

*О.В. Кулаков, к.т.н., доцент, профессор каф., НУЦЗУ,
А.М. Катунін, к.т.н., с.н.с., доцент каф., НУЦЗУ,
О.О. Бодрик, курсант, НУЦЗУ*

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ НА ВИБІР АПАРАТІВ ЗАХИСТУ ВІД КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК У ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОНАХ

(представлено д.т.н. Чубом І.А.)

Досліджений вплив параметрів електричної мережі (наближений розрахунковий повний опір трифазного трансформатору, матеріал, переріз та довжина провідників кабельного виробу) на вибір параметрів апаратів захисту від короткого замикання (номінальні струми електромагнітного розчіплювача автоматичного вимикача та плавкої вставки плавкого запобіжника) електроустановок у вибухонебезпечних зонах. Отримані чисельні значення дозволять полегшити розрахунок електричних мереж та попередити появу джерел запалювання електричного походження під час їх експлуатації.

Ключові слова: електрична мережа, апарат захисту, коротке замикання, вибухонебезпечна зона.

Постановка проблеми. В Україні за даними [1] другою за частотою виникнення причиною пожеж є порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок (до 20 % щорічно від їх загальної кількості). Коротке замикання (КЗ) електричної мережі призводить до 60 % пожеж за причиною порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок.

Особливу пожежну небезпеку уявляють електроустановки, що розташовано у вибухонебезпечних зонах. Наслідки пожеж у таких зонах, як правило, є надзвичайно резонансними у порівнянні зі звичайними умовами. Наймасштабнішою пожежею за часів незалежності України, що призвела до значних людських і матеріальних втрат, була пожежа, яка виникла 08 червня 2015 року на одному з резервуарів з паливом на території нафтобази групи компаній «БРСМ-Нафта» у с. Крячки Васильківського району Київської області [1], унаслідок якої загинуло п'ятеро людей, у тому числі троє рятувальників, та 16 – отримали травми різного ступеню тяжкості. Пожежа тривала майже два тижні, на її ліквідацію було задіяне значну кількість особового складу та техніки Державної служби України з надзвичайних ситуацій з декількох областей. Причиною пожежі став недолік конструкції та виробництва електроустановок, внаслідок чого виникло КЗ у пересувному насосному електроагрегаті, розташованому у вибухонебезпечній зоні. Витрати на гасіння пожежі оцінили у 50 мільйонів гривень.

Тому проблема удосконалення захисту електричних мереж від надструмів, викликаних КЗ є актуальною.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Згідно п. 3.1.6 [2] електрична мережа повністю або її частина мають вимикатися за визначений

проміжок часу, якщо вона може створювати загрозу для майна або здоров'я людей і свійських тварин.

Згідно п. 3.1.8 [2] для захисту електричної мережі від надструмів треба застосовувати: автоматичні вимикачі; плавкі запобіжники; комбінації комутаційних апаратів з тепловими реле і плавкими запобіжниками; спеціалізовані електронні пристрої.

З метою попередження появи джерела запалювання електричного походження надійне вимкнення пошкодженої ділянки мережі забезпечується, якщо відношення найменшого розрахункового струму КЗ до номінального струму плавкої вставки запобіжника або розчіплювача автоматичного вимикача буде не меншим визначеного значення. Згідно вимог п. 4.10.3 [3] у вибухонебезпечних зонах надійне відключення від джерел електричного живлення при виникненні КЗ наприкінці лінії, що захищається забезпечується, якщо виконуються наступні умови:

- для автоматичних вимикачів з електромагнітним розчіплювачем:

$$\frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{\text{ном.ел.м.}}} \geq 1,25(1,4), \quad (1)$$

де $I_{\text{КЗ}}$ – сила струму КЗ між лінійним (L) та PEN провідниками; $I_{\text{ном.ел.м.}}$ – номінальний струм електромагнітного розчіплювача автоматичного вимикача; коефіцієнт 1,25 – для автоматичних вимикачів на номінальні струми вище 100 А; коефіцієнт 1,4 – для автоматичних вимикачів на номінальні струми до 100 А;

- для плавких запобіжників:

$$\frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{\text{ном.вст.}}} \geq 4, \quad (2)$$

де $I_{\text{ном.вст.}}$ – номінальний струм плавкої вставки плавкого запобіжника.

Для розрахунку $I_{\text{КЗ}}$ слід використовувати закон Ома:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{Л}}}{Z_{\text{Л-PEN}}}, \text{ А}, \quad (3)$$

де $U_{\text{Л}}$ – фазна напруга в мережі, В; $Z_{\text{Л-PEN}}$ – повний сумарний опір послідовно з'єднаних елементів кола однофазного КЗ, Ом.

Для визначення величини $Z_{\text{Л-PEN}}$ накреслимо розрахункову схему кола однофазного КЗ (рис. 1).

Струм I_3 протікає через заземлювач повторного заземлення, землю та заземлювач нейтралі джерела живлення. Відповідно п. 1.7.92 [2] при лінійній напрузі 380 В опір $R_{\text{Н}}$ заземлювального пристрою, до якого

приєднано нейтраль джерела живлення не повинен перевищувати 4 Ом, а опір R_{Π} заземлювача, до якого безпосередньо приєднують нейтраль джерела трифазного струму повинен бути не більшим 30 Ом. Тому сумарний опір цієї вітки буде не меншим $R_N + R_{\Pi} = 40$ Ом, що є на порядок більшим у порівнянні з іншими опорами. Тому схему, приведену на рис. 1 можна спростити (рис. 2). Формула (3) прийме вид:

$$\dot{I}_{K3} = \frac{U_L}{\dot{Z}_{L-PEN}} = \frac{U_L}{\frac{Z_T}{3} + \dot{Z}_L + \dot{Z}_{PEN}}, A, \quad (4)$$

де Z_T – наближений розрахунковий повний опір трифазного масляного трансформатора, Ом, Z_T залежить від потужності трансформатору та схеми з'єднання обмоток трансформатору, визначається з довідкових даних, наприклад [4-7]; $\dot{Z}_L = R_L + j \cdot X_L$ – повний опір лінійного провідника, Ом; $\dot{Z}_{PEN} = R_{PEN} + j \cdot X_{PEN}$ – повний опір PEN-провіднику (електрична мережа TN-C [2]), Ом; R_L – активний опір лінійного провіднику, Ом; X_L – індуктивний опір лінійного провіднику, Ом; R_{PEN} – активний опір PEN-провіднику, Ом; X_{PEN} – індуктивний опір PEN-провіднику, Ом.

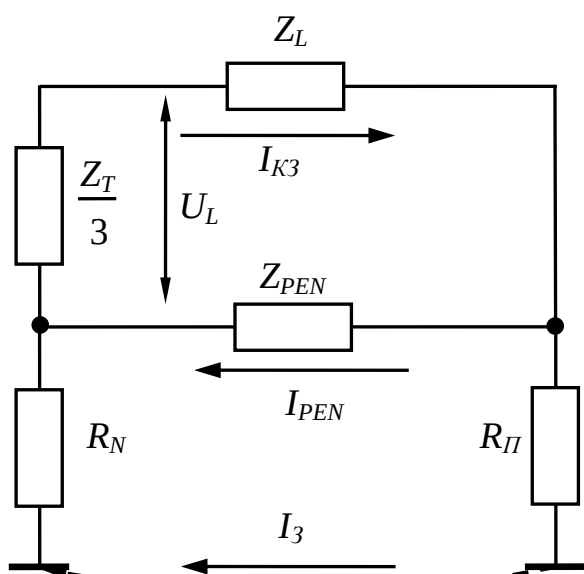


Рис. 1. Розрахункова схема кола однофазного КЗ

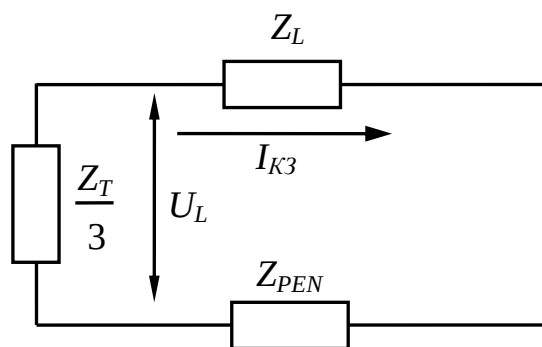


Рис. 2. Спрощена розрахункова схема кола однофазного КЗ

Перетворюємо:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_L + \dot{Z}_{PEN} &= R_L + j \cdot X_L + R_{PEN} + j \cdot X_{PEN} = (R_L + R_{PEN}) + j \cdot (X_L + X_{PEN}), \\ |Z_L + Z_{PEN}| &= \sqrt{(R_L + R_{PEN})^2 + (X_L + X_{PEN})^2}. \end{aligned}$$

Додатково враховуємо активний опір R_k перехідних контактних з'єднань та отримуємо формулу для повного опору кола КЗ між лінійним та PEN провідниками Z_{L-PEN} :

$$Z_{L-PEN} = Z_{\Pi} + \frac{Z_T}{3}, \text{ [Ом]}, \quad (5)$$

де

$$Z_{\Pi} = \sqrt{(\sum R_L + \sum R_{PEN} + \sum R_k)^2 + (\sum X_L + \sum X_{PEN})^2}, \text{ [Ом]} \quad (6)$$

– повний опір провідників кола КЗ, приєднаних до обмотки трансформатора.

При розрахунках використовують формули:

$R_L = \rho_L \cdot \frac{\ell}{S_L}$; $X_L = a_L \cdot \ell$ – відповідно активний та індуктивний опори лінійного (L) провідника кабельного виробу обраного маркорозміру, Ом;

$R_{PEN} = \rho_{PEN} \cdot \frac{\ell}{S_{PEN}}$; $X_{PEN} = a_{PEN} \cdot \ell$ – те ж, але для PEN провіднику (для електричної мережі TN-C [2]), Ом; S_L та S_{PEN} – відповідно переріз жил лінійного та PEN провідників, мм²; ρ – питомий опір матеріалу провідника, Ом·мм²/км; ℓ – довжина ділянки з однаковим перерізом жил і однакою маркою провідника, км; $a_{L,PEN}$ – середнє значення індуктивного опору ділянки провідника, Ом·км; R_k – перехідний опір контактних з'єднань, Ом.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є дослідження впливу параметрів електричної мережі на вибір апаратів захисту від струмів КЗ.

Значення $I_{\text{ном.ел.м.}}$ та $I_{\text{ном.вст.}}$ є стандартизованими величинами. Рекомендованими є значення, кратні 10: 0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10 [8, 9].

Комплексним параметром, що характеризує електричну мережу є її Z_{L-PEN} . Чим він є меншим, тим вище величина струму КЗ I_{K3} і тим легше задоволення умов (1)-(2). Для стандартного значення $U_L = 220 \text{ В}$ повний сумарний опір послідовно з'єднаних елементів кола КЗ Z_{L-PEN} не повинен перевищувати значення, приведенного у табл. 1 (для розчіплювачів з $I_{\text{ном.ел.м.}} \leq 100 \text{ А}$) та табл. 2 (для плавких вставок з $I_{\text{ном.вст.}} \leq 100 \text{ А}$).

З аналізу табл. 1 та 2 випливає:

чим менше номінальний струм електромагнітного розчіплювача або номінальний струм плавкої вставки, тим більшим дозволяється опір Z_{L-PEN} ;

при виборі автоматичного вимикача величина опору Z_{L-PEN} припускається значно більшою у порівнянні із застосуванням плавкого запобіжника.

Табл. 1. Максимально припустиме значення Z_{L-PEN} забезпечення умови (1) для розчіплювачів з $I_{НОМ.ЕЛ.М.} \leq 100$ А

$I_{НОМ.ЕЛ.М.}, А$	Максимально припустиме значення $Z_{L-PEN}, Ом$
0,6; 6	261,905; 26,190
0,8; 8; 80	196,429; 19,643; 1,964
1; 10; 100	157,143; 15,714; 1,571
1,25; 12,5	125,714; 12,571
1,6; 16	98,214; 9,821
2; 20	78,571; 7,857
2,5; 25	62,857; 6,286
3,2; 32	49,107; 4,911
4; 40	39,286; 3,929
5; 50	31,429; 3,143
6,3; 63	24,943; 2,494

Табл. 2. Максимально припустиме значення Z_{L-PEN} забезпечення умови (2) для плавких вставок з $I_{НОМ.ВСТ.} \leq 100$ А

$I_{НОМ.ЕЛ.М.}, А$	Максимально припустиме значення $Z_{L-PEN}, Ом$
0,6; 6	91,667; 9,167
0,8; 8; 80	68,750; 6,875; 0,688
1; 10; 100	55,000; 5,500; 0,550
1,25; 12,5	44,000; 4,400
1,6; 16	34,375; 3,438
2; 20	27,500; 2,750
2,5; 25	22,000; 2,200
3,2; 32	17,188; 1,719
4; 40	13,750; 1,375
5; 50	11,000; 1,100
6,3; 63	8,730; 0,873

Складовою частиною Z_{L-PEN} є наближений розрахунковий повний опір трифазного масляного трансформатора струму КЗ Z_T . Його стандартні величини є фіксованими (від 0,020 до 3,110 Ом) й приведено в [4-7]. Z_T оказує суттєвий вплив на величину Z_{L-PEN} якщо Z_T є порівняним за величиною по відношенню до Z_{L-PEN} :

якщо для захисту від КЗ застосується автоматичний вимикач з електромагнітним розчіплювачем на 40; 50; 63; 80; 100 А;

якщо для захисту від КЗ застосується плавкий запобіжник з плавкими вставками на 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100 А.

Наприклад, якщо для захисту від струму КЗ застосується автоматичний вимикач з електромагнітним розчіплювачем на 6 А, то максимально припустимим є значення $Z_{L-PEN}=26,190$ Ом.. Максимально можлива

величина $\frac{Z_T}{3} = \frac{3,110}{3} \approx 1,037$ Ом й скоріш за все цей опір не оказує суттєвого впливу на кінцеве значення Z_{L-PEN} .

А якщо для захисту від КЗ застосується автоматичний вимикач з електромагнітним розчіплювачем на

100 А, то максимально припустимим вже є значення $Z_{L-PEN}=1,5716$ Ом.

Максимально можлива величина $\frac{Z_T}{3} = \frac{3,110}{3} \approx 1,037$ Ом скоріш за все
окаже суттєвий вплив на кінцеве значення Z_{L-PEN} .

Видно що для плавких запобіжників наближений розрахунковий повний опір трифазного масляного трансформатора Z_T впливає на величину повного опора кола КЗ між лінійним та PEN провідниками Z_{L-PEN} починаючи з сили струму плавкої вставки 10 А, а для автоматичних вимикачів з електромагнітним розчіплювачем – з сили струму розчіплювача 40 А.

Іншою складовою частиною Z_{L-PEN} є опір Z_{Π} , який визначається активним та індуктивним опорами ділянок відповідно лінійного та PEN провідників обраного кабельного виробу. Активний опір залежить від матеріалу, перерізу та довжини лінійного провіднику, індуктивний опір – від довжини провіднику та виду обраного кабельного виробу (кабель або провід).

У загальному випадку струм КЗ протікає по мережі живлення, розподільній мережі та груповій мережі. Алюміній, для застосування у вибухонебезпечних зонах 0, 1, 2, 20, 21 заборонений [3]. Тому розподільна та групова мережі виконуються кабельними виробами з мідними жилами. У мережі живлення застосовуються кабельні вироби або з алюмінієвими або з мідними жилами. На рисунку 3 приведено залежність Z_{Π} від різки кабелю з алюмінієвими жилами стандартних перерізів від його довжини, а на рисунку 4 – для кабелю з мідними жилами відповідно (переріз жил взятий з таблиць глави 1.3 [2]).

Аналіз залежностей на рис. 1, 2 показує, що найбільший внесок у Z_{Π} привнесіть саме опір мережі живлення, виконаної з алюмінієвих провідників.

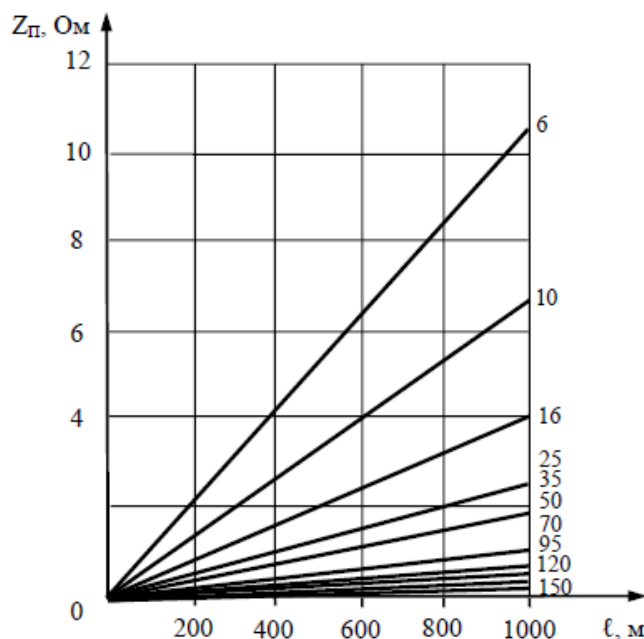


Рис. 3. Залежності повного опору Z_{Π} двох жил відрізка кабелю з алюмінієвими жилами стандартних перерізів від його довжини ℓ

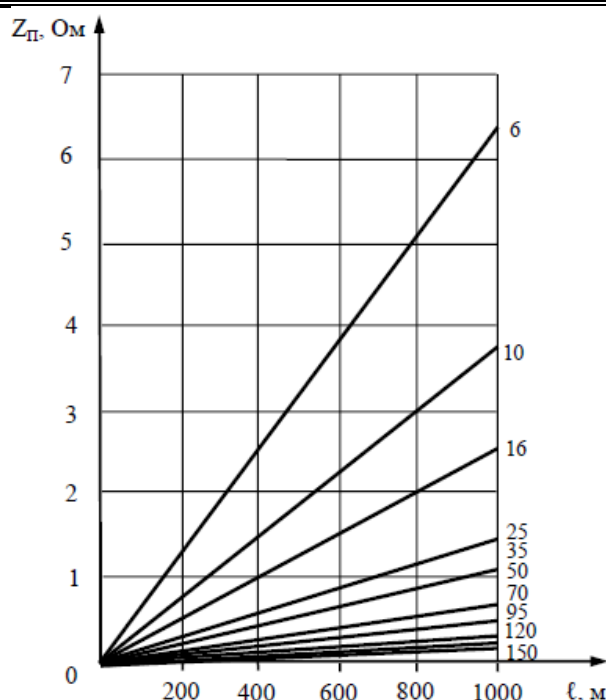


Рис. 4. Залежності повного опору Z_{Π} двох жил відрізка кабелю з мідними жилами стандартних перерізів від його довжини ℓ

Висновки. У вибухонебезпечних зонах з метою попередження появи джерела запалювання електричного походження надійне вимкнення пошкодженої ділянки електричної мережі забезпечується, якщо відношення найменшого розрахункового струму КЗ до номінального струму плавкої вставки запобіжника або розчіплювача автоматичного вимикача буде не меншим визначеного значення, приведенного в [3].

Проведені дослідження показали, що чим менше номінальний струм електромагнітного розчіплювача або номінальний струм плавкої вставки, тим більшою припускається величина повного сумарного опору послідовно з'єднаних елементів кола однофазного КЗ (Z_{L-PEN}). При виборі в якості апарату захисту автоматичного вимикача величина цього опору також припускається значно більшою у порівнянні із застосуванням плавкого запобіжника.

Наближений розрахунковий повний опір масляного трансформатора (Z_T) суттєво впливає на величину повного опору кола КЗ між лінійним та PEN провідниками Z_{L-PEN} починаючи з сили струму плавкої вставки 10 А, а для автоматичних вимикачів з електромагнітним розчіплювачем – з сили струму розчіплювача 40 А.

Повний опір провідників кола КЗ, приєднаних до обмотки трансформатора, Z_{Π} , визначається активним та індуктивним опорами ділянок відповідно лінійного та PEN провідників обраного кабельного виробу. Активний опір залежить від матеріалу, перерізу та довжини лінійного провіднику, індуктивний опір – від довжини провіднику та виду обраного кабельного виробу (кабель або провід). Найбільший внесок у Z_{Π} приносить опір мережі живлення, виконаної з алюмінієвих провідників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Статистика пожеж // Український науково-дослідний інститут цивільного захисту. URL: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Statistika-rozhezh.html> (дата звернення: 21.10.2019).
2. Правила улаштування електроустановок. Київ, 2017. 617 с.
3. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Київ, 2001. 117 с.
4. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учебное пособие. Москва, 1979. 408 с.
5. Черкасов В.Н., Костарев Н.П. Пожарная безопасность электроустановок: учебник. Москва, 2002. 377 с.
6. Ветошкин А.Г. Нормативное и техническое обеспечение безопасности жизнедеятельности: учебно-практическое пособие. Москва, 2017 Часть II. Инженерно-техническое обеспечение безопасности жизнедеятельности. 652 с.
7. ДСТУ 2105-92. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови. Київ, 1992. 77 с.
8. ДСТУ 3025-95. Вимикачі автоматичні низьковольтні. Загальні технічні умови. Київ, 1995. 9 с.
9. ДСТУ EN 60269-1:2017 (EN 60269-1:2007; A1:2009; A2:2014, IDT; IEC 60269-1:2006 + AMD1:2009 + AMD2:2014, IDT). Запобіжники плавкі низьковольтні. Частина 1. Загальні технічні вимоги. (Національний стандарт України прийнятий методом підтвердження).

Отримано редколегією 18.09.2019

О.В. Кулаков, А. М. Катунин, А.А. Бодрик

Влияние параметров электрической сети на выбор аппаратов защиты от короткого замыкания электроустановок во взрывоопасных зонах

Исследовано влияние параметров электрической сети (приближенное расчетное полное сопротивление трехфазного трансформатора, материал, сечение и длина проводников кабельного изделия) на выбор параметров аппаратов защиты от короткого замыкания (номинальные токи электромагнитного расцепителя автоматического выключателя и плавкой вставки предохранителя) электроустановок во взрывоопасных зонах. Полученные численные значения позволят облегчить расчет электрических сетей и предупредить появление источников зажигания электрического происхождения во время их эксплуатации.

Ключевые слова: электрическая сеть, аппарат защиты, короткое замыкание, взрывоопасная зона.

O. Kulakov, A. Katunin, O. Bodric

Influence of parameters of electric network on choice of vehicles of protecting from short circuit of electric equipment in explosive zones

Investigational influence of parameters of electric network (a calculation impedance is close three-phase to the transformer, material, cut and length of explorers of cable good) on the choice of parameters of vehicles of protecting from the short circuit (nominal currents electromagnetic switch circuit breaker and fusible insertion fusible to the safety device) of electric equipment in explosive zones. The got numeral values will allow to facilitate the calculation of electric networks and warn appearance of sources of lighting of electric origin during their exploitation.

Keywords: electric network, vehicle of defense, short circuit, explosive zone.