

Експериментальне дослідження параметрів пожежної небезпеки контактних з'єднань в електропроводках

Experimental study of fire hazard parameters of contact connections in electrical wires

Олег Назаровець^A

Corresponding author: к.т.н., доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, e-mail: o.nazarovets@ldubgd.edu.ua, ORCID:0000-0003-4532-9259

Oleg Nazarovets^A

Corresponding author: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Supervisory and Preventive Activities and Fire Automation, e-mail: o.nazarovets@ldubgd.edu.ua, ORCID:0000-0003-4532-9259

Ростислав Перерва^A

курсант інституту пожежної і техногенної безпеки, e-mail: ruslanpererva84@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9060-5923

Rostyslav Pererva^A

cadet of the Institute of Fire and Technological Safety, e-mail: ruslanpererva84@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9060-5923

Юрій Рудик^A

д.т.н., доцент кафедри цивільного захисту та протимінної діяльності, e-mail: rudra@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7372-5876

Yurii Rudyk^A

Dr of Technical Sciences, Associate Professor of the Department, e-mail: rudra@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7372-5876

Оксана Кириченко^B

д.т.н., професор кафедри пожежно-профілактичної роботи, e-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in, ORCID: 0000-0002-0240-1807

Oksana Kyrychenko^B

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department, e-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in, ORCID: 0000-0002-0240-1807

Василь Янків^C

к.т.н., викладач відділення інженерного та електротехнічного забезпечення, e-mail: Jankivvasyl@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0729-3072

Vasyl Yankiv^C

PhD. in Engineering, Lecturer at the Department of Engineering and Electrical Engineering Support, e-mail: Jankivvasyl@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0729-3072

^A Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

^A Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

^B Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, м. Черкаси, Україна

^B Cherkasy Fire Safety Institute named after the Heroes of Chernobyl National Center of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

^C Військовий коледж сержантського складу Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, Україна

^C Sergeant Military College of the Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, Lviv, Ukraine

Received: March 27, 2024 | **Revised:** April 25, 2024 | **Accepted:** April 30, 2024

DOI: 10.33445/sds.2024.14.2.15

Мета роботи: є проведення експериментального дослідження параметрів пожежної небезпеки контактних з'єднань в електропроводках.

Purpose: is to conduct an experimental study of the fire hazard parameters of electrical wiring connections.

Метод: математичний метод.

Method: mathematical method.

Результати дослідження: На основі отриманих даних можна спостерігати, як досягається зниження показників пожежної небезпеки контактних з'єднань в електропроводках кожного виду в залежності від запропонованого сценарію та монтажу загалом.

Research results: Based on the obtained data, it is possible to see how the reduction of fire hazard indicators of contact connections in electrical wiring of each type is achieved, depending on the proposed scenario and installation in general.

Тип статті: дослідницька.

Papertype: research.

Ключові слова: пожежна небезпечність, ймовірність пожежі, перехідний опір, низьковольтні мережі, захист, показник ризику, електропроводка, пожежна безпека.

Key words: fire hazard, probability of fire, transient resistance, low-voltage networks, protection, risk indicator, wiring, fire safety.

Вступ

Сьогодення вимагає впровадження та улаштування на сучасних підприємствах автоматизацію технологічного процесу за допомогою різного електронного та електричного обладнання. Вихід з ладу одного давача призводить до зупинки технічного процесу і багатотисячних втрат. Таке обладнання є вразливим до пожежонебезпечних режимів роботи, які виникають з різних причин, а також при ударі блискавки.

Теоретичні основи дослідження

На сучасних об'єктах промисловості широко використовується різне обладнання технологічного процесу за участю різного електронного та електричного обладнання, так само, як і побут людини в житлі насичений електрообладнанням та електромережами. На підприємствах вихід з ладу одного пристрою призводить до зупинки технічного процесу і багатотисячних втрат. Таке обладнання є чутливим до перевантаження, перенапруги, зростання перехідних опорів які виникають з різних причин [1-5]. Небезпека пожежі в електроустановках виникає не лише при короткому замиканні, а й при інших аварійних режимах роботи електроустановок, а саме: перенапруга, великі перехідні опори, витік струму та винесення напруги та інші [6-8]. Імпульсна перенапруга – це короткочасне збільшення напруги понад допустимого значення. Особливість – дуже швидке збільшення напруги (8-10 мікросекунд). Існує два види імпульсної перенапруги: комутаційна, яка виникає при перехідних процесах в мережі, та атмосферна, виникають при ударах блискавки в лінії електропередач (ЛЕП), [9-11]. Місцями прояву пожежонебезпеки імпульсної перенапруги найчастіше є контактні з'єднання з великим перехідним опором. Перехідні опори мають місце за будь-яких способів з'єднання провідників один з одним. За умови належного контакту і правильного з'єднання перехідні опори незначні і практично не відрізняються від опорів інших ділянок електричного кола. З часом перехідний опір (ПО) контактів збільшується, а у випадках їх порушення в місцях з'єднання різко зростає. Такі події виникають у будь-якій мережі і відбуваються з причин різних випадкових чинників.

Постановка проблеми

Значна кількість пожеж в електропроводках пояснюється такими обставинами: незадовільний технічний стан електричних мереж, які експлуатуються, низька якість електричних пристроїв і невідповідність їх до стандартів безпеки, відсутність ефективних служб і систем контролю безпечної експлуатації електропроводок низької напруги, недотримання правил пожежної безпеки при експлуатації побутової техніки та низька ефективність електричного захисту від усіх аварійних режимів.

До останнього часу діючими Правилами будови електроустановок не розглядаються питання контролю стану електричних мереж до 380В під час експлуатації, та зокрема, перехідного опору контактних з'єднань. Однак важливість обмеження струмових втрат з точки зору ефективності та зменшення виділення тепла у проводці для підвищення пожежної безпеки вважається загальноприйнятим у світі [12]. Ділянки з великими ПО сильно нагріваються, що призводить до займання ізоляції, іскріння і навіть до появи електричної дуги.

Всі ці явища являють значну пожежну небезпеку і повинні бути відключені системою захисту. Однак навіть за умов справності запобігти ненормальним режимам роботи за допомогою відомих пристроїв захисту не вдається, захист не забезпечується з ряду причин [13-15].

Виходячи з вищевикладеного, авторами вбачається необхідним обґрунтування і проведення експериментального дослідження задля встановлення параметрів пожежної безпеки контактних з'єднань в електропроводках.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Оцінка пожежної безпеки електротехнічних виробів (далі – ЕТВ) включає два напрямки [1, 16]. За першим напрямком оцінюють можливість виникнення пожежі від виробу, за другим – наслідки його горіння. Для визначення пожежної безпеки електротехнічних виробів обидва напрямки передбачають використання детерміністичних та імовірнісних методів. Перевага з цих методів надається імовірнісним, тому що їх використання дозволяє отримувати узагальнену кількісну оцінку пожежної безпеки електротехнічних виробів і об'єктів, на яких вони використовуються, і приймати на підставі цієї оцінки найбільш оптимальні рішення щодо запровадження

протипожежних заходів [12, 17]. Одним із основних завдань при оцінюванні пожежної небезпеки електротехнічних виробів є зменшення до мінімуму імовірності впливу на людей та матеріальні цінності небезпечних чинників пожежі [1, 18]. Зменшення до мінімуму цієї імовірності забезпечується шляхом запобігання утворенню полум'я, вибуху, надмірної температури, диму, токсичних і корозійних продуктів горіння в небезпечних кількостях, а також інших небезпечних чинників, які можуть утворюватися при пожежі від електротехнічних виробів. Теплова дія електричного струму – це екзотермічний процес перетворення кінетичної енергії носіїв зарядів у внутрішню енергію при зіткненні їх з атомами та молекулами провідників. Класична теорія електропровідності металів розглядає вільні електрони металів як матеріальні точки і для опису їх руху застосовують закони Ньютона.

Загальновідомі закони електротехніки дають підстави навести такий ланцюжок перетворень для опису процесу та визначення вагомості показників пожежної небезпеки ділянок електричного кола зі струмом. Теплові коливання іонів кристалічних ґраток перешкоджають направленому руху електронів, що зумовлює опір провідника електричному струму. Опір провідника залежить від його матеріалу, довжини і перерізу: $R = \rho l / S = l / \gamma S$, де ρ – питомий опір провідника; γ – питома електропровідність. Густина струму j в провіднику залежить від концентрації вільних електронів n_0 і середньої швидкості v_c їх спрямованого руху:

$$j = en_0 v_c \quad (1)$$

де e – заряд електрона.

Звідси можна зробити висновок, що при замиканні електричного кола кожний вільний електрон металу під дією сил електричного поля починає рухатися з прискоренням $a = Ee/m$, де E – напруженість електричного поля; m – маса електрона.

До зіткнення з іоном ґратки електрон рухається впродовж часу вільного пробігу τ . Максимальна швидкість електрона перед зіткненням з іоном $v_m = a\tau$. Час вільного пробігу електрона залежить від середньої довжини вільного пробігу l_c і середньої швидкості u_c його теплового руху $\tau \approx l_c / u_c$. Тоді максимальна швидкість спрямованого руху електрона $v_m = \frac{eEl_c}{mu_c}$, а середня швидкість спрямованого руху електрона $v_c = \frac{eEl_c}{2mu_c}$.

Підставляючи значення v_c у формулу (1), одержуємо диференціальну форму закону Ома

$$j = \frac{e^2 n_0 l_c}{2mu_c} E, \quad j = \gamma E, \quad (2)$$

де $\gamma = e^2 n_0 l_c / 2mu_c$.

Інтегральну форму закону Ома для ділянки кола отримаємо інтегруванням густини струму по перерізу провідника

$$I = \int_0^S j dS = \gamma ES = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l} S = \frac{U}{\rho l / S} = \frac{U}{R}, \quad (3)$$

де U – напруга на ділянці кола.

Зіштовхуючись із іоном кристалічної ґратки, електрон передає йому свою кінетичну енергію, знов прискорюється електричним полем й зіштовхується з іншим іоном тощо. Нагрівання провідника струмом зумовлене передачею енергії електронами іонам кристалічної ґратки. Густина теплової потужності струму:

$$w = \frac{mv_m^2}{2} n_0 z_c, \quad (4)$$

де z_c – середнє число співударянь електрона з іонами за одну секунду:

$$z_c = \frac{u_c}{I_c}$$

Підставляючи замість v_m і z_c їх значення до виразу густини теплової потужності струму (4), одержимо диференціальну форму закону Джоуля-Ленца

$$w = \frac{e^2 n_0 \ell_c}{2m u_c} E^2, \quad (5)$$

або інакше – $w = \gamma E^2$.

Інтегральну форму закону Джоуля-Ленца отримуємо інтегруванням густини теплової потужності струму за часом проходження струму і за об'ємом провідника V .

$$Q = \int_0^V \int_0^t w dV dt = \gamma E^2 V t = I^2 R t. \quad (6)$$

- де Q – кількість теплоти, яка виділяється у провіднику;
 I – сила струму в колі;
 R – активний опір;
 t – час проходження струму.

Таким чином, в обох виразах (4) і (6) спільною пасивною величиною є електричний опір. Встановлення його значення є важливою задачею для контролю рівня безпеки багатьох технічних систем (і не лише електричних).

Виникнення пожежі внаслідок зростання перехідних опорів – випадкова подія. Ймовірність її появи прогнозується за результатами обробки статистичних даних і розрахунків або вимірювань параметрів якості електромережі об'єкта. Очікувана кількість пожеж від ПО може бути від кількох сотень до тисячі за рік по Україні [1].

Значення опору окремих ділянок струмопровідного кола (або шляху витоку струму на провідні частини) в електроустановках може значно збільшуватися внаслідок таких процесів [7, 19-22]:

- виконання монтажу електропроводок і з'єднань з порушенням правил і технологічних норм (навісне скручування жил, перекошування контактних пластин, недостатня сила стиску контактів під час монтажу тощо);
- підвищення напруженості в матеріалі контактів і їх пластичної деформації через переохолодження болтових з'єднань;
- ослаблення, розхитування та порушення щільності болтових контактів через вібрацію, різницю коефіцієнтів температурного розширення матеріалу болтів і шин;
- зміни діаметру жил проводів та кабелів через недотримання значення радіуса їх згину по будівельних конструкціях або через механічний натяг, на який вони не розраховані;
- корозії матеріалів під впливом вологи та агресивних середовищ або електрохімічних процесів внаслідок використання різномірних металів контактів;
- дії тепла із зовні, впливу кліматичних або виробничих чинників, вологого або хімічно активного середовища на окислення контактів;
- від'єднання від електричної мережі електрообладнання під навантаженням, що призводить до електродугового підгоряння контактних поверхонь;
- погіршення електропровідності через утворення твердих оксидних плівок, їх забруднення маслянистими нашаруваннями і пилом;
- механічного пошкодження контактних з'єднань;
- зменшення опору ізоляції в результаті зазначених вище причин, наслідком чого є коротке замикання або струми витоку в місцях руйнування ізоляції через великий перехідний опір.

В експериментальних дослідженнях розглянуто найпоширеніші види з'єднання: скрутка (1), опресування (2), зварювання (3), пайка (4), клеми (5), болтове з'єднання (6), самозатискачі (7) (рис. 1).

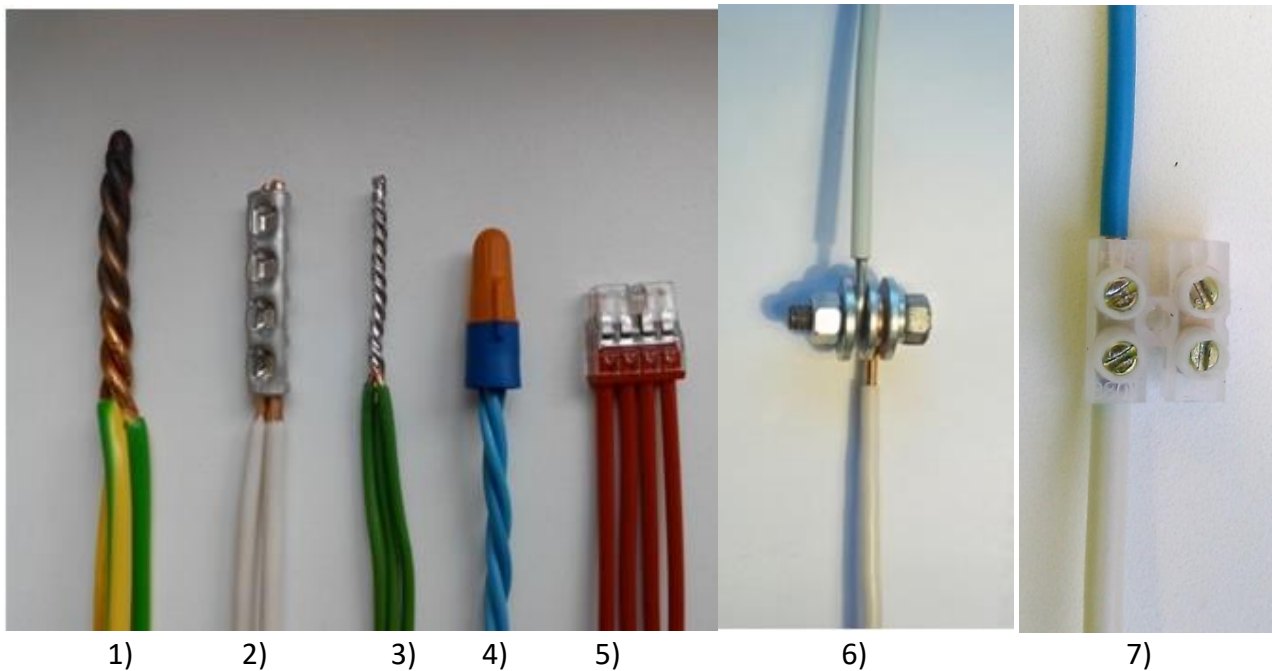


Рисунок 1 – Способи з'єднання контактів електропроводів

Небезпека ПО збільшується тим, що місця їх утворення важко виявити, а пристрої захисту при їх зростанні до пожежонебезпечних значень не спрацьовують. Зокрема, режим дугового замикання через великий перехідний опір між фазним і нульовим робочим провідниками звичайними запобіжниками не відсікається, але уже запропонований метод відключення пристроєм захисту, який реагує на високочастотні складові цього струму [14].

Результати

З цією метою авторами розроблені методика вимірювань та експериментального встановлення залежностей показників контактних з'єднань, які враховують їх температуру, потужність, вид з'єднань, величину перехідних опорів (6), якість жил та ізоляції [23-25]. В основу їх використання покладено математичне моделювання процесу функціонування системи електропроводок із врахуванням її часу експлуатації та застосування аналітичних виразів, які забезпечують можливість верифікації стану контактних з'єднань [26].

Початковим дослідженням показників пожежної безпеки було експериментальне визначення перехідного опору в місцях контактних з'єднань різними способами (табл. 1).

У таблиці 1 подані результати усереднених значень вимірювання активної складової значення електричного опору десяти "свіжих" з'єднань кожного виду, які не піддавались струмовим навантаженням, а також часовому впливу. З результатів вимірювань можемо зробити висновок, що наближено всі види з'єднань мають близькі значення за умови правильного монтажу. Виміряний опір провідника такої ж конструкції та довжини, але без з'єднання показав результат 0,006 Ом. Теплова дія електричної енергії великих перехідних опорів проявляється у вигляді інтенсивного іскріння в ослаблених, окислених контактних з'єднаннях, перегрівання контактів ділянок електромереж, електрообладнання, двигунів і апаратів), або винесення напруги на металеві конструкції і споруди.

Таблиця 1 – Результати вимірювання перехідних опорів контактних з'єднань за видами (рис.1)

№ з/п	З'єднання	Опір, Ом	±Δ, МОм
1	Скрутка	0,012	0,25
2	Опресування	0,012	0,25
3	Зварювання	0,013	0,25
4	Паяння	0,011	0,25
5	Клеми	0,014	0,25
6	Болтове з'єднання	0,014	0,25
7	Самозатискачі	0,015	0,28

Пожежна небезпека електротехнічних виробів у цілому в Україні оцінюється за Настановами, викладеними в ДСТУ ІЕС 60695-1-1:2002 [18, 25, 27]. Термін “електротехнічний виріб” (ЕТВ) у ньому охоплює матеріали, складові частини або повністю готові вироби.

Розроблення методів випробувань ЕТВ на пожежну небезпеку поширюється на такі з них, які мають застосовуються при визначенні матеріальних збитків (шкоди), яка спричиняється здоров'ю і життю людей, тваринам або майну.

Вимоги та рекомендації щодо зменшення імовірності виникнення пожежі при роботі електрообладнання і складових частин, в основному, впроваджуються під час його проектування. На цій стадії передбачається і найширше застосування вимог стандартів.

Контроль і перевірка шляхом вимірювань і випробувань щодо вибору відповідних матеріалів та конструкцій для електрообладнання також досягається мета запобігання займанню частин, які перебувають під напругою, а якщо це відбувається, то вогонь локалізується переважно в межах внутрішнього простору ЕТВ. Разом з тим, час експлуатації стаціонарного електрообладнання після його встановлення і монтажу досить значний, і становить, як правило, більше 15 років. Під час цього періоду виникають не передбачувані відмови, можливою є експлуатація з порушенням норм та випадки аварійної роботи. При цьому і стаються пожежі, причиною виникнення яких є займання електричного походження в електроустановках.

Застосування розрахункових [7, 17, 28] математичних моделей у вигляді систем лінійних диференціальних рівнянь дозволяють визначити частоту (ймовірність) виникнення у мережі значних перехідних опорів у контактних з'єднаннях. Як наслідок, за таким показником стає можливим встановити необхідну для запобігання термінального стану ділянок внутрішніх електромереж періодичність контролю величини опору побутових електричних мереж до 380В.

Розрахунок імовірності виникнення на протязі одного року лише зростання перехідного опору контактних з'єднань $P_i(\text{ПП}_{\text{ПОКЗ}})$ електроустановок однофазних двопровідних (трипровідних із захисним провідником) електромереж низької напруги можна проводити за таким співвідношенням:

$$P_i(\text{ПП}_{\text{ПОКЗ}}) = (1,9 \cdot 10^{-6} \sum_{j=1}^m \tau_j) \cdot (2 - 10^{-6} \sum_{j=1}^m \tau_j) \Leftrightarrow \Leftrightarrow \Leftrightarrow, \quad (7)$$

Застосування даного методу залежить від наявності інформації про кількість реалізацій α_{n-i} причини в i -му елементі об'єкту m за аналізований період часу та час існування α_{n-i} причини появи k -го виду горючої речовини при j -й реалізації τ_j протягом аналізованого періоду часу.

Чисельні значення необхідних для розрахунків імовірності виникнення пожежі показників надійності різних технологічних апаратів, систем управління, контролю, зв'язку і т. п., що використовуються при проектуванні об'єкту, або початкові дані для їх розрахунку вибирають у відповідності з [17-21], з нормативно-технічної документації, стандартів і паспортів на елементи об'єкту. В умовах експлуатації отримання необхідних відомостей потребує збору і обробки статистичних даних про відмови аналізованих елементів, що є доволі тривалим і громіздким процесом.

Таким чином, визначення кількості реалізацій зростання перехідного опору контактних з'єднань в умовах експлуатації доцільно проводити шляхом вимірювання опору струмопровідного кола ділянок електромереж низької напруги. Авторами розроблена методика проведення вимірювань та запропоновано структуру аналізатора опору відповідних мереж.

Таблиця 2 – Зміна температури і сили струму з часом в залежності від виду з'єднання проводів

Час, с	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А
	Скрутка (Al-Cu)		Скрутка (Al-Cu)		Скрутка (Al-Cu)		Скрутка (Al-Cu)	
0	28,6	75,8	28,5	53,0	22,3	67,2	25,8	55,6
30	100,3	63,6	105,9	48,5	168,0	64,5	151,3	53,6
60	136,3	59,6	133,6	45,8	212,0	56,1	172,1	50,6
90	156,0	57,4	151,2	44,4	255,2	41,9	179,1	48,5
120	163,9	56,4	161,6	43,5	328,3	44,3	185,9	47,8
150	168,9	56,1	170,1	42,7	279,0	53,6	187,9	46,4
180	170,3	56,2	176,4	42,2	255,3	54,3	175,0	46,1
210	171,8	55,4	181,8	41,6	252,7	53,3	189,2	45,8
240	170,9	55,6	186,2	41,4	298,9	43,7	203,0	46,5
270	169,8	55,4	193,2	41,0	324,5	41,2	198,3	42,6
300	173,1	56,0	193,5	41,0	338,2	44,9	208,5	47,0

Таблиця 3 – Зміна температури і сили струму з часом в залежності від виду з'єднання проводів

Час, с	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А
	Скрутка (Cu-Cu)		Скрутка (Cu-Cu)		Пайка (Cu-Cu)		Пайка (Cu-Cu)	
0	16,3	64,3	20,1	88,6	17,3	89,1	18,7	77,4
30	96,5	56,9	122,9	66,7	73,9	71,1	77,4	66,0
60	132,0	53,1	152,6	62,9	151,9	65,4	114,3	61,4
90	154,4	52,2	157,5	61,3	166,6	63,6	131,2	59,7
120	163,0	51,0	161,3	60,8	173,2	63,6	139,0	58,8
150	164,4	51,0	160,6	60,8	171,4	63,0	143,8	58,8
180	170,9	51,0	157,8	60,6	173,0	63,1	144,0	58,6
210	168,7	51,0	157,6	60,5	172,5	62,8	147,0	58,7
240	167,8	51,0	160,7	60,5	172,6	62,7	146,5	58,4
270	166,3	51,0	159,8	60,8	173,1	62,7	147,8	58,6
300	168,2	51,0	161,1	60,6	172,9	62,6	148,6	58,3

Таблиця 4 – Зміна температури і сили струму з часом в залежності від виду з'єднання проводів

Час, с	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А
	Пайка (Cu-Cu)		WaGo (Cu-Cu)		WaGo (Cu-Cu)		WaGo (Cu-Cu)	
0	18,5	81,8	28,0	72,0	23,1	58,0	22,6	69,7
30	67,8	67,2	54,0	58,0	78,1	54,5	70,4	58,5
60	107,4	61,7	66,7	55,0	103,9	50,8	94,7	54,9
90	131,9	60,2	80,1	53,8	118,9	49,7	110,0	53,3
120	139,1	59,4	89,8	53,0	128,8	48,9	120,2	52,6
150	153,6	59,1	96,6	53,0	135,1	48,8	128,2	52,2
180	155,8	59,0	101,5	52,7	139,1	48,6	133,7	52,2
210	157,7	58,9	104,8	52,9	141,8	48,5	138,3	51,9
240	153,1	59,0	107,0	52,7	143,8	48,5	140,3	52,1
270	154,0	59,0	108,8	52,8	144,8	48,4	143,2	51,8
300	149,0	59,1	110,1	52,6	145,5	48,7	144,5	51,9

Таблиця 5 – Зміна температури і сили струму з часом в залежності від виду з'єднання проводів

Час, с	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А
	Вилка-болт (Cu-Cu)		Вилка-болт (Cu-Cu)		Вилка-болт (Cu-Cu)		Вилка-болт (Cu-Cu)	
0	28,0	66,6	26,8	74,5	30,0	70,1	27,5	70,7
30	54,4	60,0	42,1	65,1	46,8	65,1	52,1	62,7
60	72,6	57,3	55,1	61,4	62,1	59,9	73,3	59,2
90	87,4	56,0	65,6	59,3	73,8	58,3	89,1	57,6
120	97,8	55,1	75,0	58,5	82,5	57,0	100,9	56,1
150	105,2	54,5	81,5	57,7	89,0	56,5	109,1	56,4
180	110,5	54,3	89,5	57,9	94,1	56,3	114,5	55,8
210	114,5	54,1	93,3	57,3	97,3	55,9	118,2	55,5
240	116,2	54,0	97,0	57,3	100,8	55,7	121,5	55,6
270	119,1	54,0	98,4	57,2	102,0	55,8	123,6	55,7
300	120,2	54,0	99,2	57,5	103,3	55,7	123,6	55,4

Таблиця 6 – Зміна температури і сили струму з часом в залежності від виду з'єднання проводів

Час, с	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А	Температура, °C	Струм, А
	ПВХ болт (Cu-Cu)		ПВХ болт (Cu-Cu)		ПВХ болт (Al-Cu)		ПВХ болт (Al-Cu)	
0	25,0	52,0	20,4	125,5	27,5	100,6	25,4	107,1
30	40,2	52,0	78,3	105,5	64,2	82,0	35,3	85,3
60	46,0	50,4	118,3	97,1	83,8	74,9	42,9	77,9
90	79,2	48,6	148,0	94,6	104,9	72,8	49,5	74,4
120	86,4	48,4	170,8	93,0	113,0	70,8	56,8	73,0
150	89,1	48,5	176,5	93,0	123,3	70,6	60,7	72,3
180	91,4	48,5	187,8	92,3	127,4	70,0	112,3	72,5
210	94,0	49,0	196,9	92,0	132,8	70,2	110,4	72,2

Час, с	Температура, °С	Струм, А	Температура, °С	Струм, А	Температура, °С	Струм, А	Температура, °С	Струм, А
	ПВХ болт (Cu-Cu)		ПВХ болт (Cu-Cu)		ПВХ болт (Al-Cu)		ПВХ болт (Al-Cu)	
240	95,3	48,9	202,1	91,4	141,2	69,9	166,9	72,3
270	96,8	48,6	206,4	91,4	144,7	70,3	169,6	72,3
300	97,1	49,0	208,7	91,3	145,9	69,8	173,2	72,2

Таблиця 7 – Зміна температури і сили струму з часом в залежності від виду з’єднання проводів

Час, с	Температура, °С	Струм, А	Температура, °С	Струм, А	Температура, °С	Струм, А	Температура, °С	Струм, А
	Гільзування(Cu-Cu)		Гільзування(Al-Cu)		Зварка(Cu-Cu)		Зварка(Cu-Cu)	
0	20,6	85,3	21,7	128,4	19,1	74,4	20,6	74,2
30	45,3	69,5	47,4	108,1	118,2	63,5	104,3	64,7
60	73,4	64,5	77,2	99,8	127,6	59,7	118,3	60,8
90	99,8	62,5	98,1	95,3	133,3	58,2	132,2	59,3
120	119,7	61,4	100,2	93,8	136,4	57,4	127,8	58,6
150	129,5	61,0	106,2	92,9	118,9	57,3	125,8	58,8
180	131,4	61,1	123,1	91,3	154,5	56,8	123,6	58,3
210	140,3	60,7	128,3	89,9	157,4	57,1	120,6	58,4
240	145,8	60,9	133,3	89,3	156,7	59,9	115,8	58,2
270	147,5	60,6	134,5	89,1	157,1	57,1	172,7	58,4
300	149,1	60,7	137,1	88,4	155,8	57,0	172,8	58,1

Використовуючи ці дані значень температури і сили струму з таблиць 2-7 проведено їх опрацювання та візуалізація у графіках, що дає можливість виявляти закономірності та аномалії поведінки досліджуваних елементів електропроводок в умовах експлуатації. Практичним наслідком дослідження можуть бути розробки рекомендацій виробникам щодо вибору матеріалів, типів та конструкцій контактних з’єднувачів, коннекторів та клемних коробок, відштовхуючись від значень які подані в Табл. 8.

Таблиця 8 – Кількість проведених дослідів та види з’єднань

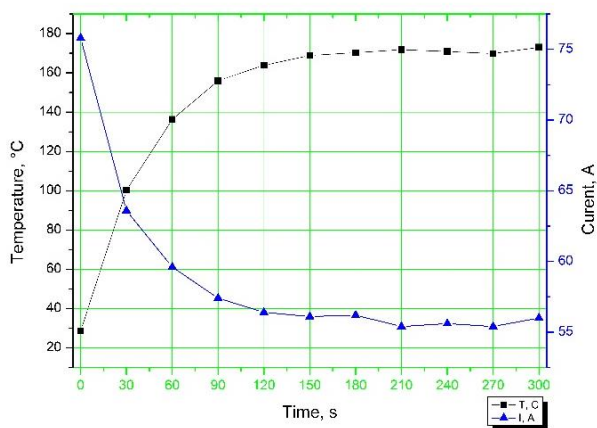
К-сть дослідів	S перерізу, мм ²	Матеріал жил	Матеріал контакту	Види з’єднань
10	1,5 - 2,5	Мідь-Мідь	Мідь	Скрутка
10	2-4,0/1,5-2,5	Алюміній-мідь	Алюміній-мідь	Скрутка
10	1,5 - 2,5	Мідь-Мідь	Олово	Пайка
10	1,5 - 2,5	Мідь-Мідь	Мідь	Зварювання
10	1,5 - 2,5	Мідь-Мідь	Латунь	ПВХ-болт
10	2-4,0/1,5-2,5	Алюміній-мідь	Латунь	ПВХ-болт
10	1,5 - 2,5	Мідь-Мідь	Латунь	Вилка-болт
10	1,5 - 2,5	Мідь-Мідь	Латунь	Гільзування
10	2-4,0/1,5-2,5	Алюміній-мідь	Латунь	Гільзування
10	1,5 - 2,5	Мідь-Мідь	Мідь	WaGo

На підставі проведеного аналізу (рис. 2-5) для оцінки пожежної небезпеки зростання перехідного опору контактних з’єднань електроустановок визначено методику та залежні параметри для розрахунку імовірності виникнення пожежі в пожежонебезпечному об’єкті на

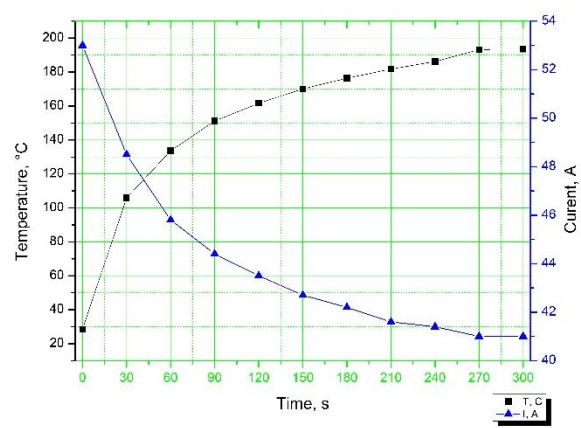
етапах його проектування, будівництва і експлуатації, як уже проведено експериментальне дослідження конекторів при короткому замиканні [29]. Застосування заходів контролю електропроводок і засобів захисту знизить ризик пожежі через виникнення високих перехідних опорів.

Пожежна безпека виробу та його елементів повинна забезпечуватися як у нормальному, так і в аварійному режимах роботи. З цією метою зниження пожежної небезпеки вимагає серед інших заходів доведення величини перехідного опору в контактних з'єднаннях до рівня, встановленого стандартами на конкретні вироби. Також значення електричної міцності ізоляції та значення її опору повинні вказуватися у стандартах і технічних умовах на конкретні види виробів.

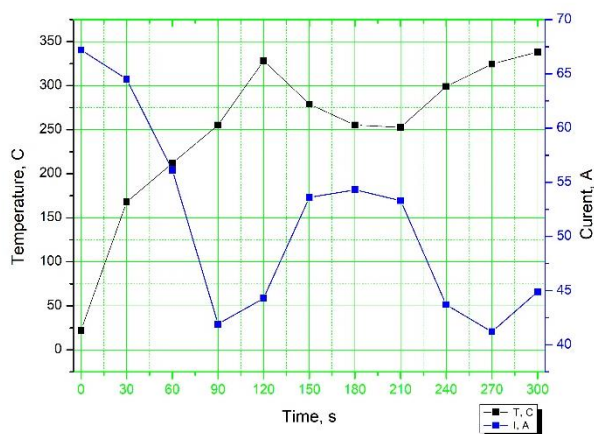
Нехтування високим ризиком небезпечної події призводить до надмірної шкоди і більших непоправних втрат, з якими особа чи громада не зможе досягати сталого розвитку. Тому саме комплексний, системний підхід у досягненні безпеки, починаючи із стадії оцінювання, має враховувати як характеристики небезпеки, у т. ч. пожежної у відповідних елементах інсталяцій об'єктів, так і особистий, індивідуальний ризик загибелі чи ушкодження.



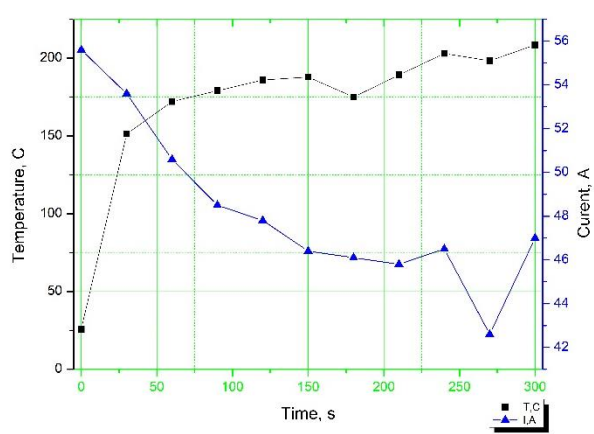
a)



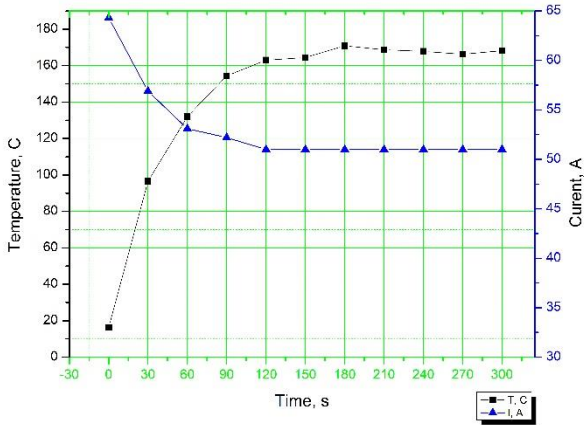
б)



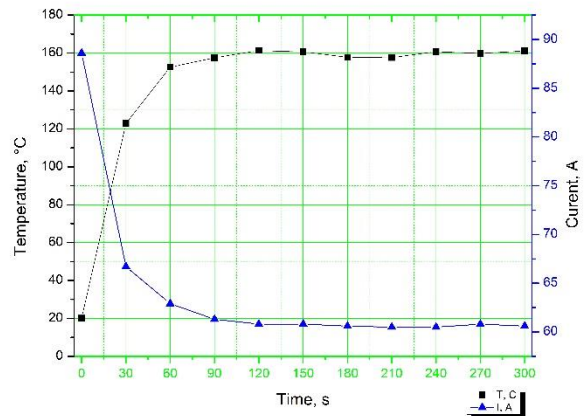
в)



г)

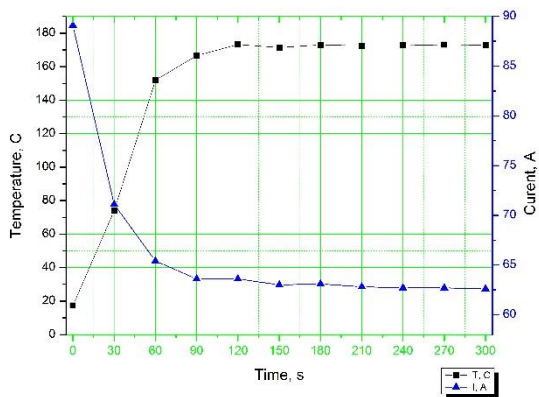


д)

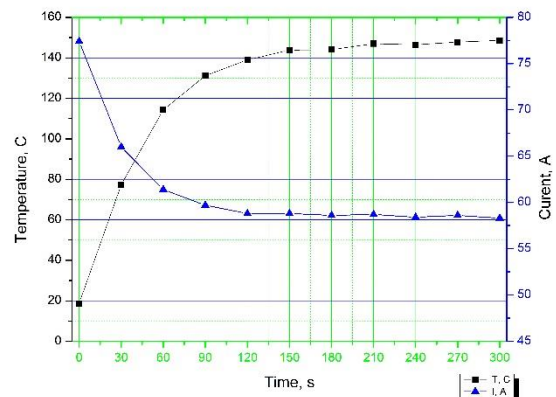


е)

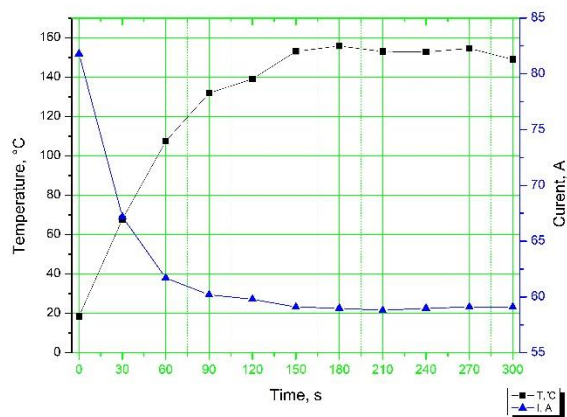
Рисунок 2 – Результати дослідження параметрів пожежної небезпеки контактних з’єднань проводів: а) з’єднання – скрутка (Al-Cu); б) з’єднання – скрутка (Al-Cu); в) з’єднання – скрутка (Al-Cu); г) з’єднання – скрутка (Al-Cu); д) з’єднання – скрутка (Cu -Cu); е) з’єднання – скрутка (Cu -Cu).



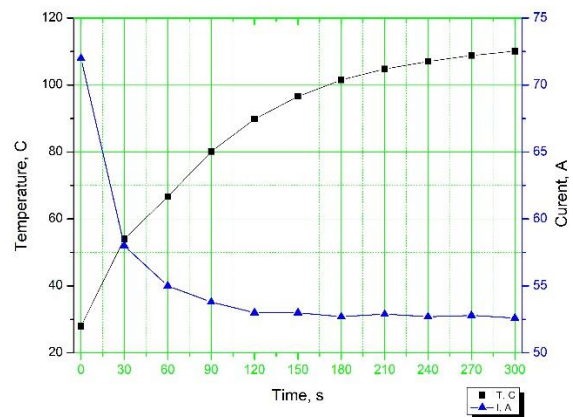
а)



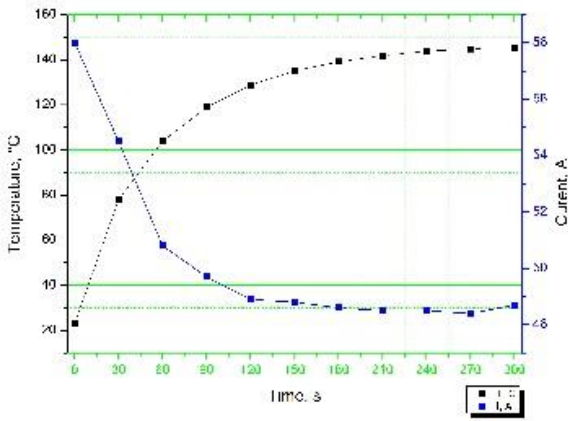
б)



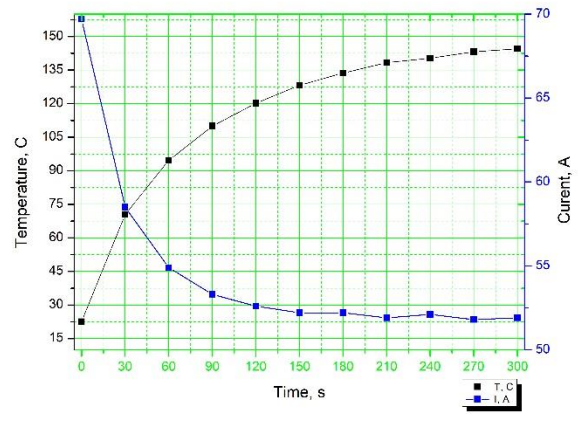
в)



г)

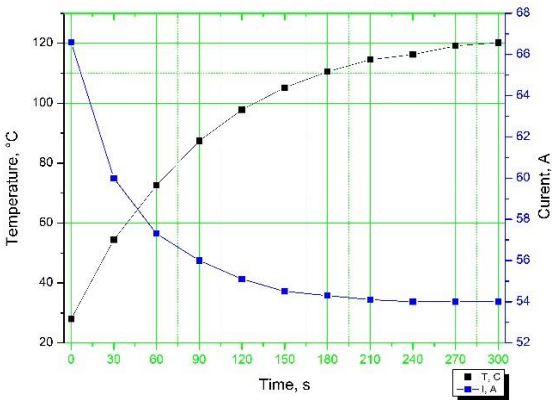


д)

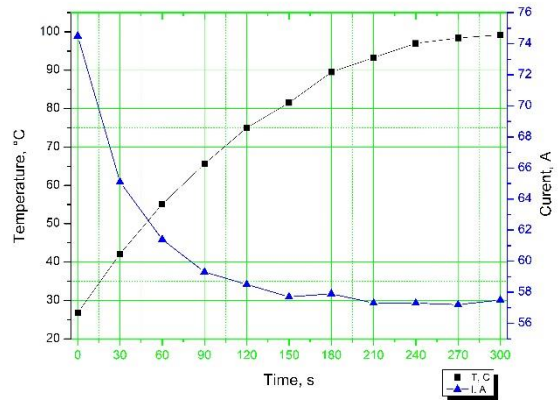


е)

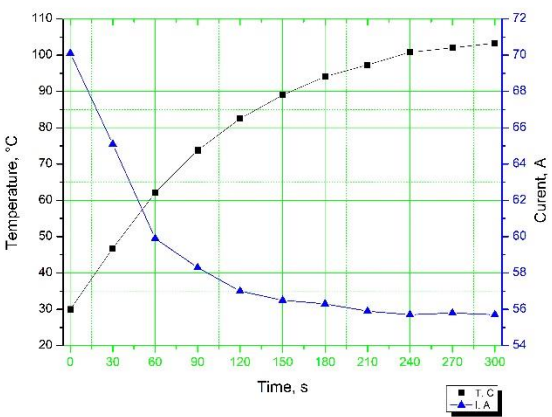
Рисунок 3 – Результати дослідження параметрів пожежної небезпеки контактних з'єднань проводів: а) з'єднання – пайка (Cu-Cu); б) з'єднання – пайка (Cu-Cu); в) з'єднання – пайка (Cu-Cu); г) з'єднання – WaGo (Cu-Cu); д) з'єднання – WaGo (Cu-Cu); е) з'єднання – WaGo (Cu-Cu).



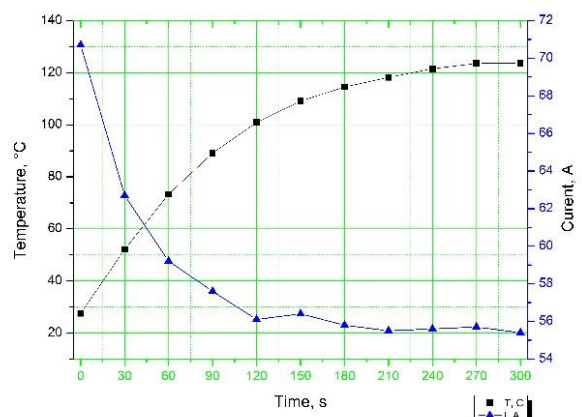
а)



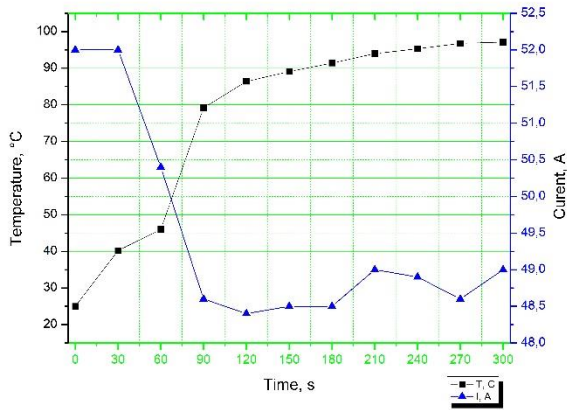
б)



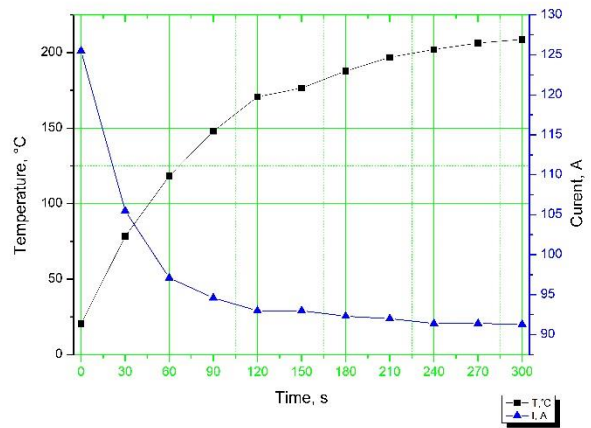
в)



г)

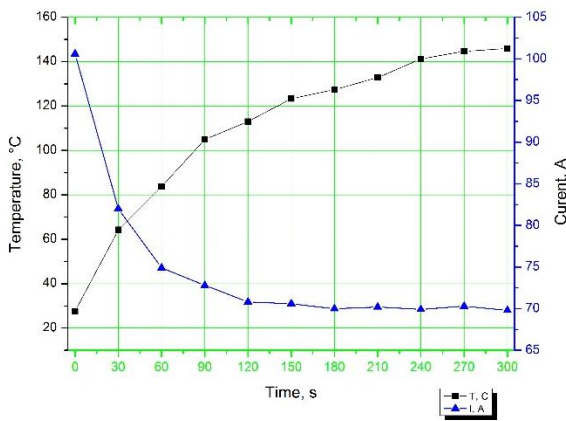


д)

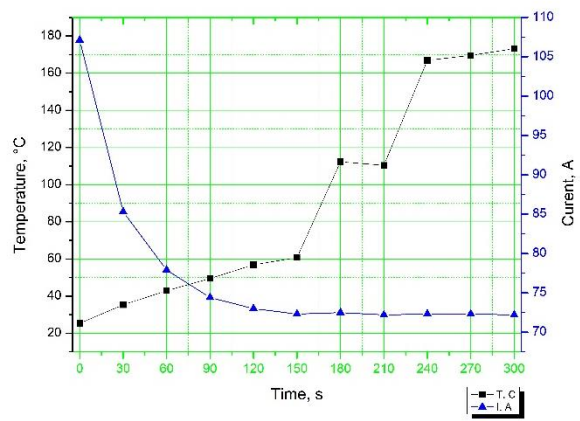


е)

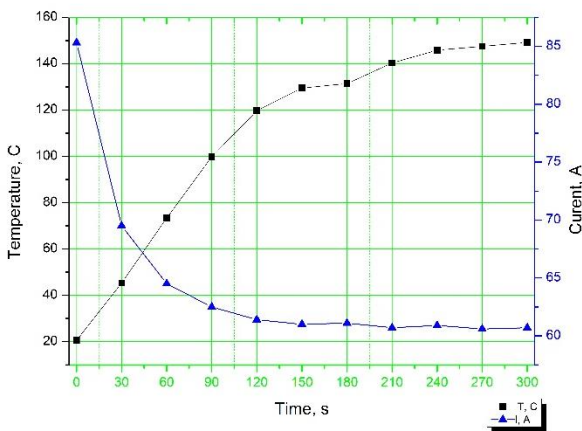
Рисунок 4 – Результати дослідження параметрів пожежної небезпеки контактних з'єднань проводів: а) з'єднання – вилка-болт (Cu-Cu); б) з'єднання – вилка-болт (Cu-Cu); в) з'єднання – вилка-болт (Cu-Cu); г) з'єднання – вилка-болт (Cu-Cu); д) з'єднання – ПВХ болт (Cu-Cu); е) з'єднання – ПВХ болт (Cu-Cu).



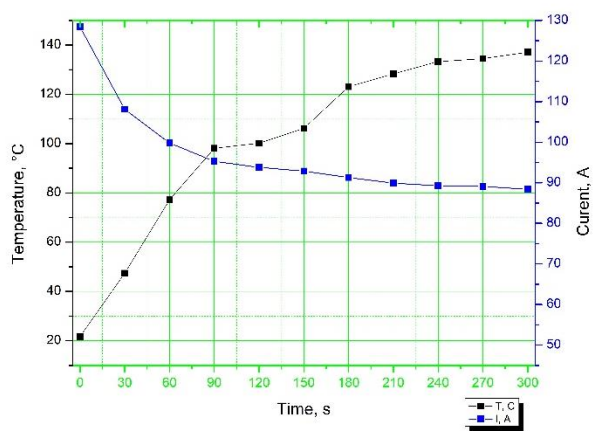
а)



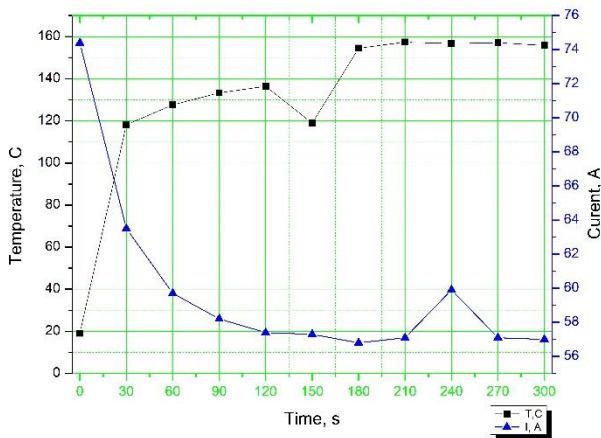
б)



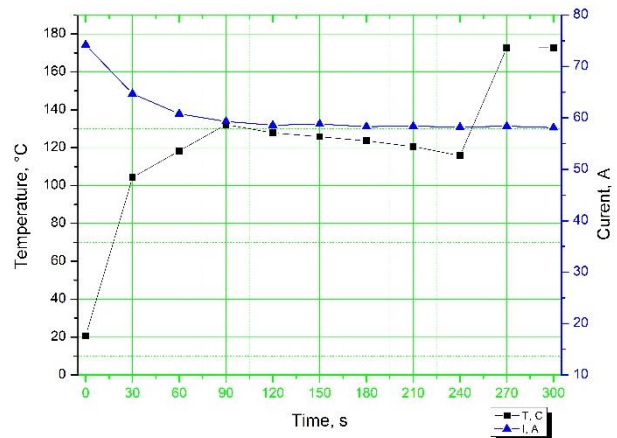
в)



г)



д)



е)

Рисунок 5 – Результати дослідження параметрів пожежної небезпеки контактних з'єднань проводів: а) з'єднання – ПВХ болт (Al-Cu); б) з'єднання – ПВХ болт (Al-Cu); в) з'єднання – гільзування (Cu-Cu); г) з'єднання – гільзування (Al-Cu); д) з'єднання – зварка (Cu-Cu); е) з'єднання – зварка (Cu-Cu).

Запропонований підхід дозволяє проводити своєчасний контроль і виявляти потенційно пожежонебезпечні ділянки електромережі до 380В в процесі експлуатації. Як наслідок, у них повинні бути замінені переріз або тип електропроводки і з'єднувальної арматури. На етапі введення в експлуатацію встановлюються паспортні дані конкретної мережі, які дозволяють періодично контролювати її стан із гарантуванням роботи без пожежонебезпечних режимів.

Запропонована методика при застосуванні необхідного технічного забезпечення [7], дозволяє своєчасно оцінювати показники якості матеріалів та монтажу електричних мереж до 380В. Значення показників якості, зокрема, ймовірність пожежі від великих перехідних опорів, залежать від величини опору контактних з'єднань.

За результатами проведених досліджень отримані параметри пожежної небезпеки контактних з'єднань в електропроводках різної комплектації із прийнятним розрахованим рівнем ризику. Опрацьована методологія придатна до застосування на інших об'єктах підвищеної небезпеки з перебуванням легкозаймистих рідин та горючих газів, з врахуванням конкретних геометричних розмірів та конфігурації технологічного обладнання.

Висновки

Статистичні дані стосовно небезпечних чинників пожежі, втрати від пошкоджень майна, будівель та споруд підтверджують, що при оцінці ризику необхідно запровадити методологію, яка б відповідала умовам України. При оцінюванні опору ізоляції найважливішим критерієм є ймовірність пожежі в електричних мережах до 380В у результаті пробиття ізоляції і виникнення дугового короткого замикання, у загальному випадку повинна забезпечуватися ймовірність пожежі не вище нормованого значення. На підставі цього буде досягтися відповідний рівень показників пожежної безпеки. Тому актуальним є прийняття рішення про вживання заходів протипожежного захисту в процедурах оцінювання ризиків, але воно також може бути прийнято незалежно від результатів оцінки ризику там, де є бажання уникнути неприйнятної небезпеки.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Рудик Ю. І., Воробйов О.І. Основи оцінювання пожежної небезпеки електроустановок: Навч. посібник. Вид. 2-е, випр. і доп. Львів, 2013. 224 с.
2. Кулаков, О. В. (2011). Пожежна небезпека великих перехідних опорів між елементами системи блискавкозахисту. *Науковий вісник НУЦЗУ*, Харків.
3. Кохановський В. О. Підвищення електроерозійної стійкості контактів низьковольтних комутаційних апаратів, *Енергетика*. 2015. № 1. С. 81–86. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/eete_2015_1_13.
4. Мрачковський, А. М. (2013). Експериментальні дослідження електричної ерозії та перехідного опору серійних контакт-деталей реле. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, (184 (1)), 192-200.
5. Gupta V., et al. Ventilation effects on the thermal characteristics of fire spread modes in open-plan compartment fires, *Fire Safety Journal*, Volume 120, 2021, 103072, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103072>.
6. Мглинець, Е. В., Мандровський, М. Ю., Чекараміт, М. Ф., & Юр'єва, О. Ю. (2020). Метод діагностування дефектів у розвитку в міжполюсних перемичках при експлуатації синхронних двигунів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*, (3 (1357)), 56-61.
7. Рудик Ю.І. Вимірювання експлуатаційних параметрів безпеки електроінсталяцій. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ "ХПІ", 2010. №46 С.166–170.
8. Коробський, В. В., & Лапшин, С. О. (2013). Закономірності зміни перехідного опору і корозійної тривкості зразків контактних матеріалів під впливом хімічно активних компонентів атмосфери тваринницьких приміщень. *Енергетика і автоматика*, (4), 38–45.
9. Babrauskas, Vytenis. (2018). Fires originating in branch-circuit NM cables due to installation damage. *Journal of Fire Sciences*. 36. 073490411878592. 10.1177/0734904118785920.
10. Pecht, Michael & Kyeong, San. (2020). Power Connectors. <https://doi.org/10.1002/9781119679837.ch15>.
11. Low Voltage Directive 2014/35/EU Guidelines. Electrical equipment designed for use within certain voltage limits August 2018 URL : http://ec.europa.eu/growth/sectors/electrical-engineering/lvddirective/index_en.htm
12. Israel, Toni & Schlegel, Stephan & Großmann, Steffen & Kufner, Tom & Freudiger, George. (2019). Modelling of Transient Heating and Softening Behaviour of Contact Points During Current Pulses and Short Circuits. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2019.8923941>.
13. Сольоний С.В., Рудик Ю.І., Сольона О.Я., Демченко Г.В. Система попередження вибухопожежонебезпечних ситуацій в об'єктах, пов'язаних із життєдіяльністю людини. *Пожежна безпека*. Львів, 2015. № 26. С. 149-155.
14. Braunovic, Milenko Effect of Connector Design on the Performance of Service Entrance Power Connectors 2004 Components and Packaging Technologies, *IEEE Transactions P*. 72–78. <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2004.825794>.

15. Гудим, В. І., Гаврилюк, А. Ф. Аналіз систем та агрегатів автотранспортних засобів за рівнем пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*, (23), 2013. 58-63.
16. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення [Чинний від 2020-01-01]. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 87 с.
17. ДСТУ EN 60695-1-10:2018 (EN 60695-1-10:2017, IDT; IEC 60695-1-10:2016, IDT) Випробування на пожежну небезпеку. Частина 1-10. Настанова щодо оцінювання пожежної небезпеки електротехнічних виробів. Загальні методичні рекомендації [Чинний від 2019-12-01]. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 38 с.
18. Козирський, В. В., Ткачук, І. П., Волошин, С., М., Слушний, І. І. Обґрунтування термінів ремонтних робіт та прогнозування строків служби контактів розбірного типу за умов неповноти вихідної інформації. *Техніка та енергетика/Machinery & Energetics*, (10 (4)), 13-17.
19. Волкова О. Г. Метод зменшення перехідного опору розривних контактів комутаційних пристроїв. Вісник Криворізького національного університету. 2015. Вип. 39. С. 78-81. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2015_39_18.
20. Коробський, В. В., & Бурла, А. В. (2017). Розробка контактних матеріалів на основі міді та дослідження контактного опору електромагнітних пускачів. *Енергетика і автоматика*, (4), 153-166.
21. Вихор Л. М. Горський П. В. Електричний опір контакту термоелектричний матеріал – метал, Термоелектрика. 2015. № 2. С. 16-24. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/TE_2015_2_4.
22. Мукуйчук М, Рудик Ю. Material test and results estimation by safety indexes. Вимірювальна техніка та метрологія. 2021. Вип. 82, № 2. С. 38–45.
23. Рудик Ю. І., Шунькін В. М. Визначення обсягу горючого матеріалу кабельних виробів при випробуванні за показниками пожежної безпеки. *Пожежна безпека*. Львів, 2019. № 34. С. 78–83
24. Försth, M., et al. Status summary of cable reaction to fire regulations in Europe. In *62nd International Cable - Connectivity Symposium*. 2013. Charlotte, NC, USA.
25. Гудим В. В., Юрків Б. В., Назаровець О. Математичне моделювання процесів нагріву в провідниках внутрішніх електричних мереж у житловому та громадському будівництві. *Пожежна безпека* 2015; 26: 59-64.
26. Оцінювання безпеки складних організаційно-технічних систем кваліметричними методами з урахуванням ризиків. дис. ... д-ра техн. наук : 05.01.02 Рудик Юрій Іванович; НУЛП. Львів, 2021
27. Мрачковський, А. М. (2013). Дослідження контактів автоматичних вимикачів серії ВА-47-29. *Енергетика і автоматика*, (3), 154-156.
28. Israel, Toni & Schlegel, Stephan & Großmann, Steffen & Kufner, Tom & Freudiger, George. (2021). Examination of the I²t criterion for short-circuit testing of connectors. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11045.12002>.

References

1. Rudyk Y.I., Vorobyov O.I. Fundamentals of fire hazard assessment of electrical installations: Study guide. Edition 2, revised and supplemented. Lviv, 2013. 224 с.
2. Kulakov, O. V. (2011). Fire hazard of large transitional resistances between the elements of the lightning protection system. Scientific Bulletin of NU CPU, Kharkiv.
3. Kokhanovsky V. O. Increasing the electrical erosion resistance of contacts of low-voltage switching devices. 2015. № 1. P. 81-86. Mode of access: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eete_2015_1_13.
4. Mrachkovsky, A. M. (2013). Experimental Studies of Electrical Erosion and Transient Resistance of Serial Relay Contact Parts. Scientific Bulletin of the National University of Life and

- Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Power Engineering of Agro-Industrial Complex, (184 (1)), 192-200.
5. Gupta V., et al. Ventilation effects on the thermal characteristics of fire spread modes in open-plan compartment fires, *Fire Safety Journal*, Volume 120, 2021, 103072, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103072>.
 6. Mhlynets, E. V., Mandrovsky, M. Y., Chekaramit, M. F., & Yurieva, O. Y. (2020). A method for diagnosing developmental defects in interpole jumpers during the operation of synchronous motors. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, (3 (1357)), 56-61.
 7. Rudyk Y.I. Measurement of operational safety parameters of electrical installations. *Bulletin of the National Technical University "KhPI" Collection of scientific papers. Thematic issue: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2010. No46 P.166-170.
 8. Korobsky, V. V., & Lapshin, S. O. (2013). Regularities of changes in transient resistance and corrosion resistance of samples of contact materials under the influence of chemically active components of the atmosphere of livestock buildings. *Power Engineering and Automation*, (4), 38-45.
 9. Babrauskas, Vytenis. (2018). Fires originating in branch-circuit NM cables due to installation damage. *Journal of Fire Sciences*. 36. 073490411878592. 10.1177/0734904118785920.
 10. Pecht, Michael & Kyeong, San. (2020). *Power Connectors*. <https://doi.org/10.1002/9781119679837.ch15>.
 11. Low Voltage Directive 2014/35/EU Guidelines. Electrical equipment designed for use within certain voltage limits August 2018. Available from : http://ec.europa.eu/growth/sectors/electrical-engineering/lvddirective/index_en.htm
 12. Israel, Toni & Schlegel, Stephan & Großmann, Steffen & Kufner, Tom & Freudiger, George. (2019). Modelling of Transient Heating and Softening Behaviour of Contact Points During Current Pulses and Short Circuits. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2019.8923941>.
 13. Solonyi S.V., Rudyk Yu.I., Solona O.Ya., Demchenko G.V. System for the prevention of explosion and fire hazards in objects related to human life. *Fire safety*. Lviv, 2015. № 26. p. 149-155.
 14. Braunovic, Milenko Effect of Connector Design on the Performance of Service Entrance Power Connectors 2004 Components and Packaging Technologies, *IEEE Transactions P 72 – 78* DOI 10.1109/TCAPT.2004.825794
 15. Gudym, V. I., & Gavrilyuk, A. F. (2013). Analysis of systems and assemblies of motor vehicles by the level of fire hazard. *Fire Safety*, (23), 58-63.
 16. DSTU 8828:2019 Fire safety. General Provisions [Effective 2020-01-01]. Kyiv: DP "UkrNDNC", 2019. 87 p. (in Ukrainian).
 17. DSTU EN 60695-1-10:2018 (EN 60695-1-10:2017, IDT; IEC 60695-1-10:2016, IDT) Fire Hazard Tests. Part 1-10. Guidelines for Assessing the Fire Hazard of Electrical Products. General Guidelines [Effective 2019-12-01]. Kyiv: DP "UkrNDNC", 2018. 38 p. (in Ukrainian).
 18. Kozyrskyi, V. V., Tkachuk, I. P., Voloshin, S. M., & Slushnyi, I. I. Justification of the timing of repair work and forecasting the service life of collapsible contacts under conditions of incompleteness of the initial information. *Engineering & Energy/Machinery & Energetics*, (10 (4)), 13-17.
 19. Volkova, O. G. Method of reducing the transient resistance of breaking contacts of switching devices. *Bulletin of Kryvyi Rih National University*. 2015. Issue. 39, pp. 78-81. Access Mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2015_39_18.
 20. Korobsky, V. V., & Burla, A. V. (2017). Development of copper-based contact materials and research of contact resistance of electromagnetic starters. *Power engineering and automation*, (4), 153-166.

21. Whirlwind, L. M., Gorsky, P. V. Electrical resistance of thermoelectric material-metal contact, thermoelectricity. 2015. № 2. P. 16-24. Access Mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TE_2015_2_4.
22. Mykyjchuk M, Rudyk Yu. Material test and results estimation by safety indexes. *Measuring equipment and metrology*. 2021. Issue. 82, № 2. p. 38–45.
23. Y.Rudyk, V.Shunkin, "Determination of the quantity of combustible material in cable products in the process of fire safety testing". *Fire Safety*, (34), p.78-83. 2019
24. Försth, M., et al. Status summary of cable reaction to fire regulations in Europe. In 62nd International Cable - Connectivity Symposium. 2013. Charlotte, NC, USA.
25. Gudym V., Yurkiv B., Nazarovets O. Mathematical modeling of heating processes in conductors of internal electrical networks in housing and public building. *Fire Safety*. 2015; 26: 59-64.
26. Assessment of the security of complex organizational and technical systems by qualimetric methods taking into account risks. dis. ... Dr. Tech. Sci. Sciences: 05.01.02 Rudyk Yurii Ivanovych; NULP. Lviv 2021
27. Mrachkovsky, A. M. (2013). Investigation of contacts of circuit breakers of the VA-47-29 series. *Power Engineering and Automation*, (3), 154-156.
28. Israel, Toni & Schlegel, Stephan & Großmann, Steffen & Kufner, Tom & Freudiger, George. (2021). Examination of the I²t criterion for short-circuit testing of connectors. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11045.12002>.