

## ВПЛИВ РЕЖИМУ НЕЙТРАДЛІ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 6-35 КВ

Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

*Розглянуто вибір режиму заземлення нейтралі в мережі напругою 6-35 кВ. Встановлено, що спосіб заземлення нейтралі впливає на значне число технічних рішень, які реалізуються в розподільчій мережі. Вибрано критерії ефективності режиму нейтралі. Досліджено вплив режиму нейтралі на рівень перенапруг, на кількість пошкоджень і час пошуку пошкоджень, на ступінь небезпеки дотику людини до заземленої частини електроустановки при виникненні однофазного замикання на землю, на застосування захисного шунтування, релейного захисту, режиму заземлення через реактор і резистор та їх комбінацію.*

**Ключові слова:** розподільча мережа, технічний стан, оптимізація режиму заземлення нейтралі.

### **Abstract**

*The selection of the neutral grounding mode in the 6-35 kV network was considered. It was established that the method of neutral grounding affects a significant number of technical solutions that are implemented in the distribution network. The efficiency criteria of the neutral mode have been selected. The influence of the neutral mode on the level of overvoltages, on the number of damages and the time to search for damages, on the degree of danger of human contact with the grounded part of the electrical installation in the event of a single-phase short circuit to the ground, on the use of protective shunting, relay protection, the grounding mode through a reactor and a resistor and their combination was studied.*

**Keywords:** distribution network, technical condition, optimization of neutral grounding mode.

### **Вступ**

Розподільча мережа напругою 6-35 кВ – це складний, розподілений в просторі електротехнічних комплекс з неоднорідною структурою, високою ціною відмови, автономним обслуговуванням. Вибір режиму (способу) заземлення нейтралі в мережі напругою 6-35 кВ є дуже важливим питанням проектування, виготовлення і експлуатації розподільчої мережі.

Режим заземлення нейтралі системи електропостачання визначає: значення струму в місці пошкодження і перенапругу на непошкоджених фазах; вибір засобів захисту від однофазних замикань на землю (ОЗЗ) параметри і характеристику ізоляції; вибір захисту від перенапруг; надійність електропостачання; значення опору контура заземлення на підстанції; безпеку обслуговуючого персоналу та захист від перенапруг електрообладнання при ОЗЗ.

В теперішній час проводиться значна робота по забезпеченню високого рівня надійності, безпеки і ефективності використання розподільчих мереж [1-2], наприклад, шляхом створення додаткових центрів живлення, скорочення довжини радіальних ліній та їх ділянок, які можна виділити комутаційними апаратами, впровадження засобів релейного захисту та противарійної автоматики.

Незважаючи на це в електроустановках з ізолюваною нейтраллю спостерігається значна кількість однофазних замикань на землю. В кабельних мережах переважають однофазні замикання на землю, а в повітряних мережах спостерігається обрив проводу з наступним замиканням на землю і рідко ОЗЗ внаслідок пробою і перекриття ізоляторів. Однофазні замикання на землю негативно впливають на показники надійності безпеки і ефективності використання систем електропостачання. Вони викликають значні кратності внутрішніх перенапруг, характерних для мереж з ізолюваною нейтраллю і компенсацію ємнісних струмів ОЗЗ; існує висока ймовірність виникнення подвійних замикань на землю, пошкодження трансформаторів напруги і засобів контролю ізоляції; зниження ефективності компенсації струмів ОЗЗ; зростання числа к.з; довгий час існування небезпечної напруги дотику і кроку; підвищують ймовірність помилкових дій обслуговуючого персоналу; погіршення селективності, швидкодії, чутливості і надійності функціонування релейного захисту.

Проблема оптимізації режиму нейтралі розглядалися на різних етапах розвитку мереж 6-35 кВ [3,4]. В [5] приведені результати виконаних досліджень режимів нейтралі, описані процеси при однофазних замиканнях, а також пристрої, які використовуються в основному для компенсації ємнісного струму. Проте в опублікованих роботах, включаючи і [5], лише частково враховується

необхідність комплексного рішення задачі мінімізації складової експлуатаційних витрат, яка залежить від режиму нейтралі мережі і використовуваних пристроїв автоматики. Більш повно, але тільки для кар'єрних мереж ці питання розглянуті в [6]., тому існує задача пошуку ефективних методів роботи нейтралі систем електропостачання.

Мета роботи. Підвищення рівня надійності, безпеки і ефективності використання за призначенням розподільчих мереж, шляхом оптимізації режиму заземлення нейтралі.

### Результати досліджень

Виходячи з результатів аналізу сучасних засобів захисту мереж 6-35 кВ від однофазних замикань на землю, сформульовані критерії ефективності заземлення нейтралі (рис.1) Приведена схема відповідає моделі розподільчої мережі з урахуванням сукупності її основних властивостей, залежних від стану нейтралі. Для оцінки комплексного показника ефективності (якості) режиму нейтралі використані методи кваліметрії [6], відповідно до яких властивості об'єкту, тобто розподільної мережі, відображаються точкою  $n$  – мірного простору ( $n$  – число незалежних показників, що визначають ефективність режиму нейтралі за підсумками порівняння об'єктів між собою і з еталоном).

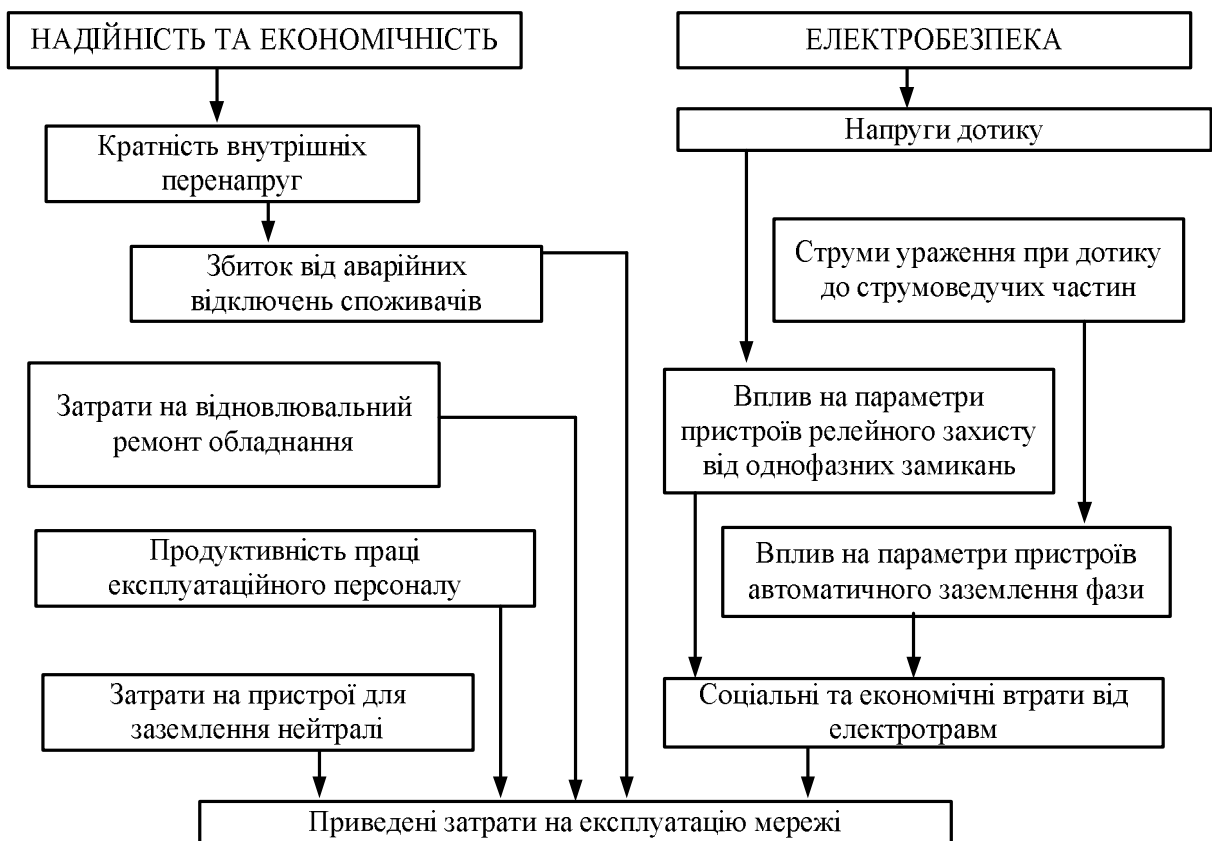


Рис. 1 Критерії ефективності режиму нейтралі

Будемо вважати, що інтегральний показник ефективності (цільова функція) режиму нейтралі є мірою наближення мережі, де використовується той або інший спосіб заземлення нейтралі, до еталону - мережі, в якій режим нейтралі забезпечує рівність цільової функції одиниці. Вид інтегрального показника  $I_k$  вибирається з урахуванням наступних основних вимог: він повинен чисельно оцінювати весь даний комплекс критеріальних властивостей мережі; кожний параметр відображається в  $I_k$  своєю ваговою характеристикою  $V_i$ ; показники ефективності  $x_i$  вимірюються у відносних одиницях; нормування  $x_i$  і  $V_i$  в інтервалі (0;1) повинно забезпечувати умову  $I_k = 1$  в ідеальній мережі.

Для визначення  $I_k$  застосована найбільше розповсюджене оцінювання - середня арифметична лінійна форма інтегрального показника

$$I_k = \sum_{i=1}^n V_i x_{ik} \quad (1)$$

де  $k$  - номер даного варіанту режиму нейтралі;  $n$  - число критеріальних властивостей, що враховувалися ( незалежних показників ефективності режиму нейтралі):  $V_i$  - вагові коефіцієнти показників;  $x_{ik} = f_{ik}(y)$  - залежності оцінок ефективності режиму нейтралі від відповідних параметрів і експлуатаційних характеристик мережі.

Якщо перелік властивостей мережі для вирішення поставленого завдання є визначеним, то виходячи з критеріїв ефективності режиму нейтралі, які залежать від: кратності перенапруг при однофазних замиканнях  $y_{\Pi}$ ; тривалості існування в мережі однофазного пошкодження, яке створює небезпеку ураження, в результаті дії напруги дотику, -  $y_{\text{H}}$ ; струму однофазного замикання, який визначає напругу дотику -  $y_{\text{T}}$ ; параметрів пристроїв релейного захисту від однофазних замикань (селективності, завадостійкості, числа відмов) -  $y_3$ ; параметрів пристроїв автоматичного заземлення фази, чутливості і швидкодії  $y_{\text{у.з.ф.}}$ . Перераховані показники визначаються аналітично у відносних одиницях і використовується для обчислення оцінок  $x_{ik}$ .

Вагові коефіцієнти показників ефективності режиму нейтралі отримані із групових експертних оцінок спеціалістів, що займалися дослідженням, проектуванням і експлуатацією розподільних мереж [ 6 ].

По експертним даним  $W_{j,i}$  шляхом усереднювання відповідних оцінок були обчислені вагові коефіцієнти

$$V_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n W_{j,i} \quad (2)$$

які використані в розрахунках цільової функції  $I_k$ .

Друга група критеріїв ефективності режиму нейтралі дає можливість визначити приведені витрати на експлуатацію мережі  $Z_k$  залежно від способу заземлення її нейтралі. До цієї групи віднесені: збиток від аварійних відключень споживачів при однофазних пошкодженнях мережі; витрати на відновлювальний ремонт устаткування; продуктивність праці експлуатаційного персоналу в процесі локалізації ділянки лінії з однофазним пошкодженням - витрати на розробку, виготовлення, монтаж і експлуатацію пристроїв для заземлення нейтралі, а також пристроїв релейного захисту від однофазних замикань.

Таким чином, вибір оптимального варіанту заземлення нейтралі здійснюється шляхом порівняння сукупності показників, а також приведених затрат на експлуатацію мережі. Завдання вирішується однозначно, якщо по одному з варіантів  $I_k$  виявляється вищим, а  $Z_k$  - менше, ніж по інших варіантах. У разі, коли в двох кращих варіантах  $I_{k1} > I_{k2}$  і  $Z_{k1} > Z_{k2}$  перевага може бути віддано першому або другому режиму нейтралі, виходячи з конкретних умов експлуатації мережі.

Проведемо дослідження впливу режиму нейтралі на перенапругу при ОЗЗ. Відомо [6-8], що у мережах з ізольованою нейтраллю до 60% всіх перекриттів ізоляції відбувається в результаті дії внутрішніх перенапруг - комутаційних, ферорезонансних і перенапруг, якими супроводжуються перекидні однофазні замикання; виникнення останніх ймовірніше в мережах з меншими значеннями ємнісних струмів, особливо в початковій стадії розвитку однофазного пошкодження. При цьому, якщо перші два види внутрішніх перенапруг призводять в основному до однофазних замикань, то останній - до переходу - однофазних до перекриття ізоляції в багатьох місцях елементів мережі і значному збитку від аварійних відключень споживачів електричної енергії. Визначимо показник ефективності режиму нейтралі за умовою обмеження перенапруг  $y_n$  у вигляді відношень:

$$y_{п2} = S_1 / S_2 ; y_{п3} = S_1 / S_3 \quad (3)$$

де  $S_1, S_2, S_3$  - площі під кривими  $P = f(k_{п})$  (рис. 2.) між ординатами, проведеними через точки  $k_{п1} = 2,4$  і  $k_{п2} = k_{п.маx}$ , де  $P = f(k_{п})$  - розподіли кратностей перенапруг на непошкоджених фазах при всіх видах однофазних замикань, причому  $k_{п1} = 2,4$  - точка на осі  $k_{п}$ , яка відповідає перенапругам, безпечним для ізоляції розподільної мережі із середнім рівнем експлуатації;  $k_{п.маx}$  максимально можливі перенапруга яка практично не перевищує 3,6. Визначений у такий спосіб показник  $y_n$  достатньо повно характеризує ефективність режиму нейтралі, оскільки він пов'язаний тільки з найбільш небезпечними перенапругами, кратності яких знаходяться за точкою  $k_{п1}$ .

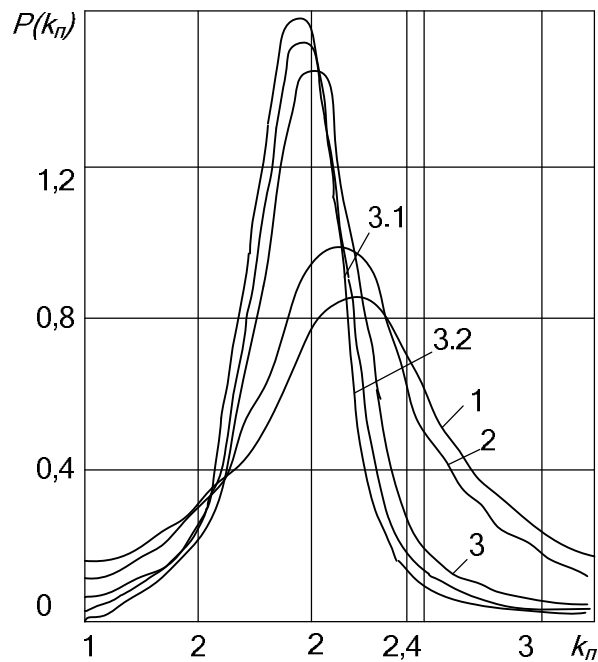


Рис. 2 Розподіл кратностей перенапруг при однофазних замиканнях

Точка  $k_{п1} = 2,4$  вибрана на підставі експериментів, проведених в [4].

З урахуванням опублікованих даних по перенапругам при однофазних замиканнях, в першу чергу [4,7,8], а також результатів вимірювань перенапруг, виконаних в мережах 6-35 кВ різного призначення, на рис. 2. побудовані диференціальні криві розподілу кратностей перенапруг. Для нейтралі заземленої через резистор, зображено залежності: 3.1-отримана на підставі [7,8] і ряду робіт зарубіжних авторів при  $k_I = I_A / I_C > 2$ ; 3.2 - побудована за результатами [9] і експериментальних досліджень, виконаних при  $I_c = 50 \div 80$  А,  $k_I = 0,6 \div 0,8$ ; 3 - отримана на підставі вимірювань [4] проведених в сільських мережах при  $I_c = 4 \div 9$  А,  $k_I = 0,5 \div 0,8$ ; а також аналізу результатів моделювання перекидних однофазних замикань.

Обробка результатів вимірювань показала, що кратності перенапруг характеризуються нормальним законом розподілу

$$P = \frac{k}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(k_n - a)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

Таблиця 1 – Параметри нормального закону розподілу при різних режимах нейтралі

Нейтраль мережі	$\sigma$	$a$	$k$
Ізольована (1)	0,462	2,274	1,012
Заземлена через реактор (2)	0,397	2,067	1,004

У виразі (5) коефіцієнт  $k_{\pi}$  забезпечує рівність одиниці площі, обмеженою кривою  $P = f(k_{\pi})$  в проміжку  $1 < k_{\pi} < 3,6$ . Значення  $k$  різні для трьох режимів нейтралі, як і параметри  $a$  (математичне очікування) і  $\sigma$ , приведені в таблиці 2.1.

В загальному виді показники ефективності режиму нейтралі за умовою обмеження перенапруг визначаються виразом

$$y_{\pi 2(3)} = \int_{2,4}^{3,6} f_1(k_{\pi}) dk_{\pi} \left[ \int_{2,4}^{3,6} f_{2(3)}(k_{\pi}) dk_{\pi} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Обчислення з використанням цього виразу дали наступні результати:  $y_{\pi 2} = 1,54$ ;  $y_{\pi 3} = 8,1$ . Для визначення оцінок  $x_{\pi 1}$ , прийнявши для гіршого варіанту рівність відповідної оцінки нулю, скористаємося виразом

$$x_{\pi 1} = 1 - \frac{1}{y_{\pi 1}}. \quad (6)$$

У випадку якщо  $x_{\pi 1} = 0$ ;  $x_{\pi 2} = 0,35$ ,  $x_{\pi 3} = 0,875$ , то з урахуванням прийнятих допущень отримаємо достатньо високу ефективність заземлення нейтралі через високоомний резистор. У випадку більш глибокого обмеження перенапруг, коли вірогідність кратностей  $k_{\pi} > 2,4$  наближається до малої величини, оцінка  $x_{\pi}$  наближається до одиниці.

Порівнюючи значення  $x_{\pi 2}$  і  $x_{\pi 3}$ , необхідно мати на увазі і те, що крива 2 на рис. 2 побудована на підставі даних, отриманих в мережах з точністю компенсації ємнісних струмів, що не перевищувала  $\pm 5\%$ .

Позитивний вплив заземлення нейтралі розподільної мережі через резистор на обмеження внутрішніх перенапруг спостерігається не тільки при перекидних однофазних замиканнях, але і при інших процесах, наприклад ферорезонансних [5]. Це веде до зниження кількості однофазних замикань і загального числа пошкоджень в мережах, що прямо пов'язане з витратами експлуатуючих організацій на ремонт устаткування мережі.

Розглянемо вплив режиму нейтралі на аварійні вимикання. Тривалість аварійних простоїв визначається кількістю відключень, а також витратами часу на виділення пошкодженої ділянки мережі і перемикання споживачів на резервне джерело живлення. Показники ефективності режиму нейтралі по умові зниження збитку  $x_y$  можна визначити як відношення

$$x_{y1} = \frac{t_{y1}}{t_{y1}} = 1; \quad x_{y2} = \frac{t_{y1}}{t_{y2}}; \quad x_{y3} = \frac{t_{y1}}{t_{y3}} = 1,$$

де  $t_{y1}$  - середній (зважений) час відключеного стану споживачів по причинах, залежних від режиму нейтралі, в мережі з ізольованою нейтраллю;  $t_{y2}$  - те ж з компенсацією ємнісних струмів однофазних замикань;  $t_{y3}$  - те ж при заземленні нейтралі через резистор. Оцінювання  $t_y$  виконано на основі аналізу об'єктивних експлуатаційних даних по розподільчим мережам. До таких даних відносяться відомості про пошкодження в міських, промислових, сільських мережах

Будемо вважати, що повне число пошкоджень  $n_{\pi}$ , число однофазних замикань  $n_0$ , з яких  $n_{0k}$  перешли за час визначення пошкодженої ділянки в короткі замикання і багатомісні пошкодження, тоді ефективність компенсації ємнісних струмів однофазних замикань (за методикою [10, 11])

$$I_k = 1 - \frac{n_{0k}}{n_0} \quad (7)$$

може істотно перевищувати її реальне значення, особливо в мережах де  $I_c > 100$  А, якщо під  $n_{0k}$  розуміти тільки зафіксовані персоналом випадки переходу однофазних замикань в короткі.

Для обчислення  $I_k$  необхідно враховувати всі короткі замикання, за винятком тих, що виникли в результаті механічних пошкоджень (в основному, поривів). Тоді значення  $I_k$  на рівні 0,1...0,3 відобразить дійсну ефективність компенсації в кабельних мережах при  $I_c > 100$  А і 0,3...0,7 - при  $I_c < 100$  А тільки по показнику зниження числа переходів однофазних замикань в короткі, який лише побічно відображає вплив режиму нейтралі на надійність мережі і збиток від аварійних відключень споживачів.

У загальному вигляді показники ефективності режиму нейтралі за умовою збитку

$$x_{y2} = \frac{\eta_{1-2} \left( \sum_{i=1}^{i=k} t_{yi1} \cdot n_{0i1} \right) \sum_{i=1}^{i=m} n_{0i2}}{\left( \sum_{i=1}^{i=k} n_{0i1} \right) \left( \sum_{i=1}^{i=m} t_{yi2} \cdot n_{0i2} \right)}; \quad x_{y3} = \frac{x_{y2} \eta_{1-3}}{\frac{1-a_{p3}}{1-a_{p2}}}, \quad (8)$$

де  $\eta_{1-2}$ ,  $\eta_{1-3}$  - відношення числа пошкоджень при переході від ізольованої нейтралі до заземленої відповідно через реактор і резистор;  $t_{yi1}$ ,  $t_{yi2}$  - час одного аварійного відключення споживачів в мережі відповідно з ізольованою і заземленою через реактор нейтралі;  $n_{0i1}$ ,  $n_{0i2}$  - число однофазних замикань в мережі при тих же режимах нейтралі;  $a_{p2}$ ,  $a_{p3}$  - показники селективності реле сигналізації в мережі із заземленням нейтралі відповідно через реактор і резистор.

Показник селективності реле сигналізації в міській мережі, що складається з  $k$  ділянок можна визначити як

$$a_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} (n_{ci}/n_{0i}) n_{pi}}{\sum_{i=1}^{i=k} n_{pi}} \quad (9)$$

де  $n_{ci}$  - число селективних спрацьовувань реле;  $n_{pi}$  - число встановлених на ділянці  $k$  мережі реле сигналізації.

З урахуванням даних, представлених в [10,12], показники ефективності режиму нейтралі за умови зниження збитку від аварійних відключень споживачів  $x_{y2} = 1,2$ ;  $x_{y3} = 9,7$ .

Такі істотні переваги заземлення нейтралі мережі через резистор забезпечуються не тільки тим, що при такому режимі знижується число пошкоджень в мережі і при однофазних замиканнях поліпшуються умови функціонування пристроїв селективної сигналізації, але і високим ступенем резервування живлення споживачів.

### Висновки

Аналіз режимів роботи розподільчих мереж напругою 6-35 кВ показав, що при виборі критерію ефективності заземлення нейтралі необхідно враховувати такі параметри і процеси які мають місце при експлуатації розподільної мережі: кратність перенапруг при однофазних замиканнях; час існування однофазного замикання на землю; значення напруги дотику і розтікання струму яке виникає при ОЗЗ; величина і вид струму ОЗЗ; харак теристика і властивості релейного захисту від ОЗЗ; технічні характеристики пристроїв шунтування пошкодженої фази.

Для дослідження впливу режиму нейтралі на рівень перенапруг доцільно враховувати лише внутрішні перенапруги: комутаційні, ферорезонансні, і такі що виникають при ОЗЗ, що супроводжуються перекидною дугою. В якості критерію оцінки перенапруги в залежності від режиму нейтралі доцільно використовувати відношення площин густин розподілу коефіцієнта кратності перенапруг на пошкоджених фазах до максимально можливої перенапруги.

В разі дослідження впливу режиму нейтралі на кількість і час пошуку пошкоджень доцільно використовувати відношення середнього часу відключеного стану споживачів по причинах, залежних від режиму нейтралі; коли вона ізольована до часу коли вона заземлена через пристрої компенсації ємнісного струму або через резистор.

Порівняння впливу режиму нейтралі мережі на ступінь небезпеки дотику людини до заземленої частини електроустановки, де виникло однофазне пошкодження ізоляції, може бути проведено за показниками, що характеризують співвідношення тривалості і величини струмів однофазних замикань.

Застосування захисного шунтування місць ОЗЗ дозволяє погасити дугу в місці пробією ізоляції за час, при якому теплова потужність, що виділиться не перевищує допустимої величини.

Режим нейтралі суттєво впливає на такі властивості релейного захисту від ОЗЗ як селективність, чутливість, надійність роботи. Заземлення нейтралі через високоомний резистор зміщує характеристику намагнічування трансформатора струму нульової послідовності і тим самим підвищує рівень сигналу, що подається на вхід захисту від ОЗЗ, що підвищує його чутливість.

У розподільчих мережах резистор для заземлення нейтралі вибирається виходячи з умови, що при дугових замиканнях на землю в перехідному процесі буде відсутня високочастотна складова. Основним варіантом схеми підключення високоомного резистора є безпосереднє підключення до нейтралі силового трансформатора через запобіжник з засобами контролю його справності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Надежность систем электроснабжения/в.в. Зорин, в. В. Тисленко, Ф.Клеппель, Г.Адлер.-К: Вища шк.,головное изд-во,1984-192 с
2. Гельфанд Я.С. Релейная защита распределительных сетей. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с
3. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М., 1959. 415 с.
4. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М., 1971. 152 с.
5. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режим нейтралі електрических сетей. 1985. 264 с.
6. Дударев Л.Е. Подавление ферорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью /Л.Е. Дударев, Адна Эль-Хатиб //Электрические станции1993.-№10.-С.62-65.
7. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью // Электричество. 1987. №5. С.31-36.
8. Беляков Н.Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтралі. М., 1991. 84-101 с.
9. Богушевич М.С., Власов С.П., Гурвич Н.Л. и др. Первичные критерии электробезопасности при кратковременных воздействиях токов промышленной частоты // Электричество. 1975. №5. С. 65-68.
10. Дударев Л.Е., Зубков В.В., Проблемы защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ // Электричество 1979. №2. С. 8
11. Кутін В.М. Визначення умов роботоздатності розподільчих мереж /В.М. Кутін, С.В. Матвієнко, -Вінниця : ВНТУ,2015.-148 с.
12. Кутін В.М. Діагностика електрообладнання : навчальний посібник / В.М. Кутін, м. О. Люхін,М.В. Кутіна – Вінниця: ВНТУ, 2014- 161 с

**Кутін Василь Михайлович** — д-р техн. наук, професор, кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, vmkytin@gmail.com.

**Пустовіт Ярослав Валерійович** – студент групи ЕМ-21мс, кафедри комп'ютеризовані електромеханічні системи і комплекси.

**Vasyl Mykhailovych Kutin** — Dr. Tech. of Sciences, professor, department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, vmkytin@gmail.com.

**Pustovit Yaroslav Valeriyovych** - student of the EM-21ms group, department of computerized electromechanical systems and complexes.