

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТО-ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ ЗА НАЯВНОСТІ ТИПОВИХ ДЕФЕКТІВ НАПІВПРОВІДНОГО ЕКРАНА

Кучерява І.М., докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: rB.irinan@gmail.com.

За допомогою комп'ютерного моделювання проведено дослідження електричного поля в зшити-поліетиленовій ізоляції кабелю середньої напруги (10 кВ) з типовими дефектами напівпровідних ізоляційних шарів. Дефекти пов'язані з технологічними відхиленнями, експлуатаційними умовами, електричним старінням та навантаженням навколишнього середовища. Модель побудовано в квазіелектростатичному наближенні для осесиметричного представлення кабелю. Розглянуто також об'ємний дефект з порушенням герметизації кабелю, руйнуванням металевого екрана і частини основної ізоляції, у разі чого електричне поле поширюється в оточуюче середовище. Проаналізовано нерівномірність розподілу електричного поля в ізоляції, характер змінення і рівень його посилення залежно від розглянутих дефектів. За результатами чисельного дослідження пояснено причини старіння поліетиленової ізоляції силових кабелів та оцінено ризик наявності розглянутих дефектів для електричної міцності ізоляції і довготривалого надійного функціонування. Бібл. 17, рис. 3.

Ключові слова: силовий кабель, середня напруга, зшити-поліетиленова (ЗПЕ) ізоляція, напівпровідні екрани, характерні дефекти, старіння ізоляції, електричне поле, комп'ютерне моделювання.

Вступ. На теперішній час силові кабелі із зшитого поліетилену (ЗПЕ) на середню напругу (1–35 кВ) є домінуючими у застосуванні в мережах виробництва і розподілу електроенергії, в промисловій, комерційній, комунальній сферах [1]. Пік їх встановлення і використання у світі припадає на 80-і рр. ХХ століття, а середній термін експлуатації становить майже 40 років. Кабелі середньої напруги, як правило, зберігають безпеку і надійність, електричну міцність зшити полімерної ізоляції. Проте впродовж тривалого часу роботи вони піддаються різноманітним навантаженням, що спричиняють поступову деградацію кабельної системи і можуть призводити до збоїв у роботі.

Сучасні кабелі середньої напруги використовують зшитий поліетилен як ізоляційний матеріал, що складається з трьох міцно з'єднаних шарів – екрануючого шару жил (внутрішнього напівпровідного екрана), основної ізоляції та зовнішнього напівпровідного екрана. Монолітна ЗПЕ ізоляція є доступним і надійним рішенням, інтерес до якого постійно зростає [1, 2]. Разом з цим актуальність зберігають питання старіння ЗПЕ ізоляції, зокрема внаслідок дефектів виготовлення, проникнення всередину вологи та інших продуктів забруднення, розвитку тріщин, протікання часткового розряду, пробою ізоляції, які спричиняють несправності і навіть вихід кабелів із ладу [3–8]. Дослідження властивостей та технологічних і експлуатаційних дефектів ізоляційної структури проводяться також теоретичними методами і шляхом комп'ютерного моделювання [9–11].

Статистика несправностей силових кабелів середньої напруги узагальнена в роботі [3] на основі польових даних різних країн: США, Данії, Великобританії, Китаю тощо. Близько 50% складають несправності, не пов'язані з роботою енергомережових компаній і з якістю самого кабелю, наприклад, це механічні пошкодження, спричинені земляними роботами. Інші 50% збоїв класифікуються наступним чином: 10–20% – пов'язані зі старінням кабелів і ізоляції; 10% – помилки під час прокладання кабелів; 7–15% – збої внаслідок низької якості виробництва; 10% – інші збої, включаючи перенапруги, перегрів, погодні умови тощо.

Силові кабелі під час роботи постійно піддаються різноманітним фізичним навантаженням, а саме: електричним, термічним, механічним та навантаженням навколишнього середовища [3].

© Кучерява І.М., 2025

© Видавець ВД «Академперіодика» 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>

Електричне старіння пов'язується із забрудненнями, домішками, порожнинами, нерівностями, іншими макро- та мікрodefектами елементів кабелю і призводить до трійнів і часткових розрядів, скороченню електричної міцності ізоляції. Термічне старіння виникає за різких температурних змінах. Навколишнє середовище впливає на якість кабелів внаслідок проникнення вологи і хімікатів, радіації т. ін. Означені навантаження, накладаючись один на одне та поєднуючись з початковими дефектами, прискорюють процеси старіння ізоляції, скорочують надійність і термін служби кабелів.

Технологічні та експлуатаційні дефекти напівпровідних екранів силових кабелів, вимоги до виготовлення та механізми деградації поліетиленової ізоляції детально представлено в [12].

Виявлення і дослідження дефектів силових кабелів надає інформацію відносно важливості врахування характерних дефектів у технологічному процесі виготовлення кабелів, а також сприяє визначенню ймовірності несправностей, допомагає в плануванні і рішеннях з технічного обслуговування, скороченню простоїв і циклів заміни кабельних ділянок з дефектами залежно від типу кабелю та його поточного стану.

Мета роботи – на основі кількісного дослідження електричного поля в ЗПЕ ізоляції з типовими дефектами кабелів на середню напругу визначити характер змінення і рівень електричного поля для оцінки стану ізоляційної структури і можливих практичних рішень щодо обслуговування/заміни ділянок кабелів з певними ушкодженнями.

Розглянуті дефекти (рис. 1 верхній ряд та рис. 2 ліворуч) безпосередньо стосуються екрануючих напівпровідних шарів ізоляції і виявлені в центрах з тестування і дослідження електричних систем National Electric Energy Testing, Research & Applications Center (США) [4, 13] та Powertech Labs Inc. (Канада) [8, 14].

Постановка задачі та модель для дослідження. Досліджується силовий кабель із ЗПЕ ізоляцію марки АПвЕП-10 на напругу 10 кВ з перерізом жили 120 мм², зовнішнім діаметром 33 мм, товщиною основної ізоляції 4 мм і кожного з напівпровідних екранів 1,2 мм. Розглядаються характерні пошкодження кабелю, які мають відношення до внутрішнього напівпровідного шару (рис. 1, картини зверху [4]): відсутність частини провідників жили поблизу напівпровідного екрана, дефект екрана жили у вигляді нерівностей-порожнин, заповнених повітрям, і порожнина у внутрішньому екрані, заповнена водою [4], а також окремий випадок відсутності частини мідного екрана, зовнішнього напівпровідного шару й ізоляції внаслідок дугоутворення (рис. 2, ліворуч) [8]. Саме втрата функції металевого екрана або напівпровідного шару ізоляції, а також недостатній контакт між ними призводять до виникнення електричної дуги і руйнування кабелю. Розглянуті дефекти пов'язані з якістю виготовлення, електричним старінням (деградацією) ізоляції і навантаженням від навколишнього середовища. Дослідження електричного поля в кабелі з дефектами виконується шляхом чисельного моделювання в програмі Comsol [15]. Використовуються двовимірні розрахункові моделі у разі осесиметричного представлення кабелю за його довжиною (рис. 1 знизу, рис. 2 праворуч).

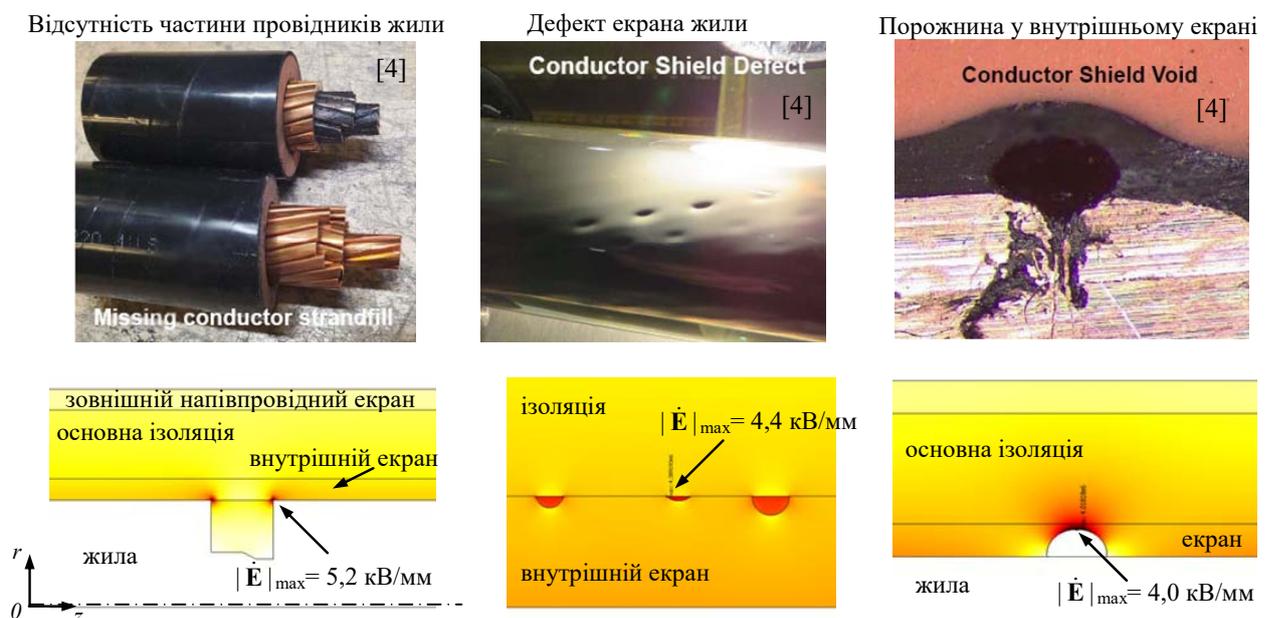


Рис. 1

Основним рівнянням математичної моделі є диференціальне рівняння для комплексного електричного потенціалу $\dot{\varphi}$, записане в частотній області

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{J}}_{tot} = 0, \quad \nabla \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon_0\dot{\varepsilon}_r)\nabla \dot{\varphi} = 0, \quad (1)$$

де $\dot{\mathbf{J}}_{tot} = (\sigma + j\omega\varepsilon_0\dot{\varepsilon}_r)\dot{\mathbf{E}}$, $\dot{\mathbf{E}} = -\nabla \dot{\varphi}$, $\dot{\mathbf{J}}_{tot}$ – густина повного електричного струму (струму провідності та струму зміщення), ε_0 та $\dot{\varepsilon}_r$ (у загальному випадку комплексна величина) – відповідно, електрична стала та відносна діелектрична проникність середовища (кожного з трьох шарів ізоляції); σ – електропровідність відповідного середовища; $\omega = 314$ рад/с – кругова частота (встановлена частота 50 Гц).

Ушкодження оболонки і частини ізоляції

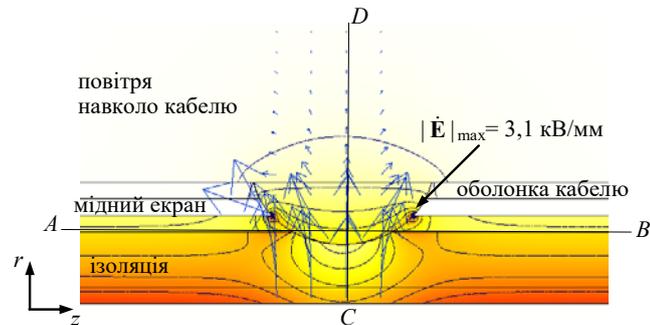
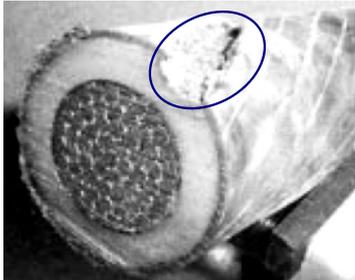


Рис. 2

Задля врахування нелінійності електропровідності основної ізоляції в моделі використовуються ефективне значення σ в залежності від напруження електричного поля [16]

$$\sigma(|\dot{\mathbf{E}}|) = a \cdot \exp\left(-\frac{E_A \cdot q_e}{20k_B}\right) \frac{\sinh(b \cdot 10^{-7} |\dot{\mathbf{E}}|)}{|\dot{\mathbf{E}}|}. \quad (2)$$

Тут $q_e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона; $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана; $a = 3,2781$ та $b = 2,7756$ – експериментально визначені константи; $E_A = 0,56$ еВ – енергія активації; залежність (2) відповідає температурі 20°C.

У загальному випадку врахування залежності (2) важливо для кабелів високої і надвисокої напруги за напруженості електричного поля до 10–11 кВ/мм [17].

Задаються граничні умови: $\dot{\varphi} = U$ (U – амплітудного значення фазної напруги) – на поверхні жили кабелю; $\dot{\varphi} = 0$ – на поверхні мідного екрану, що оточує ізоляцію; умова електричної ізоляції $\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{J}} = 0$ – на зовнішніх границях, крім осі симетрії; умова неперервності $\mathbf{n} \cdot (\dot{\mathbf{J}}_1 - \dot{\mathbf{J}}_2) = 0$ (\mathbf{n} – одиничний вектор зовнішньої нормалі, $\dot{\mathbf{J}} = \dot{\mathbf{J}}_{tot}$) – на внутрішніх границях.

Для випадку поширення електричного поля за межі пошкодженого кабелю (рис. 2) розрахункова область включає навколишнє середовище (повітря), її розмір більш ніж у 4 рази перевищує діаметр кабелю.

У моделі нехтується впливом на розподіл електричного поля аналогічних дефектів, розташованих симетрично осі OZ (рис. 1). Прийнято також наступні припущення: матеріал ізоляції є ізотропним; сторонні заряди в діелектрику відсутні; в розрахунках задані однакові значення діелектричної проникності ε_r (її дійсної частини) для всіх трьох шарів ЗПЕ ізоляції (уявна частина не враховується); шари ізоляції характеризуються слабкою питомою електропровідністю, яка має свої постійні значення для кожного шару.

Основні дані для розрахунків: діелектрична проникність ізоляційних шарів $\varepsilon_r = 2,4$; електропровідність зовнішнього / внутрішнього екранів відповідно $\sigma = 10^{-8} / 10^{-10}$ См/м. Водне середовище в порожнині внутрішнього екрану (рис. 1, праворуч) має характеристики: $\varepsilon_r = 5$, $\sigma = 0,05$ См/м. Значення характеристик узгоджуються з даними статті [9]. Враховано, що електропровідність напівпровідних шарів може змінюватися залежно від частки наповнювачів, зокрема технічного вуглецю (сажі) в полімерному матеріалі.

У процесі реалізації описаної моделі методом скінченних елементів в областях розташування дефектів використовується максимально можлива кількість розрахункових вузлів.

Результати комп'ютерних розрахунків. На рис. 1 показано розглянуті дефекти кабелю, зв'язані з внутрішнім напівпровідним екраном (картини зверху [4]) та результати моделювання електричного поля поблизу таких дефектів (картини знизу). Невеликі дефекти внутрішнього екрана заповнені повітрям, а порожнина в екрані праворуч – водою (у припущенні просочення вологи всередину кабелю за тривалий час роботи). Електричне поле відображено кольором. Більш інтенсивний колір відповідає більшим значенням напруженості електричного поля.

Для обраного подрібнення розрахункової області максимальне значення поля складає $|\dot{E}|_{\max} = 5,2$ кВ/мм і досягається в кутових зонах ізоляції, прилеглих до жили без частини провідників. За розрахунками таке значення перевищує значення поля біля поверхні жили без дефектів майже у 2,5 рази. Усі дефекти на рис. 1 спричиняють посилення електричного поля від 2 разів і вище у порівнянні з полем за відсутності пошкоджень. Це свідчить про значну ймовірність подальшої деградації ізоляції в зонах поблизу дефектів і поступового її старіння в цілому.

Рис. 2 показує руйнування кабелю від зовнішньої поверхні аж до частини основної ізоляції у разі втрати захисної функції оболонки і частини металевого екрана (рис. 2, ліворуч [8]). Таке пошкодження визначається як об'ємний дефект. Розподіл вектора електричного поля $|\dot{E}|$ контурними лініями і стрілками поблизу такого дефекту відображено на рис. 2, праворуч. Електричне поле розповсюджується у навколишнє середовище. У радіальному напрямку поле незначно поширюється за межі кабелю і повністю затухає на відстані до 2-х його радіусів. Максимальне поле $|\dot{E}|_{\max} = 3,1$ кВ/мм і досягається на границі пошкодження з зовнішнім напівпровідним екраном, що може призводити до подальшого його руйнуванням в цій локальній зоні. Найбільш небезпечними для руйнування і розвитку процесів старіння є крайові зони ізоляції біля межі напівпровідного шару.

На рис. 3 показано змінення електричного поля вздовж ліній AB і CD , зображених на рис. 2. Виявлено максимальні значення напруженості поля саме на зруйнованій границі зовнішнього напівпровідного екрана (графік ліворуч) та різке змінення $|\dot{E}|$ під час переходу від основної ізоляції до напівпровідного екрану (графік праворуч) як середовищ з різними значеннями електропровідності.

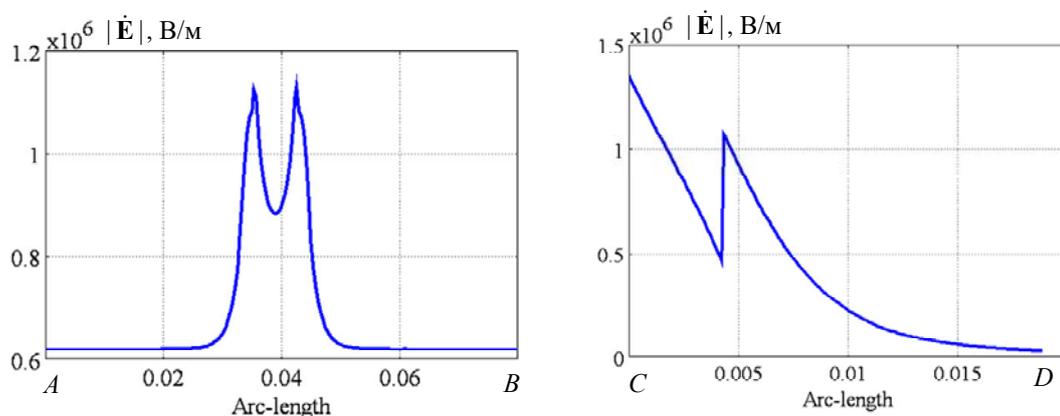


Рис. 3

Висновки. Оцінка стану силових кабелів проводиться, перш за все, за результатами перевірки і виявлення найбільш характерних дефектів всіх конструктивних елементів. Напівпровідні шари зшити-поліетиленової ізоляції кабелів призначені задля утримання електричного поля всередині діелектрика і вирівнювання розподілу поля на поверхні основної ізоляції. Ця функція порушується у разі наявності дефектів.

У роботі розглянуто типові дефекти ізоляційної структури кабелю середньої напруги (10 кВ), а саме пошкодження у вигляді нерівностей і порожнин напівпровідного екрана, відсутності декількох дротів жили у разі утворення повітряної області біля внутрішнього напівпровідного екрана та значне руйнування частини металевого екрана і ізоляції внаслідок дугоутворення, що призводить до розповсюдження електричного поля за межі кабелю.

Проаналізовано розподіл напруженості електричного поля та рівень його посилення поблизу дефектів, що знижує електричну міцність ізоляції і підвищує ймовірність її руйнування на границі з дефектами.

Виявлено, що наявність досліджених дефектів в ізоляції спричиняє збільшення електричного поля в локальних зонах їх розташування до 2,5 разів у порівнянні з полем в ізоляції без дефектів.

Результати пояснюють старіння зшито-поліетиленової ізоляції силових кабелів внаслідок розглянутих дефектів за однієї з причин – дії електричного поля. Визначений рівень і характер змінення електричного поля у разі конкретних типових дефектах надає інформацію для практичних рішень щодо циклів обслуговування або замін кабельних ділянок з метою уникнення збоїв і зайвих простоїв.

Роботу виконано за темою «Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу», КПКВК 6541030

1. *Medium voltage cable global market report 2025*. January 2025. URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/medium-voltage-cable-global-market-report> (дата звернення 15.01.2025)
2. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ ПАО "Завод Южкabelь" (www.yuzhcable.com.ua). URL: https://electrotorg.biz.ua/userfiles/public/-Кабели-XLPE-6-35-кВ_1.pdf?srsId=AfmBOorCUI2yXIZrknVdHr3quUBIkGvsv99O9DEpKtuCzOGkpuL0iQz6 (дата звернення 15.01.2025)
3. *Power cable diagnostic review*, Rapport 2022:903. Energiforsk, December 2022. 72 p. URL: <https://energiforsk.se/media/31923/power-cable-diagnostic-review-energiforskrapport-2022-903.pdf> (дата звернення 25.12.2024)
4. Hernandez-Mejia J.C., Elledge S., Riley C., Ramirez D. Cable quality assurance program. NEETRAC (National Electric Energy Testing, Research and Applications Center), IEEE PES ICC Spring 2023, Denver CO, May 2023. 9 p. URL: https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/CableQA_ICC_Spring2023.pdf (дата звернення 23.01.2025)
5. Zhou C., Yi H., Dong X. Review of recent research towards power cable life cycle management. *High Voltage*. 2017. Vol. 2. No 3. Pp. 179–187. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve.2017.0037>.
6. Perkel J., Hernandez-Mejia J.C. Medium voltage cable system partial discharge. Chapter 7. University System of Georgia, Institute of Technology of National Electric Energy Testing, Research and Application Center. Cable Diagnostic Focused Initiative. Georgia Tech Research Corporation, February 2016. 114 p. URL: https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/09/7-MV-Partial-Discharge-39_with-Copyright.pdf (дата звернення 23.01.2025)
7. Buchholz V. Finding the root cause of power cable failures. URL: http://www.electricenseonline.com/show_article.php?article=186 (дата звернення 13.01.2025)
8. Abdolall K., Halldorson G. L., Green D. Condition assessment and failure modes of solid dielectric cables in perspective. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2002. Vol. 17. No 1. Pp. 18–24.
9. 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>
10. Kucheriava I.M. Electric field enhancement in polyethylene cable insulation with defects. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.011>.
11. Беспрозванних А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со сшитой изоляцией. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2010. № 3. С. 44–47. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/143339> (дата звернення 13.01.2025)
12. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
13. National Electric Energy Testing, Research & Applications Center. URL: <https://neetrac.gatech.edu/> (дата звернення 13.01.2025)
14. Powertech (expertise in performance/type testing, modelling and studies, asset inspection/assessment, and consulting services for the electric utility, OEM, industrial, and clean energy industries). URL: <https://powertechlabs.com/> (дата звернення 24.12.2024)
15. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (Accessed 07.12.2024)
16. Olsson C.O. Modelling of thermal behaviour of polymer insulation at high electric dc field. Proc. of the 5-th *European Thermal-Sciences Conference*. The Netherlands, 18–22 May 2008. 8 p. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=6d9b36c06991948ad13dec8d9c599fc6110f394c> (дата звернення 13.01.2025)
17. Ljumba N. High voltage cable insulation systems. *Energize*. May 2008. Pp. 27–30. URL: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1467725/mod_resource/content/1/High%20voltage%20cable%20insulation%20systems.pdf (дата звернення 13.01.2025)

ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD IN CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATED CABLES WITH TYPICAL DEFECTS OF SEMICONDUCTING SHIELD

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: rB.irinan@gmail.com.

The study of electric field in the cross-linked polyethylene insulation of medium-voltage cable (10 kV) with typical defects of semiconducting insulating layers is carried out by computer modeling. The defects are associated with the

technological faults, operating conditions, electrical and environmental aging. The model is built as a quasi-electrostatic approximation for the axial-symmetric representation of the cable. The volume defect with the loss of cable sealing and with the destruction of the metal screen and part of main insulation, when the electric field spreads into the surrounding medium, is also considered. The non-uniform distribution of the electric field in the insulation, the nature of field variation and the level of field enhancement depending on the defects are analyzed. The results of the numerical study ground the causes of polyethylene insulation aging as well as the risk of the considered defects for the dielectric strength of the insulation and its reliable long-term operation. References 17, figures 3.

Key words: power cable, medium voltage, cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, semiconducting shield, typical defects, insulation ageing, electric field, computer modeling.

1. Medium voltage cable global market report 2025. January 2025. URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/medium-voltage-cable-global-market-report> (Accessed 15.01.2025)
2. Power cables with cross-linked polyethylene insulation for voltage from 6 to 35 kV. PJSC Yuzhkabel factory. URL: https://electrotorg.biz.ua/userfiles/public/-Кабели-XLPE-6-35-кВ_1.pdf?srsId=AfmBOorCUI2yXIZrknVdHr3quUBIkGvsr99O9DEpKtuCzOGkpuL0iQz6 (Accessed 15.01.2025)
3. Power cable diagnostic review, Rapport 2022:903. Energiforsk, December 2022. 72 p. URL: <https://energiforsk.se/media/31923/power-cable-diagnostic-review-energiforskrapport-2022-903.pdf>
4. Hernandez-Mejia J.C., Elledge S., Riley C., Ramirez D. Cable quality assurance program. NEETRAC (National Electric Energy Testing, Research and Applications Center), IEEE PES ICC Spring 2023, Denver CO, May 2023. 9 p. URL: https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/CableQA_ICC_Spring2023.pdf (Accessed 23.01.2025)
5. Zhou C., Yi H., Dong X. Review of recent research towards power cable life cycle management. *High Voltage*. 2017. Vol. 2. No 3. Pp. 179–187. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve.2017.0037>.
6. Perkel J., Hernandez-Mejia J.C. Medium voltage cable system partial discharge. Chapter 7. University System of Georgia, Institute of Technology of National Electric Energy Testing, Research and Application Center. Cable Diagnostic Focused Initiative. Georgia Tech Research Corporation, February 2016. 114 p. URL: https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/09/7-MV-Partial-Discharge-39_with-Copyright.pdf (Accessed 23.01.2025)
7. Buchholz V. Finding the root cause of power cable failures. URL: http://www.electricenergyonline.com/show_article.php?article=186 (Accessed 13.01.2025)
8. Abdolall K., Halldorson G. L., Green D. Condition assessment and failure modes of solid dielectric cables in perspective. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2002. Vol. 17. No 1. Pp. 18–24.
9. 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. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.003>.
10. Kucheriava I.M. Electric field enhancement in polyethylene cable insulation with defects. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.011>.
11. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G., Moscvitin E.S. Substantiation of electrophysical characteristics of high-voltage power cable semiconducting screens with stitched insulation. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2010. No 3. Pp. 44–47. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/143339> (Accessed 13.01.2025) (Rus)
12. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Extra-high voltage cables with polymer insulation. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2013. 550 p. (Rus)
13. National Electric Energy Testing, Research & Applications Center. URL: <https://neetrac.gatech.edu/> (Accessed 13.01.2025)
14. Powertech (expertise in performance/type testing, modelling and studies, asset inspection/assessment, and consulting services for the electric utility, OEM, industrial, and clean energy industries). URL: <https://powertechlabs.com/> (Accessed 24.12.2024)
15. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (Accessed 07.12.2024)
16. Olsson C.O. Modelling of thermal behaviour of polymer insulation at high electric dc field. Proc. of the 5-th *European Thermal-Sciences Conference*. The Netherlands, 18–22 May 2008. 8 p. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=6d9b36c06991948ad13dec8d9c599fc6110f394c> (Accessed 13.01.2025)
17. Ljumba N. High voltage cable insulation systems. *Energize*, May 2008. Pp. 27–30. URL: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1467725/mod_resource/content/1/High%20voltage%20cable%20insulation%20systems.pdf (Accessed 13.01.2025)

Надійшла 30.01.2025

Остаточний варіант 25.02.2025