

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ НАПІВПРОВІДНОГО ЕКРАНА СИЛОВОГО КАБЕЛЮ З ПОЛІМЕРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ

А.А.Щерба¹, академік НАН України, О.Д. Подольцев², докт.техн.наук,
І.М. Кучерява, докт.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: podol@ied.org.ua.

Методом скінченно-елементного аналізу досліджено неоднорідний розподіл електричного поля в зшитополіетиленовій ізоляції силового кабелю на напругу 330 кВ із багатопровідниковою жилою та в залежності від електропровідності та товщини напівпровідного екрана, а також за різної частоти прикладеної напруги (від 50 до 10⁴ Гц). Показано, що у разі врахування періодичної структури поверхні струмопровідної жили, задля отримання однорідного електричного поля в основній ізоляції кабелю на границі з внутрішнім напівпровідним екраном, електропровідність матеріалу цього екрана повинна перевищувати 10⁻⁶ См/м, а його товщина має бути не менше 1,5 мм. Розглянуто вплив різних видів поверхневих та об'ємних дефектів у напівпровідному екрані на неоднорідність розподілу електричного поля в ізоляції кабелю. Показано, що наявність дефектів у напівпровідному екрані може призводити до значного підвищення електричного поля в локальних зонах їхнього розташування (до 5 разів по відношенню до поля у разі відсутності дефектів), а отже сприяти утворенню та розвитку тріщинних структур в ізоляції. Отримані результати пояснюють причини мікро- та макрорівневої деградації ізоляції силових кабелів і обґрунтовують необхідність забезпечення однорідної структури та гладкої поверхні напівпровідного екрана і струмопровідної жили у технологічному процесі виготовлення силових кабелів зі зшитополіетиленовою ізоляцією. Бібл. 23, рис. 8, табл. 1.

Ключові слова: зшитополіетиленова (ЗПЕ) ізоляція, напівпровідний екран, електрофізичні властивості, поверхневі та об'ємні дефекти, неоднорідне електричне поле, скінченно-елементний аналіз.

В енергосистемі України впродовж останніх десятиліть в розподільні мережі та мережі передачі електроенергії впроваджуються силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) [1, 2]. Передумовою для цього поряд з їхніми високими експлуатаційними показниками, надійністю та безпекою стало налагоджене вітчизняне виробництво таких кабелів різних класів напруги (до 330 кВ), зокрема на харківському заводі "Південкабель" [3–5].

Монолітна полімерна ізоляція силових кабелів виготовляється методом екструзії та складається з трьох шарів: основної ізоляції та внутрішнього й зовнішнього напівпровідних екранів (рис. 1, а). Екрани призначаються для вирівнювання розподілу електричного поля на поверхні основної ізоляції. Це особливо важливо, враховуючи складну структуру поверхні багато провідникової жили, що показано на рис. 1, а. Наявність таких екранів може призводити до додаткових діелектричних втрат, що залежать від електрофізичних властивостей (діелектричної проникності та провідності) поліетиленового матеріалу екранів [6, 8] та змінюються з частотою [7].

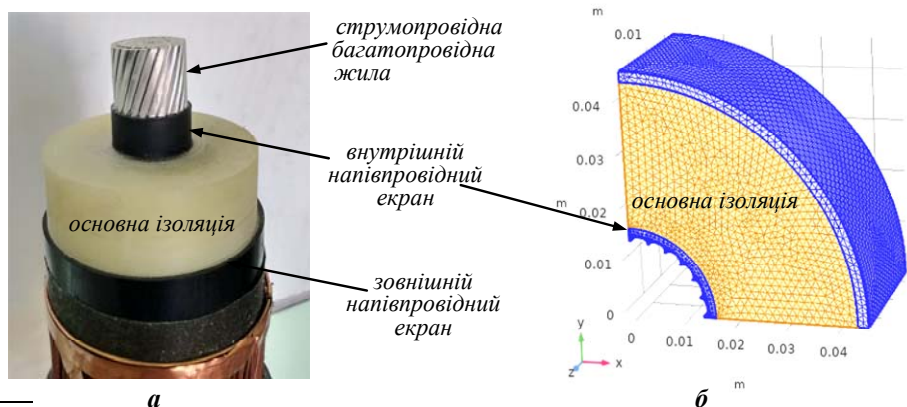


Рис. 1

© Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М., 2024

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-0200-369X>; ² <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



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

Поліетиленовий матеріал напівпровідних екранів є композитним. Введення в полімерний матеріал технічного вуглецю (сажі) дає змогу змінювати електропровідність екранів [8–10]. Наприклад, у разі збільшення об'ємної частки сажі в два рази електропровідність зростає теж у два рази [8]. У свою чергу, електрофізичні характеристики напівпровідних покриттів (діелектрична проникність та питома електропровідність) впливають на розподіл електричного поля, втрати в кабелі та його пропускну спроможність [8, 11]. У разі наявності дефектів в об'ємі екранів ізоляції, збільшення в їх локальних областях напруженості електричного поля впливає не тільки на утворення триїнгових структур і виникнення часткових розрядів, але й призводить до механічних розривів матеріалу [12]. Загалом основним механізмом старіння ЗПЕ ізоляції силових кабелів є поширення в присутності води (вологи) та під впливом сильного електричного поля водних та електричних триїнгів у місцях розташування дефектів та забруднень [1, 13]. Розвиток триїнгів призводить до погіршення властивостей ізоляції і, перш за все, до зниження її електричної міцності, а згодом створює умови для пробоя ізоляції, що становить небезпеку виходу кабелю з ладу [13].

Напівпровідні екрани силових кабелів в залежності від вмісту технічного вуглецю можуть характеризуватися різними діелектричними властивостями в широкому діапазоні змінення частоти (питомою електропровідністю від 10^{-1} до 10^{-14} См/м [9]), при цьому діелектрична проникність дорівнює 2,3–2,5 і слабо залежить від частоти [7].

У роботі [14] показано, що діелектричні втрати в напівпровідних шарах ізоляції мають переважне значення лише на частоті більше 10 МГц. У даній роботі діелектричні втрати не розглядаються, а досліджується вплив електропровідності екранів на розподіл електричного поля в ізоляції на частоті нижче вказаної.

Відмітимо, що середній термін служби та надійність кабелів залежать від електропровідності та теплових властивостей складових елементів. Згідно з експериментальними даними [15] питомий об'ємний опір матеріалу напівпровідних екранів зменшується із збільшенням вмісту сажі. Крім того, теплопровідність збільшується відповідно до зростання вмісту сажі і температури нагріву, а електропровідність σ екранів зменшується із зростанням температури T . На основі вимірювань [15] у таблиці наведено залежність $\sigma(T)$ для композиційного матеріалу СВ/HDPE з 20% часткою сажі.

Як підтверджують дані таблиці, у режимі короткотривалого перегріву, наприклад, у разі короткого замикання, внаслідок зростання температури електропровідність напів-

$T, ^\circ\text{C}$	40	60	80	100	120	140	145	150
$\sigma, \text{См/м}$	3,17	3,17	3,17	2,52	0,63	10^{-4}	10^{-6}	10^{-7}

провідного екрана може суттєво зменшуватися, що може привести до послаблення його екрануючих властивостей, а з часом – до прискорення старіння ізоляції. Для напівпровідного екрана важливо підбирати матеріали за умови, що за критичної температури (до прикладу, 140°C) його електропровідність має бути не менше певного достатньо низького значення.

У роботі [16] підкреслюється, що напівпровідний екрануючий шар відіграє важливу роль для досягнення однорідності електричного поля в ізоляції кабелю високої напруги, а електричні та теплові властивості шару безпосередньо впливають на загальні характеристики всієї ізоляції. Експериментальні дані [16] також свідчать, що питомий опір напівпровідного композиту поступово зростає зі збільшенням температури і зменшується зі збільшенням вмісту сажі. Крім того, стійкість до пробоя композиційної структури напівпровідного екрана значно зменшується з підвищенням температури (для дослідженого в [16] матеріалу: від 307 кВ/мм за 25°C до 203 кВ/мм за 90°C).

Надійність кабелів у процесі тривалої експлуатації (до 40 років) багато в чому пов'язана не тільки з властивостями матеріалів, а й з бездефектністю елементів, станом поліетиленової ізоляції та інтенсивністю її старіння [1, 13, 17]. Дефекти поліетиленової ізоляції на мікро- та макрорівнях призводять до неоднорідності і локальної концентрації електричного поля, зниження електричної міцності ізоляції. У процесі експлуатації кабелів дефекти здатні поширюватися, змінювати властивості та структуру ізоляції [13, 17].

Структура напівпровідного екрана не є досконалою, однорідною і гладкою як на макро-, так і на мікрорівні [16, 18–20]. Вона може мати дефекти різної форми та розмірів. Такі дефекти можна умовно поділити на:

- об’ємні дефекти у вигляді, наприклад, каналів або порожнин у напівпровідних екранах, заповнених водою, з трійнгом в основній ізоляції (рис. 2, а [18]), тріщин, що йдуть від поверхні жили в основну ізоляцію (рис. 2, б [19]);
- поверхневі дефекти напівпровідного екрана у вигляді викривлення, різних нерівностей, спрямованих в ізоляцію (рис. 2, в [20]) або виступів, нерівностей струмопровідної жили (рис. 2, г).

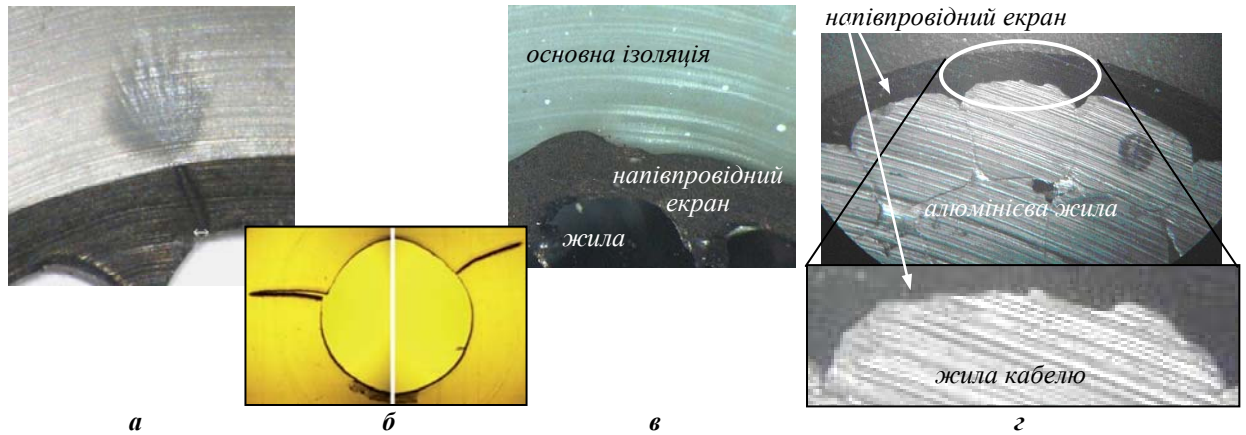


Рис. 2

Дослідження розподілу електричного поля та ступеня його неоднорідності для характерних дефектів в напівпровідному екрані та визначення кількісних залежностей збільшення локальних значень поля за різних електрофізичних властивостях ізоляційних шарів становить важливу практичну задачу і, перш за все, з точки зору вдосконалення технології отримання багатошарової ізоляції з підвищеним терміном експлуатації.

У зв’язку з вище обґрунтованими доцільністю вивчення електричного поля в напівпровідних екранах і основної ізоляції силових кабелів та практичною стороною задачі **метою роботи** є обґрунтування необхідності забезпечення однорідної структури та гладкої поверхні напівпровідних екранів і струмопровідної жили в технологічному процесі виготовлення кабелів зі зшито-поліетиленовою ізоляцією.

У роботі проводиться кількісне дослідження та виявлення особливостей розподілу електричного поля у внутрішньому напівпровідному екрані силового кабелю на напругу 330 кВ за різних електричних властивостях шару, його товщині та за наявності найбільш характерних дефектів. Для дослідження вибрані такі дефекти напівпровідного екрана: наскрізний канал, заповнений водою, із трійнгом в основній ізоляції [18] (рис. 2, а); тріщина в ізоляції від поверхності жили [19] (рис. 2, б); викривлення поверхні екрана на границі з основною ізоляцією [20] (рис. 2, в); нерівність поверхні напівпровідного екрана біля жили кабелю (рис. 2, г).

У разі, коли побудова експериментальної моделі та проведення натурних експериментів є ускладненими та затратними, перевага віддається обчислювальним експериментам. Саме математичне і комп’ютерне моделювання, що надає можливості вивчення найбільш широкого діапазону змін параметрів об’єкту, вибрано методом дослідження в роботі.

Дослідження електричних процесів в ЗПЕ ізоляції проводиться на основі скінченно-елементного розрахунку та аналізу тривимірного електричного поля в пакеті програм *Comsol* [21], а також з використанням загальних положень і результатів попередніх робіт [1, 8, 10, 22]. Результати роботи пояснюються теоретично та узгоджуються з кількісними даними, представленими в роботах [1, 8, 18, 20, 22, 23]. Достовірність отриманих результатів полягає в тому, що наукові положення і висновки ґрунтуються на перевірених математичній моделі та численних комп’ютерних розрахунках у програмі *Comsol* для конкретних геометричних параметрів та електричних характеристик ЗПЕ ізоляції досліджуваного кабелю за ретельного підбору в комп’ютерній моделі обчислювальної точності та кінцево-елементного поділення розрахункової області.

Далі наведені результати розрахунків електричного поля в ізоляції кабелю, коли враховується періодична структура поверхні струмопровідної жили: 1) за відсутності дефектів в напівпровідному екрані; 2) за наявності таких дефектів.

Неоднорідне електричне поле під час врахування періодичної структури поверхні жили.

Модель для дослідження. У роботі досліджується електричне поле в ізоляції силового кабелю АПВЄВнгд 1х630/185 на напругу 330 кВ, фотографію якого наведено на рис. 1, а. Поставлена задача передбачає розрахунок електричного поля в об'ємі кабелю в декартовій системі координат $Oxyz$. Розглядається складна структура поверхні струмопровідної жили – періодична структура з елементом, зображеним на рис. 1, б, та вибираються реальні розміри всіх складових кабелю.

Тривимірний розрахунковий об'єкт (рис. 1, б) обрано на основі підходів багатомасштабного моделювання [22]. Область являє собою елементарний об'єм структури так, що в цілому картина поля в ізоляції кабелю відтворюється шляхом періодичного повторення картини поля в такому об'ємі за кутовою координатою.

Електричний потенціал, прикладений до жили кабелю та змінюваний за гармонійним законом, є джерелом потенціальної складової змінного електричного поля (квазіелектростатичного поля) в поліетиленовій ізоляції кабелю. З урахуванням цього на поверхні жили задається електричний потенціал $\phi = U$ ($U = 330 \text{ кВ}/\sqrt{3}$), а на граничній поверхні зовнішнього напівпровідного екрана – $\phi = 0$. Вплив об'ємного електричного заряду, що інjektується з поверхні електродів в ізоляцію, не розглядається.

Електричний потенціал ϕ в розрахунковому об'ємі (рис. 1, б) визначається з диференціального рівняння, записаного в частотній області

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_{tot} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla\phi = 0, \quad (1)$$

$$\text{де } \mathbf{J}_{tot} = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = -\nabla\phi.$$

У цих виразах \mathbf{J}_{tot} – густина повного електричного струму (струму провідності та струму зміщення), ϵ_0 та ϵ_r – відповідно, абсолютна діелектрична проникність вакууму та відносна діелектрична проникність середовища (різних шарів ізоляції); σ – електропровідність середовища; $\omega = 3,14 \text{ рад/с}$ – кругова частота (встановлена частота $f = 50 \text{ Гц}$). Крапкою зверху позначені комплексні величини.

Граничні умови доповнюються наступним чином: на бокових зовнішніх поверхнях задається умова електричної ізоляції: $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_{tot} = 0$ (\mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі одиничної довжини), на внутрішніх поверхнях – умова неперервності $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_{tot,1} - \mathbf{J}_{tot,2}) = 0$.

Після розрахунку потенціалу ϕ напруженість електричного поля визначається як $\mathbf{E} = -\nabla\phi$.

Для кількісної оцінки ступеня неоднорідності електричного поля в основній ізоляції на границі з внутрішнім напівпровідним екраном використовується коефіцієнт неоднорідності

$$k = \frac{|\mathbf{E}|_{\max} - |\mathbf{E}|_{\min}}{0,5(|\mathbf{E}|_{\max} + |\mathbf{E}|_{\min})}. \quad (2)$$

Результати моделювання електричного поля. Початкові дані для розрахунків: діаметр жили – 30 мм (кількість провідників жили за довжиною кола – 24); діаметр основної ізоляції – 88 мм, товщина зовнішнього напівпровідного екрана – 4 мм; товщина внутрішнього екрана $\Delta = 1,5 \text{ мм}$; діелектрична проникність усіх ізоляційних шарів $\epsilon_r = 2,4$; електропровідність основної ізоляції / зовнішнього / внутрішнього екранів відповідно $\sigma = 10^{-14}/10^{-6}/10^{-10} \text{ См/м}$. Водне середовище в розглянутих дефектах (тріщині, каналі) характеризується $\epsilon_r = 5$, $\sigma = 0,05 \text{ См/м}$.

Окремо під час дослідження впливу заданих характеристик внутрішнього напівпровідного екрана на змінення електричного поля варіюються частота f та Δ і σ .

Електричне поле за різних характеристик внутрішнього екрана. Змінення електричного поля $|\mathbf{E}|$ на границі між основною ізоляцією і екраном за його електропровідності $\sigma = 10^{-10} \text{ См/м}$ та різній товщині Δ показано на рис. 3, а. Характер змінення поля (з періодичними піковими значеннями) відповідає заданій геометрії жили кабелю.

Результати розрахунку коефіцієнта неоднорідності поля за виразом (2) в залежності від електропровідності екрана σ та за різних значеннях його товщини Δ наведено на рис. 3, б. Як видно, зі збільшенням товщини екрана його екрануючі властивості покращуються – поле стає більш однорідним, про що свідчить зменшення значення коефіцієнта k . Існує критичне значення

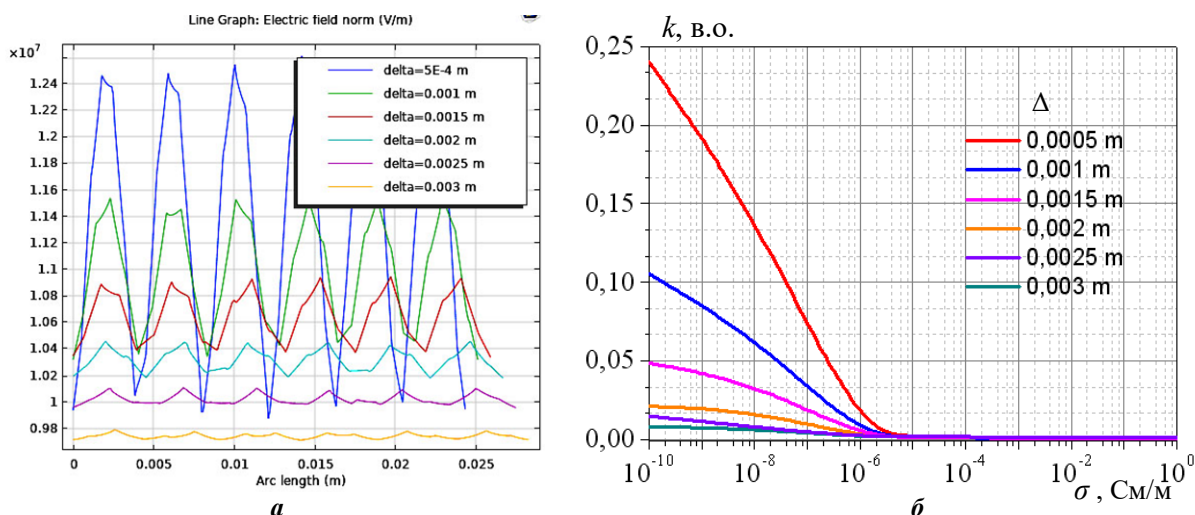


Рис. 3

електропровідності екрана $\sigma^* \approx 10^{-6}$ См/м, у разі перевищення якого коефіцієнт неоднорідності $k \rightarrow 0$ для всіх розглянутих значень Δ . За результатами проведених розрахунків у діапазоні зміння $\sigma = 10^{-6} - 10^0$ См/м коефіцієнт неоднорідності $k \leq 0,002$ для $\Delta = 0,5 \div 3$ мм.

На рис. 4 наведено змінення електричного поля $|\dot{E}|$ в основній ізоляції на границі з внутрішнім напівпровідним екраном товщиною $\Delta = 1,5$ мм за різних значеннях його електропровідності σ , за частоти $f = 50$ Гц = const (рис. 4, а) та різних значеннях частоти напруги ($f = 50, 10^3$,

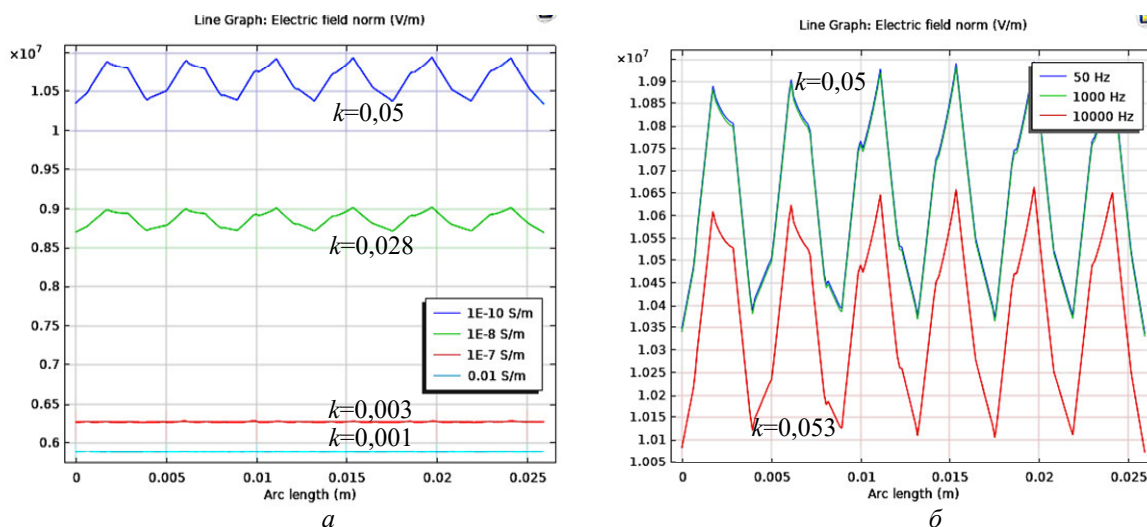


Рис. 4

10^4 Гц) за $\sigma = 10^{-10}$ См/м = const (рис. 4, б). Наведено значення коефіцієнта неоднорідності k для відповідних кривих. Комп'ютерні результати показують, що із зростанням електропровідності екрана σ поле стає більш однорідним (значення k для електричного поля зменшуються). Разом з цим у такому випадку збільшуються втрати в напівпровідному екрані [8]. Дані рис. 4, б також ілюструють, що за вибраних параметрах матеріалів активної зони кабелю частота слабо впливає на неоднорідність розподілу електричного поля в основній ізоляції.

Неоднорідне електричне поле за наявності локальних дефектів в напівпровідному екрані. У наведених далі результатах моделювання враховується як періодична структура поверхні струмопровідної жили кабелю (що досліджувалося у попередньому розділі статті), так і додатково наявність різних типів дефектів в області внутрішнього напівпровідного екрана. Відповідно до дефекту на рис. 2, а, рис. 5 представляє розподіл в ізоляції електричного поля $|\dot{E}|$ на віддаленні від каналу, наповненого водою, в екрані ($|\dot{E}|_{\max} = 14,2$ кВ/мм) (рис. 5, а) та в різних фрагментах площини, що включає цей канал (рис. 5, б). Поле у разі водного каналу підвищується до 72,9 кВ/мм,

тобто майже в 5,1 разів у порівнянні з максимальним полем у разі бездефектного екрана. Коefіцієнт

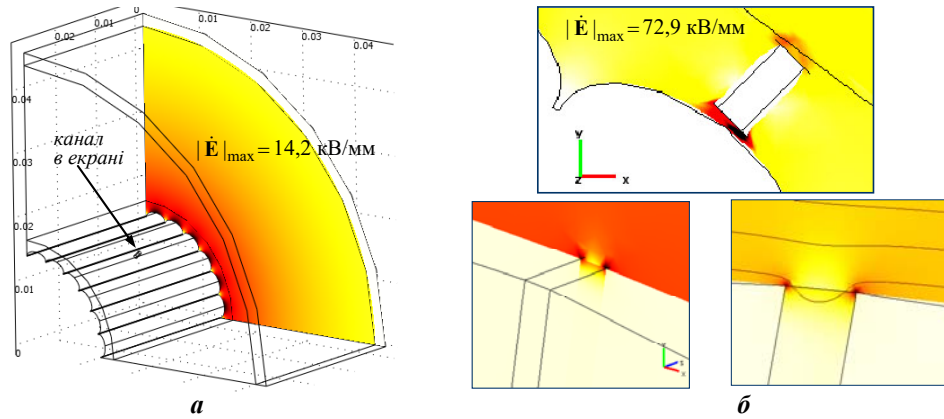


Рис. 5

неоднорідності поля $k \approx 1,95$.

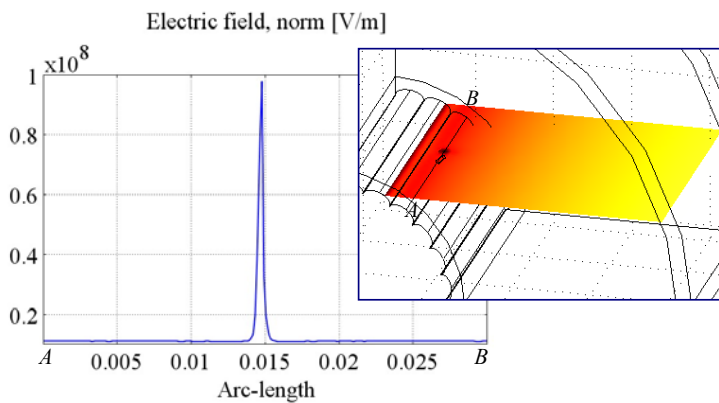


Рис. 6

Рис. 6 відображає змінення поля $|\dot{E}|$ вздовж лінії AB на площині, показаній праворуч, яка проходить безпосередньо над каналом в екрані, та різке зростання $|\dot{E}|$ в зоні, що відповідає цьому дефекту. Рис. 7 подає ліворуч розподіл $|\dot{E}|$ біля тріщини відповідно до рис. 2, б та з нерівністю напівпровідного екрана відповідно до рис. 2, в (картина праворуч). Максимальне поле за наявності тріщини збільшується майже в 4,1 рази, а у випадку викривлення поверхні екрана – в 3,2 разів.

Результати дослідження поля для нерівності жили кабелю відповідно до рис. 2, г представлено на рис. 8, а саме розподіл $|\dot{E}|$ в площині, що включає нерівності жили, (рис. 8, а) та змінення поля $|\dot{E}|$ вздовж границі напівпро-

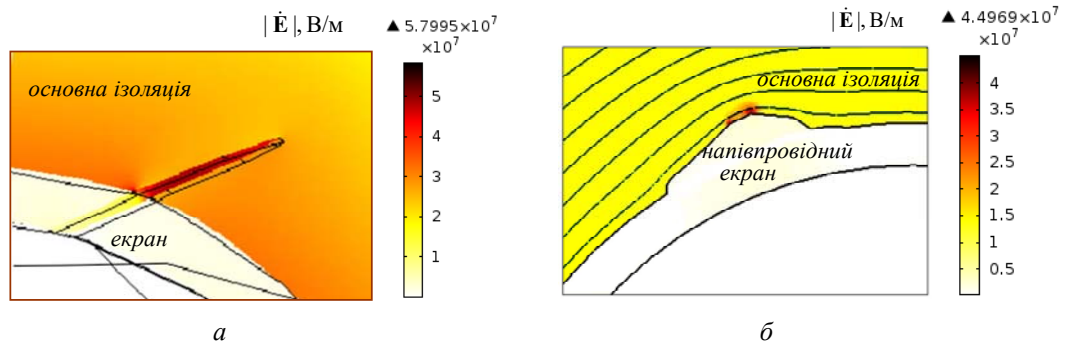


Рис. 7

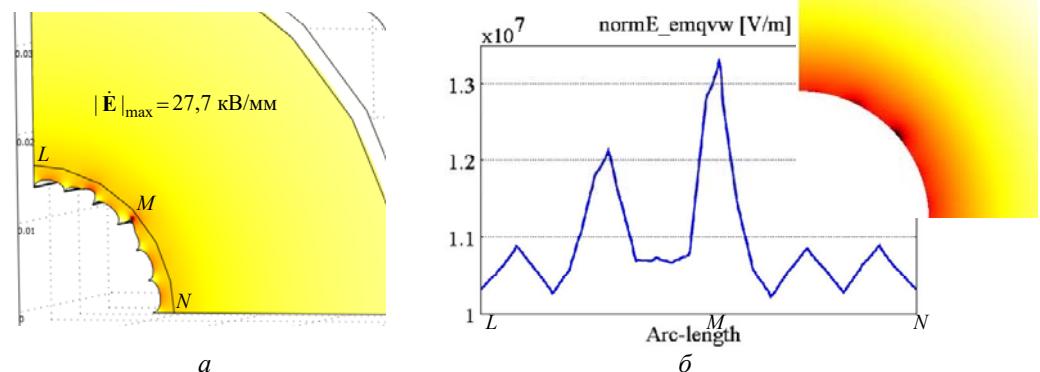


Рис. 8

відного екрана LMN – рис. 8, б, де на вставці праворуч показано окремо розподіл поля в основній ізоляції над екраном з нерівностями. Видно, що електричне поле навіть на віддаленні від дефектів поверхні жили реагує стрибками, збільшуючися до 1,23 рази біля границі з основною ізоляцією. Коефіцієнт неоднорідності поля для випадку нерівності жили $k \approx 1,86$.

Слід зазначити, що поле поблизу поверхні, на якій змінюються електрофізичні параметри, залежить від кривизни поверхні. До того ж, локальні значення поля в місцях розташування розглянутих гострих дефектів в напівпровідному екрані теоретично дуже великі і швидко змінюються з віддаленням від них. Представлені результати відносно неоднорідності електричного поля відповідають випадку однакового вибору скінченно-елементного розбиття розрахункової області за тривимірною комп'ютерною моделювання (рис. 1, б).

Висновки. За допомогою комп'ютерного скінченно-елементного аналізу проведено дослідження електричного поля в ізоляції, зокрема в її внутрішньому напівпровідному екрані, для силового кабелю на напругу 330 кВ з урахуванням електрофізичних характеристик екрана та наявності в ньому характерних поверхневих та об'ємних дефектів.

Виконано кількісний аналіз залежності екрануючого ефекту від електропровідності внутрішнього напівпровідного екрана кабелю та його товщини. Показано, що для отримання однорідного електричного поля в основній ізоляції на границі з внутрішнім напівпровідним екраном електропровідність його матеріалу повинна перевищувати 10^{-6} См/м, а його товщина має бути не менше 1,5 мм.

За результатами проведених розрахунків показано, що із зростанням електропровідності екрана поле стає більш однорідним – значення розглянутого коефіцієнта неоднорідності електричного поля зменшується. При цьому збільшуються втрати в екрані. Виявлено, що за вибраних параметрах активних матеріалів силового кабелю частота слабо впливає на неоднорідність розподілу електричного поля в основній ізоляції.

Наявність поверхневих та об'ємних дефектів у напівпровідному екрані може призводити до значного підвищення електричного поля в локальних зонах їхнього знаходження (до 5 разів по відношенню до поля без дефектів в екрані), а отже призводити до утворення і розвитку триїнгових структур в ізоляції. Отримані результати пояснюють причини мікро- та макрорівневої деградації ізоляції силових кабелів та обґрунтовують необхідність забезпечення однорідної структури та гладкої поверхні напівпровідних екранів і струмопровідної жили в технологічному процесі виготовлення кабелів зі шито-поліетиленовою ізоляцією.

Дослідження виконані за Проектом № 2022.01/0211 "Розробка мобільної системи формування напруги зі змінними параметрами для моніторингу безпеки і надійності високовольтного електрообладнання енергетичних об'єктів критичної інфраструктури України", який фінансується Національним фондом досліджень України.

1. 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.
2. Electrical power cable engineering. Third Edition. Ed. by W.A. Thue. CRC Press, 2011, 460 p.
3. ПАО «Южкabelь». URL: <https://www.yuzhcable.info/> (дата звернення 22.04.2024).
4. Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения. Харьков: Майдан, 2017. 64 с.
5. Золотарев В.М. Завод "Южкabelь": вехи пути (75 лет заводу "Южкabelь"). *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 5. С. 12–16.
6. Liu T., Fothergill J., Dodd S., Nilsson U. Influence of semicon shields on the dielectric loss of XLPE cables. IEEE Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, VA, USA, 18-21 October 2009. Pp. 246–249. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377792>.
7. Bezprozvannykh G.V., Kostiukov I.A. A calculation model for determination of impedance of power high voltage single-core cables with polymer insulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No 3. Pp. 47–51. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.08>.
8. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со шитой изоляцией. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2010. № 3. С. 44–47.
9. Rothon R. *Fillers for Polymer Applications*. Springer International Publishing, 2017. 317 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>.

10. Lee K.-Y., Nam J.-C., Park D.-H., Park D.-H. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154 kV power cable. Proceedings of International Symposium on *Electrical Insulating Materials* (ISEIM'2005), 2005, 5–9 June 2005. Vol. 3. Pp. 616–619.
11. Кучерявая И.Н. Применение метода многомасштабного моделирования для исследования электрического поля в изоляции силового кабеля на 330 кВ в аварийном режиме. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 4. С. 13–18.
12. Bezprozvannykh G.V., Kyessayev A.G. The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016. No 6. Pp. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.6.09>.
13. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22.
14. Chunchuan Xu, Boggs S.A. High frequency properties of shielded power cable. Part 2: Sources of error in measuring shield dielectric properties. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. No 1. Pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2006.1618966>.
15. Lee K.Y., Nam J.C., Park Dong-Ha, Park Dae-Hee. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154KV power cable. IEEE Proceedings of 2005 International Symposium on *Electrical Insulating Materials*, (ISEIM 2005), Kitakyushu, Japan, June 5–9, 2005. Vol. 3. Pp. 616–619. DOI: <https://doi.org/10.1109/iseim.2005.193444>.
16. Wei Y., Liu M., Li X., Li G., Li N., Hao C., Lei Q. Effect of temperature on electric-thermal properties of semiconductive shielding layer and insulation layer for high-voltage cable. *High Voltage*. 2021. Vol. 6. Pp. 805–812. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve2.12089>.
17. Teyssedre G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2013. Vol. 29. No 5. Pp. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6585854>
18. Hvidsten S., Kvande S., Ryen A., Larsen P.B. Severe degradation of the conductor screen of service and laboratory aged medium voltage XLPE insulated cables. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. Vol. 16. No 11. Pp. 155–161. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4784563>.
19. Ковригин Л.А. Технологические и эксплуатационные дефекты в изоляции кабелей. *Кабель-news*. 2008. № 10. С. 58–60.
20. Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachadran R. Long-life XLPE insulated power cable. *JiCable 2007*. URL: http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf (дата звернення 22.04.2024).
21. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (дата звернення 22.04.2024).
22. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Многомасштабное моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. 256 с.
23. Mashikian M.S., Szatkowski A. Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. No 4. Pp. 24–32.

ELECTRIC FIELD OF SEMICONDUCTING SCREEN IN POWER CABLE WITH POLYMER INSULATION TAKING INTO ACCOUNT STRUCTURAL INHOMOGENEITIES

A.A. Shcherba, O.D. Podoltsev, I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: podol@ied.org.ua.

The non-homogeneous electric field distributions in the cross-linked polyethylene insulation of 330 kV power cable with multi-conductor core depending on the electrical conductivity and thickness of the semiconducting screen as well as at different frequency of applied voltage (from 50 to 10^4 Hz) are studied by finite-element analysis. As shown, taking into account the periodic structure of core surface, the electrical conductivity of the material of internal semiconducting screen should exceed 10^{-6} S/m and its thickness should be at least 1.5 mm in order to obtain the uniform electric field in the basic insulation of the cable at the boundary with the screen. The paper also considers the effect of various types of the surface and volumetric defects in the semiconducting screen on the electric field inhomogeneity in cable insulation. It is shown that the defects in the screen can lead to a significant increase of the electric field in the local zones of their location (up to 5 times as compared to the field without defects) and therefore contribute to the formation and development of treeing structures in the insulation. The revealed results explain the reasons for the micro- and macro-level degradation of power cable insulation and confirm the need to ensure the uniform structure, smooth surface of both semiconducting screen and core during the technological process of manufacturing the power cables with cross-linked polyethylene insulation. References 23, figures 8, table 1.

Key words: cross-linked polyethylene insulation, semiconducting screen, electrophysical properties, surface and volumetric defects, non-uniform electric field, finite-element analysis.

1. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotaryov V.M., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Extra-high voltage cables with polymer insulation. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2013. 550 p. (Rus)
2. Electrical power cable engineering. Third Edition. Ed. by W.A. Thue, CRC Press, 2011, 460 p.
3. Private Joint-Stock Company «Yuzhcable Works». URL: <https://www.yuzhcable.info/lang/en> (accessed at 22.04.2024). (Rus)
4. Guiding technical material on the construction, testing and operation of modern extra-high-voltage power cable lines. Kharkiv: Maidan, 2017. 64 p. (Rus)
5. Zolotaryov V.M. Plant «Yuzhcable works»: milestones of the road (75 years to Plant «Yuzhcable works»). *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2018, No. 5, p. 12–16. (Rus)
6. Liu T., Fothergill J., Dodd S., Nilsson U. Influence of semicon shields on the dielectric loss of XLPE cables. IEEE Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, VA, USA, 18-21 October 2009. Pp. 246–249. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377792>.
7. Bezprozvannykh G.V., Kostiukov I.A. A calculation model for determination of impedance of power high voltage single-core cables with polymer insulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No 3. Pp. 47–51. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.08>.
8. 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. (Rus)
9. Rotheron R. Fillers for Polymer Applications. Springer International Publishing, 2017. 317 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>.
10. Lee K.-Y., Nam J.-C., Park D.-H., Park D.-H. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154 kV power cable. Proceedings of International Symposium on *Electrical Insulating Materials (ISEIM'2005)*, 2005, 5–9 June 2005. Vol. 3. Pp. 616–619.
11. Kucheriava I.M. Application of multiscale modeling for study of electric field in insulation of 330 kV power cable at emergency operation. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 4. Pp. 13–18. (Rus)
12. Bezprozvannykh G.V., Kyessayev A.G. The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016. No 6. Pp. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.6.09>.
13. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22.
14. Chunchuan Xu, Boggs S.A. High frequency properties of shielded power cable. Part 2: Sources of error in measuring shield dielectric properties. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. No 1. Pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2006.1618966>.
15. Lee K.Y., Nam J.C., Park Dong-Ha, Park Dae-Hee. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154KV power cable. IEEE Proceedings of 2005 International Symposium on *Electrical Insulating Materials (ISEIM 2005)*, Kitakyushu, Japan, June 5–9, 2005. Vol. 3. Pp. 616–619. DOI: <https://doi.org/10.1109/iseim.2005.193444>.
16. Wei Y., Liu M., Li X., Li G., Li N., Hao C., Lei Q. Effect of temperature on electric-thermal properties of semiconductive shielding layer and insulation layer for high-voltage cable. *High Voltage*. 2021. Vol. 6. Pp. 805–812. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve2.12089>.
17. Teyssedre G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2013. Vol. 29. No 5. Pp. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6585854>
18. Hvidsten S., Kvande S., Ryen A., Larsen P.B. Severe degradation of the conductor screen of service and laboratory aged medium voltage XLPE insulated cables. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. Vol. 16. No 11. Pp. 155–161. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4784563>.
19. Kovrigin L.A. Technological and operating defects in cable insulation. *Kabel-news*. 2008. No 10. Pp. 58–60. (Rus)
20. Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachadran R. Long-life XLPE insulated power cable. *JiCable 2007*. URL: http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf (available at 22.04.2024).
21. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (available at 22.04.2024).
22. Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Multiscale modeling in electrical engineering. Kiyv: Insitut elektrodinamiki NAN Ukrainy, 2011. 255 p. (Rus)
23. Mashikian M.S., Szatkowski A. Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. No 4. Pp. 24–32.

Надійшла 08.05.2024
Остаточний варіант 17.06.2024