

СТІЙКІСТЬ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ. КОМП'ЮТЕРНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

А.А. Щерба^{1*} академік НАН України, О.Д. Подольцев^{1**}, докт. техн. наук,
І.М. Кучерява¹, докт. техн. наук, С.С. Розіскулов¹, канд. техн. наук,
Р.В. Білянin^{2***}, канд. техн. наук, Т.Ю. Антоненко^{2****}, канд. техн. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: podol@ied.org.ua.

² ПАТ «Завод «Південкабель»,
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна.

Роботу присвячено чисельному та експериментальному дослідженню електромагнітних та теплових процесів в силовому кабелі в аварійних умовах у разі виникнення пожежі. Розглядається два режими роботи: 1) коли кабель знаходиться в приміщенні із високою температурою та на певній відстані від зони пожежі і 2) коли він знаходиться безпосередньо під дією прямого полум'я. Для дослідження першого режиму було розроблено комп'ютерну модель та розраховано температурне поле в силовому кабелі з полімерною ізоляцією, що працює в зоні із високою температурою. Запропоновано і вивчено теплові процеси в кабелі у разі встановлення на його центральній ділянці вогнезахисного екрану різної товщини. Встановлено два основних фактори щодо використання такого екрану: час стійкої надійної роботи кабелю у разі пожежі поступово зростає зі збільшенням товщини екрану, в той час як у разі роботи у штатному режимі, через погіршення умов охолодження, температура ізоляції на ділянці кабелю із екраном зростає зі збільшенням товщини екрану. Ці фактори необхідно враховувати у разі застосування і вибору розміру екрану. Задля дослідження другого режиму проведено експериментальне дослідження процесів руйнування силового кабелю в умовах, наближених до пожежі – коли кабель знаходиться безпосередньо під прямою дією полум'я. Визначено час від початку пожежі, впродовж якого робоча ізоляція кабелю зберігає свої властивості, і він внаслідок цього спроможний здійснювати електроживлення навантаження. Цей час для зразка, що досліджувався, складає 15 хв. Бібл. 17, рис. 10.

Ключові слова: силовий кабель, зшити-поліетиленова (ЗПЕ) ізоляція, вогнезахисне покриття, пожежа, температурне поле, робочий ресурс кабелю, експериментальна установка, комп'ютерний аналіз.

Вступ. У даний час вимоги до кабельної продукції, що виробляється для енергетичних об'єктів, промислового і житлового будівництва, транспорту, енерговідповідальних підприємств, постійно підвищуються. Серед основних вимог – висока надійність, пожежна безпека, тривалий термін служби кабелів. Особлива увага на протипожежні властивості кабелів звертається у зв'язку з рядом значних пожеж, зокрема тих, що безпосередньо стосувалися електричних підстанцій, важливих об'єктів промисловості, місць великого скупчення людей і об'єктів стратегічного призначення. Найбільш відома пожежа, що спочатку поширилася по кабельних лініях – пожежа в аеропорту німецького міста Дюссельдорф, що сталася у 1996 р. Аналогічні численні пожежі поставили проблему пожежного захисту силових кабелів та застосування вогнестійких кабелів у фокус пильної суспільної уваги в усьому світі. Внаслідок цього глобальний ринок вогнестійких кабелів досягнув оцінки в 1967,8 млн. доларів США в 2023 р. [1, 2]. Розширення промислової цінності та широкий діапазон застосувань, за прогнозами, будуть і надалі основними причинами зростання ринку. Прогнозується, що загальний обсяг постачання вогнестійких кабелів зростатиме на стабільному середньорічному темпі 3,4% до 2030 р. і на кінець 2033 р. становитиме близько 2486,7 мільйонів доларів США. Основними виробниками пожежобезпечних, вогнестійких кабелів є Prysmian Group, Nexans S.A., Furukawa Electric Co., Ltd., General Cable Corporation, NKT Group, Leoni AG, LS Cable & System Ltd, EL Sewedy Electric Company [1, 2].

© Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М., Розіскулов С.С., Білянin Р.В., Антоненко Т.Ю., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-0200-369X>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>;

*** <https://orcid.org/0000-0003-3781-6233>; **** <https://orcid.org/0009-0007-2388-2252>

© Видавець ВД «Академпериодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Разом з цим розробляються прогресивні технологічні рішення та нові класи пожежобезпечних матеріалів для кабельних систем, що мають високу стійкість до поширення полум'я і знижену шкідливість для здоров'я людей [3–8].

Удосконалення силових кабелів проводиться у напрямку підвищення їхньої пожежної безпеки шляхом, наприклад, введення додаткових конструктивних елементів у вигляді оболонки або металевих екранів, розділових шарів, вогнестійких бар'єрів, спеціальних вогнезахисних покриттів, використання нових матеріалів зниженої горючості за одночасного скорочення об'єму горючих матеріалів.

До виникнення і розповсюдження пожеж від силових кабелів може призводити їхня робота в аварійних режимах, а саме надмірне нагрівання, електричні дуги й іскри, струм короткого замикання (КЗ), струм перевантаження, перенапруга, збільшення перехідного опору в контактних з'єднаннях. Крім того, зовнішні умови здатні створювати ризик займання через наявність поблизу джерел вогню (наприклад, у разі розташування кабелів поблизу вимикачів). У разі пожежі температура різко підвищується до 700–750°C. За такого нагріву плавляться багато матеріалів, а полімерні ізоляційні матеріали у розплавленому стані здатні прискорювати поширення вогню. Таким чином загоряння кабелів може призводити до пожежі у великих масштабах.

У рамках загальної проблеми забезпечення пожежної безпеки силових кабелів постає задача визначення часу, протягом якого кабель здатний витримувати високу температуру (вище 700°C), залишаючись у працездатному стані, і тим самим визначення межі теплової стійкості елементів кабельної конструкції, що залежить не лише від температури оточуючого середовища, але й від самої конструкції, струму навантаження, режимів експлуатації тощо. Розв'язання такої задачі може бути проведено на етапі проектування і опрацювання конструктивного виконання кабелю шляхом комп'ютерного розрахунку температурного поля в кабельних елементах у разі впливу полум'я на певну ділянку по довжині кабелю протягом заданого проміжку часу.

Чисельні розрахунки теплових процесів важливо проводити відповідно до діючих стандартів щодо безпеки кабелів, а також враховувати технічні умови і норми відносно тривалої робочої температури кабелю в аварійному режимі, зокрема враховувати тривалу робочу температуру жили кабелю класу напруги 110–220 кВ (не вище 90°C), тривалий нагрів в аварійному режимі, який обмежується 130°C, гранично допустиму температуру за протіканні струму КЗ – 250°C [9].

Електрофізичні процеси, що забезпечують необхідні в аварійних умовах високу якість і надійність роботи кабелів з полімерною ізоляцією на напругу до 330 кВ, досліджено у роботах [10, 11]. Робота [12] проведена у напрямку створення фізико-математичної моделі горіння силових кабелів у разі їхнього прокладання в тунелі. Проте питання аналізу процесу горіння електричних кабелів теоретичними і чисельними методами залишається маловивченим.

Метою даної роботи є чисельне та експериментальне дослідження електромагнітних та теплових процесів в силовому кабелі, що працює в аварійних умовах у разі виникнення пожежі та визначення шляхів щодо підвищення надійності їхньої роботи. При цьому розглядається два режими роботи: 1) коли кабель знаходиться в приміщенні із високою температурою та на певній відстані від зони пожежі; 2) коли він знаходиться безпосередньо під прямою дією полум'я. Під час дослідження першого режиму в роботі проводиться чисельне дослідження температурного поля високовольтного кабелю з ізоляцією зі зшитого поліетилену із використанням методу скінчених елементів у програмі Comsol [13]. Задля дослідження другого режиму проведено експериментальне дослідження процесів в зразку силового кабелю, що знаходиться під прямим впливом полум'я, та визначається час від початку пожежі, впродовж якого кабель спроможний здійснювати електроживлення навантаження.

1. Комп'ютерне дослідження електромагнітних та теплових процесів в силовому кабелі, що знаходиться на відстані від зони пожежі

Модель для дослідження. Розглядається однофазний кабель марки АПвЕгП-64/110 з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу 110 кВ. Основними його елементами є: 1 – алюмінієва струмопровідна жила з номінальним перерізом 500 мм²; 2 – поліетиленова ізоляція товщиною 16 мм; 3 – екран з мідних дротів, переріз екрану складає 35 мм²; 4 – зовнішня поліетиленова оболонка (рис. 1). Зовнішній діаметр кабелю – 73,7 мм. На рис. 1 наведено осесиметричний вигляд такого кабелю та кінцево-елементну сітку, що використовується в розрахунках.

Задача формулюється для двовимірного випадку в циліндричній системі координат. Нестационарний розподіл температури в кабельних елементах описується рівнянням теплопровідності

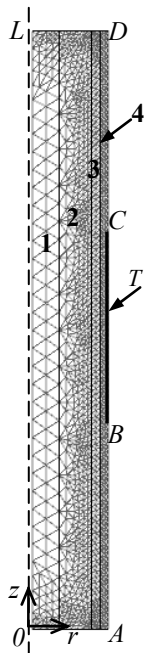


Рис. 1

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda(T)\nabla T) = Q, \quad (1)$$

де C і ρ – питома теплоємність і густина матеріалу відповідного елемента конструкції; λ – теплопровідність; Q – густина потужності теплових джерел.

Джерелами нагріву кабелю є зона пожежі навколо кабелів (на відрітку CB на рис. 1), джоулево тепло, що виділяється в масивному провіднику жили $Q_{ж}$ та в екрані $Q_{е}$, а також електричні втрати в діелектрику $Q_{д}$.

Потужність тепловиділення в рівнянні (1) визначається як

$$Q = \begin{cases} Q_{ж} = J_{ж}^2 / \sigma_{ж} & \text{у струмопровідній жилі;} \\ Q_{д} = \text{tg}\delta \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r E_r^2 & \text{в ізоляції;} \\ Q_{е} = J_{е}^2 / \sigma_{е} & \text{у мідному екрані;} \\ 0 & \text{у захисній оболонці,} \end{cases} \quad (2)$$

де $J_{ж}$, $J_{е}$ – діючі значення густини струму в жилі та наведеного струму в екрані, відповідно; $\sigma_{ж}$, $\sigma_{е}$ – електропровідність жили та екрана; $\text{tg}\delta$, ε_r – тангенс кута діелектричних втрат і відносна діелектрична проникність матеріалу ізоляції; ω – кругова частота; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна; E_r – напруженість електричного поля в ізоляції, яка розраховується за формулою

$$E_r(r) = \frac{U}{r \ln(r_e / r_{ж})}. \quad (3)$$

Тут U – напруга між жилою та екраном; r – поточна відстань від осі кабелю; $r_{ж}$, r_e – радіуси екрана і жили кабелю, відповідно.

Температурні залежності питомої теплоємності та електропровідності алюмінієвої жили в (1) і (2) визначаються виразами [14]

$$C(T) = 757,2 + 0,473 \cdot T, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$\sigma_{жс}(T) = 10^8 / [-0,628 + T \cdot (8,45 \cdot 10^{-3} + 3,28 \cdot 10^{-6} \cdot T)], \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}.$$

Теплоємність і теплопровідність поліетилену показано на рис. 2 [15]. Різке зміння теплоємності $C(T)$ поліетилену в інтервалі 90–120°C обумовлено плавленням кристалічної фази і переходом полімеру в аморфний стан [15].

Значення струму в жилі $I_{ж}$ приймалося рівним номінальному, струм в екрані $I_{е} = 0,07 I_{ж}$ [17]. Вихідна температура в усіх елементах кабелю $T_0 = 70^\circ\text{C}$. Умова осової симетрії задавалася на лінії OL (рис. 1). Горизонтальним границям відповідала умова теплової ізоляції. На відрізках AB та CD обирався тепловий потік, що відводиться у навколишнє середовище

$$-\lambda \partial T / \partial n = \alpha(T - T_c), \quad (4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; T_c – температура оточуючого середовища (повітря); $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до границі кабелю.

Розрахунок теплових процесів в кабелі в зоні пожежі за відсутності вогнезахисного екрану. Вихідні дані для розрахунків наступні. Струм $I_{ж} = 760$ А, що відповідає тривало допустимому струму жили у разі прокладання кабелю в повітрі. Температура $T_c = 20^\circ\text{C}$. Для шитого поліетилену коефіцієнт діелектричних втрат $\text{tg}\delta = 0,001$, відносна діелектрична проникність $\varepsilon_r = 2,4$. Коефіцієнт тепловіддачі в (4) визначався за даними [16] для випадку теплообміну між повітрям і гладкою стінкою, його значення склало $\alpha = 9,6$ Вт/(м²·К).

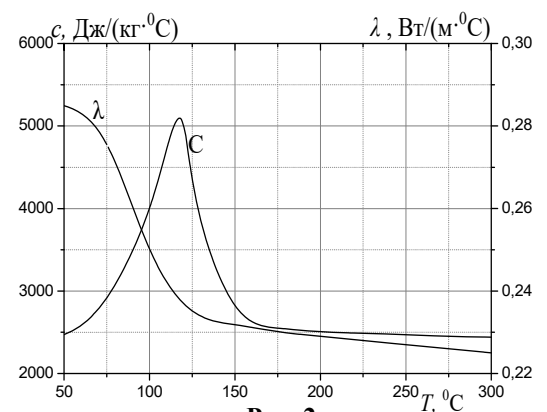


Рис. 2

Важливим розрахунковим моментом є застосування масштабування за довжиною кабелю 1:5 через невідповідність геометричних розмірів поперечного перерізу і загальної довжини кабелю (1,5 м). У цьому випадку в моделі використовувався масштабний множник 5 для позовжньої координати і вводилася анізотропія для коефіцієнту теплопровідності λ .

На рис. 3 показано отримані розрахунковим шляхом розподіли температури (в кольорі) і вектора теплового потоку (нормалізованими стрілками) в осьовому перерізі кабелю в моменти часу: а) $t = 3600$ с; б) $t = 7200$ с; в) $t = 10800$ с. Тепловий потік в об'ємі кабелю виникає, в основному, внаслідок зовнішнього нагріву оболонки кабелю в зоні пожежі. Зазначимо, що діелектричні втрати в ізоляції кабелю незначні. Їхня частка по відношенню до джоулевих втрат для даного випадку складає не більше 2 %.

Характер змінення температури вздовж радіусу в центральній зоні кабелю (по лінії NP на рис. 3, а) у різні моменти часу: 1 – $t = 1800$ с; 2 – $t = 3600$ с; 3 – $t = 7200$ с; 4 – $t = 10800$ с показано на рис. 4.

Дані рис. 3 та 4 свідчать про наступне.

1) Внаслідок низької теплопровідності матеріалу захисної оболонки і основної ізоляції кабелю тепло відносно повільно проходить вглиб кабелю. Протягом першої години екран кабелю нагрівається з 70 до $\sim 300^\circ\text{C}$.

2) Найбільший перепад температури досягається на товщині захисної оболонки (рис. 4), що визначає основні вимоги до матеріалу її виготовлення.

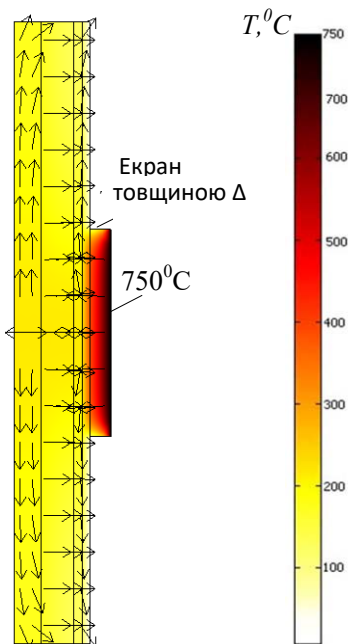


Рис. 5

умова $T = 750^\circ\text{C}$ (рис. 5).

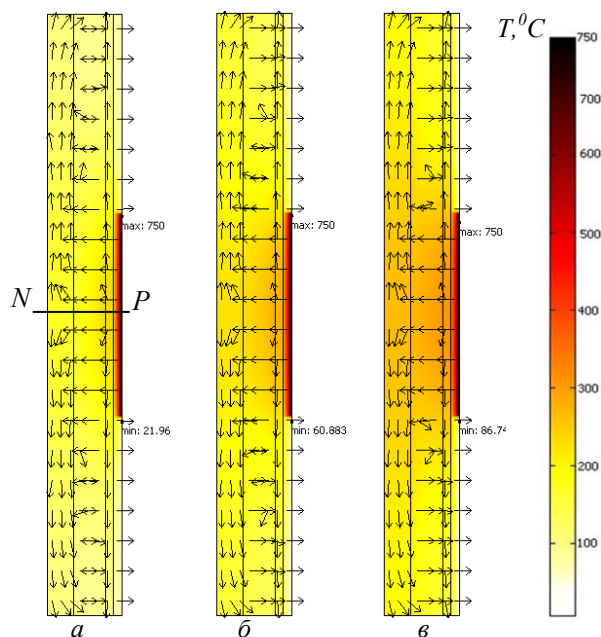


Рис. 3

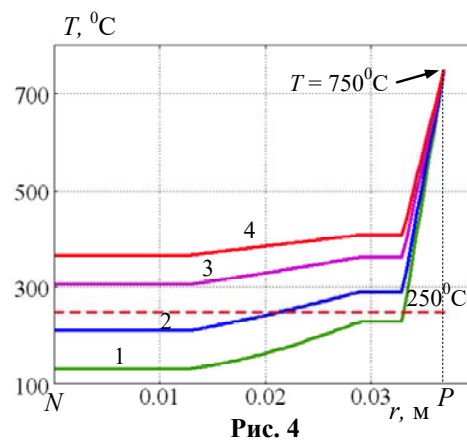


Рис. 4

3) Тепловий потік від найбільш нагрітої центральної зони кабелю відводиться до бічних поверхонь, в основному, по алюмінієвій жилі та мідному екрану (показано стрілками на рис. 3). Звідси випливає, що збільшення перерізу жили та екрана призведе до більш інтенсивного охолодження ізоляції в зоні пожежі і до збільшення часу безаварійної роботи кабелю під час пожежі.

Теплові процеси в кабелі в зоні пожежі під час використання вогнезахисного екрану. За допомогою комп'ютерної моделі (1)–(4) проводилися розрахунки для нестационарного та усталеного режиму нагріву кабелю у разі наявності захисного екрану різної товщини Δ та встановленому на центральній ділянці кабелю (рис. 5). Для розрахунків було обрано стійкий до загоряння матеріал екрану – асбест з наступними теплофізичними характеристиками: густина $\rho = 2400$ кг/м³, теплопровідність $\lambda = 0,05$ Вт/(м·К), теплоємність $C = 800$ Дж/(кг·К).

У разі моделювання ситуації виникнення пожежі поблизу кабелю і прямої дії на його частину вогню, на центральному вертикальному відрізку захисного покриття задавалася гранична

На рис. 5 для кабелю з екраном показано розподіл температури (у кольорі) та теплового потоку (нормалізованими стрілками) в досліджуваному об'ємі під час пожежу в зоні, що відповідає екрану у момент часу $t = 1800$ с.

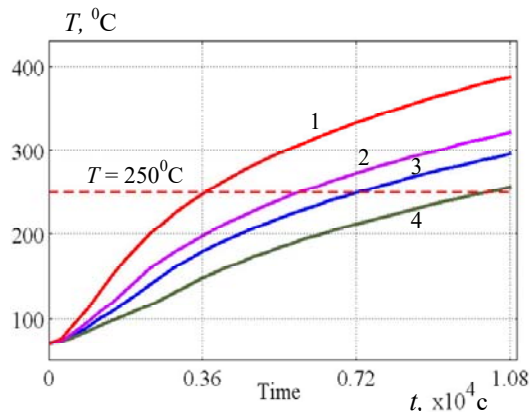


Рис. 6

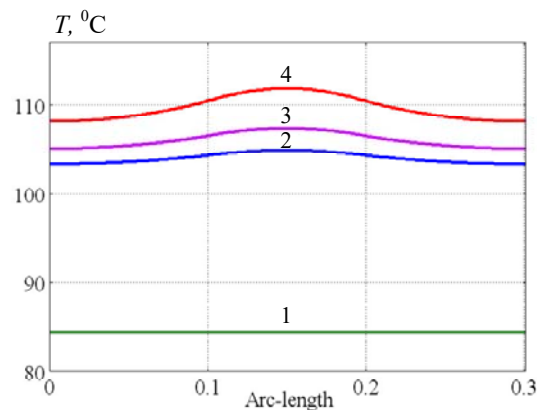


Рис. 7

Рис. 6 відображає змінення у часі температури центральної точки в середині ізоляції кабелю (на лінії NP на рис. 3) за умови пожежі для випадків, коли кабель не має екрану (крива 1) і коли застосовується захисний екран різної товщини: 2 – $\Delta = 3$ мм; 3 – $\Delta = 5$ мм; 4 – $\Delta = 10$ мм. Пунктирна лінія відповідає припустимій температурі поліетиленової ізоляції в режимі КЗ (250°C) та визначає тривалість безаварійної роботи кабелю у разі виникнення пожежі. Як показано на рис. 6, час надійної роботи кабелю з вогнезахисним екраном у разі пожежі поступово збільшується з однієї до трьох годин у разі змінення Δ від 0 до 10 мм, тобто в цьому сенсі наявність пожежобезпечного екрану є позитивним фактором, що дає змогу збільшити час роботи кабелю, який зазнає дії вогню, для того, щоб вчасно вжити необхідних протипожежних заходів.

З іншої сторони негативним фактором використання захисного екрану є збільшення температури ізоляції в нормальному робочому режимі через погіршення умов охолодження кабелю. На підтвердження цього наведено рис. 7, який ілюструє змінення температури у подовжньому напрямку посередині ізоляції кабелю за умови відсутності пожежі для випадків: 1 – кабель без екрану ($\Delta = 0$); 2 – $\Delta = 3$ мм; 3 – $\Delta = 5$ мм; 4 – $\Delta = 10$ мм. Розрахункові дані показують, що за товщини екрану $\Delta = 3, 5$ та 10 мм температура ізоляції на центральній вертикальній ділянці кабелю, яка відповідає розташуванню покриття, збільшується

відповідно на 20, 23 та 29°C . Слід підкреслити, що на такий несприятливий фактор необхідно зважувати під час застосування вогнезахисного екрану та виборі його товщини.

2. Експериментальне дослідження процесів в силовому кабелі, що знаходиться під прямою дією полум'я. Силовий кабель, що знаходиться безпосередньо в зоні пожежі, повинен певний час пропускати електричний струм задля живлення критично важливого електрообладнання. З метою визначення такого часового проміжку в роботі було створено експериментальний макет, що дає можливість дослідити процеси в кабелі з полімерною ізоляцією в умовах, наближених до пожежі (рис. 8).

Досліджувався кабель із ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу 10 кВ. Для моделювання теплової дії відкритого вогню використовувався газовий пальник. До кабелю було підключено джерело живлення постійної напруги 10,6 кВ. Електричні характеристики ізоляції кабелю (величина струму за постійної напруги 1 кВ та величина електричного опору ізоляції за цієї напруги) в процесі його руйнування оцінювалися шляхом вимірювання параметрів ізоляції кабелю мегометром Е6-16. Безпосередньо в момент вимірювання зразок кабелю на малий проміжок часу переключався із зовнішнього джерела на мегометр.



Рис. 8

На рис. 9 показано картини змінення в часі стану ізоляції кабелю безпосередньо в зоні дії полум'я спрямованої дії. Видно, що доволі швидко руйнується зовнішня оболонка кабелю. Приблизно за 2–3 хвилини після початку своєї дії полум'я досягає мідного екрана. Далі процес руйнування уповільнюється, поки весь цей мідний шар проплавляється. Такий процес триває приблизно 7 хвилин. Далі починає горіти полімерна ізоляція і в кінці процесу, після загального часового проміжку приблизно у 15 хвилин, відбувається електричний пробій ізоляції.

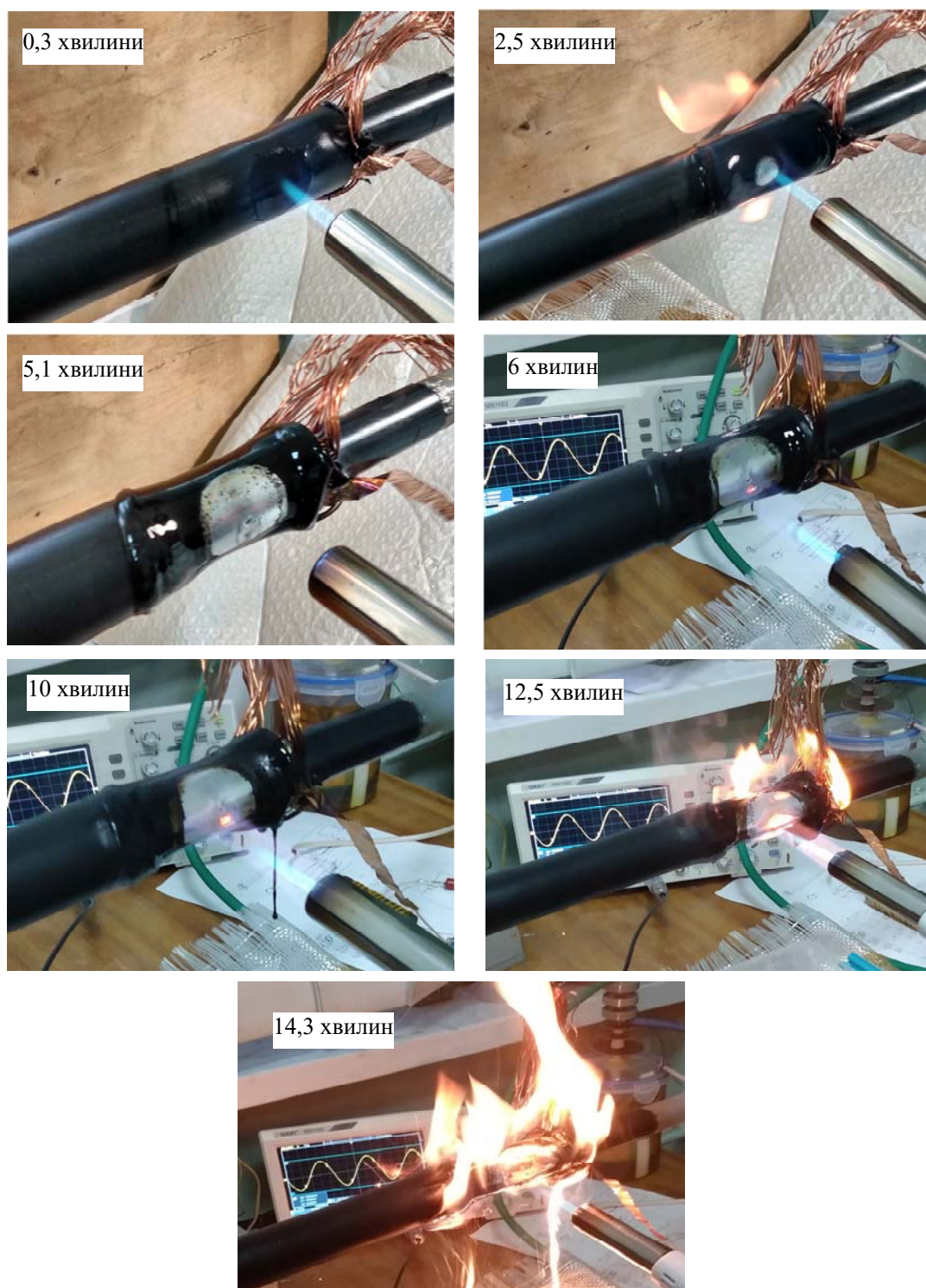


Рис. 9



Рис. 10

На рис. 10 показано зовнішній вигляд ізоляції кабелю внаслідок дії впродовж 15 хвилин відкритого полум'я після погашення вогню. Як видно, в зоні горіння на жилі ще залишається тонка полімерна ізоляція, що має чорний колір.

Таким чином, результати проведеного експерименту надали можливість дослідити основні етапи руйнування ізоляції кабелю внаслідок виникнення пожежі в зоні його розташування, а також встановити, що силовий кабель із полімерною ізоляцією на номінальну напругу 10 кВ, на який діє полум'я прямого

направлення, дає можливість здійснювати живлення навантаження приблизно впродовж 15 хвилин після початку пожежі.

Висновки 1. Розроблено комп'ютерну модель та досліджено перехідні теплові процеси в силовому кабелі з полімерною ізоляцією, що працює в аварійному пожежному режимі. Реалізація моделі дає можливість розраховувати теплові навантаження ізоляції та струмопровідної жили і тим самим прогнозувати термін служби кабелю в екстремальних ситуаціях.

2. Задля захисту кабелю від пожежі можуть використовуватися вогнезахисні екрани із стійкого до загорання матеріалу, наприклад, асбесту. У роботі виявлено як позитивний ефект від такого екрану, пов'язаний із збільшенням проміжку часу роботи кабелю в зоні пожежі в аварійному режимі, так і негативний ефект внаслідок погіршення умов охолодження кабелю під час роботи в штатному режимі. Показано, що використання екрану з асбесту товщиною 3–10 мм дає змогу у 2–3 рази збільшити час, впродовж якого ізоляція кабелю буде нагріватися до критичної температури – 250⁰С. Разом з цим за результатами теплових розрахунків в усталеному режимі встановлено, що у разі використання екрану різної товщини – 3, 5 та 10 мм, робоча температура ізоляції в зоні встановлення екрану під час роботи кабелю в штатному режимі збільшується відповідно на 20, 23 та 29 ⁰С. Цей фактор важливо враховувати під час вибору товщини захисного екрану.

3. Розроблено експериментальний макет для вивчення електричних характеристик ізоляції кабелю з полімерною ізоляцією під впливом відкритого полум'я, що відповідає умовам виникнення пожежі безпосередньо в зоні розташування кабелю. Проведені експериментальні дослідження для зразка силового кабелю напругою 10 кВ надали змогу визначити основні етапи руйнування його ізоляції від дії полум'я, а також встановити, що досліджуваний зразок, на який діє полум'я, здійснює живлення навантаження приблизно впродовж 15 хвилин після виникнення пожежі. Цей часовий проміжок визначається початком електричного пробоя пошкодженої внаслідок пожежі ізоляції кабелю.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Забезпечення ефективності функціонування та розвитку розподіленої енергетики в Україні з використання технологій мікромереж" (шифр "Режим 3"), КПКВК 6541230.

1. Fire-resistant cable market size, share, trend, forecast, competitive analysis, and growth opportunity: 2023–2028. URL: <https://www.stratviewresearch.com/751/fire-resistant-cable-market.html> (дата доступу 10.03.2025)

2. Fire-Resistant Cable Market. January 2024. URL: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/fire-resistant-cable-market.asp> (дата доступу 10.03.2025)

3. Безпрозваних Г.В., Мірчук І.А. Синтез технологічних режимів охолодження та радіаційного опромінення електричної ізоляції кабелів. Харків: ТОВ Друкарня Мадрид, 2021. 179 с.

4. Xu J.C., Ou H.X., Shan X.Y., Liu B., Jiang J.C., Xu G.G. Investigation of novel intumescent flame retardant low-density polyethylene based on SiO₂@MAPP and double pentaerythritol. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. No 137 (11). P. 49242. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.49242>.

5. Yan Li, Leijie Qi, Yifan Liu, Junjie Qiao, Maotao Wang, Xinyue Liu, Shasha Li. Recent advances in halogen-free flame retardants for polyolefin cable sheath materials. *Polymers*. 2022. No 14. P. 2876. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14142876>.

6. Zolotaryov V.V., Chulieieva O.V., Chulieiev V.L., Kuleshova T.A., Suslin M.S. Influence of doping additive on thermophysical and rheological properties of halogen-free polymer composition for cable insulation and sheaths. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. Issue 2. Pp. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.2.06>.

7. Fangrat J., Kaczorek-Chrobak K., Bartłomiej P. Fire behavior of electrical installations in buildings.

Energies. 2020. No 13(23). P. 6433. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13236433>.

8. Porowski R., Kowalik P., Ramiączek P., Bąk-Patyna P., Gawdzik J. Application assessment of electrical cables during smoldering and flaming combustion. *Applied Sciences*. 2023. No 13(6). P. 3766. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13063766>.

9. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. Т. 3. М.: Папирус-Про, 2004. 688 с.

10. Щерба А.А., Золотарев В.М., Перетятко Ю.В., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ершов С.Е. Оптимизация электрофизических процессов для создания отечественных технологий изготовления высоконадежных кабелей на напряжения до 330 кВ с твердой полимерной изоляцией. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2009. Вип. 23. С. 137–147.

11. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М. Електричне поле напівпровідного екрана силового кабелю з полімерною ізоляцією з урахуванням структурних неоднорідностей. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.003>.

12. Мещанов Г.И., Холодный С.Д. Физико-математическая модель процесса горения электрических кабелей при групповой прокладке. *Кабели и провода*. 2007. №4 (305). С. 10–14.

13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (дата доступу 22.02.2025)

14. Столович Н.Н., Миницкая Н.С. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов. Минск: Наука и техника, 1975. 160 с.

15. Овсиенко В.Л. Исследование нелинейных тепловых полей в высоковольтных кабелях с полимерной изоляцией. *Кабели и провода*. 2000. № 4. С. 26–29.

16. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1985. 520 с.

17. Peschke E., Olshausen V. Cable Systems for High and Extra-High Voltage. Publicis MCD Verlag, 1999. 296 p.

STABILITY OF POWER CABLES UNDER FIRE CONDITIONS. COMPUTER AND EXPERIMENTAL STUDY

A.A. Shcherba¹, O.D. Podoltsev¹, I.M. Kucheriava¹, S.S. Roziskulov¹, R.V. Belyanin², T.Yu. Antonets²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

56, Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, Ukraine,

e-mail: podol@ied.org.ua.

² Yuzhcable works, PJSC,

Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine.

The work is dedicated to the experimental and numerical study of ways to increase the resource and reliability of power cables under fire emergency conditions. Firstly the computer model is developed and the temperature field in XLPE-insulated power cable operating at fire emergency is studied. The thermal processes in the case of the fireproof coating with different thickness located on the central section of the cable around it are analyzed. Two main factors of the additional coating are revealed: 1) the time of stable reliable operation of the cable at fire gradually increases with an increase in the thickness of the coating (a positive factor); 2) under normal operating conditions, due to cooling deterioration, the temperature of the insulation on the section of the cable, corresponding to the coating, increases with an increase in the thickness of the coating (a negative factor). Such factors should be taken into account when applying and choosing the dimensions of the coating. At the second stage of the work, the experimental study of power cable destruction under conditions close to a fire, i.e. under the direct influence of open flame, is carried out. The time from the beginning of the fire, during which the cable under the influence of the flame allows powering the load, is determined. References 17, figures 10.

Keywords: power cable, cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, fire-resistant coating, fire, temperature field, service life of cable, experimental installation, computer analysis.

1. Fire-resistant cable market size, share, trend, forecast, competitive analysis, and growth opportunity: 2023–2028. URL: <https://www.stratviewresearch.com/751/fire-resistant-cable-market.html> (accessed at 10.03.2025)

2. Fire-Resistant Cable Market. January 2024. URL: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/fire-resistant-cable-market.asp> (accessed at 10.03.2025)

3. Bezprozvannikh G.V., Mirchuk I.A. Synthesis of technological conditions for cooling and radiating impregnation of cable insulation. Kharkiv: TOV Drukarnya Madrid, 2021. 179 p. (Ukr)

4. Xu J.C., Ou H.X., Shan X.Y., Liu B., Jiang J.C., Xu G.G. Investigation of novel intumescent flame retardant low-density polyethylene based on SiO₂@MAPP and double pentaerythritol. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. No 137 (11). P. 49242. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.49242>.

5. Yan Li, Leijie Qi, Yifan Liu, Junjie Qiao, Maotao Wang, Xinyue Liu, Shasha Li. Recent advances in halogen-free flame retardants for polyolefin cable sheath materials. *Polymers*. 2022. No 14. P. 2876. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14142876>.
6. Zolotaryov V.V., Chulieieva O.V., Chulieiev V.L., Kuleshova T.A., Suslin M.S. Influence of doping additive on thermophysical and rheological properties of halogen-free polymer composition for cable insulation and sheaths. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. Issue 2. Pp. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.2.06>.
7. Fangrat J., Kaczorek-Chrobak K., Bartłomiej P. Fire behavior of electrical installations in buildings. *Energies*. 2020. No 13(23). P. 6433. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13236433>.
8. Porowski R., Kowalik P., Ramiączek P., Bąk-Patyna P., Gawdzik J. Application assessment of electrical cables during smoldering and flaming combustion. *Applied Sciences*. 2023. No 13(6). P. 3766. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13063766>.
9. Makarov E.F. Handbook on electrical networks 0.4–35 kV and 110–1150 kV. Vol. 3. Moskva: Papirus-Pro, 2004. 688 p. (Rus)
10. Shcherba A.A., Zolotaryov V.M., Peretyatko Yu.V., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Ershov S.E. Optimization of electrophysical processes for the creation of domestic technologies for the production of high-reliable cables for voltages up to 330 kV with solid polymer insulation. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2009. Vyp. 23. Pp. 137–147. (Rus)
11. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Electric field of semiconducting screen in power cable with polymer insulation taking into account structural inhomogeneities. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2024. No 5. Pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.003>. (Ukr)
12. Meshchanov G.I., Kholodny S.D. Physical and mathematical model for the combustion process of electric cables during group laying. *Kabeli i provoda*. 2007. No 4 (305). Pp. 10–14. (Rus)
13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed at 22.02.2025)
14. Stolovich N.N., Mynytskaia N.S. Temperature dependences of the thermophysical properties of some metals. Minsk: Nauka i tekhnika, 1975. 160 p. (Rus)
15. Ovsienko V.L. Study of nonlinear thermal fields in high-voltage cables with polymer insulation. *Kabeli i provoda*. 2000. No. 4. Pp. 26–29. (Rus)
16. Kuchling H. Handbook on physics. Moskva: Mir, 1985. 520 p. (Rus)
17. Peschke E., Olshausen V. Cable Systems for High and Extra-High Voltage. Publicis MCD Verlag, 1999. 296 p.

Надійшла 20.03.2025
Остаточний варіант 10.04.2025