

УДК 621.316

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КОНТУРУ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ
ЗА ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ СЕРЕДНІХ НАПРУГ**

Канд. техн. наук Ю. О. Семененко,
д-р техн. наук О. Г. Серета, канд. техн. наук О. І. Семененко

**STUDY OF VARIATION OF ZERO SEQUENCE CIRCUIT PARAMETERS DURING
SINGLE-PHASE SHORTCUTS OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES
OF MEDIUM VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS**

PhD (Tech.) Y. O. Semenenko,
Dr. Sc. (Tech.) O. H. Sereda, PhD (Tech.) O. I. Semenenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362500>



Анотація. У статті наведено аналітичні дослідження найпоширенішого виду пошкоджень у повітряних лініях електропередачі розподільних мереж середньої напруги з ізолюваною або резистивно-заземленою нейтраллю – однофазного замикання на землю. Під час проведення дослідження

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Семененко Ю. О., Серета О. Г., Семененко О. І., 2026.

встановлено обґрунтовані діапазони варіації основних параметрів контуру нульової послідовності на основі нормативних документів і експлуатаційних даних: сумарна ємність фаз відносно землі: $0,01 \leq C_{\Sigma} \leq 9,2$ мкФ; тангенс кута діелектричних втрат (коефіцієнт демпфування): $0,02 \leq \operatorname{tg}\delta \leq 3,5$; перехідний опір у місці замикання: $1 \leq R_n \leq 7$ кОм; коефіцієнт K_d (режим заземлення нейтралі) і безрозмірний комплексний показник λ (для резистивного заземлення). Варіація параметрів контуру нульової послідовності суттєво впливає на чутливість і селективність захистів, особливо в умовах високого перехідного опору та сезонних змін стану ізоляції.

Доведено, що перехід до резистивно-заземленої нейтралі з правильно вибраним коефіцієнта, який враховує вибір величини опору заземлювального резистора відносно ємнісного опору мережі, дає змогу стабілізувати сигнали нульової послідовності та підвищити селективність захисту порівняно з ізольованою нейтраллю.

Ключові слова: швидкодія, коефіцієнт демпфування, активні провідності, струмовий захист, заземлення нейтралі, ємнісний струм, робочі сигнали.

Abstract. The article presents analytical studies of the most common type of damage in overhead power lines of medium voltage distribution networks with an isolated or resistively grounded neutral - single-phase ground fault. The operating signals of current protection against ground faults are formed on the basis of zero-sequence currents and voltages, therefore their sensitivity, selectivity and reliability directly depend on the real parameters of the zero-sequence circuit: the total capacitance of the phases relative to the ground, active conductivity ($\operatorname{tg}\delta$ coefficient), the neutral grounding mode and the transition resistance at the fault location.

During the study, reasonable ranges of variation of the key parameters of the zero-sequence circuit were established based on regulatory documents and operational data: total capacitance of the phases relative to the ground: $0,01 \leq C_{\Sigma} \leq 9,2$ μF ; tangent of the dielectric loss angle (damping coefficient): $0,02 \leq \operatorname{tg}\delta \leq 3,5$; transition resistance at the fault location: $1 \leq R_n \leq 7$ $\text{k}\Omega$; K_d coefficient (neutral grounding mode) and dimensionless complex exponent λ (for resistive grounding).

A mathematical analysis of the influence of these parameters on the ground fault current, zero sequence voltage and voltage of intact phases has been performed. It has been shown that with an increase in the transition resistance, the magnitudes of the operating protection signals (proportional to the incompleteness coefficient of the ground fault) significantly decrease. It has been established that the variation of the zero sequence circuit parameters significantly affects the sensitivity and selectivity of protections, especially in conditions of high transition resistance and seasonal changes in the state of insulation. It has been proven that the transition to a resistively grounded neutral with the correct choice of the coefficient, which takes into account the choice of the resistance value of the grounding resistor in relation to the capacitive resistance of the network, allows stabilizing zero-sequence signals and increasing the selectivity of protection compared to an isolated neutral.

Keywords: speed, damping factor, active conductivities, current protection, neutral grounding, capacitive current, operating signals.

Вступ. Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) є найпоширенішим видом пошкоджень у розподільних електричних мережах 6–10–35 кВ і становлять не менше 3/4 усіх коротких замикань. У мережах з ізольованою або резистивно-заземленою нейтраллю такі замикання супроводжує протікання ємнісного струму, величина

якого суттєво залежить від параметрів контуру нульової послідовності. При цьому робочі сигнали струмових захистів від ОЗЗ (зокрема напрямлених і ненапрямлених захистів нульової послідовності, захистів за напругою нульової послідовності тощо) формуються саме на основі струмів і напруг нульової послідовності. Тому точність і

швидкодія спрацювання цих захистів, а також їхня чутливість і селективність безпосередньо залежать від реальних значень параметрів контуру нульової послідовності мережі – сумарної ємності фаз відносно землі, активної провідності, режиму заземлення нейтралі та перехідного опору в місці замикання.

Параметри контуру нульової послідовності в реальних розподільних мережах не є постійними і зазнають значної варіації з впливом багатьох факторів: довжини і типу ліній, сезонних змін вологості і забруднення ізоляції, температури, режиму роботи нейтралі, а також наявності або відсутності засобів компенсації струму замикання. Недостатнє врахування цих варіацій призводить до помилок у розрахунках уставок захисту, зниження його надійності або, навпаки, до надмірної чутливості та ризику хибних спрацювань.

Для визначення впливу параметрів контуру нульової послідовності на робочі сигнали струмових захистів від ОЗЗ, які застосовують в електричних мережах 6–10–35 кВ з ізолюваною та резистивно-заземленою нейтраллю, необхідно попередньо встановити реальні діапазони їхньої варіації.

Відповідно до нормативних документів [1-3], максимальна ємність фаз мережі відносно землі обмежена умовами допустимої роботи мережі без компенсації струму замикання на землю і може досягати в мережах 6 кВ – 9,2 мкФ, 10 кВ – 3,7 мкФ, 35 кВ – 0,5 мкФ. На основі цих обмежень для загального випадку діапазон варіації сумарної ємності фаз мережі відносно землі становить $0,01 \leq C_{\Sigma} \leq 9,2$ мкФ.

Для врахування активних провідностей фаз ліній відносно землі використовують тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$. Дослідження [4-6], проведені в розподільних мережах 6–10–35 кВ, показують, що цей параметр змінюється в межах від 0,02 до 3,5. Збільшення $tg\delta$ спостерігають переважно в осінньо-

весняний період через зволоження ізоляції. Отримані межі є адекватними, оскільки співвідношення сухо- та мокророзрядного опорів ізоляторів повітряних ліній електропередачі становить близько 250. Для подальших досліджень діапазон варіації коефіцієнта демпфування мережі приймають $0,02 \leq tg\delta \leq 3,5$.

Вплив параметрів системи заземлення нейтралі на величини нульової послідовності визначають за допомогою двох основних компонентів: коефіцієнта K_d , що характеризує режим роботи нейтралі, і безрозмірного комплексного показника, який враховує параметри трансформатора (або резистора) заземлення нейтралі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження підтверджують значну варіацію ємнісних параметрів мережі відносно землі. Сумарна ємність фаз відносно землі в реальних мережах 6–10–35 кВ залежить від конфігурації ліній, їхньої довжини, типу ізоляції та режиму експлуатації. Нормативні обмеження на максимальну ємність (зокрема для мереж 6 кВ – до 9,2 мкФ, 10 кВ – до 3,7 мкФ) використовують у моделях, але реальні значення коливаються в широкому діапазоні – від 0,01 мкФ до кількох мікрофарадів. Це безпосередньо впливає на величину ємнісного струму замикання та чутливість ненапрямлених і напрямлених захистів нульової послідовності [1-3].

Окремий напрям – вивчення активних провідностей фаз відносно землі та коефіцієнта тангенса кута діелектричних втрат ($tg\delta$). Публікації показують, що $tg\delta$ значно зростає в осінньо-весняний період через зволоження ізоляції, забруднення та старіння обладнання. Діапазон зміни $tg\delta$ від 0,02 (для сухої ізоляції) до значно вищих значень (до 3,5 і більше) із вологістю вважають реалістичним і таким, що відповідає співвідношенню опорів сухої та вологої ізоляції повітряних ліній електропередачі. Збільшення активної складової змінює коефіцієнт демпфування

мережі, впливає на фазові співвідношення струмів і напруг нульової послідовності та може призводити до помилок у роботі захистів, особливо з високим перехідним опором у місці замикання [4, 5].

У мережах із резистивним заземленням аналізують коефіцієнт, що характеризує режим роботи нейтралі, і комплексний показник, який враховує параметри заземлювального резистора. Ці фактори визначають співвідношення активної та реактивної складових струму замикання, рівень зміщення нейтралі та чутливість захисту. У резистивно-заземлених мережах правильне врахування цих параметрів дає змогу значно підвищити селективність порівняно з ізольованою нейтраллю, зменшити ризик дугових перенапруг і переходу ОЗЗ у багатофазне пошкодження [2, 6, 7].

Незважаючи на значний прогрес, більшість досліджень вказує на недостатню кількість систематизованих експериментальних даних про реальні діапазони варіації ємності, $tg\delta$ і параметри заземлення нейтралі саме для мереж 6–10–35 кВ з ізольованою та резистивно-заземленою нейтраллю в умовах сезонних змін і різного перехідного опору. Для точного визначення впливу цих параметрів на робочі сигнали струмових захистів від ОЗЗ необхідне встановлення обґрунтованих діапазонів їхньої зміни з урахуванням нормативних обмежень, сезонних факторів і конкретного режиму нейтралі [3, 4].

Проведений аналіз свідчить про високу актуальність теми та потребу в подальших дослідженнях, спрямованих на уточнення діапазонів варіації параметрів контуру нульової послідовності для підвищення надійності та селективності захисту розподільних мереж 6–10–35 кВ.

Визначення мети та задач дослідження. Метою роботи є встановлення діапазонів варіації параметрів контуру нульової послідовності в мережах 6–10–35 кВ з ізольованою та резистивно-заземленою нейтраллю та оцінювання

їхнього впливу на робочі сигнали струмових захистів від ОЗЗ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати відомі нормативні обмеження та експлуатаційні дані про сумарну ємність фаз мережі 6–10–35 кВ і встановити обґрунтований діапазон варіації ємності ($0,01 \leq C_{\Sigma} \leq 9,2$ мкФ).

2. Проаналізувати діапазон зміни активної провідності фаз відносно землі за допомогою тангенса кута діелектричних втрат ($tg\delta$) на основі результатів досліджень у розподільних мережах з урахуванням сезонних змін вологості ізоляції та прийняти діапазон $0,02 \leq tg\delta \leq 3,5$ як коефіцієнт демпфування мережі.

3. Дослідити вплив параметрів системи заземлення нейтралі на величини нульової послідовності, проаналізувавши два основні компоненти: коефіцієнт K_d , який характеризує режим роботи нейтралі.

4. Виконати математичний аналіз контуру нульової послідовності з урахуванням встановлених діапазонів варіації параметрів мережі та оцінити їхній вплив на робочі сигнали (струми та напруги нульової послідовності) струмових захистів від ОЗЗ за різних значень перехідного опору в місці замикання.

5. Розглянути можливі рекомендації щодо врахування варіації параметрів контуру нульової послідовності для розрахунку уставок і налаштування струмових захистів від ОЗЗ у мережах з ізольованою та резистивно-заземленою нейтраллю для підвищення їхньої чутливості та селективності.

Вирішення поставлених завдань допоможе кількісно оцінити межі зміни параметрів контуру нульової послідовності та їхній реальний вплив на роботу захисту, що є необхідною основою для підвищення надійності експлуатації розподільних мереж 6–10–35 кВ.

Основна частина дослідження. Для визначення впливу параметрів контуру нульової послідовності на робочі сигнали

струмових захистів від ОЗЗ, які застосовано в електричних мережах 6–10–35 кВ з ізольованою та резистивно-заземленою нейтраллю, необхідно встановити діапазони їхньої варіації. Максимальна ємність фаз мережі відносно землі може досягати в мережах напругою 6 кВ – 9,2 мкФ, 10 кВ – 3,7 мкФ, 35 кВ – 0,5 мкФ, виходячи з умови найбільшої значення струму металевого замикання на землю, за якого допускають роботу електричної мережі без компенсації струму замикання землі [2, 3]. На основі цих обмежень для загального випадку діапазон варіації сумарної ємності фаз мережі відносно землі становить $0,01 \leq C_{\Sigma} \leq 9,2$ мкФ [8-10].

Для обліку активних провідностей фаз ліній мережі відносно землі використовують тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ [11]. На основі досліджень, що проведені в розподільних мережах 6-10-35 кВ, встановлено, що тангенс кута діелектричних втрат мережі змінюється в межах від 0,02 до 3,5 [10]. Збільшення $\text{tg}\delta$ пов'язане зі зволоженням ізоляції ліній, особливо в осінньо-весняний період року. Отримані дані є цілком адекватними через те, що відношення

сухорозрядного опору до мокророзрядного становить приблизно 250 для ізоляторів повітряних ліній електропередач [1]. Отже, у подальших дослідженнях діапазон варіації коефіцієнта демпфування мережі прийемо $0,02 \leq \text{tg}\delta \leq 3,5$.

Вплив параметрів системи заземлення нейтралі на величини нульової послідовності визначають за допомогою двох компонентів: коефіцієнта d_N , що характеризує режим роботи нейтралі, і безрозмірного комплексного показника λ , що враховує параметри трансформатора заземлення нейтралі.

На рис. 1 подані схеми підключення заземлювального резистора в нейтраль електричної мережі [10-16]. За відсутності виведеної нейтралі на силовому трансформаторі виникає потреба штучного створення нейтральної точки розподільної мережі для підключення заземлювального резистора. Як трансформатори заземлення нейтралі (ТЗН) застосовують стандартні силові трансформатори зі схемою з'єднання обмоток зірка з нульовим проводом – трикутник (рис. 1, б).

Розрахункові параметри трансформаторів заземлення нейтралі подані в таблиці.

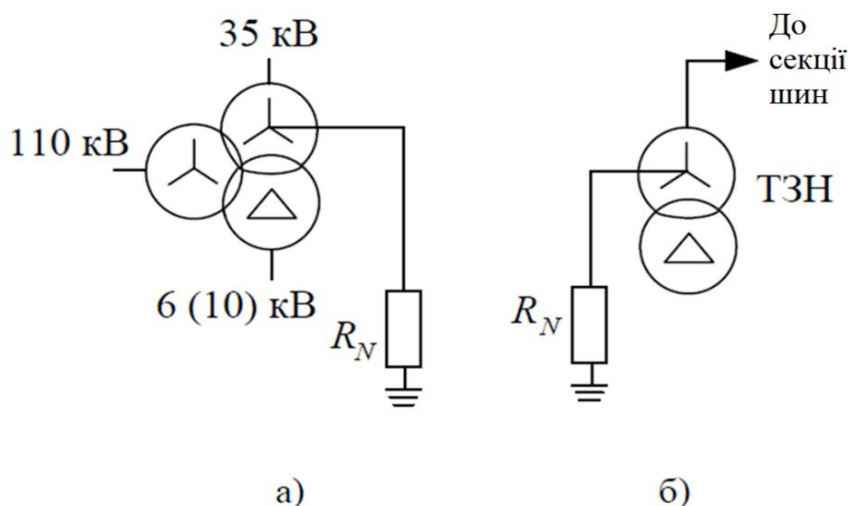


Рис. 1. Схеми підключення заземлювального резистора в нейтраль мережі: а – за допомогою виведеної нейтралі силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Y_0/Y_0 ; б – за допомогою трансформатора із схемою з'єднання обмоток Y_0/Δ

Розрахункові параметри трансформаторів заземлення нейтралі

Тип трансформатора	$I_{ном}, A$	$U_K, \%$	$P_{кз}, кВт$	$P_{хх}, кВт$	$I_{хх}, \%$	$R_m, Ом$	$X_m, Ом$	$Y_{\Sigma mp}, См$
ТМ-250/10	14,5	4,5	3,7	0,65	1,2	5,92	18,1	0,052
ТМ-400/10	38,5	5,9	5,9	0,92	1,9	1,23	4,1	0,234

З урахуванням таблиці безрозмірний комплексний показник λ , прийнявши R_N у

діапазоні 500-2000 Ом (високоомне заземлення нейтралі), визначають так:

- для ТМ-250/10

$$\lambda_{(R_N=500)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,146}{0,002 + 0,146} = 0,986;$$

$$\lambda_{(R_N=2000)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,146}{0,0005 + 0,146} = 0,996;$$

- ТМ-400/10

$$\lambda_{(R_N=500)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,234}{0,002 + 0,234} = 0,991;$$

$$\lambda_{(R_N=2000)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,234}{0,0005 + 0,234} = 0,997.$$

На основі отриманих виразів встановлено, що значення безрозмірного комплексного показника λ знаходиться в межах 0,986-0,997.

Коефіцієнт K_d дає змогу моделювати режим заземлення нейтралі, а також вибирати частку активного струму замикання на землю відносно ємнісного струму мережі. Наприклад, у мережі з ізольованою нейтраллю резистивно-заземленої мережі, вибираючи значення опору резистора в нейтралі за умови рівності сумарного ємнісного струму мережі $I_{C\Sigma}$ активному струму, що створений елементом заземлення нейтралі I_N ,

коефіцієнт $K_d = 0$. У ряді робіт для забезпечення надійного функціонування захисту від ОЗЗ рекомендовано вибирати величину опору резистора в нейтралі виходячи з умови $I_N = (2-4)I_{C\Sigma}$ [9-11], тобто відносна провідність елемента заземлення нейтралі становитиме $K_d = 2$ і $K_d = 4$ відповідно.

Значення перехідного опору в місці замикання на землю має імовірнісний характер і може змінюватися в межах від одиниць омів до кількох кілоомів. На рис. 2 наведено експериментальні дані, що характеризують взаємозв'язок кількості ОЗЗ і величини перехідного опору в місці

пошкодження в умовах ґрунту з високим питомим опором [9]. З рис. 2 видно, що найбільша кількість ОЗЗ відбувається через

перехідний опір, значення якого знаходиться в межах $1 \leq R_{\Pi} \leq 7 \cdot 10^3$ Ом.

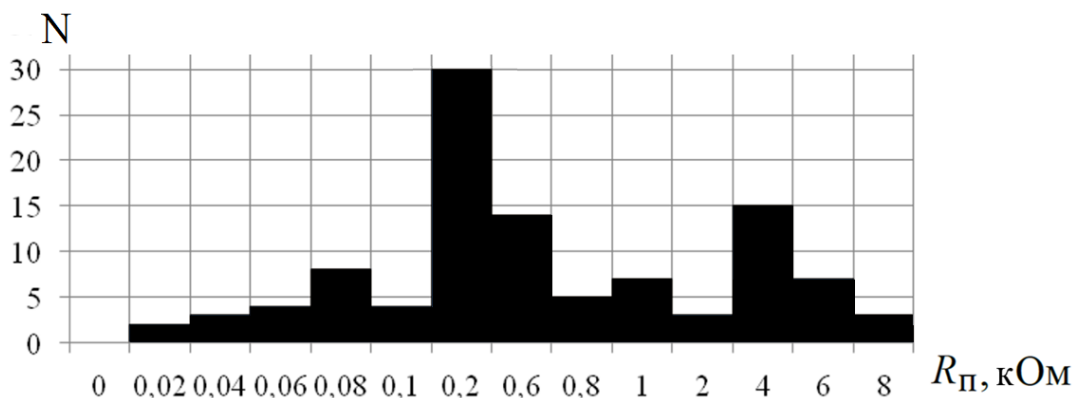


Рис. 2. Взаємозв'язок кількості ОЗЗ і величини перехідного опору в місці пошкодження електричної мережі 10 кВ

Результати дослідження імовірнісних значень перехідного опору в місці ушкодження отримані у джерелах [8, 9], де зазначено, що величина перехідного опору може досягати 7 кОм. У статті [10] зазначено, що його значення досягає 5 кОм і більше. Тому доцільно вибрати діапазон варіації перехідного опору в місці $1 \leq R_{\Pi} \leq 7$ кОм.

Взявши за базисну величину граничне значення з вибраних діапазонів варіації сумарної ємності мережі, тангенса кута діелектричних втрат, перехідного опору, отримаємо $0,01 \leq C_{\Sigma}^* \leq 1$; $0,006 \leq tg \delta^* \leq 1$; $0,00014 \leq R_{\Pi}^* \leq 1$ відповідно. Для нормального режиму роботи електричної мережі характерна наявність фазних напруг відносно землі.

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_N;$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_N; \quad (1)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_N.$$

Для визначення впливу параметрів контуру нульової послідовності на струм ОЗЗ, напругу нульової послідовності та напругу неушкоджених фаз мережі використовуємо такі вирази [5, 6]:

- струм замикання на землю

$$I_3 = \frac{U_{\phi} 3\omega C_{\Sigma} \sqrt{tg^2 \delta + \lambda^2 d_N^2 + 1}}{\sqrt{(tg \delta R_n 3\omega C_{\Sigma} + \lambda d_N R_n 3\omega C_{\Sigma} + 1)^2 + (R_n 3\omega C_{\Sigma})^2}}; \quad (2)$$

- напруга нульової послідовності мережі

$$U_0 = \frac{E_{\phi}}{\sqrt{(tg \delta R_n 3\omega C_{\Sigma} + \lambda d_N R_n 3\omega C_{\Sigma} + 1)^2 + (R_n 3\omega C_{\Sigma})^2}}; \quad (3)$$

- напруги неушкоджених фаз мережі

$$U_A^{(1)} = E_\phi \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{R_n 3\omega C_\phi (tg\delta + \lambda d_N) + 1}{[R_n 3\omega C_\phi (tg\delta + \lambda d_N) + 1]^2 + 1} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{tg\delta R_n 3\omega C_\phi}{\sqrt{[R_n 3\omega C_\phi (tg\delta + \lambda d_N) + 1]^2 + R_n 3\omega C_\phi}} \right)^2}; \quad (4)$$

$$U_B^{(1)} = E_\phi \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{R_n 3\omega C_\phi (tg\delta + \lambda d_N) + 1}{[R_n 3\omega C_\phi (tg\delta + \lambda d_N) + 1]^2 + 1} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{tg\delta R_n 3\omega C_\phi}{\sqrt{[R_n 3\omega C_\phi (tg\delta + \lambda d_N) + 1]^2 + R_n 3\omega C_\phi}} \right)^2}, \quad (5)$$

де $tg\delta = \frac{g_N}{\omega C_\Sigma}$ – тангенс кута діелектричних втрат;

$K_d = \frac{g_N}{3\omega C_\Sigma}$ – коефіцієнт, що враховує

вибір величини опору заземлювального резистора відносно ємнісного опору мережі.

На рис. 3 подані залежності напруги нульової послідовності мережі та напруг непошкоджених фаз від перехідного опору в місці ОЗЗ за різного значення коефіцієнта K_d .

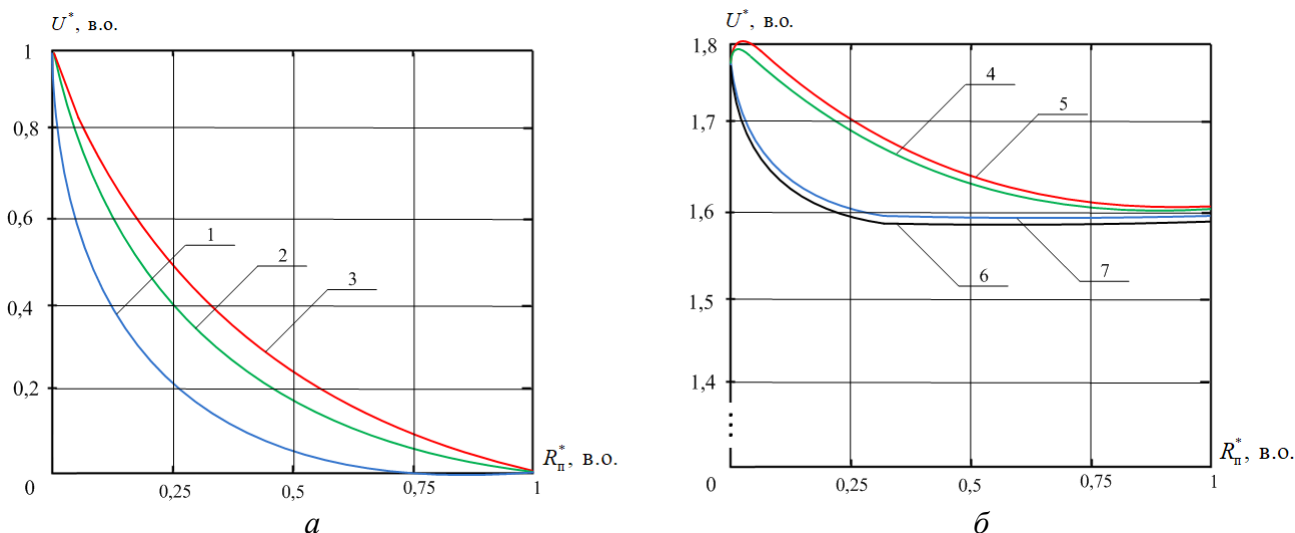


Рис. 3. Залежності напруги нульової послідовності та напруг непошкоджених фаз для ОЗЗ через перехідний опір мережі з ізолюваною та резистивно-заземленою нейтраллю за різної величини опору резистора в колі нейтралі: 1, 2, 3 – напруга нульової послідовності мережі; 4, 5 – напруга на фазі А; 6, 7 – напруга на фазі В

Із рис. 3 видно, що в режимі однофазного металевого замикання на

землю (фаза А) напруги неушкоджених фаз дорівнюють лінійним значенням і зі

збільшенням перехідного опору в місці ОЗЗ знижуються. Напряда нульової послідовності мережі зі збільшенням перехідного опору також знижується, значення за однієї й тієї самої величини перехідного опору в місці ОЗЗ у мережі з резистивно-заземленою нейтраллю буде менше порівняно з мережею із ізольованою нейтраллю.

На основі виразу (2) побудовані залежності струму замикання на землю від величини перехідного опору за різного вибору величини резистора в нейтралі мережі (рис. 3). Із рис. 4 випливає, що зі збільшенням перехідного опору в місці ОЗЗ струм замикання на землю знижується і, отже, знижуються і величини сигналів струмів нульової послідовності, контрольовані колами захисту від ОЗЗ у

пошкодженій і непошкоджених лініях, що є причиною низької селективності її дії за таких умов. Перехід від режиму ізольованої нейтралі до режиму заземлення через резистор дасть змогу підвищити значення струму замикання на землю за рахунок активної складової, обумовленої елементом заземлення нейтралі.

Із рис. 5, де подані залежності нульового струму послідовності від кута діелектричних втрат за різного перехідного опору в місці пошкодження, випливає, що в режимі металевого ОЗЗ підвищення $tg\delta^*$ призводить до пропорційного збільшення струму замикання на землю. Однак із збільшенням перехідного опору в місці ОЗЗ підвищення $tg\delta^*$ не впливає на значення струму замикання на землю.

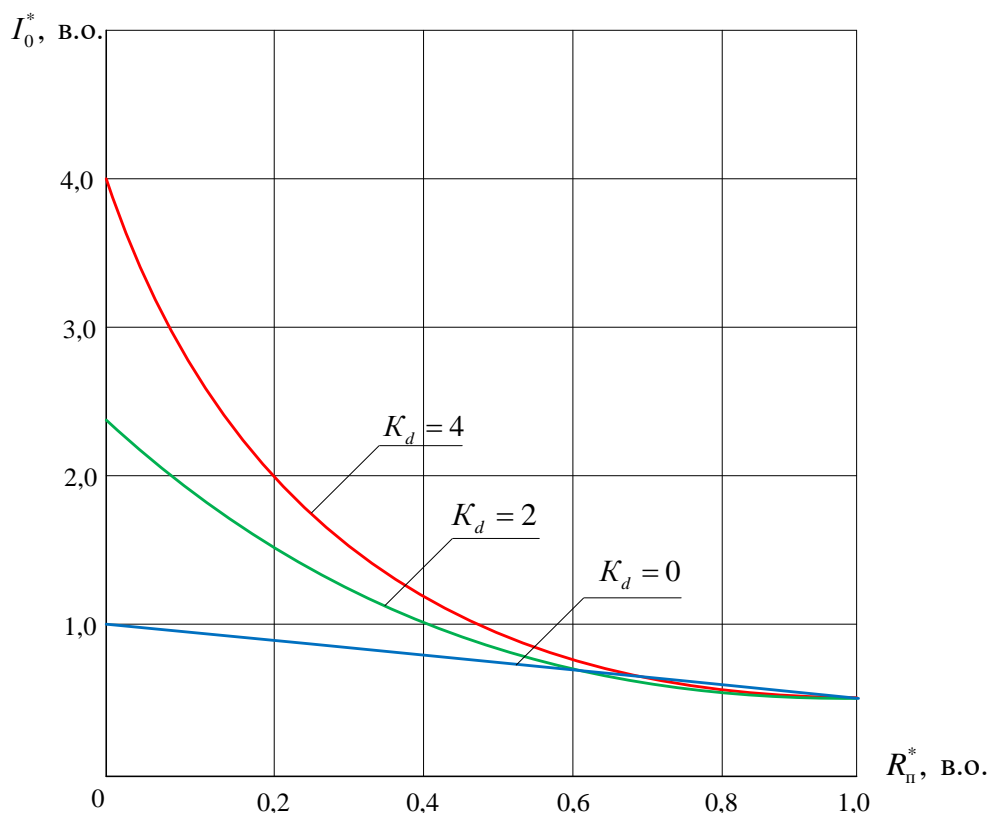


Рис. 4. Залежності струму замикання на землю від величини перехідного опору в місці ОЗЗ за різної відносної провідності кола нейтралі

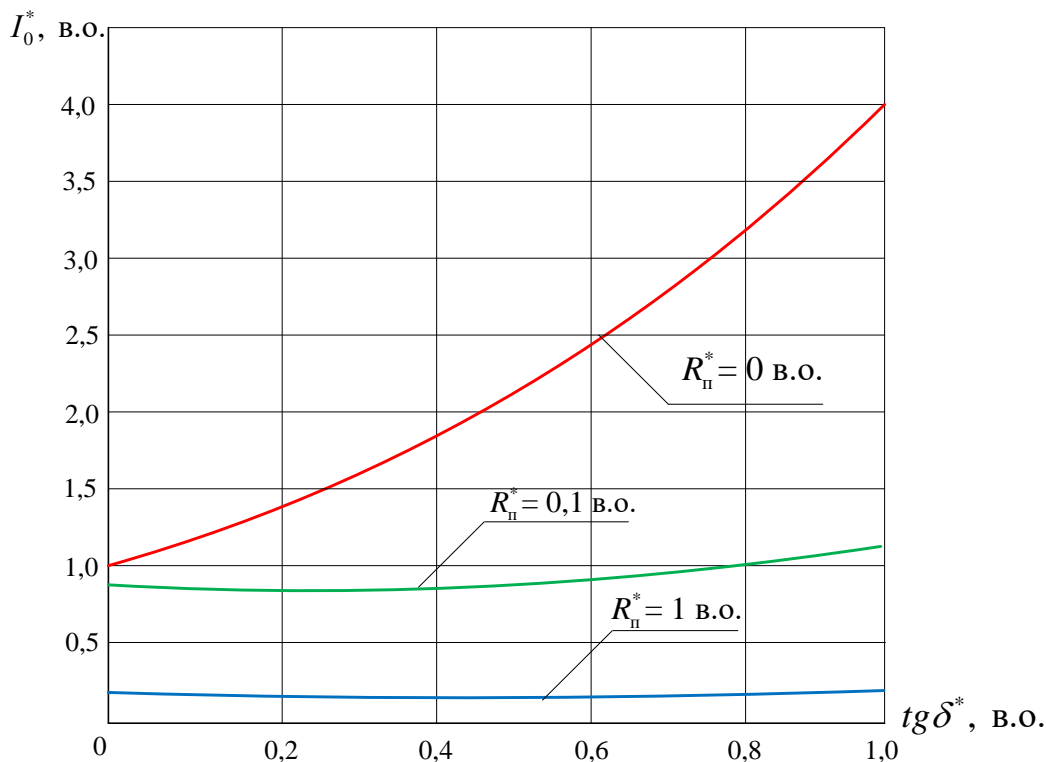


Рис. 5. Залежність струму нульової послідовності від кута діелектричних втрат за різного перехідного опору в місці пошкодження

Ступінь зниження величин нульової послідовності в умовах виникнення в електричній мережі ОЗЗ через перехідний опір порівняно з їхніми значеннями в

режимі металевого замикання характеризує коефіцієнт неповноти замикання на землю [10-16], який з урахуванням виразів (3) і (4) визначено за виразом

$$n = \frac{1}{\sqrt{\left[R_n 3\omega C_\Sigma (tg \delta + \lambda d_N) + 1 \right]^2 + (R_n 3\omega C_\Sigma)^2}} \quad (6)$$

На підставі виразу (6), прийнявши $tg \delta^* = 0,006$ (що відповідає значенню нормального стану ізоляції), отримано залежності коефіцієнта неповноти ОЗЗ від величини перехідного опору в місці пошкодження та сумарної ємності для мережі з ізолюваною нейтраллю (рис. 6).

Із рис. 6 і виразу (6) випливає, що значення коефіцієнта неповноти замикання змінюється в межах $0 \leq n \leq 1$ і зі

збільшенням перехідного опору в місці ОЗЗ знижуватиметься.

Зазначимо, що зі збільшенням параметрів контуру нульової послідовності, включаючи сумарну ємність мережі, тангенс кута діелектричних втрат, перехідний опір і коефіцієнт K_d , градієнт зниження коефіцієнта неповноти замикання має найбільше значення.

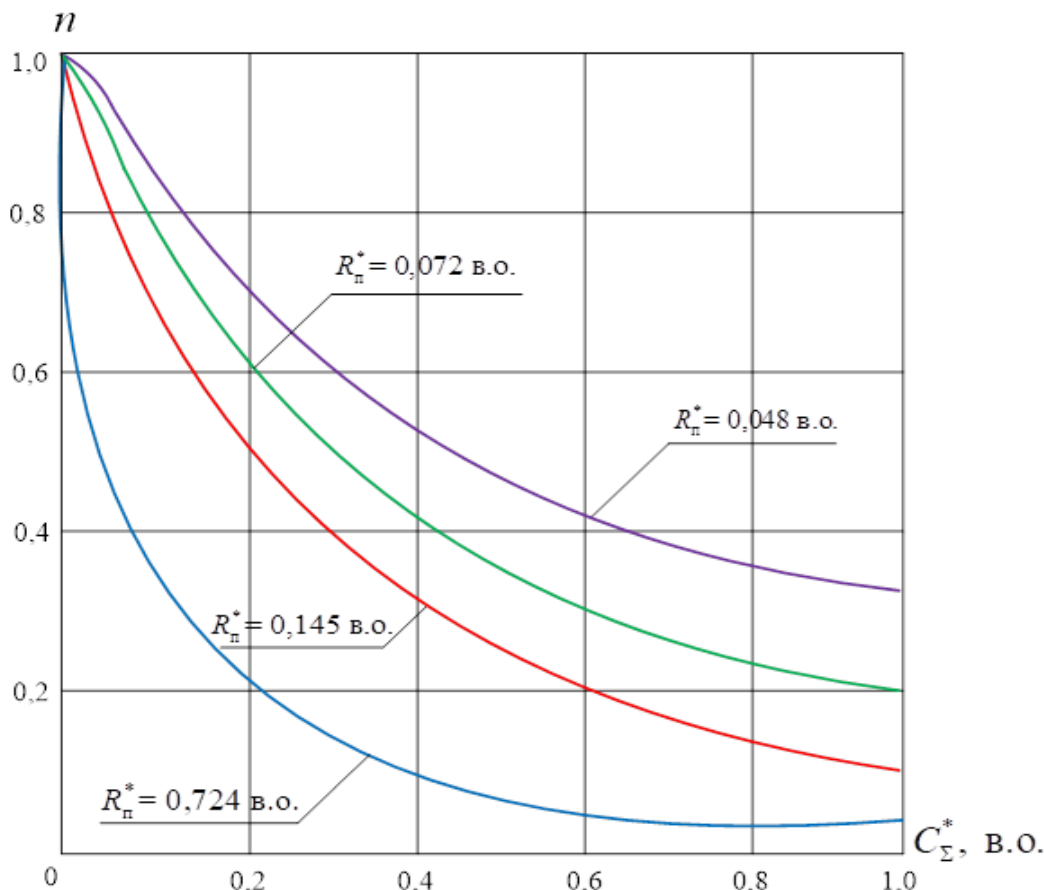


Рис. 6. Залежність коефіцієнта неповноти замикання від перехідного опору в місці ОЗЗ та сумарної ємності мережі з ізольованою нейтраллю

У дослідженні встановлено, що зниження струму та напруги нульової послідовності за однофазного замикання на землю через перехідний опір порівняно з режимом металевого ОЗЗ відбувається пропорційно коефіцієнту неповноти замикання на землю, значення якого залежить від параметрів контуру нульової послідовності, включаючи поперечні провідності фаз відносно землі, перехідний опір у місці пошкодження та параметри системи заземлення нейтралі. Це необхідно враховувати для вибору уставок на спрацювання струмових захистів від однофазних замикань на землю.

Висновки. Проведені дослідження варіації параметрів контуру нульової послідовності за однофазних замикань на землю в повітряних лініях електропередачі

розподільних мереж 6–10–35 кВ з ізольованою та резистивно-заземленою нейтраллю дають змогу встановити важливі закономірності, що впливають на роботу струмових захистів від ОЗЗ.

Встановлено, що зі збільшенням параметрів контуру нульової послідовності, а саме сумарної ємності мережі відносно землі (C_{Σ}), тангенса кута діелектричних втрат ($tg\delta$), перехідного опору в місці замикання та коефіцієнта K_d , градієнт зниження коефіцієнта неповноти замикання має найбільше значення. Зниження струму та напруги нульової послідовності за однофазного замикання на землю через перехідний опір порівняно з режимом металевого ОЗЗ відбувається пропорційно коефіцієнту неповноти замикання на землю. Отримані результати свідчать про значну

варіативність параметрів контуру нульової послідовності в реальних умовах експлуатації. Діапазон зміни сумарної ємності фаз відносно землі становить $0,01 \leq C_{\Sigma} \leq 9,2$ мкФ, а тангенс кута діелектричних втрат $0,02 \leq \operatorname{tg} \delta \leq 3,5$. Ці межі необхідно обов'язково враховувати для розрахунку уставок струмових захистів від ОЗЗ, оскільки це може призвести як до втрати чутливості захисту за високих значень перехідного опору, так і його надмірної чутливості та хибних спрацювань за нормальних режимів.

У мережах із резистивно-заземленою нейтраллю правильний вибір коефіцієнта,

який враховує вибір величини опору заземлювального резистора відносно ємнісного опору мережі (K_d) і параметрів заземлювального резистора дає змогу суттєво стабілізувати сигнали нульової послідовності та підвищити селективність захисту порівняно з мережами з ізольованою нейтраллю. Подальші дослідження заплановано спрямувати на експериментальну верифікацію отриманих діапазонів варіації в умовах реальних мереж і розроблення алгоритмів адаптивного захисту, що автоматично враховують поточні значення параметрів контуру нульової послідовності.

Список використаних джерел

1. Серeda, О. Г. (2004). Ефективне використання незалежних розчеплювачів струмообмежувальних автоматичних вимикачів. *Електротехніка і електромеханіка*, 3, 56-60. URL: <https://eie.khpi.edu.ua/issue/view/14768/8041>
2. *Правила улаштування електроустановок*. (2017). Офіційне видання. Міненерговугілля України. 617. URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>
3. *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів*. (2012). Затверджені наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 13.02.2012 № 91, 145. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0350-12#n11>
4. Серeda, О. Г. (2021). Теоретичні основи розвитку цифрових технологій в системах автоматизації, діагностики, контролю та захисту електротехнічних комплексів. *Націон. техн. ун-т «ХПІ»*, 320. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/3171d13f-1f4c-4c92-b0b0-5fba3f5e6450>
5. Семененко, Ю. О., Серeda, О. Г., Серeda, О. Г., Семененко, О. Д. (2025). Аналіз причин неселективної дії захисту електромереж середньої напруги при однофазних замиканнях на землю. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 9(212), 17–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.09.02>
6. Семененко, Ю. О., Серeda, О. Г., Семененко, О. І., Серeda, О. Г., Семененко, О. Д. (2025). Аналіз причин пошкодження повітряних ліній електропередачі в електромережах середньої напруги. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 11(214), 17-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.11.02>
7. Серeda, О. Г. (2005). Здатність металокерамічних контактів струмообмежувальних автоматичних вимикачів комутувати граничні струми короткого замикання. *Електротехніка і електромеханіка*, 3, 45-47. URL: <https://eie.khpi.edu.ua/issue/view/6519/2472>
8. *СОУ-Н ЕЕ 35.514:2007*. (2007). *Технічне обслуговування мікропроцесорних пристроїв, релейного захисту, протиаварійної автоматики, електроавтоматики, дистанційного керування та сигналізації від 0,4 кВ до 750 кВ*. Правила. Видання офіційне. Міністерство палива та енергетики України. URL: <https://uniti.ua/images/products/ertif/SOU.pdf>
9. Jetpissov, M. et al. (2025). A Selective Method for Identifying Single-Phase Ground Faults with Transient Resistance in Isolated Neutral Medium-Voltage Networks. *Energies*, 18(21), 5699. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18215699>

10. Abbas, A.K., Hamad, S., & Hamad, N. (2021). Singleline to ground fault detection and location in medium voltage distribution system based on neural network. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 23, 621-632. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632>
11. Chen, J. (2015). Fault Section Identification for Power Distribution Systems Using Online Measurements. Master's Thesis, *Department Electrical and Computer Engineering, University of Kentucky, USA*, 65. URL: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=ece_etds&httpsredir=1&referer=
12. Filomena, A. D., Resener, M., Salim, R. H., & Bretas, A. S. (2011). Distribution systems fault analysis considering fault resistance estimation. *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.*, 33, 7, 1326-1335. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.010>
13. Liao, Yuan. (2011). Generalized fault location methods for overhead electric distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(1), 53-64. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108031>
14. Goh, H. H. et al. (2017). Transmission line fault detection: A review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS)*, 8(1), 199-205. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v8.i1.pp199-205>
15. Baldwin, T., Kelle, D., Cordova, J., & Beneby, N. (2014). Fault locating in distribution networks with the aid of advanced metering infrastructure. In *Proceedings of the 2014 Clemson University Power Systems Conference, Clemson, SC, USA*, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/PSC.2014.6808108>
16. Saha, M. M., Izykowski, J. J., & Rosolowski, E. (2009). Fault location on power networks, *Berlin, Germany: Springer Science & Business Media*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-886-5>

References

1. Sereda, O. H. (2004). Efektyvne vykorystannia nezaleznykh rozcheplivuvachiv strumoobmezhuvalnykh avtomatychnykh vymykachiv [Effective use of independent trip units of current-limiting circuit breakers]. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 3, 56-60. Retrieved from: <https://eie.khpi.edu.ua/issue/view/14768/8041> [in Ukrainian].
2. *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok* (2017). [Rules for the arrangement of electrical installations]. Official publication. Minenerhovuhillia Ukrainy, 617. Retrieved from: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> [in Ukrainian].
3. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv* (2012). [Rules for the technical operation of electrical installations of consumers]. Approved by Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine dated 13.02.2012 No. 91, 145. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0350-12#n11> [in Ukrainian].
4. Sereda, O. H. (2021). Teoretychni osnovy rozvytku tsyfrovyykh tekhnolohii v systemakh avtomatyzatsii, diahnostryky, kontroliu ta zakhystu elektrotekhnichnykh kompleksiv [Theoretical foundations of the development of digital technologies in automation, diagnostics, control and protection systems of electrical complexes]. *National Technical University «KhPI»*, 320. Retrieved from: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/3171d13f-1f4c-4c92-b0b0-5fba3f5e6450> [in Ukrainian].
5. Semenenko, Yu. O., Sereda, Oleksandr H., Sereda, Olena H., & Semenenko, O. D. (2025). Analiz prychn neselektyvnoi dii zakhystu elektromerezh serednoi napruhy pry odnofaznykh zamykanniakh na zemliu [Analysis of the causes of non-selective action of protection of medium voltage electrical networks during single-phase ground faults]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 9(212), 17-27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.09.02> [in Ukrainian].

6. Semenenko, Yu. O., Sereda, Oleksandr H., Semenenko, O. I., Sereda, Olena H., & Semenenko, O. D. (2025). Analiz prychnyn poshkodzhennia povitrianykh liniy elektroperedachi v elektromerezhakh serednoi napruhy [Analysis of the causes of damage to overhead power lines in medium voltage power networks]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 11(214), 17-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.11.02> [in Ukrainian].
7. Sereda, O. H. (2005). Zdatnist` metalokeramichnykh kontaktiv strumoobmezhuvalnykh avtomatychnykh vymykachiv komutuvaty hranychni strumy korotkoho zamykannia [The ability of cermet contacts of current-limiting circuit breakers to switch limiting short-circuit currents]. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 3, 45-47. Retrieved from: <https://eie.khpi.edu.ua/issue/view/6519/2472> [in Ukrainian].
8. *SOU-N EE 35.514:2007. Tekhnichne obsluhovuvannia mikroprotsesornykh prystroiv, releinoho zakhystu, protyavariinoi avtomatyky, elektroavtomatyky, dystantsiinoho keruvannia ta syhnalizatsii vid 0,4 kV do 750 kV (2007)*. [Maintenance of microprocessor devices, relay protection, emergency automation, electrical automation, remote control and signaling from 0.4 kV to 750 kV]. Rules. Official publication. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Retrieved from: <https://uniti.ua/images/products/sertif/SOU.pdf> [in Ukrainian].
9. Jetpissov, M. et al. (2025). A Selective Method for Identifying Single-Phase Ground Faults with Transient Resistance in Isolated Neutral Medium-Voltage Networks. *Energies*, 18(21), 5699. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18215699> [in English].
10. Abbas, A.K.; Hamad, S.; & Hamad, N. (2021). Singleline to ground fault detection and location in medium voltage distribution system based on neural network. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 23, 621-632. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632> [in English].
11. Chen, J. (2015). Fault Section Identification for Power Distribution Systems Using Online Measurements. *Master's Thesis, Department Electrical and Computer Engineering, University of Kentucky, USA*. 65. Retrieved from: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=ece_etds&httpsredir=1&referer= [in English].
12. Filomena, A. D., Resener, M., Salim, R. H., & Bretas, A. S. (2011). Distribution systems fault analysis considering fault resistance estimation. *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.*, 33(7), 1326-1335. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.010> [in English].
13. Liao, Yuan. (2011). Generalized fault location methods for overhead electric distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(1), 53-64. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.epwr.2011.08.031> [in English].
14. Goh, H. H. et al. (2017). Transmission line fault detection: A review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS)*, vol. 8, 1, 199-205. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v8.i1.pp199-205> [in English].
15. Baldwin, T., Kelle, D., Cordova, J., & Benez, N. (2014). Fault locating in distribution networks with the aid of advanced metering infrastructure. *In Proceedings of the 2014 Clemson University Power Systems Conference, Clemson, SC, USA*, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/PSC.2014.6808108> [in English].
16. Saha, M. M., Izykowski, J. J., & Rosolowski, E. (2009). Fault location on power networks, *Berlin, Germany: Springer Science & Business Media*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-886-5> [in English].

Семененко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-9422-3528. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua.

Серета Олександр Григорійович, доктор технічних наук, професор кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0003-5243-3828. E-mail: oleksandr.sereda@khpi.edu.ua.

Семененко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8885-6783. E-mail: semenoi@i.ua.

Semenenko Yurii, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-9422-3528. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua.

Sereda Oleksandr, Doctor of Science, Professor of the Department of Electrical Appliances, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0009-0003-5243-3828. E-mail: oleksandr.sereda@khpi.edu.ua.

Semenenko Oleksandr, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8885-6783. E-mail: semenoi@i.ua.

Дата надходження статті 07.04.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY