відносно землі);
 $U_{\text{КОРП ЕУ-1}}$ - напруга на корпусі ЕУ-1 (відносно землі);
 $I_{\text{З2}}$ - струм замикання при аварійному режимі роботи ЕУ-1;
 R_{N3} – активна складова повного еквівалентного опору PEN-провідника, Ом
 $R_{\text{Ф}}$ - еквівалентний опір функціонального заземлення, Ом;
 $R_{\text{П}}$ - еквівалентний опір повторного заземлення PEN-провідника, Ом.

Умова безпеки у цьому випадку визначається як:

$$U_{N3} = U_{КОРП\ EУ-1} = I_{33} R_{N3} R_{П} / (R_{\Phi} + R_{П}) \leq U_{КДОП.ДОТ} \quad (7)$$

З цієї нерівності можна визначити точне значення опору повторного заземлення (одного чи декількох) PEN-провідника, при якому буде забезпечено виконання даної умови.

Розглянемо аварійний стан схеми виконання ЗЗ в ЕМ (рис. 3, в) – це випадок, коли стався обрив нейтрального заземлюючого провідника (PEN-провідника) на деякій відстані від ДЖ, як це показано на рисунку 3, в.

У випадку відсутності повторного заземлення і замиканні фази на корпус ЕУ-1 PEN-провідник та усі корпуси ЕУ, що розміщені за місцем обриву PEN-провідника матимуть відносно землі напругу, яка дорівнює фазній (U_L). І цей стан зовсім не вплине на режим роботи ЕМ до обриву – тут і наявність PEN-провідника і відсутність на корпусі ЕУ-2 будь-якої напруги відносно землі.

Зовсім інше явище буде мати місце у випадку обриву PEN-провідника, якщо використовується повторне заземлення, як це показано на схемі рис. 3, в. У цьому випадку струм замикання на землю I_{33} , буде протікати по наступному шляху: корпус пошкодженої ЕУ-1, перемичка до PEN-провідника, далі через PEN-провідник до точки підключення повторного заземлення, через повторне заземлення $R_{П}$, і далі по землі до ФЗ R_{Φ} , до нейтралі ДЖ, через обмотку трансформатора і по фазному провіднику $L1$ до місця замикання на корпус ЕУ-1.

Струм замикання на землю I_{33} , якщо знехтувати невеликими опорами провідників (порівняно з опорами R_{Φ} і $R_{П}$) визначається згідно залежності:

$$I_{33} = U_L / (R_{\Phi} + R_{П}) \quad (8)$$

тобто фазна напруга розподіляється пропорційно опорам R_{Φ} і $R_{П}$.

Таким чином, напруга на корпусах ЕУ-1 та ЕУ-2 розподілиться наступним чином:

– на корпусах ЕУ після обриву PEN-провідника (ЕУ-1)

$$U_{КОРП\ EУ-1} = I_{33} R_{П} = U_{\Phi} R_{П} / (R_{\Phi} + R_{П}) \quad (9)$$

– на корпусах ЕУ до місця обриву PEN-провідника (ЕУ-2)

$$U_{КОРП\ EУ-2} = I_{33} R_{\Phi} = U_{\Phi} R_{\Phi} / (R_{\Phi} + R_{П}) \quad (10)$$

Таким чином повторне заземлення PEN-провідника дозволяє дещо зменшити небезпеку ураження електричним струмом навіть при аварійному стані ЕМ із захисним заземленням системи TN підсистеми. TN-C.

Завдання № 1

Для приведеної на рис. 3, а електричної схеми виконання захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C без повторного заземлення PEN-провідника, розрахувати згідно із приведеними вихідними даними величини струму короткого замикання ($I_{з1}$) в ЕУ-1 та напруг на корпусах ЕУ-1 ($U_{корп. ЕУ-1}$) та ЕУ-2 ($U_{корп. ЕУ-2}$) за умови, що ЕУ-1 знаходиться в аварійному режимі роботи (пробій робочої ізоляції; однофазне коротке замикання в ЕМ), а також визначити з урахуванням приведених характеристик пристроїв МСЗ відповідність отриманих результатів існуючим вимогам безпеки.

Вихідні дані для розрахунку:

1. ЕМ з глухозаземленою нейтраллю.
2. Захисне заземлення системи TN підсистеми TN-C без повторного заземлення PEN- провідника.
3. Корпуси ЕУ-1 та ЕУ-2 заземлені за допомогою PEN-провідника.
4. Аварійний режим роботи ЕУ-1 (пробій робочої ізоляції; однофазне коротке замикання).
5. U_L - фазна напруга в ЕМ (220 В).
6. Вважати, що $\cos \varphi = 1$.
7. R_L та R_{N3} – активні складові повних еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників, Ом. (див. таблицю 2);
8. $Z_{ТР}/3$ – еквівалентний опір трансформатора, (0,16 Ом.).
9. ЗАВЖ: пристрій МСЗ з електромагнітним розчіплювачем: $I_{НОМ.СПР.} = 15$ А; $t_{СПР} = 0,2$ сек.
10. Кількість можливих варіантів розрахунку – 7 (див. таблицю 2).

***Примітки:**

1. Для визначення величини струму замикання ($I_{з1}$) в ЕУ-1, яка знаходиться в аварійному режимі роботи, необхідно скористатися формулою (2).
2. Для визначення величини напруги на корпусі ЕУ-1 ($U_{корп. ЕУ-1}$), що знаходиться в аварійному режимі роботи, слід використати формулу (4).
3. Потрібні для розрахунку значення R_L та R_{N3} , (п.7) приведені у таблиці 2 для кожного із 7 можливих варіантів виконання завдання окремо.
4. Додатково визначити значення співвідношень R_L/R_{N3} для кожного із 7 приведених у таблиці 2 варіантів і занести у відповідні графи таблиці 2.
5. При визначенні відповідності отриманих значень $U_{корп. ЕУ-1}$, $U_{корп. ЕУ-2}$ та $I_{з1}$, існуючим вимогам безпеки, необхідно скористатися даними, що приведені у таблиці 1 ($U_{дот.доп.}$), і зробити це необхідно з урахуванням приведених у вихідних даних значень номінального струму спрацювання пристроїв МСЗ ($I_{НОМ.СПР.}$) та часу їх спрацювання ($t_{СПР}$), а також необхідно визначити за формулою (5) коефіцієнт $K_{КР}$ для пристроїв МСЗ і занести отримані результати до таблиці 2.

Таблиця 2. Відповідність виконання електричної схеми захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C без повторного заземлення PEN-провідника (рис. 3, а) існуючим вимогам безпеки (ПУЕ, ГОСТ 12.1.038-82).

№ варіанту	R_L (Ом)	R_{N3} (Ом)	R_L / R_{N3} (Ом)	I_{31} (мА)	$U_{\text{КОРП. ЕУ-1}}$ (В)	$U_{\text{КОРП. ЕУ-2}}$ (В)	$K_{\text{КР}}$	$U_{\text{ДОТ.ДОП.}}$ (В)
1	0,4	0,2						
2	0,37	0,23						
3	0,33	0,27						
4	0,3	0,3						
5	0,27	0,33						
6	0,23	0,37						
7	0,2	0,4						
№ варіанту	Висновки та рекомендації за варіантами № 1 - № 7							
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								

**Примітка:* Для кожного із приведених у таблиці 2 варіантів, у графі «Висновки та рекомендації за варіантами № 1 - № 7», зробити відповідні записи щодо відповідності чи не відповідності вимогам безпеки отриманих результатів та, у разі необхідності, надати відповідні рекомендації, щодо запровадження можливих додаткових заходів, які дозволять забезпечити необхідний рівень безпеки.

Завдання № 2

Для приведеної на рис. 3, б електричної схеми виконання захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C із повторним заземленням PEN-провідника, розрахувати згідно із приведеними вихідними даними величини струму короткого замикання (I_{32}) в ЕУ-1 та напруг на корпусах ЕУ-1 ($U_{\text{КОРП. ЕУ-1}}$) та ЕУ-2 ($U_{\text{КОРП. ЕУ-2}}$) за умови, що ЕУ-1 знаходиться в аварійному режимі роботи (пробій робочої ізоляції; однофазне коротке замикання в ЕМ), а також з урахуванням приведених характеристик пристроїв МСЗ визначити відповідність отриманих результатів існуючим вимогам безпеки.

Вихідні дані для розрахунку:

1. ЕМ з глухозаземленою нейтраллю.
2. Захисне заземлення системи TN підсистеми TN-C із повторним заземленням PEN-провідника.
3. Корпуси ЕУ-1 та ЕУ-2 заземлені за допомогою PEN-провідника.
4. Аварійний режим роботи ЕУ-1 (пробій робочої ізоляції; однофазне коротке замикання).
5. U_L - фазна напруга в ЕМ (220 В).
6. Вважати, що $\cos \varphi = 1$.
7. R_L та R_{N3} – активні складові повних еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників /PEN-провідника/, Ом. ($R_L = 0,4$ Ом; $R_{N3} = 0,4$ Ом.);
8. R_Φ та R_Π – еквівалентні опори функціонального заземлення нейтралі ЕМ та повторного заземлення нейтрального заземлюючого провідника /PEN-провідника/, Ом. (див. таблицю 3);
9. $Z_{\text{ТР}}/3$ – еквівалентний опір трансформатора, (0,16 Ом.).
10. ЗАВЖ: пристрій МСЗ з електромагнітним розчіплювачем: $I_{\text{НОМ.СПР.}} = 30$ А; $t_{\text{СПР}} = 0,1$ сек.
11. Кількість можливих варіантів розрахунку – 7 (див. таблицю 3).

***Примітки:**

1. Для визначення величини струму замикання (I_{32}) в ЕУ-1, яка знаходиться в аварійному режимі роботи, необхідно скористатися формулою (2).
2. Для визначення величини напруги на корпусі ЕУ-1 ($U_{\text{КОРП. ЕУ-1}}$), яка знаходиться в аварійному режимі роботи, слід використати формулу (6).
3. Потрібні для розрахунку значення R_Φ та R_Π (п.8) приведені у таблиці 3 для кожного із 7 можливих варіантів виконання завдання окремо.
4. Додатково визначити значення співвідношень R_Φ/R_Π для кожного із 7 приведених у таблиці 2 варіантів і занести у відповідні графи таблиці 3.
5. При визначенні відповідності отриманих значень $U_{\text{КОРП. ЕУ-1}}$, $U_{\text{КОРП. ЕУ-2}}$ та I_{32} , існуючим вимогам безпеки, необхідно скористатися даними, що приведені у таблиці 1 ($U_{\text{ДОТ.ДОП.}}$), і зробити це необхідно з урахуванням приведених у вихідних даних значень номінального струму спрацювання

пристроїв МСЗ ($I_{ном.спр}$) та часу їх спрацювання ($t_{спр}$), а також необхідно визначити за формулою (5) коефіцієнт $K_{кр}$ для пристроїв МСЗ і занести отримані результати до таблиці 3.

Таблиця 3. Відповідність виконання електричної схеми захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C із повторним заземленням PEN-провідника (рис. 3, б - без обриву PEN-провідника) існуючим вимогам безпеки (ПУЕ, ГОСТ 12.1.038-82).

№ варіанту	R_{ϕ} (Ом)	$R_{п}$ (Ом)	$R_{\phi}/R_{п}$ (Ом)	I_{32} (мА)	$U_{корп. ЕУ-1}$ (В)	$U_{корп. ЕУ-2}$ (В)	$K_{кр}$	$U_{дот. доп.}$ (В)
1	10	4						
2	9	5						
3	8	6						
4	7	7						
5	6	8						
6	5	9						
7	4	10						
№ варіанту	Висновки та рекомендації за варіантами № 1 - № 7							
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								

*Примітка: Для кожного із приведених у таблиці 3 варіантів, у графі «Висновки та рекомендації за варіантами № 1 - № 7», зробити відповідні записи щодо відповідності чи не відповідності вимогам безпеки отриманих результатів та, у разі необхідності, надати відповідні рекомендації, щодо запровадження можливих додаткових заходів, які дозволять забезпечити необхідний рівень безпеки.

Завдання № 3

Для приведеної на рис. 3, в електричній схемі виконання захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C із повторним заземленням PEN-провідника (розглядається випадок обриву PEN-провідника), розрахувати згідно із приведеними вихідними даними величини струму короткого замикання ($I_{зз}$) в ЕУ-1 та напруг на корпусах ЕУ-1 ($U_{корп\ ЕУ-1}$) та ЕУ-2 ($U_{корп\ ЕУ-2}$) за умови, що ЕУ-1 знаходиться в аварійному режимі роботи (пробій робочої ізоляції; однофазне коротке замикання в ЕМ), а також з урахуванням приведених характеристик пристроїв МСЗ визначити відповідність отриманих результатів існуючим вимогам безпеки.

Вихідні дані для розрахунку:

1. ЕМ з глухозаземленою нейтраллю.
2. Захисне заземлення системи TN підсистеми TN-C із повторним заземленням PEN-провідника. Розглядається випадок, коли має місце обрив PEN-провідника.
3. Корпуси ЕУ-1 та ЕУ-2 заземлені за допомогою PEN-провідника.
4. Аварійний режим роботи ЕУ-1 (пробій робочої ізоляції; однофазне коротке замикання).
5. U_L - фазна напруга в ЕМ (220 В).
6. Вважати, що $\cos \varphi = 1$.
7. R_L та R_{N3} – активні складові повних еквівалентних опорів фазного і нейтрального заземлюючого провідників /PEN-провідника/, Ом. ($R_L = 0,2$ Ом; $R_{N3} = 0,3$ Ом.);
8. R_Φ та R_Π – еквівалентні опори функціонального заземлення нейтралі ЕМ та повторного заземлення нейтрального заземлюючого провідника /PEN-провідника/, Ом. (див. таблицю 4);
9. $Z_{ТР}/3$ – еквівалентний опір трансформатора, (0,16 Ом.).
10. ЗАВЖ: пристрій МСЗ з електромагнітним розчіплювачем: $I_{НОМ.СПР.} = 25$ А; $t_{СПР} = 0,3$ сек.
11. Кількість можливих варіантів розрахунку – 7 (див. таблицю 4).

***Примітки:**

1. Для визначення величини струму замикання ($I_{зз}$) в ЕУ-1, яка знаходиться в аварійному режимі роботи, необхідно скористатися формулою (2).
2. Для визначення величини напруги на корпусі ЕУ-1 ($U_{корп\ ЕУ-1}$), що знаходиться в аварійному режимі роботи і розташована після точки обриву PEN-провідника, слід використовувати формулу (9).
3. Для визначення величини напруги на корпусі ЕУ-2 ($U_{корп\ ЕУ-2}$), що знаходиться в нормальному режимі роботи і розташована до точки обриву PEN-провідника, слід використати формулу (10).
4. Потрібні для розрахунку значення R_Φ та R_Π (п.8) приведені у таблиці 4 для кожного із 7 можливих варіантів виконання завдання окремо.

5. Додатково визначити значення співвідношень R_{Φ}/R_{Π} для кожного із 7 приведених у таблиці 2 варіантів і занести у відповідні графи таблиці 4.

6. При визначенні відповідності отриманих значень $U_{\text{корп. еу-1}}$, $U_{\text{корп. еу-2}}$ та I_{33} , існуючим вимогам безпеки, необхідно скористатися даними, що приведені у таблиці 1 ($U_{\text{дот.доп.}}$), і зробити це необхідно з урахуванням приведених у вихідних даних значень номінального струму спрацювання пристроїв МСЗ ($I_{\text{ном.спр.}}$) та часу їх спрацювання ($t_{\text{спр.}}$), а також необхідно визначити за формулою (5) коефіцієнт $K_{\text{кр}}$ для пристроїв МСЗ і занести отримані результати до таблиці 4.

Таблиця 4. Відповідність виконання електричної схеми захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C із повторним заземленням PEN-провідника (рис. 3, в – обрив PEN-провідника) існуючим вимогам безпеки (ПУЕ, ГОСТ 12.1.038-82).

№ варіанту	R_{Φ} (Ом)	R_{Π} (Ом)	R_{Φ}/R_{Π} (Ом)	I_{33} (мА)	$U_{\text{корп. еу-1}}$ (В)	$U_{\text{корп. еу-2}}$ (В)	$K_{\text{кр}}$	$U_{\text{дот.доп.}}$ (В)
1	10	4						
2	9	5						
3	8	6						
4	7	7						
5	6	8						
6	5	9						
7	4	10						
№ варіанту	Висновки та рекомендації за варіантами № 1 - № 7							
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								

**Примітка: Для кожного із приведених у таблиці 4 варіантів, у графі «Висновки та рекомендації за варіантами № 1 - № 7», зробити відповідні записи щодо відповідності чи не відповідності вимогам безпеки отриманих результатів та, у разі необхідності, надати відповідні рекомендації, щодо запровадження можливих додаткових заходів, які дозволять забезпечити необхідний рівень безпеки.*

Завдання № 4

Згідно із результатами, які були отримані при виконанні завдання № 1, побудувати графік залежності напруги на корпусі ЕУ-1 ($U_{\text{КОРП. ЕУ-1}}$), що знаходиться в аварійному режимі роботи (однофазне коротке замикання), від величини співвідношення еквівалентних опорів фазного (R_L) та нейтрального заземлюючого провідників (R_{N3}).

Завдання № 5

Згідно із результатами, які були отримані при виконанні завдання № 2, побудувати графік залежності напруги на корпусі ЕУ-2 ($U_{\text{КОРП. ЕУ-2}}$), що знаходиться в нормальному режимі роботи, від величини співвідношення еквівалентних опорів функціонального (R_Φ) та повторного (R_{II}) заземлень.

Завдання № 6

Згідно із результатами, які були отримані при виконанні завдання № 3, побудувати графіки залежності напруги на корпусі ЕУ-1 ($U_{\text{КОРП. ЕУ-1}}$), яка знаходиться в аварійному режимі роботи (однофазне коротке замикання), та напруги на корпусі ЕУ-2 ($U_{\text{КОРП. ЕУ-2}}$), яка знаходиться в нормальному режимі роботи, від величини співвідношення еквівалентних опорів функціонального (R_Φ) та повторного (R_{II}) заземлень.

Завдання № 7

Для електричної схеми захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C без повторного заземлення PEN-провідника (рис. 3, а) розробити електронні таблиці у форматі Excel для визначення величин струму замикання на корпус ЕУ (I_{31}) за формулами (2) та (3), а також величини напруги на PEN-провіднику (U_{N3}) за формулою (4) і коефіцієнта кратності ($K_{кр}$) струму однофазного короткого замикання на корпус ЕУ (I_{31} , А) до номінального струму спрацювання пристрою МСЗ ($I_{НОМ.СПР.}$, А) за формулою (5).

Завдання № 8

Для електричної схеми захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C із повторним заземленням PEN-провідника (рис. 3, б – без обриву PEN-провідника) розробити електроні таблиці у форматі Excel для визначення величин струму замикання на корпус ЕУ (I_{32}) за формулами (2) та (3), а також величини напруги на PEN-провіднику (U_{N3}) за формулою (6) і коефіцієнта кратності ($K_{кр}$) струму однофазного короткого замикання на корпус ЕУ (I_{32}, A) до номінального струму спрацювання пристрою МСЗ ($I_{НОМ.СПР.}, A$) за формулою (5).

Завдання № 9

Для електричної схеми захисного заземлення ЕУ системи TN підсистеми TN-C із повторним заземленням PEN-провідника (рис. 3, в – обрив PEN-провідника) розробити електроні таблиці у форматі Excel для визначення величин струму замикання на корпус ЕУ (I_{33}) за формулою (8), а також величин напруг на корпусах ЕУ-1 та ЕУ-2 ($U_{КОРП\ ЕУ-1}$ та $U_{КОРП\ ЕУ-2}$) за формулами (9) та (10) і коефіцієнта кратності ($K_{кр}$) струму однофазного короткого замикання на корпус ЕУ (I_{33}, A) до номінального струму спрацювання пристрою МСЗ ($I_{НОМ.СПР.}, A$) за формулою (5).

Список літератури

1. Ткачук К. Н., Зацарний В. В., Каштанов С.Ф. та ін. Охорона праці та промислова безпека: навч. посіб. – К.: Лібра, 2010. – 559 с.
2. ПУЕ-2017 «Правила улаштування електроустановок»
3. ГОСТ 12.1.038-82 «ССБП. Гранично допустимі значення напруг та струмів».
4. ГОСТ 12.1.030-81 «ССБП. Електробезпека. Захисне заземлення. Занулення».