

УДК 621.3:620.96

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК ТА ПРИЛАДОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЙМОВІРНИХ СТРУМІВ
ОДНОФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ В МЕРЕЖАХ ЗМІННОГО
СТРУМУ НАПРУГОЮ ДО 1000 В**

М.Т. Лут, кандидат технічних наук, доцент

І. П. Радько, кандидат технічних наук, доцент

В. А. Наливайко, кандидат технічних наук, доцент

О. В. Окушко, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: nva041@ukr.net

***Анотація.** В роботі проведено порівняльний аналіз та результати експериментальних досліджень методик та приладів для оцінювання ймовірних струмів короткого замикання в електричних мережах напругою до 1000 В. Обґрунтована доцільність застосування приладів, які використовують надмале значення обмежувального опору під час вимірювань.*

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

Актуальність дослідження. Визначення величини струму к. з. дозволяє зробити правильний вибір провідників, плавких запобіжників та апаратів захисту у випадку аварійної ситуації .

В даний час ряд підприємств в Україні та в інших країнах розробляють і виготовляють пристрої для визначення струму к.з і повного опору кола фаза-нуль, і звичайно, що ці пристрої володіють відмінними один від одного споживчими якостями. Найбільш важливими з точки зору споживчими якостями даного ряду пристроїв є: - виконання вимірювань реального струму короткого замикання, тобто під час вимірювань в 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.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перевірка кола «фаза-нуль» в електроустановках до 1 кВ з глухим заземленням нейтралі регламентована чинними Правилами улаштування електроустановок[3] у складі приймально-здавальних випробувань. Струм 1-фазного замикання повинен забезпечувати надійне спрацювання захисту за час, який регламентується технічними характеристиками вимикача (як правило не більше 0,05 с).

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [4] встановлюють вимоги щодо перевірки спрацювання захисту .

- силових кабельних ліній до 1000В із глухозаземленою нейтраллю (п.6.11);
- повітряних ліній електропередавання до 1000В із глухозаземленою нейтраллю (п. 7.9);
- електричних машин напругою до 1000 В при системі живлення із глухозаземленою нейтраллю;
- електроустановок, апаратів, вторинних кіл, норми випробування яких не визначенні в розділах 2-25 Норм і електропроводок напругою до 1000В.

Метою досліджень є аналіз сучасних методик вимірювання ймовірних струмів короткого замикання в електричних мережах напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю.

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

Предметом досліджень є методики та прилади для оцінювання величини ймовірних струмів короткого замикання в мережах до 1000 В.

Результати дослідження та їх обговорення. У разі захисту мереж автоматичними вимикачами, які мають лише електромагнітний розчіплювач (відсічку), провідність вказаних провідників має забезпечувати струм не нижче 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 [2]

$$I_k \geq k_3 \cdot k_p \cdot I_{\text{відс.}} \quad (1)$$

де I_k – струм 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 $I_n \geq 100\text{А}$ – $k_p = 1,25$; $I_{\text{відс.}}$ – струм відсічки електромагнітного розчіплювача, А.

Струм однофазного короткого замикання визначається за наближеною формулою:

$$I_k^{(1)} = \frac{U_\phi}{\frac{z_{\text{т.к}}}{3} + z_n}, \quad (2)$$

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

У ряді випадків напругу приймають рівною $0,9 U_\phi$, пояснюючи це тим, що при виникненні к.з. напруга знижується, особливо у струмоприймачів, які віддалені від джерела змінного струму.

Повний опір трансформатора джерела живлення:

$$\frac{z_{\text{т.к}}}{3} \approx \frac{26}{S_n}, \quad (3)$$

де S_n - номінальна потужність трансформатора, кВ·А.

$$\frac{z_{\text{т.к}}}{3} \approx \frac{26}{400} = 0,065 \text{ Ом.}$$

Опір петлі фазний провід - нульовий провід:

$$z_n = \sqrt{(\sum R_n)^2 + (\sum X_n)^2}, \quad (4)$$

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

В нашому випадку:

$$\sum R_n = R_\phi + R_n + R_{\text{конт}}, \quad (4.5)$$

$$\sum X_{\Pi} = 2 \cdot x'_{\phi.н} - x'_{\phi.\phi} - x'_{н.н} + x''_{\phi} + x''_{н}, \quad (6)$$

де R_{ϕ} , $R_{н}$ - відповідно активні опори фазного та нульового проводів (для даного випадку $R_{\phi} = R_{н}$), Ом; $R_{\text{конт}}$ - активний опір контактів, $R_{\text{конт}} = 0,075$ Ом; $x'_{\phi.н}$ - зовнішній опір одиночного проводу, обумовлений взаємоіндукцією між фазним і нульовим проводами, Ом; $x'_{\phi.\phi}$, $x'_{н.н}$ - зовнішні індуктивні опори самоіндукції, які залежать від геометричних розмірів фазного і нульового проводів (для даного випадку $x'_{\phi.\phi}$, $x'_{н.н} = 0$ Ом); x''_{ϕ} і $x''_{н}$ - внутрішні індуктивні опори, які залежать від ступеня проявлення поверхневого ефекту в металі, Ом.

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

Струм 1-фазного замикання на корпус або нульовий провід повинен забезпечувати надійне спрацювання захисту і перевищувати не менш чим:

- у 3 рази номінальний струм 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).

За відсутності заводських даних для автоматичних вимикачів з номінальним струмом до 100 А кратність струму 1-фазного короткого замикання відносно уставки слід приймати не менше 1,4, а для автоматичних вимикачів з номінальним струмом понад 100 А - не менше 1,25.

В даний час 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 даного ряду пристроїв є: - виконання вимірів реального струму короткого замикання. Тобто під час вимірювань в 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 даної вимоги визначається тим, що опір кола «фаза-нуль» може мати нелінійний характер від величини протікаючого по колу струму. Окрім того, коефіцієнт нелінійних спотворень в реальних електричних мережах може досягати 12%. Тому при вимірюваннях виникає значна похибка від неврахування форми кривої струму. При вимірюваннях струму короткого замикання без обмеження похибка практично відсутня, тому, амплітуда першої гармоніки струму короткого замикання значно перевищує амплітуди 3-ї і 5-ї гармонік і форма кривої струму є синусоїдальною.

Зазначені вище вимірювання, пов'язані з перевіркою кола «фаза –нуль» проводяться з використанням цілого ряду приладів вітчизняного і зарубіжного виробництва, порівняльна характеристика яких наведена в таблиці 1.

При вимірюваннях за різними методиками використовуються обмежувальні опори різної величини, що визначає масо-габаритні показники вимірювального приладу. Крім того, виміри з обмеженням призводять до виникнення похибки від неврахування індуктивної складової кола фаза-нуль, так як практично неможливо буде визначити з достатньою точністю кут зсуву фаз між струмом і напругою під час реального короткого замикання.

Визначальною серед споживчих якостей вказаних вимірювальних приладів є проведення вимірювань реального (чи максимально наближеного до реального) струму 1-фазного короткого замикання. Це обумовлюється тим, що під час вимірювань в колі «фаза-нуль» буде проявлятися його нелінійний характер і до того ж в мережі коефіцієнт нелінійних спотворень може сягати 12% [6].

1. Порівняльна характеристика приладів для вимірювання струму 1-фазного короткого замикання і опору кола «фаза-нуль»

Назва показника	ЦК 0220	ЕКО 2000	KYORITS U KEW 6050A	Telaris ISO 100	EP 180 M1
Діапазон вимірювання струму к.з., кА	0,01-10	0,02-2	0,2-20	0,2-20	0,01-1,99
Похибка вимірювань	± 5 %,	± 10 %,	± 5 %,	± 5 %,	± (6% Zs + 6 EMP)
Діапазон вимірювання опору петлі «Фаза-нуль», Ом	0,01-200	-	0,01-200	0,01 -20,0	0,1 -22,0
Похибка вимірювань	± 5 %,	-	± (3%+8dgr)	(2%+0,1)	± (6% Zs + 6 EMP)
Діапазон вимірювання напруги, В	180-245	0-250			180-250
Розміри, мм	335x305 x145	345x265x135	186 x 167x89	235 x 103x70	222 x102 x 42
Маса, кг	9	6	0,98	1,2	0,3
Середній строк служби, років	10	10		10	

Нами проводились порівняльні дослідження вимірювань на різних ділянках електричної мережі, результати яких представлені в таблиці 2.

Проведені експериментальні дослідження показали достатньо велику різницю у вимірних значеннях, яка перевищує в деяких випадках межі похибки. Для проведення інженерних вимірювань в електричних мережах досить привабливими є малогабаритні пристрої, які значно спрощують та прискорюють процес вимірювань. Прилади ЕКО 2000 та EP 180 M1 не можна використовувати на ТП, оскільки

ймовірний струм короткого замикання перевищує вимірювальні можливості приладу.



Рисунок 1 - Вимірювач параметрів кола «фаза-нуль» ЦК 0220

2. Результати розрахунків та вимірювань ймовірних струмів 1-фазного короткого замикання

Місце вимірювань	Виміряне значення струму к.з., кА					Розрахунок 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	-	5,7
ГРЩ будівлі	1,2	0,9	0,93	0,87	0,75	1,3
Найдовша точка лінії	0,48	0,39	0,42	0,44	0,36	0,46

Серед приладів особливо вирізняється вимірювач параметрів кола «фаза-нуль» ЦК 0220 (рис.1), який призначений для вимірювання струму однофазного короткого замикання, повного електричного опору і напруги кола «фаза-нуль» в 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.

Режим роботи вимірювача повторно-короткочасний з інтервалом між вимірюваннями (натисненням кнопки «ИЗМЕРЕНИЕ») встановлений програмою роботи, яка реалізується вбудованим мікроконтролером, після завершення якої подається звуковий сигнал, що дозволяє проведення наступного вимірювання.

Вимірювач забезпечує вимірювання параметрів кола «фаза-нуль» за одне натиснення кнопки «ИЗМЕРЕНИЕ» і запам'ятовування 10 останніх результатів вимірювань.

Робота вимірювача базується на принципі аналого-цифрового перетворення падіння напруги на шунті вимірювача і кута зсуву фаз між струмом однофазного короткого замикання і напругою мережі в значення струму однофазного короткого замикання і повного електричного опору кола «фаза-нуль».

Вимірювання проводиться у два такти:

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

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

Проведені на ПрАТ «Уманський завод «Мегометр»» дослідження показали, що тільки при зміні струму к.з. з обмежувальним резистором меншим чи рівним 0,1 Ом форма кривої струму відповідає синусоїді навіть при коефіцієнті нелінійності рівному 12%. Оскільки при зміні з таким обмежувальним резистором амплітуда першої гармоніки струму к.з. значно перевищує амплітуди 3-ї і 5-ї гармонік і форма кривої струму є синусоїдальною.

Окрім того, вимірювання з обмеженням приводять до виникнення похибки від неврахування індуктивної складової кола «фаза-нуль», оскільки практично

неможливо буде визначити з достатньою точністю кут зсуву фаз між струмом і напругою під час реального к.з., на основі кута, виміряного при обмеженні струму, а значить і визначити повний опір кола «фаза-нуль» і струм к.з.

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.

Висновки. Визначальною серед споживчих якостей вимірювальних приладів є проведення вимірювань реального (чи максимально наближеного до реального) струму 1-фазного короткого замикання. Саме така методика реалізується вимірювачем параметрів кола «фаза-нуль» ЦК 0220 ПрАТ «Уманський завод «Мегометр»».

Список використаних джерел

1. Радько І.П. Методика та обладнання для проведення енергетичного аудиту / І.П. Радько, В.А. Наливайко, О.В. Окушко, А.В. Міщенко, Є.О. Антипов // Енергетика та автоматика. – 2018. – № 4 (23). – С. 123 – 134.
2. Борковский С.О. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю / С.О. Борковский, Т.С. Горева, Т.И. Горева // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9, Ч. 5. – С. 954 – 959.
3. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля. – 2017. – 617 с.
4. Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів / Міненерговугілля. – 2014. – 199 с.
5. Сидоров А.И. Рациональное значение сопротивления заземления нейтрали по условиям электробезопасности / А.И. Сидоров, Ш.С. Саидалиев // Международный научно-исследовательский журнал. - №7 (49), Ч. 4. – 2016. – С. 59 – 62.
6. Радько І.П. Підвищення заходів з енергоефективності та енергозбереження у вищих навчальних закладах / І.П. Радько, В.А. Наливайко, О.В. Окушко, А.В. Міщенко, Є.О. Антипов // Науковий вісник НУБІП. – 2018. – № 283. – С. 275 – 280.

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 zamykaniy 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. Radko, I.P., Nalyvaiko, V.A., Okushko, O.V., Mischenko, A.V., Antipov, E.O. (2018). Pidvyshchennia zakhodiv z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia u vyshchykh navchalnykh zaklada [Improving Energy Efficiency and Energy Saving Measures in Higher Educational Institutions]. Scientific Bulletin NUBIP, 283, 275 – 280.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИК И ПРИБОРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНЫХ ТОКОВ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНИЙ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Н.Т. Лут, И.П. Радько, В.А. Наливайко, А.В. Окушко

Аннотация. В работе представлены результаты сравнительного анализа и экспериментальных исследований методик и приборов для инструментальной оценки токов однофазных коротких замыканий в сетях напряжением до 1000 В. Обоснована целесообразность использования приборов со свернизким значением ограничительного сопротивления во время измерений.

Ключевые слова: электрический аппарат, токи короткого замыкания, электрические сети.

RESEARCH OF THE METHOD AND APPARATUS OF THE INSTRUMENTAL EVALUATION OF PROBABLE TOXES OF ONE-PHASE SHORT SURFACES IN NETWORKS WITH VOLTAGE TO 1000 V

Lut M.T., I.P. Radko, V. A. Nalivayko, O. V. Okushko

Abstract. The paper presents the results of comparative analysis and experimental studies of techniques and instruments for instrumental evaluation of single-phase short-circuit currents in networks with voltages up to 1000 V. The expediency of using instruments with a mean value of limiting resistance during measurements is substantiated.

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