

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ СЕЛЕКТИВНОСТІ ПРИСТРОЇВ
ЗАХИСТУ ВІД ВЕЛИЧИНИ СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ В
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ ДО 1000 В**

І. П. Радько, кандидат технічних наук, доцент

В. А. Наливайко, кандидат технічних наук, доцент

О. В. Окушко, кандидат технічних наук, доцент

І. М. Болбот, доктор технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: nva041@ukr.net

Анотація. Відповідно до ПУЕ-2017 кожна групова лінія повинна мати захист від коротких замикань. Миттєве відключення (відсічку) лінії при виникненні коротких замикань забезпечує електромагнітний розчіплювач автоматичного вимикача. Надійне вимикання при цьому можливе, якщо струм однофазного короткого замикання буде більшим струму миттєвого спрацювання. Нині на ринку широко представлені автоматичні вимикачі з характеристиками «В», «С» та «D», які характеризуються різними кратностями струму відсічки електромагнітного розчіплювача.. Деякі європейські фірми випускають автоматичні вимикачі з іншими характеристиками, що значно розширює можливості створення повноцінної та надійної системи захисту електрообладнання. Складність в організації селективності захисту полягає в тому, що автоматичні вимикачі модульного виконання при вимиканні коротких замикань характеризуються однаковим часом вимикання (не більше 0,05 с).

Метою досліджень є пошук шляхів організації селективності захисту в електричних мережах напругою до 1000 В, використовуючи достовірні значення струмів коротких замикань.

У мережах напругою до 1000 В струм однофазного короткого замикання можна достатньо точно розрахувати, якщо відомі точні значення всіх ділянок електричної мережі. На практиці отримати достовірні дані про чисельні характеристики мережі 0,4 кВ, до яких приєднується новий енергетичний об'єкт, не завжди можливо. Тому пропонується частину мережі розглядати як активний чотириполюсник, характеристики якого отримані шляхом вимірювання в точці приєднання. Для подальших розрахунків необхідно знати напругу на затискачах чотириполюсника та внутрішній повний опір.

На основі теорії чотириполюсників можна отримати вихідні дані для розрахунків, при цьому не розраховуючи внутрішні параметри чотириполюсників. Таким чином пропонується використовувати гібридну методiku оцінювання величини ймовірних струмів короткого замикання в електричних мережах напругою до 1000 В при проектуванні нових енергетичних об'єктів. Достовірні значення

струмів короткого замикання дадуть змогу організувати селективний захист електричних мереж.

Ключові слова: *електричний апарат, струм короткого замикання, електричні мережі*

Актуальність. Обґрунтування параметрів пристроїв захисту від коротких змикань в електричних мережах напругою до 1000 В залежить від достовірних значень струмів однофазних та трифазних коротких замикань. При виборі апаратів захисту необхідно також забезпечувати селективність захисту. Автоматичні вимикачі з номінальним струмом до 300 А, як апарати які найчастіше використовуються для влаштування захисту від коротких замикань, відзначаються однаковим часом вимикання (0,05 с), оскільки не мають регульованої затримки часу вимикання. На практиці це призводить до того, що спрацьовує не тільки найближчий до місця короткого замикання автоматичний вимикач, але і декілька інших апаратів в цій лінії. Це призводить до порушення роботи технологічного обладнання. Селективності в таких мережах можна досягти за рахунок правильного підбору уставок автоматичних вимикачів різних рівнів при визначенні точних значень струмів коротких замикань. Складність розрахунків полягає в тому, що не завжди є достовірні дані про характеристики мережі, до якої має бути приєднаний новий енергетичний об'єкт.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині на ринку широко представлені автоматичні вимикачі з характеристиками «В», «С» та «D». Автоматичні вимикачі з характеристикою «В», які мають нерегульовану кратність відсічки $(3-5)I_{ном}$, призначені для захисту електричних освітлювальних мереж, в яких відсутні електродвигуни або інші споживачі, які мають значні пускові струми. Вимикачі цієї серії не можна встановлювати в лінії з асинхронними електродвигунами, оскільки в них пускові струми в 6-8 разів більші за номінальні. Автоматичні вимикачі з характеристикою «С» використовуються для захисту мереж та обладнання з електродвигунами. Для електричних мереж, які містять електроприводи з великими інерційними масами та характеризуються затяжним пуском, промисловість випускає автоматичні вимикачі з характеристикою «D» (кратність відсічки $(10-20)I_{ном}$). Деякі європейські фірми випускають автоматичні

вимикачі з іншими характеристиками, що значно розширює можливості створення повноцінної та надійної системи захисту електрообладнання (табл. 1).

Складність в розробці селективності захисту полягає в тому, що автоматичні вимикачі модульного виконання при вимиканні коротких замикань характеризуються однаковий часом вимикання (не більше 0,05 с).

1. Порівняльні характеристики автоматичних вимикачів

Характеристика електромагнітного розчіплювача	Z	B	C	K	D
Кратність відсічки	2-3	3-5	7-10	10-15	10-20
Сфера застосування	Мережі з електронними пристроями	Освітлювальні мережі	Промислові мережі з електродвигунами	Промислові мережі з електродвигунами	Мережі з електроприводом із затяжним пуском

Метою дослідження є пошук шляхів організації селективності захисту в електричних мережах напругою до 1000 В, використовуючи достовірні значення струмів коротких замикань.

Матеріали і методи дослідження. Під час досліджень застосовувались методи математичної статистики та теорії ймовірностей.

Відповідно до ПУЕ-2017 кожна групова лінія повинна мати захист від коротких замикань [3]. Миттєве відключення (відсічку) лінії при виникненні коротких замикань забезпечує електромагнітний розчіплювач автоматичного вимикача. Надійне вимикання при цьому можливе, якщо струм однофазного короткого замикання буде не нижчим уставки струму миттєвого спрацювання, помноженої на коефіцієнт, що враховує розпад (за заводськими даними) і на коефіцієнт запасу 1,1.

При захисті кіл автоматичними вимикачами, які мають лише електромагнітний розчіплювач, є необхідним виконання такої умови [4]

$$I_{k1} \geq k_3 \cdot k_p \cdot I_{\text{від}} \quad (1)$$

де I_{k1} – струм однофазного короткого замикання, А; k_3 – коефіцієнт запасу, $k_3 = 1,1$; k_p – коефіцієнт розкиду струму спрацювання відсічки, для автоматів з $I_n \leq 100\text{А}$ – $k_p = 1,4$, з $I_n \geq 100\text{А}$ – $k_p = 1,25$; $I_{\text{від}}$ – мінімальне значення струму миттєвого спрацювання електромагнітного розчіплювача автоматичного вимикача, А.

У мережах напругою до 1000 В струм однофазного короткого замикання можна достатньо точно розрахувати, якщо відомі точні значення всіх ділянок електричної мережі. На практиці отримати достовірні дані про чисельні характеристики мережі 0,4 кВ, до яких приєднується новий енергетичний об'єкт, не завжди можливо. Тому пропонується частину мережі 0,4 кВ розглядати як активний чотириполіусник (рисунок). Для подальших розрахунків необхідно знати напругу на затискачах чотириполіусника та внутрішній повний опір.

На основі теорії чотириполіусників можна отримати вихідні дані для розрахунків, при цьому не розраховуючи внутрішні параметри чотириполіусників.

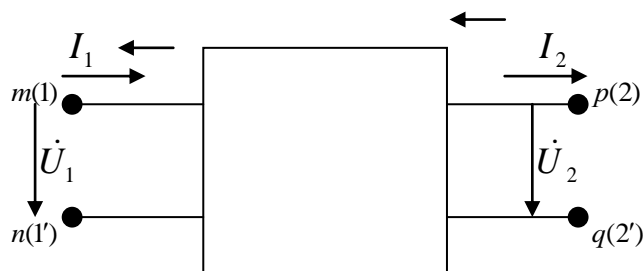


Рис. 1. Схема чотириполіусника

У загальному випадку чотириполіусники описуються системою рівнянь [6]. Для подальших розрахунків необхідно визначити параметри режиму холостого ходу та короткого замикання:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_g &= \underline{A} \cdot \bar{U}_2 + \underline{B} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{I}_n &= \underline{C} \cdot \dot{U}_2 + \underline{D} \cdot \dot{I}_2 \end{aligned} \right\}$$

Для режиму холостого ходу струм $\dot{I}_2 = 0$. Розділивши перше рівняння чотириполіусника на друге при $\dot{I}_2 = 0$, отримаємо значення повного опору холостого ходу:

$$\underline{Z}_{xx} = \frac{\dot{U}_{xx}}{\dot{I}_{xx}} = \frac{\underline{A} \cdot \dot{U}_{xx2}}{\underline{C} \cdot \dot{U}_{xx2}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}, \text{ Ом.} \quad (2)$$

У режимі короткозамкнених полюсів $p - q$ напруга $\dot{U}_2 = 0$. Розділивши аналогічно перше рівняння системи на друге (при $\dot{U}_2 = 0$), отримуємо опір короткого замикання в прямому напрямку:

$$\underline{Z}_{1\text{кк}} = \frac{\dot{U}_{1\text{кк}}}{\dot{I}_{1\text{кз}}} = \frac{\underline{B} \cdot \underline{I}_{2\text{кз}}}{\underline{D} \cdot \underline{I}_{2\text{кз}}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}, \text{ Ом.} \quad (3)$$

При зворотному підключенні джерела живлення до затискачів $p - q$ чотириполюсника напрямки струмів змінюється на протилежні I_1' та I_2' комплексні коефіцієнти \underline{A} і \underline{D} поміняються місцями, а система рівнянь за формою А перетвориться в систему рівнянь за формою В, в якій коефіцієнт \underline{A} і \underline{D} помінялись місцями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_2 &= \underline{D} \cdot \dot{U}_g + \underline{B} \cdot \dot{I}_n' \\ \dot{I}_n' &= \underline{C} \cdot \dot{U}_g + \underline{A} \cdot \dot{I}_n' \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Тоді, поділивши перше рівняння системи на друге в режимах холостого ходу (при $\dot{I}_{\text{хх}}' = 0$) та короткого замикання (при $\dot{U}_{\text{хх}2} = 0$), отримаємо опори холостого ходу та короткого замикання при зворотному підключенні:

$$\underline{Z}_{\text{хх}2} = \frac{\dot{U}_{\text{хх}2}}{\dot{I}_{\text{хх}2}'} = \frac{\underline{D} \cdot \dot{U}_{\text{хх}}}{\underline{C} \cdot \dot{U}_{\text{хх}}} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}, \text{ Ом;} \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{2\text{кк}} = \frac{\dot{U}_{2\text{кк}}}{\dot{I}_{2\text{кз}}} = \frac{\underline{B} \cdot \underline{I}_{\text{нкз}}}{\underline{A} \cdot \underline{I}_{\text{нкз}}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}}, \text{ Ом.} \quad (6)$$

Отримані залежності опорів холостого ходу і короткого замикання чотириполюсника в прямому і зворотному напрямках від комплексних коефіцієнтів \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} дають можливість визначити залежності кожного із комплексних коефіцієнтів від цих опорів так.

$$\frac{\underline{Z}_{1\text{кк}}}{\underline{Z}_{\text{хх}}} = \frac{\frac{\underline{B}}{\underline{D}}}{\frac{\underline{A}}{\underline{C}}} = \frac{\underline{B} \cdot \underline{C}}{\underline{A} \cdot \underline{D}}; \quad (7)$$

$$\frac{\underline{Z}_{2\text{кк}}}{\underline{Z}_{1\text{кк}}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}} = \frac{\underline{B} \cdot \underline{D}}{\underline{B} \cdot \underline{A}} = \frac{\underline{D}}{\underline{A}} \quad (8)$$

Поділивши рівняння (7) на $\underline{A} \cdot \underline{D}$ та враховуючи співвідношення (7), отримаємо такий вираз:

$$\frac{\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C}}{\underline{A} \cdot \underline{D}} = \frac{1}{\underline{A} \cdot \underline{D}} = 1 - \frac{\underline{B} \cdot \underline{C}}{\underline{A} \cdot \underline{D}} = 1 - \frac{\underline{Z}_{1\text{кз}}}{\underline{Z}_{\text{xx}}} = \frac{\underline{Z}_{\text{xx}} - \underline{Z}_{1\text{кз}}}{\underline{Z}_{\text{xx}}} \quad (9)$$

Перемноживши вирази (7) і (8), визначаємо комплексний коефіцієнт \underline{A} :

$$\frac{\underline{Z}_{2\text{кк}}}{\underline{Z}_{1\text{кк}}} \cdot \frac{(\underline{Z}_{\text{xx}} - \underline{Z}_{1\text{кз}})}{\underline{Z}_{\text{xx}}} = \frac{1}{\underline{A} \cdot \underline{D}} \cdot \frac{\underline{D}}{\underline{A}} = \frac{1}{\underline{A}^2} \quad (10)$$

звідки отримаємо:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{\text{xx}} \cdot \underline{Z}_{1\text{кз}}}{\underline{Z}_{2\text{кк}} (\underline{Z}_{\text{xx}} - \underline{Z}_{1\text{кз}})}} \quad (11)$$

Використовуючи рівняння 1-5, визначаються комплексні коефіцієнти \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} .

Із рівняння (5) визначається коефіцієнт \underline{B} :

$$\underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2\text{кз}}, \text{ Ом.} \quad (12)$$

Із рівняння (1) отримуємо коефіцієнт \underline{C} :

$$\underline{B} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{2\text{xx}}}, \text{ См.} \quad (13)$$

Із рівнянь (2) і (5) визначається коефіцієнт \underline{D} :

$$\underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1\text{кз}}} = \underline{C} \cdot \underline{Z}_{\text{xx2}} = \underline{A} \cdot \frac{\underline{Z}_{2\text{кз}}}{\underline{Z}_{1\text{кз}}} = \underline{A} \cdot \frac{\underline{Z}_{\text{xx2}}}{\underline{Z}_{\text{xx}}} \quad (14)$$

Таким чином, комплексні коефіцієнти чотириполосника визначаються залежно від опорів холостого ходу і короткого замикання в прямому та зворотному напрямках системою таких рівнянь.

Для симетричних чотириполосників, де $\underline{A} = \underline{D}$, а $\underline{Z}_{1\text{кз}} = \underline{Z}_{2\text{кз}}$, ці рівняння перетворюють до такого вигляду:

$$\underline{A} = \underline{D} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{\text{xx}}}{\underline{Z}_{\text{xx}} - \underline{Z}_{1\text{кз}}}} \quad (15)$$

$$\underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2кз}, \text{ Ом}; \quad (16)$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{xx}}, \text{ См.} \quad (17)$$

Ці характеристики можна отримати при експериментальному вимірювання струмів однофазного короткого замикання.

Нині ряд підприємств в Україні та в інших країнах розробляють і виготовляють прилади для визначення ймовірного струму короткого замикання і повного опору кола «фаза-нуль». Звичайно, що ці прилади відрізняються між собою, оскільки базуються на різних методах оцінювання ймовірних струмів короткого замикання. Найбільш важливими з точки зору споживчими якостями цього ряду пристроїв є можливість вимірювань струму наближеного до реального режиму короткого замикання. Тобто під час вимірювань у колі «фаза-нуль» повинен протікати струм, яким він буде під час короткого замикання або величина струму під час вимірювань повинна бути максимально наближена до реального струму короткого замикання. Важливість цієї вимоги визначається тим, що опір кола «фаза-нуль» може мати нелінійний характер від величини протікаючого цим колом струму.

Серед приладів особливо вирізняється вимірювач параметрів кола «фаза-нуль» ЦК 0220, який призначений для вимірювання струму однофазного короткого замикання, повного електричного опору і напруги кола «фаза-нуль» у мережах змінного струму напругою 380/220 В частотою 50 Гц з глухозаземленою нейтраллю. Він визначає активну і реактивну складові повного електричного опору кола «фаза-нуль», кут зсуву фаз між напругою і струмом як додаткові інформаційні параметри [8].

Вимірювання проводиться в два такти:

- під час першого такту визначається кут зсуву фаз між струмом і напругою;
- під час другого такту вимірюється падіння напруги на шунті вимірювача, яке пропорційне струму однофазного короткого замикання

Вбудований мікроконтролер приладу керує його роботою, здійснює обробку отриманих результатів вимірювань і забезпечує виведення інформації на рідкокристалічний дисплей.

Можливість визначення не тільки ймовірного струму однофазного короткого замикання, але і повного опору кола «фаза-нуль» та кута зсуву фаз робить вимірювальний прилад ЦК 0220 незамінним при проведенні наукових досліджень режимів роботи низьковольтних електричних мереж при коротких замиканнях.

Струм однофазного короткого замикання визначається за такою формулою:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_{m.\kappa}}{3} + z_n}, \quad (18)$$

де $z_{т.к}$ – повний опір трансформатора струмові замикання на корпус, Ом; z_n – опір петлі фазний провід - нульовий провід, Ом.

Опір петлі фазний провід - нульовий провід:

$$z_n = \sqrt{(\sum R_n)^2 + (\sum X_n)^2}, \quad (19)$$

де $\sum R_n$ - сума активних опорів окремих елементів петлі, Ом; $\sum X_n$ - сума реактивних опорів окремих елементів петлі, Ом;

У нашому випадку:

$$\sum R_n = R_{\phi} + R_n + R_{\text{конт}}, \quad (20)$$

$$\sum X_n = 2 \cdot x'_{\phi.n} - x'_{\phi.\phi} - x'_{n.n} + x''_{\phi} + x''_n, \quad (21)$$

де R_{ϕ} , R_n – відповідно активні опори фазного та нульового проводів (для даного випадку $R_{\phi} = R_n$), Ом; $R_{\text{конт}}$ – активний опір контактів, (табл. 2); $x'_{\phi.n}$ – зовнішній опір одиночного проводу, обумовлений взаємоіндукцією між фазним і нульовим проводами, Ом; $x'_{\phi.\phi}$, $x'_{n.n}$ – зовнішні індуктивні опори самоіндукції, які залежать від геометричних розмірів фазного і нульового проводів (для даного випадку $x'_{\phi.\phi}$, $x'_{n.n} = 0$ Ом); x''_{ϕ} і x''_n - внутрішні індуктивні опори, які залежать від ступеня проявлення поверхневого ефекту в металі, Ом.

Характеристики ліній наводяться в довідковій літературі. Перехідний опір контактів залежить від номінального струму комутаційного апарату та його виробника. Оскільки ці дані не наводяться в технічній документації, то нами були визначені ці значення експериментально.

Визначення величини ймовірного струму короткого замикання дозволяє зробити правильний вибір провідників, плавких запобіжників та апаратів захисту у випадку аварійної ситуації.

2. Значення опору постійному струму полюса автоматичних вимикачів різних виробників

Автоматичні вимикачі	Перехідний опір (мОм) при номінальному струмі, А							
	10	16	25	32	40	50	63	100
АСКО	15,4	10,5	5,7	4,8	3,9	3,5	2,8	2,1
ВА2000	14,9	10,6	5,2	4,5	3,7	3,4	2,5	2,0
ABB	12,1	8,6	4,8	3,9	3,2	2,7	2,1	1,5
Haggar	12,3	8,8	5,1	4,2	3,5	2,6	2,2	1,7
ETIMAT	13,2	9,7	5,2	4,2	3,4	2,7	2,4	1,8

Струм однофазного замикання на корпус або нульовий провід повинен забезпечувати надійне спрацювання захисту і бути не меншим ніж:

- у 3 рази номінального струму плавної вставки найближчого запобіжника;
- у 3 рази струм нерегульованого розчіплювача або уставки струму регульованого розчіплювача автоматичного вимикача, що має обернено залежну від струму характеристику;
- уставку струму миттєвого спрацювання, помножену на коефіцієнт, що враховує розпад (за заводськими даними) і на коефіцієнт 1,1, у разі захисту мереж автоматичними вимикачами, які мають лише електромагнітний розчіплювач (відсічку).

Результати досліджень та їх обговорення. Нами проводились порівняльні дослідження вимірювань на різних ділянках електричної мережі, результати яких представлені в таблиці 3. За результатами цих вимірювань розраховувались очікувані струми короткого замикання в кінці лінії. При виконанні розрахунків ділянка мережі від трансформаторної підстанції до ГРЩ будинку приймалась за чотириполюсник. Результати розрахунків співпадають з експериментальними значення, що підтверджує правильність прийнятої гіпотези.

Проведені експериментальні дослідження з використанням вимірювальних приладів різних виробників показали достатньо велику різницю у вимірних значеннях, яка перевищує в деяких випадках межі похибки. Прилади ЕКО 2000 та

EP 180 M1 не можна використовувати на трансформаторних підстанціях, оскільки ймовірний струм короткого замикання перевищує вимірювальні можливості приладу.

Найбільш привабливим є вимірювач параметрів кола «фаза-нуль» ЦК 0220 ПрАТ «Уманський завод «Мегометр». Він визначає активну і реактивну складові повного електричного опору кола «фаза-нуль», кут зсуву фаз між напругою і струмом як додаткові інформаційні параметри, що може бути використано для визначення параметрів чотириполюсників за запропонованою методикою.

3. Результати розрахунків та вимірювань ймовірних струмів однофазного короткого замикання

Місце вимірювання	Виміряне значення струму к.з., кА				
	ЦК 0220	ЕКО 2000	KEW 6050A	Telaris ISO 100	EP 180 M1
Шини споживчої ТП 10/0,4 кВ з трансформатором ТМ 400/10	5,5	-	4,7	4,6	-
ГРЩ будівлі	1,2	0,9	0,93	0,87	0,75
Найдовша точка лінії (виміряне значення)	0,48	0,39	0,35	0,41	0,36
Найдовша точка лінії (розрахункові значення)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

Висновки і перспективи. Запропонована гібридна методика оцінювання величини ймовірних струмів короткого замикання в електричних мережах напругою до 1000 В може використовуватися для обґрунтування селективності захисту мереж та обладнання при проектуванні нових енергетичних установок.

Список використаних джерел

1. Радько І. П., Наливайко В. А., Окушко О. В., Міщенко А. В., Антипов Є. О. [Методика та обладнання для проведення енергетичного аудиту](#). Енергетика та автоматика. 2018. № 4 (23). С. 123 – 134.

2. Борковский С.О., Горева Т. С., Горева Т. И. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю. Фундаментальные исследования. 2014. № 9, ч. 5. С. 954 – 959.
3. Правила улаштування електроустановок. К.: Міненерговугілля. 2017. 617 с.
4. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. К.: Міненерговугілля. 2014. 199 с.
5. Сидоров А. И., Саидалиев Ш. С. Рациональное значение сопротивления заземления нейтрали по условиям электробезопасности. Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №7 (49), ч. 4. С. 59 – 62.
6. Василенко В. В., Жильцов А. В., Сорокін Д. С. Теоретичні основи електротехніки: Т. 1. К.: , 2015. 364 с.
7. System pro M compact DIN Rail components for low voltage installation. URL: <https://library.e.abb.com/public/570880e6e5abfaf5c1257aa1004f8988/2CSC400002D0210.pdf>
8. Радько І. П., Наливайко В. А., Окушко О. В. Дослідження особливостей умов роботи електричних апаратів в аграрному виробництві. Енергетика і автоматика. 2018. №2. С. 168 – 178.

References

1. Radko, I.P., Nalyvaiko, V.A., Okushko, O.V., Mischenko, A.V., Antipov, E.O. (2018). Metodyka ta obladnannia dlia provedennia enerhetychnoho audytu [Methodology and equipment for energy auditing]. Power engineering and automation, 4 (23), 123 – 134.
2. Borkovsky, S.O., Goreva, T.S., Grief, T.I. (2014). Problema diagnostiki odnofaznykh zamykanii na zemliu v setiakh s malymi tokami zamykaniia na zemliu [The problem of diagnosing single-phase earth faults in networks with low earth fault currents]. Basic research, 9, 5, С. 954 – 959.
3. Ministry of Energy and Coal (2014). Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]. 617.
4. Ministry of Energy and Coal (2014). Pravyl tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv [Rules of technical operation of electrical installations of consumers]. 175.
5. Sidorov, A.I., Saidaliev, Sh.S. (2016). Rational value of neutral grounding resistance under electrical safety conditions [Ratsionalnoe znachenie soprotivleniia zazemleniia neutrali po usloviiam elektrobezopasnosti]. International Research Journal, 7(49), 4, 59 – 62.
6. Vasilenko, V.V., Zhiltsov, A.V., Sorokin D.S. (2015). Theoretical foundations of electrical engineering [Teoretichni osnovi elektrotekhniki]. Kiyv, 364.
7. System pro M compact DIN Rail components for low voltage installation. Available at: <https://library.e.abb.com/public/570880e6e5abfaf5c1257aa1004f8988/2CSC400002D0210.pdf>
8. Radko, I. P., Nalyvaiko, V. A., Okushko, O. V. (2018). Research of features of working conditions of electric devices in agricultural production [Doslidzhennia

osoblivostei umov roboti elektrichnikh aparativ v agrarnomu virobnitctvi]. Power engineering and automation, 2, 168 – 178.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СЕЛЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

И. П. Радько, В. А. Наливайко, А. В. Окушко, И. М. Болбот

Аннотация. Согласно ПУЭ-2017 каждая групповая линия должна иметь защиту от коротких замыканий. Мгновенное отключение (отсечку) линии при возникновении коротких замыканий обеспечивает электромагнитный расцепитель автоматического выключателя. Надежное отключение при этом возможно, если ток однофазного короткого замыкания будет больше тока мгновенного срабатывания. В настоящее время на рынке широко представлены автоматические выключатели с характеристиками «В», «С» и «D», которые характеризуются различными кратностями тока отсечки электромагнитного расцепителя. Некоторые европейские фирмы выпускают автоматические выключатели с другими характеристиками, что значительно расширяет возможности создания полноценной и надежной системы защиты электрооборудования. Сложность в организации селективности защиты заключается в том, что автоматические выключатели модульного исполнения при выключении коротких замыканий характеризуются одинаковым временем выключения (не более 0,05 с).

Целью исследований является поиск путей организации селективности защиты в электрических сетях напряжением до 1000 В, используя достоверные значения токов коротких замыканий.

В сетях напряжением до 1000 В ток однофазного короткого замыкания можно достаточно точно рассчитать, если известны точные значения всех участков электрической сети. На практике получить достоверные данные о численных характеристиках сети 0,4 кВ, к которым присоединяется новый энергетический объект, не всегда возможно. Поэтому предлагается часть сети рассматривать как активный четырехполюсник, характеристики которого получены путем измерения в точке присоединения. Для дальнейших расчетов необходимо знать напряжение на зажимах четырехполюсника и внутреннее полное сопротивление.

На основе теории четырехполюсников можно получить исходные данные для расчетов, при этом не рассчитывая внутренние параметры четырехполюсников. Таким образом предлагается использовать гибридную методику оценки величины вероятных токов короткого замыкания в электрических сетях напряжением до 1000 В при проектировании новых энергетических объектов. Достоверные значения токов короткого замыкания позволят организовать селективную защиту электрических сетей.

Ключевые слова: электрический аппарат, ток короткого замыкания, электрические сети

INVESTIGATION OF DEPENDENCES OF SELECTIVITY OF DEVICES OF PROTECTION AGAINST THE VALUE OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN ELECTRICAL NETWORKS UP TO 1000 V

I. Radko, V. Nalivayko, O. Okushko, I. Bolbot

Abstract. *According to PUE-2017, each group line must be protected against short circuits. Instant disconnection (cut-off) of the line in the event of short circuits provides an electromagnetic release of the circuit breaker. Reliable tripping is possible if the current of a single-phase short circuit is greater than the instantaneous tripping current. Today on the market are widely available circuit breakers with characteristics "B", "C" and "D", which are characterized by different multiplicities of the cut-off current of the electromagnetic release. Some European companies produce circuit breakers with other characteristics, which greatly expands the possibilities protection of electrical equipment. The difficulty in organizing the selectivity of protection is that the circuit breakers of modular design when switching off short circuits are characterized by the same switching time (not more than 0.05 s).*

The purpose of the research is to find ways to organize the selectivity of protection in electrical networks with voltage up to 1000 V using reliable values of short-circuit currents.

In networks with a voltage of up to 1000 V, the current of a single-phase short circuit can be calculated fairly accurately if the exact values of all sections of the electrical network are known. In practice, it is not always possible to obtain reliable data on the numerical characteristics of the 0.4 kV network to which a new energy facility is connected. Therefore, it is proposed to consider part of the network as an active quadrupole, the characteristics of which are obtained by measurements at the point of connection. For further calculations it is necessary to know the voltage at the clamps of the four-pole scheme and the internal impedance.

Based on the theory of four-pole scheme, you can get the original data for calculations without calculating the internal parameters of four-poles scheme. Thus, it is proposed to use a hybrid method for estimating the magnitude of probable short-circuit currents in electrical networks up to 1000 V when designing new energy facilities. Credible values of short-circuit currents will allow to organize selective protection of electric networks.

Key words: *electric apparatus, short-circuit currents, electrical networks*