

УДК 614.8

Я. Ю. Кальченко, PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0002-3482-0782)

К. А. Афанасенко, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-1877-1551)

В. О. Липовий, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1967-0720)

М. В. Пікалов, курсант (ORCID 0009-0002-8028-4631)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОВІДНИКІВ ПРИ АВАРІЙНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

Проведені дослідження з визначення параметрів електричних провідників марок ВВГ та АВВГ з різними перерізами при виникненні короткого замикання. Побудовані залежності температури струмовідної жили електричних провідників в залежності від електричного струму, що проходить по ньому при короткому замиканні за час відключення апарату захисту. Визначені чисельні залежності температури струмовідних жил електричних кабелів ВВГ та АВВГ з різними перерізами залежно від кратності електричного струму, що представлені у вигляді таблиці. Визначені мінімальні значення часу досягнення температури струмовідної жили електричних кабелів температури займання їх ізоляції. Визначено, що навіть за умови досягнення температури струмовідної жили електричного кабелю температури плавлення його ізоляції при справному апараті захисту процес плавлення не відбудеться. Визначені параметри електричних провідників при яких може відбутися займання їх ізоляції внаслідок короткого замикання. Побудовані графіки залежності кратності електричного струму від часу протікання короткого замикання при яких температура ізоляції електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ з різними перерізами досягне температури її займання. Із аналізу цих залежностей витікає, що в залежності від кратності електричного струму при короткому замиканні, електричні кабелі з мідними струмовідними жилами нагріваються швидше за електричні кабелі з алюмінієвими жилами того ж перерізу, що пов'язано із більшими значеннями допустимих струмів для провідників з мідними жилами. Визначено, що навіть при невеликих кратностях струму короткого замикання може відбутися займання ізоляції електричної проводки. Визначені мінімальні значення параметрів електричних провідників при яких, у разі виникнення короткого замикання у електричній мережі з несправним апаратом захисту може утворитися займання їх ізоляції, що призведе до пожежі.

Ключові слова: температура провідника, коротке замикання, кратність електричного струму, температура струмовідної жили

1. Вступ

Правильно розрахована та належним чином змонтована електрична мережа не гарантує виключення можливості виникнення аварійних ситуацій, що призводять до неприпустимого перегріву електричних кабелів при виникненні короткого замикання.

Тривалість короткого замикання, зазвичай, становить 10 с і, як виняток, може досягти декількох секунд. Протягом цього короткого проміжку часу виділення тепла настільки велике, що температура провідників виходить за межі, встановлені для нормального режиму. Процес нагрівання припиняється в момент автоматичного відключення пошкодженої ділянки системи, після чого відбувається відносно повільне охолодження.

Навіть, короткочасне підвищення температури провідників при короткому замиканні може призвести до розм'якшення та плавлення металу, випалювання ізоляції, руйнування контактів та інших ушкоджень. Для надійної роботи електричної системи необхідно виключити такі пошкодження, що досягається вибором відповідних розмірів струмопровідних частин та по можливості швидким автоматичним вимкненням пошкоджених кіл. Властивість провідника протистояти короткочасній

Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-22

тепловій дії струму короткого замикання без ушкоджень, називається термічною стійкістю. Критерієм термічної стійкості є кінцева температура, яка обмежується механічною міцністю металів, а також стійкістю до нагрівання ізоляції.

Допустимі кінцеві температури провідників встановлені на підставі досвіду та приведені у [1]. Вони вищі за допустимі температури при нормальній роботі, оскільки зміна механічних властивостей металів і знос ізоляції визначаються не тільки температурою, але також тривалістю нагрівання, яка в умовах, що розглядаються, мала. Величина електричного струму при короткому замиканні може варіюватись у великому діапазоні. У [1] не приведені значення електричного струму при проходженні якого через електричний провідник може відбутися займання його ізоляції, що спричинить пожежу.

Таким чином, виникнення пожеж внаслідок аварійних режимів роботи електричних мереж є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [2] показано, що у 25 % випадків причиною пожеж є займання електричних проводок та електричних приладів чи апаратів. При цьому 51 % цих пожеж виникають внаслідок короткого замикання.

В [3] приведені експериментальні дослідження плавлення електричних провідників, при короткому замиканні, які спрямовані на встановлення причини його виникнення. В [4] приведені дослідження температури електричних іскор, що утворились внаслідок короткого замикання, у твердому стані. Проаналізовані можливості утворення електричних іскор при різних умовах охолодження і отримані зображення їх мікроструктури. Такі дослідження дозволяють удосконалити методику проведення експертизи виникнення загорань внаслідок короткого замикання, але не досліджують параметри виникнення займання.

В [5] приведені дослідження з визначення надійності апаратів захисту від короткого замикання, що встановлюються у автомобілях. Показано, що вони є достатньо надійними проте можуть виходити з ладу за певних кліматичних умов. В [6] представлені дослідження виникнення короткого замикання у літій-іонних батареях. Показані результати експериментальних досліджень виникнення короткого замикання при створенні на літій-іонні батареї теплових впливів різної величини та порушенні їх конструктивної цілісності внаслідок ушкодження металевим предметом. Визначено, що порушення конструктивної цілісності таких батарей металевим предметом може привести до виникнення пожежі, при цьому вибух батареї не відбудеться. В [7] була розроблена математична модель, яка використовувалась для вивчення внутрішніх коротких замикань в літій-іонному елементі. Результати цього дослідження можуть допомогти розробити більш безпечний літій-іонний елемент внаслідок розуміння процесів конкретного внутрішнього короткого замикання. Недоліком таких досліджень є вузький спектр застосування отриманої математичної моделі. В [8] приведені дослідження розплавлених частин мідних провідників, що утворились внаслідок іскріння проводки при короткому замиканні. Результати досліджень показують, що аналіз цих часток дозволяє робити припущення про характеристики електричних провідників при короткому замиканні, умови та сценарій виникнення займання.

У [9] приведені дослідження з визначення температури іскор, що можуть утворитись у електричних провідниках при короткому замиканні. У дослідженні температура іскор визначалась для різних матеріалів струмовідних жил провідни-

ків та висоти їх розташування. Було визначено, що електрична іскра, утворена під стелею на висоті 10 м може спричинити займання паперу, гуми і пластику, що знаходяться на підлозі цієї кімнати. В [10] приведені результати експериментальних досліджень, у яких показано що електричні іскри утворені внаслідок короткого замикання у електричній мережі з напругою 220 В, можуть привести до горіння бавовни, паперу та пінополіуретану. При цьому, в дослідженнях не розглядається питання можливості займання ізоляції електричних провідників внаслідок короткого замикання та параметри при яких це можливо.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є визначення параметрів електричних провідників при їх нагріванні внаслідок виникненні короткого замикання.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є оцінка можливості утворення пожежі внаслідок займання електричних провідників при виникненні короткого замикання у електричній мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити температуру нагрівання електричних провідників при різних значеннях величини електричного струму, що проходить у провіднику під час короткого замикання, за час спрацювання апарату захисту;
- визначити час досягнення температури електричного провідника температури займання його ізоляції при виникненні короткого замикання у електричній мережі з несправним апаратом захисту.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є теплові процеси, що відбуваються у електричних провідниках при аварійних режимах роботи електричних мереж.

Предметом дослідження є електричні провідники марки ВВГ та АВВГ з різними перерізами струмовідної жили.

Гіпотезою дослідження було те, що за певних умов при виникненні короткого замикання у електричному провіднику його температура може підвищуватись згідно закону Джоуля-Ленца і досягати температури займання ізоляції.

Розрахунок температури електричних провідників при короткому замиканні було проведено для кабелів марок ВВГ та АВВГ. Електричний кабель ВВГ складається із мідної струмопровідної жили, полівінілхлоридної (далі ПВХ) ізоляції та ПВХ оболонки, а кабель марки АВВГ із алюмінієвої струмовідної жили ПВХ ізоляції та ПВХ оболонки. Вихідні дані для проведення розрахунків представлені у табл. 1, 2.

Початкова температура кабелю до короткого замикання 55 °С. Така температура відповідає робочому струму, що проходить кабелем до виникнення короткого замикання порядку від гранично допустимого тривалого струму при температурі навколишнього середовища 25–30 °С.

Величина електричного струму при короткому замиканні може варіюватись у діапазоні $(2,5 \div 18)I_{ном}$. Номінальні значення сили струму обиралися із табл. 1.3.5–1.3.6 [1]. Час короткого замикання дорівнює часу спрацювання апарату захисту. Температура плавлення ПВХ ізоляції може варіюватись від 150 до 250 °С, в залежності від виробника та методів його виготовлення. В розрахунках будемо приймати найгірший випадок, коли температура плавлення ізоляції дорівнює 150 °С.

Табл. 1. Вихідні дані для проведення розрахунку температури електричного кабелю марки ВВГ при короткому замиканні

$T_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$	55				
β	234,5				
$t, \text{с}$	0,3...0,6				
$K, \text{Ac}^{0,5} / \text{мм}^2$	226				
X	0,29				
Y	0,06				
I, A	$(2,5 \div 18)I_{\text{НОМ}}$				
$S, \text{мм}^2$	1,5;	2,5	4	6	10
$I_{\text{НОМ}}, \text{A}$	19	25	35	42	55

Табл. 2. Вихідні дані для проведення розрахунку температури електричного кабелю марки АВВГ при короткому замиканні

$T_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$	55			
β	228			
$t, \text{с}$	0,3...0,6			
$K, \text{Ac}^{0,5} / \text{мм}^2$	148			
X	0,4			
Y	0,08			
I, A	$(2,5 \div 18)I_{\text{НОМ}}$			
$S, \text{мм}^2$	2,5	4	6	10
$I_{\text{НОМ}}, \text{A}$	19	28	32	47

Для досягнення поставленої мети були застосовані методи рішення рівнянь математичної фізики і застосуванням програмного математичного забезпечення у середовищі Maple.

5. Визначення температури електричного провідника при виникненні короткого замикання

Розрахунок параметрів електричного провідника при короткому замиканні ґрунтується на припущенні, що тепло зберігається всередині струмоведучого елемента протягом короткого замикання, тобто має місце адіабатичний нагрів. Однак під час короткого замикання відбувається передача тепла у сусідні матеріали і це слід враховувати.

Температура струмовідних жил електричного провідника при короткому замиканні може бути визначена з виразу:

$$T = (T_{\text{поч}} + \beta) \exp\left(\frac{I_{\text{ад}}^2 t}{K^2 S^2}\right) - \beta, \quad (1)$$

де $T_{\text{поч}}$ – початкова температура струмовідної жили електричного провідника, β – величина, що обернена температурному коефіцієнту опору, t – тривалість короткого замикання, K – стала, що залежить від матеріалу струмопровідної жили, S – площа поперечного перерізу струмопровідної жили, $I_{\text{ад}}$ – сила електричного струму при короткому замиканні, розрахованого на основі адіабатичного процесу нагріву, який визначається за формулою:

$$I_{ад} = \frac{I}{\varepsilon}, \quad (2)$$

де I – величина сили струму електричного провідника при короткому замиканні; ε – коефіцієнт, що враховує відвід тепла у сусідні елементи.

Загальний вигляд емпіричного рівняння для неадиабатичного коефіцієнта можна представити у виді:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + FA\sqrt{\frac{t}{S}} + FB^2\left(\frac{t}{S}\right)}, \quad (3)$$

де F – коефіцієнт, що ураховує неповний тепловий контакт між жилою або дротом і навколишніми або сусідніми неметалевими матеріалами, A, B – емпіричні постійні, основані на термічних характеристиках навколишніх або сусідніх неметалевих матеріалів.

Для звичайних комбінацій матеріалів формула (3) може бути спрощена наступним чином:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + X\sqrt{\frac{t}{S}} + Y\left(\frac{t}{S}\right)}, \quad (4)$$

де X, Y – сталі, що використовуються у спрощеній формулі для струмовідних жил з різними матеріалом ізоляції.

За виразом (1) було визначено залежності температури струмовідних жил електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ з різними перерізами від величини електричного струму короткого замикання за 0,6 с, які представлені на рис. 1, 2, відповідно.

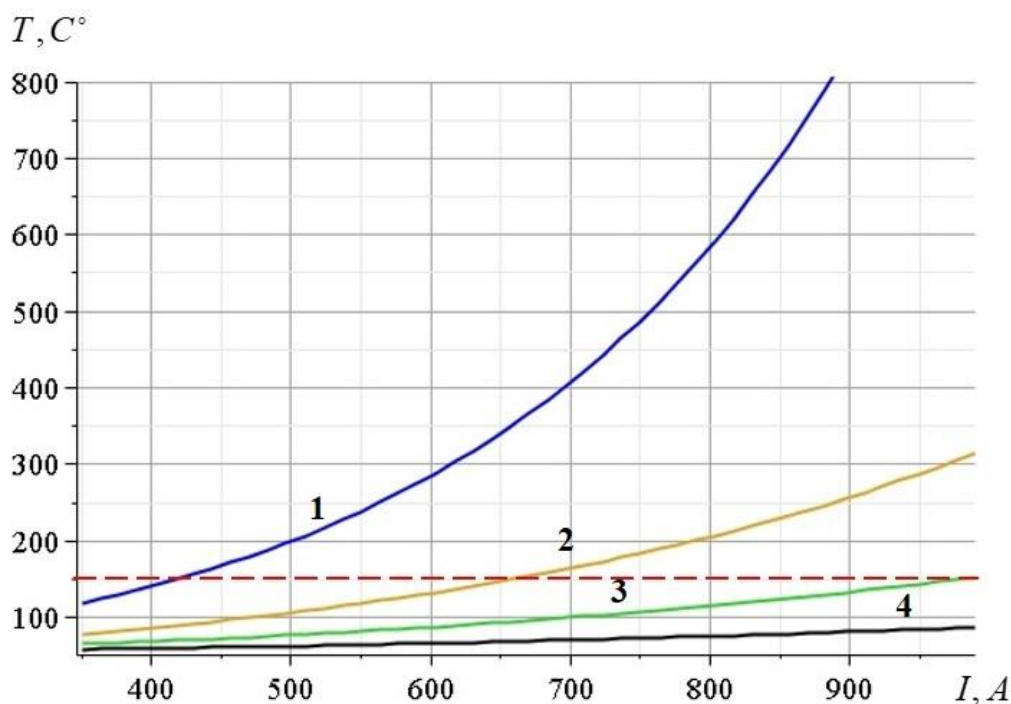


Рис. 1. Залежність температури від електричного струму для електричних провідників марки ВВГ з перерізом: 1 – 2,5 мм²; 2 – 4 мм²; 3 – 6 мм²; 4 – 10 мм²

Виходячи з отриманих залежностей, було визначено значення температури струмовідних жил електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ з різними перерізами при впливі на них електричних струмів короткого замикання різних кратностей. Результати розрахунків представлені у табл. 3, 4.

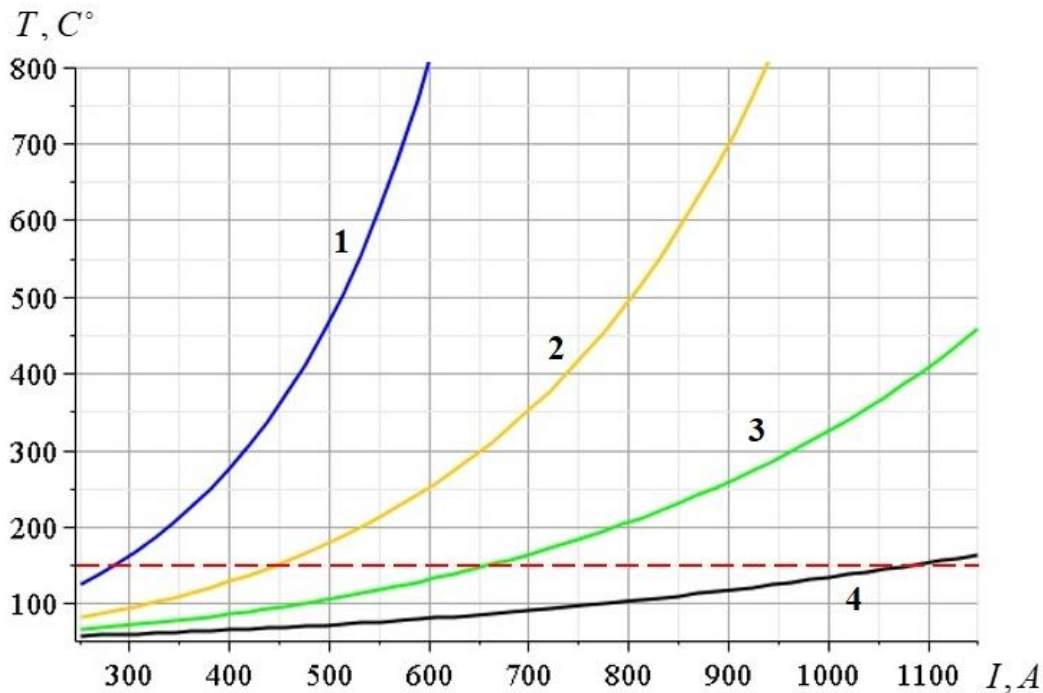


Рис. 2. Залежність температури від електричного струму для електричних провідників марки АВВГ з перерізом: 1 – 2,5 мм²; 2 – 4 мм²; 3 – 6 мм²; 4 – 10 мм²

Табл. 3. Значення температури струмовідних жил електричних провідників ВВГ при короткому замиканні

$I/I_{ном}$ $S, \text{мм}^2$	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	18,0
1,5	57,8	66,5	81,6	103,9	134,9	176,8	232,4	245,6
2,5	56,8	62,4	72,1	85,9	104,8	129,3	160,6	167,8
4	56,5	60,8	68,3	79,2	93,6	112,3	135,6	140,9
6	55,9	58,8	63,6	70,6	79,7	91,3	105,4	108,6
10	55,6	57,4	60,4	64,7	70,4	77,4	85,9	87,73

За результатами розрахунків можна стверджувати, що температура струмовідних жил електричних кабелів марки ВВГ з перерізами 1,5 та 2,5 мм² та марки АВВГ з перерізами 2,5 та 4 мм² при кратностях електричного струму, що приведені у табл. 5, можуть перевищувати температуру плавлення ізоляції цих кабелів.

Табл. 4. Значення температури струмовідних жил електричних провідників АВВГ при короткому замиканні

$I/I_{ном}$ $S, \text{мм}^2$	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	18,0
2,5	57,3	64,4	76,5	94,4	118,8	151,4	195,6	203,5
4	56,7	62,6	72,5	86,9	106,5	132,0	164,7	172,2
6	56,4	60,5	67,5	77,8	91,4	108,9	130,8	135,8
10	55,9	58,7	63,5	70,3	79,2	90,5	104,4	107,5

Табл. 5. Значення величини кратності електричного струму при якому температура струмовідної жили електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ перевищить температуру займання їх ізоляції

S, мм ²	I/Іном
ВВГ	
1,5	12,75
2,5	16,15
АВВГ	
2,5	14,92
4,0	16,46

Результати розрахунків показали, що температура струмовідних жил електричних кабелів марки ВВГ з перерізом 1,5 мм² та марки АВВГ з перерізом 2,5 мм² при великих кратностях електричного струму може досягти температури плавлення ізоляції швидше ніж 0,6 с. Для визначення часу досягнення температури струмовідних жил цих електричних кабелів за формулою (1) були побудовані залежності температури провідника від електричного струму та часу, що представлені на рис. 3.

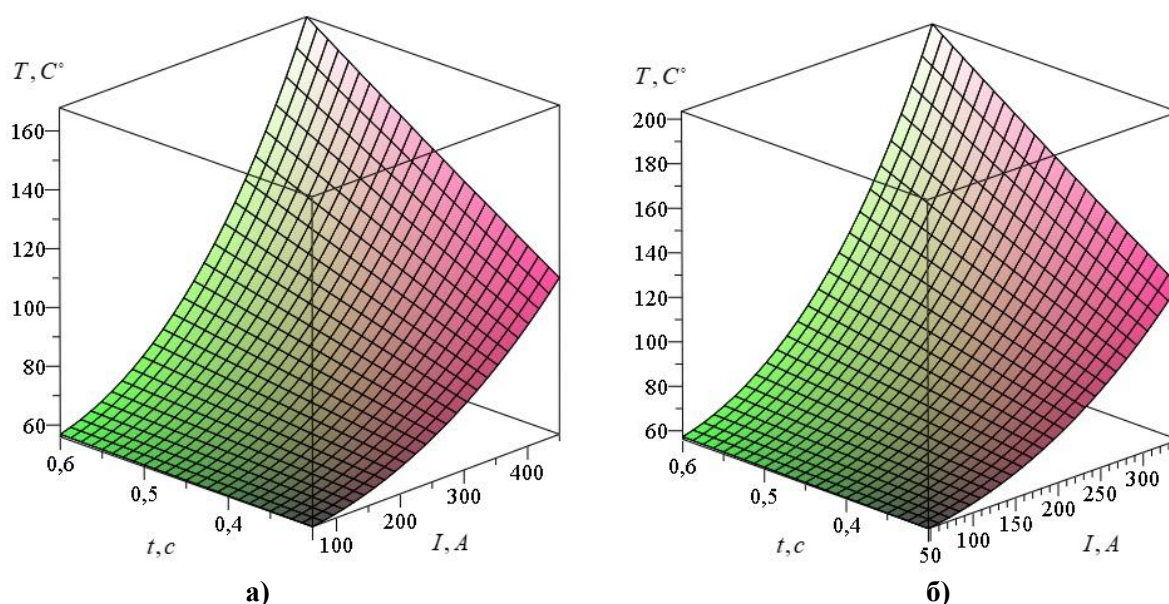


Рис. 3. Залежності температури провідника від електричного струму та часу: а – для кабеля марки ВВГ з перерізом 1,5 мм²; б – для кабеля марки АВВГ з перерізом 2,5 мм²

Із аналізу цих залежностей витікає, що найменший час досягнення температури струмовідної жили кабелю марки АВВГ з перерізом 2,5 мм² температури плавлення його ізоляції складає $t=0,385$ с при кратності струму $I/I_{ном}=18$, а для кабелю марки ВВГ з перерізом 1,5 мм² – $t=0,320$ с при тій же кратності струму.

Із аналізу результатів розрахунків температури електричних кабелів при короткому замиканні, що приведені у табл. 3, 4, можна зробити висновок, що навіть при максимальній кратності струму короткого замикання у електричній мережі із справним апаратом захисту займання проводки не відбудеться.

6. Визначення параметрів електричного провідника у мережі з несправним апаратом захисту

У випадку коли апарат захисту перебуває у несправному стані, тривалість короткого замикання може складати десятки секунд. Температура займання ПВХ складає 482 °С. Час досягнення температури ізоляції електричного кабелю темпе-

ратури електричної жили залежить від його постійної часу. Величина постійної часу нагрівання ізоляції залежить від роду проводки, матеріалу, перерізу та ізоляції провідника та визначається експериментальним шляхом. Досягнення температури ізоляції до температури 500 °С може відбутися за тривалості короткого замикання щонайменше 5 с. При такій тривалості короткого замикання ізоляція кабелю встигає нагрітися до цієї температури.

Виходячи з (1), кратність електричного струму, що протікає у провіднику при короткому замиканні описується виразом:

$$N = \frac{\sqrt{t \ln \left(\frac{T + \beta}{T_{\text{поч}} + \beta} \right) S K \varepsilon}}{t I}, \quad (5)$$

За формулою (5) були побудовані залежності кратності електричного струму при короткому замиканні для електричних кабелів марки ВВГ та АВВГ з різними перерізами від часу, при якому температура ізоляції цих кабелів досягне 500 °С, які представлені на рис. 4, 5 відповідно.

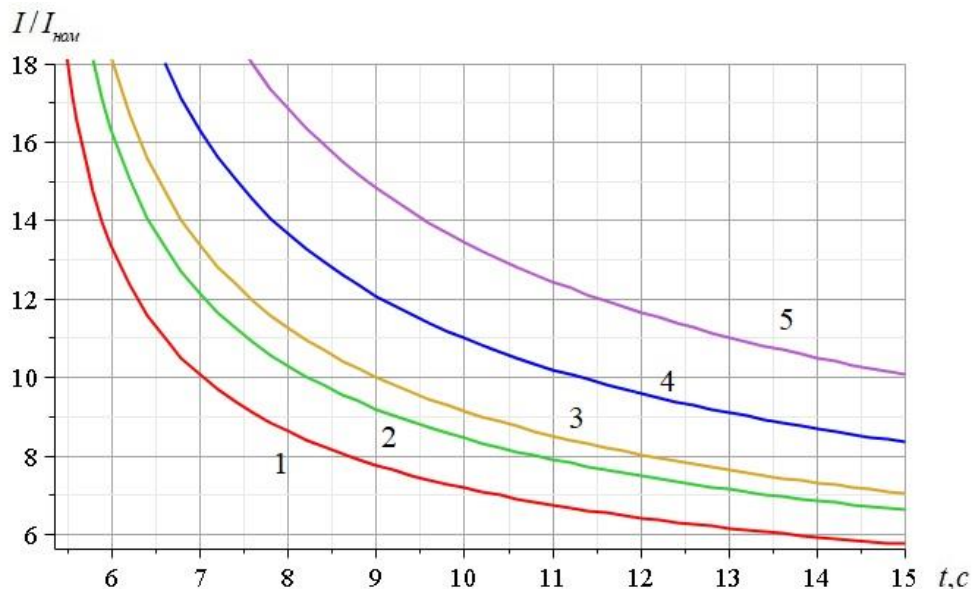


Рис. 4. Залежності кратності електричного струму провідників марки ВВГ від часу: 1 – переріз провідника 10 мм²; 2 – переріз провідника 6 мм²; 3 – переріз провідника 4 мм²; 4 – переріз провідника 2,5 мм²; 5 – переріз провідника 1,5 мм²

З аналізу залежностей, що представлені на рис. 4, 5, визначено мінімальний час досягнення температури ізоляції електричного кабелю температури його займання, а результати представлені у табл. 6.

Табл. 6. Мінімальний час досягнення температури ізоляції електричного кабелю температури займання

АВВГ					
S, мм ²	2,5	4,0	6,0	10,0	
t, с	6,5	6,8	7,6	8,8	
ВВГ					
S, мм ²	1,5	2,5	4,0	6,0	10,0
t, с	5,5	5,8	6,0	6,6	7,6

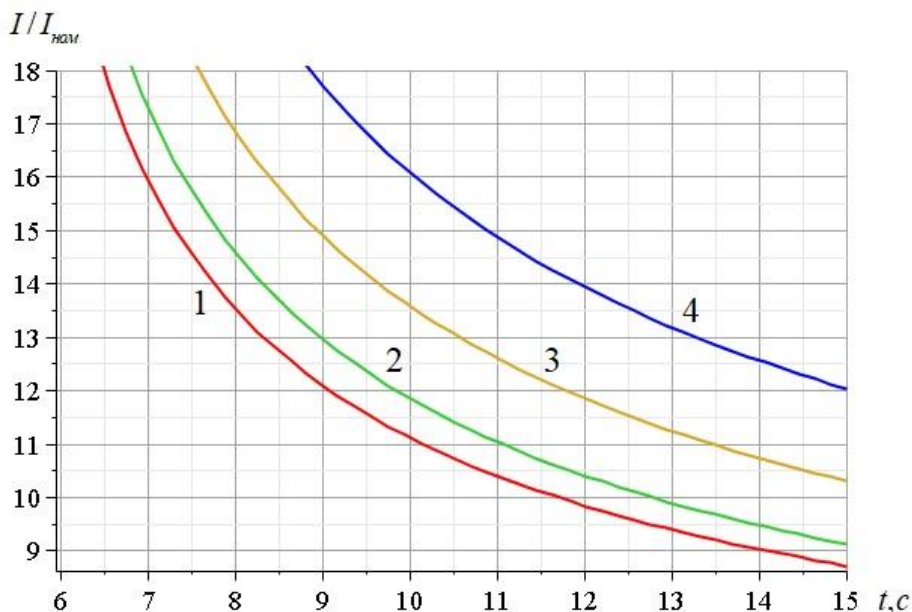


Рис. 5. Залежності кратності електричного струму провідників марки АВВГ від часу: 1 – переріз провідника 10 мм²; 2 – переріз провідника 6 мм²; 3 – переріз провідника 4 мм²; 4 – переріз провідника 2,5 мм²

Слід зауважити, що результати представлені у табл. 6 були розраховані за кратності струму короткого замикання $N=18$.

7. Обговорення результатів визначення параметрів електричного провідника при виникненні короткого замикання у електричній мережі

У діючому нормативному документі не приведена методика визначення температури електричних провідників, а наведені лише номінальні значення електричного струму при яких температура провідника є допустимою, тому неможливо визначити критичні значення електричного струму при яких температура ізоляції електричних провідників досягне температури її займання, що може привести до пожежі. За результатами дослідження можна оцінити можливість утворення пожежі при аварійних режимах роботи електричних мереж для провідників марок ВВГ з перерізами від 1,5 до 10 мм² та АВВГ з перерізами від 2,5 до 10 мм².

У результаті проведеного дослідження було визначено параметри електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ з різними перерізами при виникненні короткого замикання у електричній мережі.

Аналіз залежностей, що представлені на рис. 2, 3 показав, що температура струмовідних жил електричних кабелів марки ВВГ з перерізом 4, 6 та 10 мм² та АВВГ з перерізом 6 та 10 мм² при тривалості короткого замикання 0,6 с не досягне температури плавлення ізоляції цих кабелів. Було визначено мінімальні значення кратності електричного струму короткого замикання при яких температура струмовідних жил електричних кабелів марок ВВГ з перерізом 1,5 та 2,5 мм² та АВВГ з перерізом 2,5 та 4 мм² досягне температури плавлення ізоляції цих провідників.

Було отримано чисельні значення температури струмовідних жил електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ при короткому замиканні, що представлені у табл. 2 та табл. 3. Слід зауважити, що навіть за умови досягнення температури струмовідної жили електричного кабелю температури плавлення його ізоляції при справному апараті захисту процес плавлення не відбудеться. Це пов'язано з малим часом теплового впливу струмовідної жили на ізоляцію кабелю, який

складає не більше 0,6 с. При цьому такий тепловий процес негативно впливає на якість провідника, оскільки може привести до скорішого старіння його ізоляції.

Із аналізу залежностей, що представлені на рис. 5, 6 можна визначити час виникнення пожежі внаслідок займання електричної проводки при короткому замиканні. З аналізу цих залежностей витікає, що навіть при невеликих кратностях струму короткого замикання може відбутися займання ізоляції електричної проводки. У табл. 6 приведено мінімальний час досягнення температури ізоляції електричного кабелю температури його займання для електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ з різними перерізами. Із результатів приведених у табл. 6 можна зробити висновок, що чим більший поперечний переріз струмовідної жили електричного кабелю, тим довше буде відбуватися його нагрів, при однакових величинах кратності електричного струму при короткому замиканні. Також було визначено, що в залежності від кратності електричного струму при короткому замиканні, електричні кабелі з мідними струмовідними жилами нагріваються швидше за електричні кабелі з алюмінієвими жилами того ж перерізу. Це пов'язано із тим, що допустимі значення електричного струму для електричних кабелів з мідними струмовідними жилами перевищують допустимі значення струму для кабелів з алюмінієвими жилами.

Недоліками даного дослідження є те, що отримані результати можуть бути застосовані лише для провідників ВВГ з перерізами від 1,5 до 10 мм² та АВВГ з перерізами від 2,5 до 10 мм², а також відсутністю експериментального підтвердження результатів дослідження, які плануються усунені у майбутніх дослідженнях.

8. Висновки

1. Визначені значення температури електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ з різними перерізами при різних значеннях величини електричного струму, що проходить у провіднику під час короткого замикання, за час спрацьовування апарату захисту. Було визначено, що за 0,6 с температура ізоляції електричних кабелів, що досліджувались не досягне 150 °С, що є мінімальною температурою плавлення ПВХ ізоляції. Тобто при справній роботі апарату захисту виникнення пожежі внаслідок короткого замикання з кратністю електричного струму $I/I_{ном} < 18$ для кабелів марки ВВГ з перерізами 1,5; 2,5; 4,0; 6,0 та 10,0 мм² та АВВГ з перерізами 2,5; 4,0; 6,0 та 10,0 мм² неможливе. При цьому такий тепловий процес негативно впливає на якість провідника, оскільки може привести до скорішого старіння його ізоляції.

2. Визначено значення мінімального часу досягнення температури електричних кабелів марок ВВГ та АВВГ з різними перерізами до 500 °С, що є мінімальною температурою займання ПВХ ізоляції, які представлені у вигляді таблиці. Побудовані залежності кратності електричного струму електричних кабелів марок ВВГ з перерізами 1,5; 2,5; 4,0; 6,0 та 10,0 мм² та АВВГ з перерізами 2,5; 4,0; 6,0 та 10,0 мм² від часу. Визначено, що при виникненні у електричній мережі з несправним апаратом захисту короткого замикання з кратністю електричного струму $I/I_{ном} = 18$ максимальний час займання ізоляції електричних кабелів, що досліджувались складе 8,8 с.

Література

1. Правила улаштування електроустановок. [Чинний від 2017-21-08]. Київ: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017. 754 с. URL:

http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758

2. Duan Gao, Qi Liu. Review of the Research on the Identification of Electrical Fire Trace Evidence. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 135. P. 29–32. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.075

3. Shan-jun Moa, Fang-jie Zhenga, Dong Lianga, Yue Wanga. Image System Establishment of Electrical Fire Short Circuit Melted Mark. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 71. P.114–118. doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.016

4. Mo Shan-jun, Peng Wen-jing, Liang Dong, Long Yu-tao. Impact Analysis to Microstructure Primary Short Circuit Melted Mark under Different Heat Dissipation Condition. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 52. P. 640–644. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.199

5. Application Report. AEC-Q100-012 Short-Circuit Reliability Test Results for Smart Power Switches. Texas Instruments Incorporated, 2019. 13 p. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slva709a/slva709a.pdf?ts=1676499788445>

6. M. Ouyang, M. Zhang, X. Feng, L. Lu, J. Li, X. He, Y. Zheng, Internal short circuit detection for battery pack using equivalent parameter and consistency method, *J. Power Sources*. 2015. Vol. 294. P. 272–284. doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.06.087

7. W. Fang, P. Ramadass, Z. Zhang, Study of internal short in a Li-ion cell-II. Numerical investigation using a 3D electrochemical-thermal model. *J. Power Sources*. 2014. Vol. 248. P. 1090–1098. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.10.004

8. Ying Wu, Wei Gao, Man Di, Chang Zhang Zhao. Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation. *Applied Mechanics and Materials*. 2010. № 34. P. 172–176. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.34-35.172

9. Afanasenko K. Electrical ignition sources for critical infrastructure facilities. 3rd International Conference on Central European Critical Infrastructure Protection. November 15th 2021, Budapest, Hungary. P. 13. URL: <http://i-rzeczoznawca.pl/en/no-1-2021/>

10. Bin Li, Ying Wu, Research on Ignition Characteristic of Short-Circuit Fault. *Advanced Materials Research*. 2013. № 740. P. 496–501. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.740.496

Y. Kalchenko, PhD, Lecturer of the Department

K. Afanasenko, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

V. Lypovyi, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Pikalov, Cadet

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

DETERMINATION OF THE ELECTRICAL CONDUCTOR PARAMETERS IN THE EMERGENCY MODE OF OPERATION

Studies were conducted to determine the parameters of electrical conductors with different cross-sections when a short circuit occurs. The temperature dependences of the current-carrying core of electrical conductors are plotted, depending on the electric current passing through it during a short circuit during the tripping of the protection device. Numerical dependences of the temperature of the current-carrying cores of electric cables with different cross-sections depending on the multiplicity of the electric current are determined, which are presented in the form of a table. The minimum values of the time to reach the temperature of the current-carrying core of electric cables and the ignition temperature of their insulation are determined. It was determined that even if the temperature of the current-carrying core of the electric cable reaches the melting temperature of its insulation, the melting process will not occur if the protection device is in good working order. The parameters of electrical conductors at which ignition of their insulation may occur due to a short circuit are determined. The graphs of the de-

pendence of the multiplicity of the electric current on the time of the short circuit at which the insulation temperature of the electric cables with different cross-sections will reach its ignition temperature are plotted. From the analysis of these dependencies, it follows that depending on the multiplicity of the electric current during a short circuit, electric cables with copper current-carrying cores heat up faster than electric cables with aluminum cores of the same section, which is associated with higher values of permissible currents for conductors with copper cores. It was determined that even at small multiples of the short-circuit current, ignition of the electrical wiring insulation can occur. The minimum values of the parameters of electrical conductors have been determined, at which, in the event of a short circuit in the electrical network with a faulty protection device, ignition of their insulation may occur, which will lead to a fire.

Keywords: conductor temperature, short circuit, electric current multiplicity, current-carrying core temperature

References

1. Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok (Derzhavnyy standart). (2017). Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758
2. Duan, G., Qi, L. (2016). Review of the Research on the Identification of Electrical Fire Trace Evidence. *Procedia Engineering*, 135, 29–32. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.075
3. Shan-jun, M., Fang-jie, Zh., Dong, L., Yue, W. (2014). Image System Establishment of Electrical Fire Short Circuit Melted Mark. *Procedia Engineering*, 71, 114–118. doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.016
4. Shan-jun, M., Wen-jing, P., Dong, L., Yu-tao, L. (2013). Impact Analysis to Microstructure Primary Short Circuit Melted Mark under Different Heat Dissipation Condition. *Procedia Engineering*, 52, 640–644. doi:10.1016/j.proeng.2013.02.199
5. Application Report. AEC-Q100-012 Short-Circuit Reliability Test Results for Smart Power Switches. Texas Instruments Incorporated. (2019), 13. Available at: <https://www.ti.com/lit/an/slva709a/slva709a.pdf?ts=1676499788445>
6. Ouyang, M., Zhang, M., Feng, X., Lu, L., Li, J., He, X., Zheng, Y. (2015). Internal short circuit detection for battery pack using equivalent parameter and consistency method, *J. Power Sources*, 294, 272–284. doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.06.087
7. Fang, W., Ramadass, P., Zhang, Z. (2014). Study of internal short in a Li-ioncell-II. Numerical investigation using a 3D electrochemical-thermal model. *J. Power Sources*, 248, 1090–1098. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.10.004
8. Ying, Wu, Wei, G., Man, D., Chang, Zh. (2010). Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation. *Applied Mechanics and Materials*, 34, 172–176. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.34-35.172
9. Afanasenko, K. (2021). Electrical ignition sources for critical infrastructure facilities. 3rd International Conference on Central European Critical Infrastructure Protection, November 15, 2021, Hungary, 13. Available at: <http://i-rzeczoznawca.pl/en/no-1-2021/>
10. Bin, L., Ying, W. (2013). Research on Ignition Characteristic of Short-Circuit Fault. *Advanced Materials Research*, 740, 496–501. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.740.496

Надійшла до редколегії: 06.03.2023

Прийнята до друку: 12.04.2023