

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ У КОМПОЗИТНИХ НАПІВПРОВІДНИХ ЕКРАНАХ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ДІЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ СИЛОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ

Г.В. Безпрозванних^{1*}, докт. техн. наук, М.В. Гринишина^{2**}

¹Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.

²ТОВ «Інтеркабель Київ»,

вул. Дачна, 5, с. Капітанівка, Кієво-Святошинський р-н, Київська обл., 08112, Україна.

E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khp.edu.ua, m.grynysyna@interkabel.ua.

Запропоновано методологію моделювання процесу перколяції у напівпровідних екранах силових високовольтних кабелів. Напівпровідний екран представлено двовимірною решітчастою моделлю з полімерною матрицею, що наповнена провідними частинками сажі. Модельні матриці композиту в залежності від ймовірності заповнення та концентрації провідного наповнювача узгоджуються з мікрофотографіями розподілу сажі у поліетиленовій матриці напівпровідного екрану силового кабелю. Визначено з урахуванням стохастичності процесу перколяції діапазон критичної концентрації провідного наповнювача, що обумовлює поріг протікання у представленій моделі. На експериментальній часовій залежності струму абсорбції силового кабелю спостерігаються збурення, що є опосередкованим свідченням накопичення поверхневих зарядів на межі поділу напівпровідний екран – високовольтна полімерна ізоляція. Часові залежності електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат на частоті 120 Гц підтверджують стохастичний характер процесу накопичення поверхневих зарядів. Цей процес обумовлює уповільнену у часі міжфазну поляризацію у силових високовольтних кабелях. Бібл. 36, рис. 5.

Ключові слова: силовий кабель, напівпровідний екран, провідний наповнювач, поріг протікання, міжфазна поляризація, струм абсорбції, діелектричні параметри.

Вступ. Розвиток технології силових кабелів є досить повільним процесом. Завдяки зусиллям кабельної промисловості у світовій практиці впроваджуються силові високовольтні кабелі не тільки змінного [1], але і постійного струму з нанокompозитною електричною ізоляцією на основі зшитого поліетилену, термопластичних поліетилену низької густини та поліпропілену [2–7].

Контрольоване додавання в полімерну матрицю неорганічних компонентів (нітриду алюмінію, нітриду бору, діоксиду кремнію, оксиду алюмінію, оксиду титану, карбіду кремнію, оксиду цинку, тощо) дає змогу отримати покращені електричні, механічні, тепло-фізичні, хімічні, термічні, вогнестійкі властивості електричної композитної ізоляції [8–14]. Нанокompозитна ізоляція на основі термопластичних полімерів є альтернативою зшитої поліетиленовій ізоляції силових високовольтних кабелів постійного струму [2, 5–7].

Електрична полімерна ізоляція з вмістом неорганічного нанонаповнювача менше ніж 10% мас. має більший питомий об'ємний опір ($\rho_v \geq 10^{16}$ Ом·м) та у меншій мірі здатність до накопичення просторових зарядів у товщі високовольтної ізоляції порівняно з ненаномодифікованою [15]. Нанорозмірні частинки наповнювача з надзвичайно великою питомою поверхнею відіграють роль пасток об'ємних зарядів, що є основою забезпечення працездатності кабелів з такою електричною ізоляцією на постійному струмі [15].

Проблема накопичення статичного електричного заряду у товщі як ненаномодифікованої, так і наномодифікованої, високоякісної полімерної ізоляції частково вирішується застосуванням напівпровідних екранів у силових високовольтних кабелях [1–2].

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Напівпровідні екрани, розташовані з обох боків високовольтної електричної ізоляції кабелів, являють собою композитний матеріал з наповненою мікроно-розмірними частинками сажі або карбіду кремнію (SiC) полімерної матриці [16]. Поліетилен, який використовується як матриця для напівпровідних шарів силових кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією, повинен мати високу термічну стабільність до (250–300)°C під час процесу зшивання задля забезпечення механічних властивостей екрану та електричної природи міжчастинкових проміжків вуглецю [17]. Крім того, поліетилен повинен містити знижений ризик

обгоряння та утворення грудок [17]. При цьому наповнювач – сажа – має великий вплив на гладкість поверхні і чистоту напівпровідних шарів [16]. Забезпечення гладкості напівпровідного екрану є важливою складовою технологічного процесу задля отримання однорідності електричного поля на поверхні струмопровідної жили та високовольтної ізоляції [17]. Виступи напівпровідного шару можуть посилювати локальне електричне поле, прискорюючи електричне старіння ізоляції [17].

Електричні параметри (питомий об'ємний опір, діелектрична проникність, коефіцієнт втрат електричної енергії) напівпровідних шарів залежать від природи полімерної матриці, концентрації наповнювача, параметрів технологічного процесу отримання напівпровідних шарів, температури, тощо.

Застосування напівпровідних екранів у силових кабелях пов'язано з критичними проблемами їхнього впливу на діелектричні параметри самої високовольтної полімерної ізоляції. Тривалий час дослідження накопичення просторового заряду у силових високовольтних кабелях зосереджувалися в основному на інжекції заряду від струмопровідної жили у зшити поліетиленову ізоляцію [18]. Інжекція заряду провідного наповнювача (сажі) з напівпровідних екранів у зшити поліетиленову ізоляцію не враховувалася.

У [19–21] доведено вплив діелектричної проникності напівпровідних екранів на розподіл електричного поля і втрати електричної енергії у високовольтній зшитій поліетиленовій ізоляції кабелів напруги 50 Гц. При отриманні значень тангенсу кута діелектричних втрат напівпровідних екранів та зшити поліетиленової ізоляції не враховано товщину та питому активну провідність напівпровідних шарів, що визначає процеси електропровідності та поляризації на змінній напрузі [22].

У діапазоні частоти від 200 Гц до 20 кГц визначено вплив напівпровідних покриттів з урахуванням поляризаційних процесів на втрати електричної енергії у високовольтній зшитій поліетиленовій ізоляції силових кабелів [23].

Врахування дисперсії комплексної діелектричної проникності, співвідношень між питомими об'ємними електропровідностями на постійному і змінному струмах, товщини напівпровідних екранів дали можливість отримати у широкому діапазоні частоти ефективні параметри діелектричної абсорбції силових високовольтних кабелів [24].

Широкий спектр експериментальних досліджень доводить повільне спадання у часі струму абсорбції як для не наповненої, так і наповненої нанодомішками незалежно від їх типу та масової долі, в зразках полімерної ізоляції силових високовольтних кабелів [25]. Так, за тривалості вимірювань до 70 хв. струм абсорбції на постійному струмі зменшується у 100 разів: від 10^{-12} А до 10^{-14} А [25].

Геометричний і електричний початок зв'язності у композитній системі напівпровідного екрану не є одночасним. Кореляція між геометричними і електричними параметрами екрану залежить від фізичних процесів, що протікають в ньому, зокрема таких, як тунелювання та інжекція зарядів. Композитні напівпровідні екрани є сильно-неоднорідними матеріалами та мають багатомасштабну просторову структуру фрактального типу [26–30]. Як наслідок, в них виникають мікро-неоднорідності електричних полів і струмів і, відповідно, можуть виявлятися нелінійні ефекти.

Умовно двокомпонентний екран з поліетиленовою матрицею складається з трьох фаз в залежності від наповнення мікрон-домішками сажі: електроізоляційної – за вмісту сажі (вуглецю) від 0 до 20% мас. питома об'ємна електропровідність γ знаходиться у діапазоні від 10^{-14} См/м до 10^{-12} См/м; перколяції (протікання струму) – за вмісту сажі від 20% мас. до 40% мас. і провідністю 10^{-12} См/м $< \gamma < 10^{-2}$ См/м; провідної – за вмісту сажі від 40% мас. до 60% мас. і провідністю 10^{-2} См/м $< \gamma < 1$ См/м [26, 27].

Задля аналітичного опису залежностей електропровідності від вмісту наповнювача можна використати методи ефективного середовища, теорії імовірності, термодинамічних моделей та ін. Найбільш універсальним є використання теорії перколяції [28–32], за допомогою якої розглядається імовірність утворення кластерів з провідних частинок, що контактують одна з одною. Процеси протікання у наповненій полімерній системі спостерігаються за відмінності електропровідностей наповнювача і полімеру не менше, ніж на 5 порядків [27]. Опис протікання критичного електричного струму в композитній матриці дається найбільш адекватно за допомогою перколяційної задачі, сформульованої для неперервного середовища. Стабільні результати щодо електропровідності композитних систем вказують на суттєву роль полімеру в утворенні електропровідних кластерів. Це може бути пов'язано з розподілом наповнювача в полімерній матриці за умови, що частинки полімеру мають значно більший розмір, ніж частинки наповнювача [27].

Саме наслідки процесів порогу перколяції для електротранспортних властивостей у композиційній системі наповнювач (сажа) – матриця (полімер) та накопичення поверхневих зарядів

на межі поділу напівпровідні екрани – полімерна ізоляція силових кабелів ігноруються. Напівпровідні екрани як незамінна частина силових високовольтних кабелів мають значний вплив на їх діелектричні параметри [23–24].

Мета роботи полягає у аналізі фізичних процесів перколяції та абсорбції у напівпровідних екранах та їхнього впливу на діелектричні параметри за результатами експериментальних досліджень силових високовольтних кабелів.

Модель процесу перколяції у напівпровідних екранах. Згідно перколяційної задачі поріг протікання в термінах теорії перколяції означає концентрацію наповнювача, за якій відбувається перехід діелектрик-провідник [30, 33].

Критична концентрація K_c , за якої відбувається перехід з непровідного стану у провідний, залежить від деталей решітки та зростає за фіксованому розмірі решітки d зі зменшенням координаційного числа z решітки – числа найближчих рівновіддалених частинок. Для трикутної решітки $z=6$ і критична концентрація становить 50%; для квадратної ($z=4$) – 59,2746%; для стільникової ($z=3$) – 69,62%, для простої кубічної решітки $z=6$ – 31,16%. Для фіксованого значення z критична концентрація зменшується у разі зменшення розміру решітки [33]. Перколяційний перехід характеризується геометричними властивостями кластерів поблизу K_c . Імовірність того, що провідна область належить нескінченному кластеру, дорівнює нулю нижче критичного значення концентрації провідного наповнювача K_c і зростає вище критичного значення $p \sim (K - K_c)^\beta$. Показник β залежить від розміру решітки. У разі двох розмірної $d=2$ $\beta=5/16$, три вимірної – $\beta=0,417 \pm 0,003$ [33].

За малих значеннях імовірності p всі провідні елементи містяться в ізольованих кластерах кінцевого розміру. Зі збільшенням p середній розмір кластерів зростає і за $p=x_c$ в безмежній системі виникає наскрізний канал провідності: неперервна сітка провідних кластерів. І, нарешті, за більших значеннях p ізольованими один від одного будуть непровідні діелектричні області.

Для моделювання процесу перколяції у напівпровідних екранах застосовано двовимірну

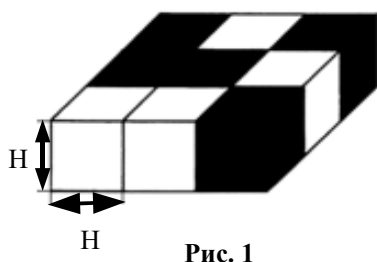


Рис. 1

решітчасту модель неоднорідного композиційного матеріалу: діелектрик (поліетилен – матриця: білі квадрати) – провідник (наповнювач – сажа: чорні квадрати) (рис. 1) [28, 29]. Для двовимірної моделі товщина прошарку H дорівнює розміру елементів. Сукупність елементів, за якими відбувається протікання, є перколяційним кластером. Кожній точці простору з ймовірністю $p=x$ відповідає електропровідність провідної частини (сажі) $\gamma=\gamma_{пров}$ і з ймовірністю $(1-p)$ – електропровідність діелектричної частини (поліетилену) $\gamma=\gamma_\delta$.

Поріг перколяції, тобто протікання струму провідності, у цьому випадку визначається часткою простору x_c (мінімальною критичною концентрацією провідних мікрон-частинок), зайнятою провідними областями, за якої виникає кластер перколяції.

Оскільки утворення кластеру перколяції є випадковим процесом, його певні розміри та форма також випадкові. За кінцевих розмірах системи значення порогу протікання коливається в деяких межах, проте зі збільшенням розмірів системи стає цілком певним.

Питома електропровідність у критичній області залежить від x_c і визначається [28, 29, 31, 32]

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_{пров} \cdot (x_c - x)^{-q}, x < x_c; \\ \gamma &= \gamma_{пров} \cdot \left(\frac{\gamma_\delta}{\gamma_{пров}} \right)^S, x = x_c; \\ \gamma &= \gamma_{пров} \cdot (x - x_c)^{-t}, x > x_c, \end{aligned} \quad (1)$$

де q, S, t – критичні показники: $q = t \cdot (S^{-1} - 1)$.

За умови $x_\delta = x_c = 0,5$ значення показників дорівнюють $S=0,5; q=t=1,3$.

Методологія моделювання процесу перколяції у композитному напівпровідному екрані з провідними частинками наповнювача складається з наступних етапів.

1. Генерація складу композиту: розмірів двовимірної композитної системи, ймовірності заповнення провідником; питомої провідності сажі. Кожний вузол решітки стає або діелектриком,

або провідником в залежності від їхнього взаємного співвідношення, що визначається параметром ймовірності p . Таким чином формується стохастичний характер процесу перколяції.

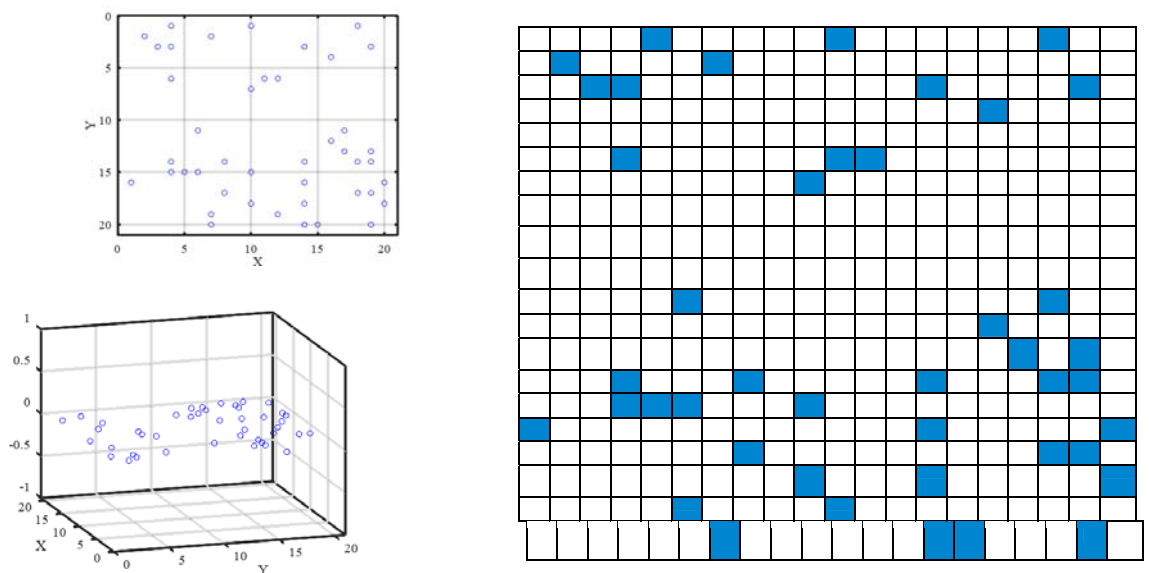
2. Побудова двовірної матриці композиту за різних значень ймовірності заповнення провідним наповнювачем.

3. Визначення порогу протікання – мінімальної критичної концентрації K_c провідних домішок з урахуванням стохастичності процесу перколяції.

Програмна реалізація за зазначеним алгоритмом щодо визначення порогу протікання здійснена у безкоштовному програмному середовищі Octave.

Поріг перколяції у напівпровідних екранах силових високовольтних кабелів. На рис. 2 – рис. 3 наведено результати чисельного моделювання стохастичного характеру розподілу провідних частинок у вузлах решітки в залежності від ймовірності заповнення двовірної матриці розміром $X \times Y = 20 \times 20$. Кожна з представлених реалізацій узагальнює 100 циклів усереднення. Питома провідність наповнювача сажі дорівнює $\gamma_{пров} = 1$ См/м. Питома провідність діелектричної матриці γ_d дорівнює 0.

Представлені рисунки відповідають: рис. 2, *a, z* – матрицям з ймовірністю $p=0,10$ та $0,30$, рис. 3, *a, в* – $p=0,50$ та $0,75$ заповнення провідними частинками з концентрацією 10%, 30%, 50% та 75% відповідно. Рис. 2, *б, z*; рис. 3, *б* – реальному розподілу провідних частинок в залежності від концентрації сажі у зразках напівпровідних екранів силових високовольтних кабелів.



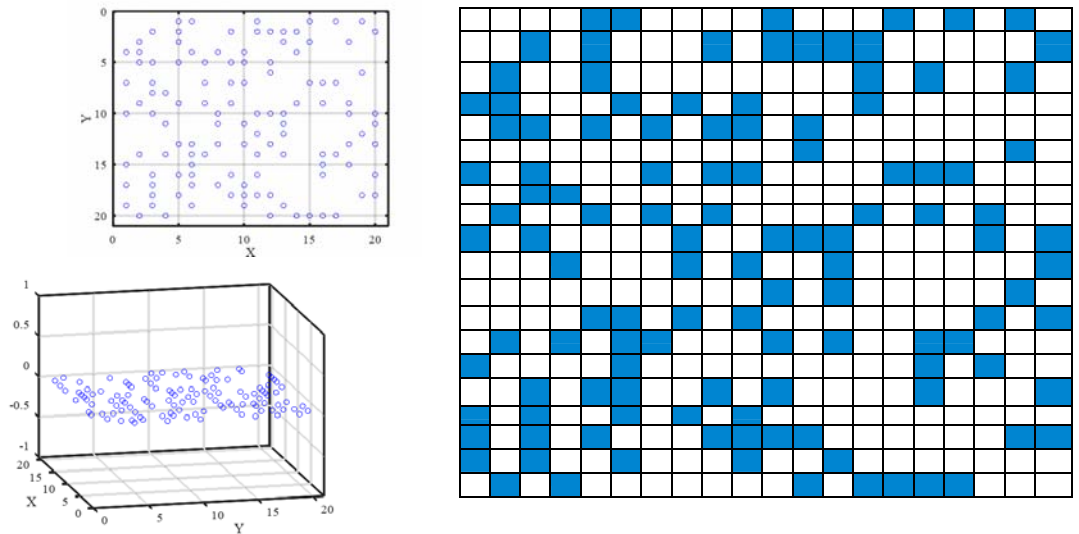
a) $p=0,1$ – вміст провідного наповнювача становить 10%



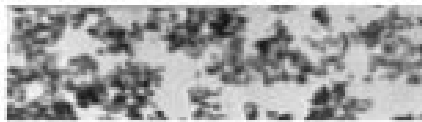
б) 10%

Рис. 2, *a, б*

За $p=0,10$ та $0,30$ концентрація наповнювача зростає і становить 10% та 30% відповідно (рис. 2, *a, в*). Але частинки сажі розділені діелектричним середовищем (рис. 2, *a, в*) і струм провідності не протікає через композитний напівпровідний екран. У міру збільшення ймовірності заповнення матриці відбувається зростання концентрації частинок сажі і за критичного значення $p=x_c=0,5$ виникає умова для протікання струму провідності (рис. 3, *a*).



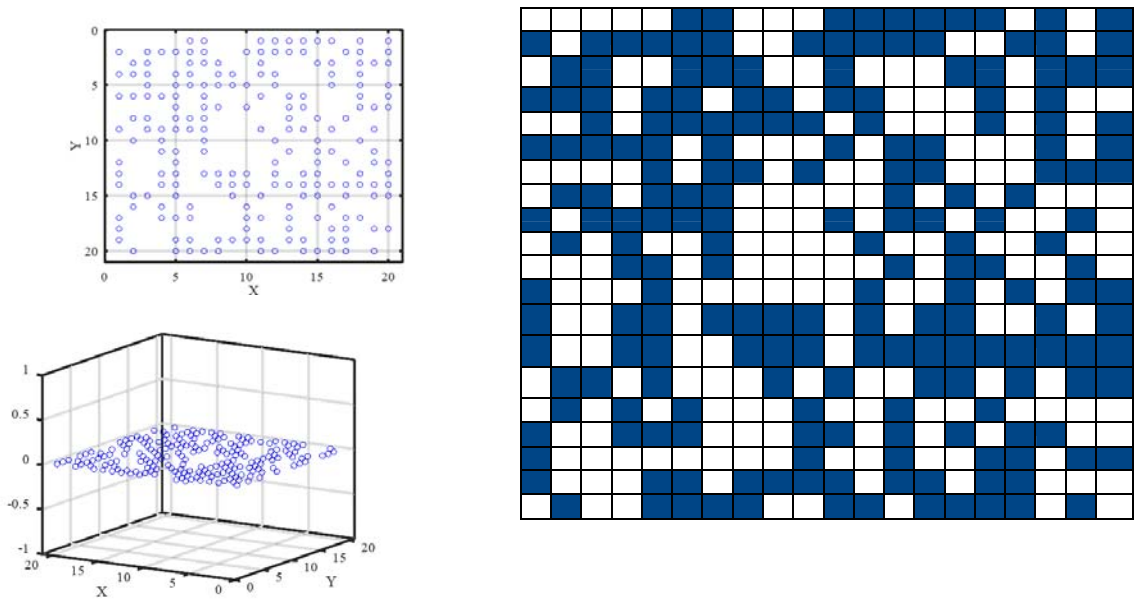
в) $p=0,30$ – вміст провідного наповнювача становить 30%



г) 30%

Рис. 2, в, г

Мінімальна критична концентрація K_c провідних частинок, які обумовлюють поріг протікання, становить 48%. Навіть за однакових значень $p=x_c=0,5$ (рис. 3, а) концентрація наповнювача за причини стохастичності процесу перколяції коливається від 48% до 53%. Кластери перколяції на квадратній решітці мають вид, представлений на рис. 3, а за концентрації провідного наповнювача 51%. При імовірності $p=0,53$ за результатами моделювання з усередненням 100 послідовних матриць складу композиту концентрація наповнювача знаходиться у діапазоні від 50% до 56,25%.

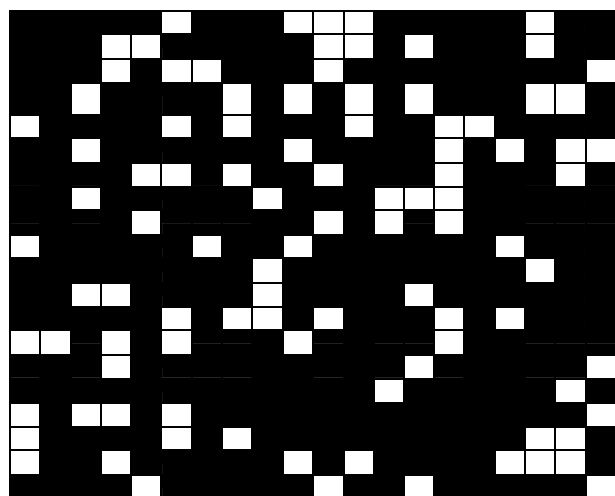
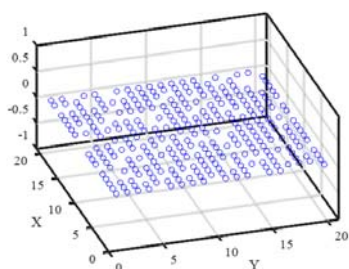
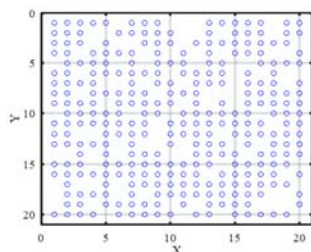


а) $p=0,5$ – вміст провідного наповнювача становить 51%

Рис. 3, а



б) 50%



в) $p=0,75$ – вміст провідного наповнювача становить 75%

Рис. 3, б, в

За $p=0,75$ спостерігається утворення суцільного провідного кластеру у двокомпонентному середовищі (рис. 3, в). У цьому випадку діелектричні прошарки розділені провідним наповнювачем.

Результати моделювання узгоджуються з мікрофотографіями розподілу (дисперсії) сажі в залежності від масової частки наповнювача (рис. 2, б, з; рис. 3, б) у поліетиленовій матриці напівпровідного екрану силового кабелю, отриманих методом мікроскопії.

Вимірювання дисперсії є ключовим аспектом, оскільки впливає на механічні та електричні властивості силових високовольтних кабелів. Рівномірний розподіл частинок сажі в полімерній матриці має важливе значення для забезпечення сталої та оптимальної роботи кабелю в експлуатації.

Характер розподілу частинок вуглецевого наповнювача в полімерній матриці залежить не тільки від типу та вмісту у полімерній матриці, але і технологічного процесу екструзії тришарової композитної системи: напівпровідні екрани – високовольтна полімерна ізоляція силових кабелів.

Наповнення сажею напівпровідних екранів обмежене порогом перколяції, що необхідно враховувати на технологічній стадії виготовлення силових високовольтних кабелів. Поріг протікання визначається характером розподілу сажі у поліетиленовій матриці та від форми частинок наповнювача, що потребує відповідних досліджень.

Питома провідність сажі суттєво залежить від її чистоти (наявності домішок), стану поверхні частинок сажі (окиснення), способу отримання, часу перемішування та температури. У разі збільшення температури від 25°C до 90°C спостерігається зростання питомої провідності у (1-10) разів в залежності від марки сажі [34]. Так, питома провідність ацетиленової сажі зростає від 2,5 См/м до 6 См/м відповідно [34].

Діелектричні прошарки поліетилену (рис. 3, а, б) є тими ділянками, які визначають загальний опір кластеру перколяції. До складу кластеру перколяції обов'язково входять частинки сажі, безпосередньо пов'язані одна з одною. Вони створюють сажові агломерати (рис. 3, б), запобігти виникненню яких практично неможливо. В перенесенні струму будуть брати участь сажові агломерати і прошарки матриці, які їх оточують. Прошарки, що входять до кластеру перколяції, мають мінімальний локальний опір, величина якого співвимірна з опором сажових агломератів. Ця умова може виконуватися для прошарків, що мають мінімальну товщину, найбільшу кількість дефектних центрів, та забезпечують стрибкову електропровідність. Фізико-хімічні процеси, що протікають на межі поділу

фаз, призводять до того, що локальна електропровідність прошарків полімеру зростає зі збільшенням концентрації наповнювача. Це викликає часткове пониження розмитості переходу діелектрик (поліетилен)-провідник (сажа) зі сторони концентрацій, які більші, ніж порогові.

Водночас, на межі поділу полімерна високовольтна ізоляція – композитний напівпровідний екран виникає тонкий подвійний електричний прошарок [35], що може спричинити виникнення значної міжфазної області, яка, в свою чергу, забезпечує наявність багатьох місць для формування міжфазної поляризації. Ізольовані полімерною матрицею скупчення провідних частинок сажі являють собою “диполі”. У такому випадку ефект поляризації Максвелла-Вагнера в електричному полі має сильно виражений характер [32, 36].

Вплив процесів поляризації у напівпровідних екранах на електричні параметри силових кабелів. Результати експериментальних досліджень доводять монотонність спадання у часі струму витоку (наскрізної провідності) (рис. 4, крива 1) у зшитій поліетиленовій ізоляції при підключенні до джерела постійної напруги одножильного силового кабелю на напругу 6 кВ з напівпровідними екранами.

Струм абсорбції, обумовлений уповільненими видами поляризації, (рис. 4, крива 2) зазнає непередбачених стрибків за час вимірювання більше 3 хв. у високоякісній зшитій поліетиленовій ізоляції.

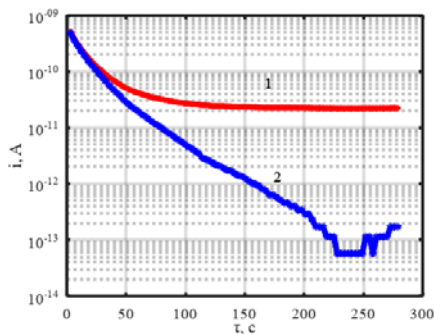


Рис. 4

Така поведінка струму абсорбції свідчить про найбільш вірогідну причину – прояв міграційної поляризації вільними носіями зарядів, котра протікає дуже повільно зі сталою часу $\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_{пров}$ (с) неоднорідного композитного діелектрика [32], у першу чергу на межі поділу напівпровідний екран – зшита поліетиленова ізоляція. Час встановлення міграційної поляризації знаходиться у діапазоні (200 – 300) с (рис. 4, крива 2).

Опосередкованим підтвердженням прояву міграційної поляризації для частоти 120 Гц (рис. 5) є часові залежності електричної ємності (рис. 5, а) та тангенсу кута діелектричних втрат (рис. 5, б) силового кабелю.

На рис. 4 представлено динаміку змінення у часі для частоти 120 Гц електричної ємності (рис. 5, а), тангенсу кута діелектричних втрат (рис. 5, б) та $C \cdot tg\delta$ діаграму зразків кабелів різного конструктивного виконання та застосованих матеріалів. Вимірювання проводилися одним і тим самим приладом. Експериментальні криві на рис. 5 відповідають: 1 – силовому кабелю одножильного виконання з напівпровідними екранами по струмопровідній жилі та зшитій поліетиленовій ізоляції на напругу 6 кВ, 2 – радіочастотному кабелю зі спіненою поліетиленовою ізоляцією та поліетилентерефталатною плівкою, накладеною нещільно на ізоляцію, 3 – силовому кабелю з ізоляцією на основі полівінілхлоридного (ПВХ) пластикату. Для силового кабелю з напівпровідними екранами та радіочастотним проявляється стохастичний характер залежності $tg\delta$ у часі. Значення ємності та діелектричних втрат на $C \cdot tg\delta$ діаграмі силового кабелю з напівпровідними екранами розділяються на дві характерні групи (рис. 5, в). Вочевидь, це обумовлено різними електрофізичними характеристиками, товщиною, наповненістю та дисперсністю сажі у напівпровідних екранах по жилі та ізоляції відповідно. На межі поділу ізоляція – напівпровідний екран відбувається накопичення поверхневих зарядів за причини різних електрофізичних характеристик [35, 36].

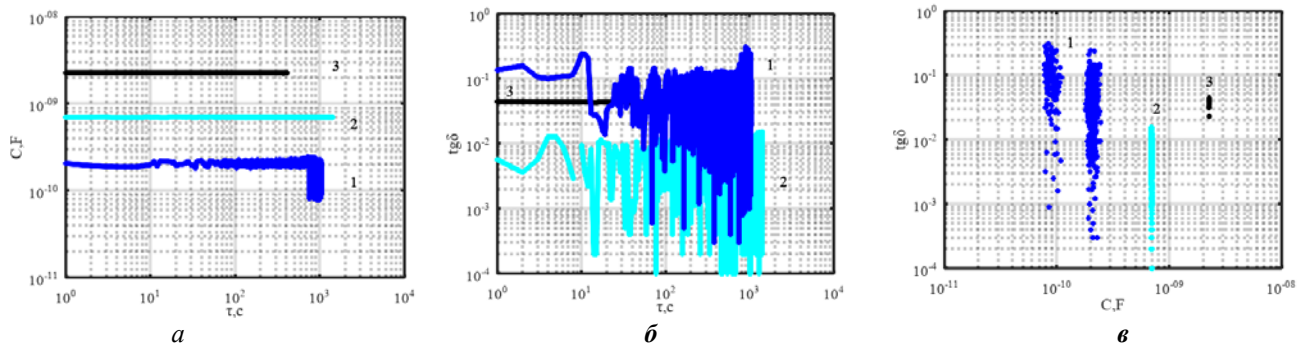


Рис. 5

Ця додаткова стохастичної природи міжфазна поляризація обумовлює підвищення діелектричної проникності, тобто електричної ємності, і діелектричних втрат на низькій частоті та нестабільність у часі діелектричних параметрів силових високовольтних кабелів. У низькочастотній області електрична провідність також може помітно зростати через початок формування перколяційної структури у напівпровідному екрані [31]. Поява цієї області призводить до внеску електричної провідності наповнювача у втрати електричної енергії силових високовольтних кабелів.

Стан міжфазної границі ізоляція – напівпровідний екран можна контролювати за результатами вимірювання у часі ємності та тангенсу кута діелектричних втрат на частоті 120 Гц на технологічній стадії виготовлення силових високовольтних кабелів.

У полярній ізоляції на основі ПВХ-пластикату спостерігається стабільність у часі електричної ємності та $\tan\delta$ для частоти 120 Гц. Стала часу уповільненої поляризації компонентів неоднорідної ізоляційної ПВХ-композиції у (100 – 1000) разів менша у порівнянні з міграційною на межі поділу напівпровідний екран – зшита поліетиленова ізоляція.

Висновки. На підставі запропонованої методології моделювання процесу перколяції отримано матриці складу композиту в залежності від ймовірності заповнення провідником, що узгоджуються з мікрофотографіями розподілу сажі у напівпровідному екрані силового кабелю.

Доведено вплив концентрації провідного наповнювача на поріг протікання з урахуванням стохастичності процесу перколяції.

Розроблена методологія визначення порогу протікання має суттєве практичне значення та надає підстави обґрунтовано визначати концентрацію провідного наповнювача для запобігання провідного стану напівпровідним екраном на технологічній стадії виготовлення силових високовольтних кабелів.

Міжфазна границя діелектрик (зшита поліетиленова ізоляція) – напівпровідник (композитна зшита поліетиленова матриця з сажею) відіграє домінуючу роль у накопиченні поверхневих зарядів та їх транспорту у товщу високоякісної полімерної ізоляції. Експериментально підтверджено вплив процесу міжфазної поляризації на електричну ємність та тангенс кута діелектричних втрат силових високовольтних кабелів.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
2. Mazzanti G., Marzinotto M. Extruded Cables For High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development. Wiley-IEEE Press, Hoboken, 2013. 384 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118590423>.
3. Tanaka T., Montanari G.C., Mülhaupt R. Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation—Perspectives for processing technologies, material characterization and future applications. *IEEE Transaction Dielectric Electrical Insulation*. 2004. No 11. Pp. 763–784. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2004.1349782>.
4. Polymer Insulation Applied for HVDC Transmission. Editor Prof. Boxue Du. Springer Singapore, 2021. 674 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-9731-2>.
5. Huang X., Zhang J., Jiang P. Thermoplastic insulation materials for power cables: History and progress. *High Voltage Engineering*. 2018. Vol. 44. Pp. 1377–1398. DOI: <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20180430001>.
6. Pleša I., Nojinger P.V., Sumereder C., Muhr M. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications. *Polymers*. 2016. Vol. 8(5). Pp. 173. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym8050173>.
7. Adnan M., Abdul-Malek Z., Lau K.Y., Tahir M. Polypropylene-based nanocomposites for HVDC cable insulation. *IET Nanodielectrics*. 2021. Vol. 4. Issue 3. Pp. 84–97. DOI: <https://doi.org/10.1049/nde2.12018>.
8. Roy M., Nelson J.K., Schadler L.S., Zou C., Fothergill J.C. The influence of physical and chemical linkage on the properties of nanocomposites. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Nashville, TN, USA, 16–19 October 2005. Pp. 183–186. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2005.1560651>.
9. Balasubramanian N., Ramesh K.B. Role, effect, and influences of micro and nano-fillers on various properties of polymer matrix composites for microelectronics: A review. *Polymer Adventure Technology*. 2018. Vol. 29. Pp. 1568–1585. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.4280>.
10. Безпрозванних Г.В., Мірчук І.А. Синтез технологічних режимів охолодження та радіаційного опромінення електричної ізоляції кабелів. Монографія. Харків: Мадрид, 2021. 179 с.
11. 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>.
12. Безпрозванних Г.В., Рогинський О.В. Конструктивно-технологічні рішення підвищення електричних характеристик високовольтної композитної електроізоляційної системи електричних машин. Монографія. Харків: Мадрид, 2023. 137 с.

13. 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>.
14. 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>
15. Ji M., Min D., Wu Q., Liu W., Li S., Qin S., Zhu S. Ultra-low electrical conductivity originated from ordered and tightly aggregated interfacial regions in polymer nanocomposites. *Composites Part B:Engineering*. 2022. Vol. 233. Pp. 109649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109649>.
16. Spahr M., Gilardi R., Bonacchi D. Carbon Black for Electrically Conductive Polymer Applications. *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016. Pp 1–26 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37179-0_32-2.
17. Бржезицький В.О., Михайлов В.М., Ісакова А.В., Рудаков В.В., Гурін А.Г., Набока Б.Г. та інш. Техніка та електрофізика сильних електричних полів. Харків: НТУ ХІІ ТОВ Торнадо, Київ НТУУ КПІ, 2004. 930 с.
18. Guo C., Li J., Gao Y., Liu B., Du B. Effect of Nanoparticle Type on Charge Transport Characteristics of LDPE/Micro-BN composite with High Thermal Conductivity. *IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), IEEE*. 2023. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMPE57831.2023.10139611>.
19. Беспрозванних А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со сшитой изоляцией. *Електротехніка та Електромеханіка*. 2010. № 3. С. 44–47.
20. Kucheriava I.M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.019>.
21. Nadolny Z. Electric Field Distribution and Dielectric Losses in XLPE Insulation and Semiconductor Screens of High-Voltage Cables. *Energies*. 2022. Vol. 15 (13). P. 4692. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134692>.
22. Золотарев В.М., Золотарев В.В., Бузько С.В., Антоненко Т.Ю., Науменко А.А. Влияние проводимости экранов на диэлектрические потери в кабелях. *Вісник Національного технічного університету ХІІІ*. 2014. № 21. С. 50–54.
23. Liu T., Fothergill J., Dodd S. J.Nilsson U. H. Influence of semicon shields on the dielectric loss of XLPE cables. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE CEIDP. 2009. Pp. 395–398. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377792>.
24. Bezprozvannykh G.V., Grynyshina M.V. Efficient parameters of dielectric absorption of polymeric insulation with semiconductor coatings of power high voltage cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. No 3. Pp. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.06>.
25. Lau K.Y., Vaughan A.S., Chen G., Hosier I.L., Holt A.F. Absorption current behaviour of polyethylene/silica nanocomposites. *Journal of Physics Conference Series*. 2013. No 472. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/472/1/012003>.
26. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. Taylor, London, 2017. 192 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315274386>.
27. Rotheron R. Fillers for polymer applications. Springer, 2017. 317 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>.
28. Дыхне А.М., Снарский А.А., Женировский М.И. Устойчивость и хаос в двумерных случайно-неоднородных средах и LC цепочках. *Успехи физических наук*. 2004. Т. 174. № 8. С. 887–894.
29. Емец Ю.П. Моделирование электрофизических характеристик диэлектрической среды с периодической структурой. *Журнал технической физики*. 2004. Т. 74. № 12. С. 1–9.
30. Мамуня Е.П., Давиденко В.В., Лебедев Е.В. Связь критической концентрации с геометрическими параметрами частиц наполнителя в электропроводных полимерных композициях. *Доклады АН УССР, сер. Б*. 1991. № 5. С. 124–127.
31. Дыхне А.М. Проводимость двумерной двухфазной системы. *Журнал экспериментальной и технической физики*. 1970. Т. 59. С. 110–114.
32. Емец Ю.П. Дисперсия диэлектрической проницаемости двухкомпонентных сред. *Журнал экспериментальной и технической физики*. 2002. Т. 121. № 12. С. 1339–1351.
33. Bunde A., Havlin S. Fractals and isordered systems. Springer Verlag, Heidelberg, 1996. 350 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-51435-7>.
34. Rahaman M., Gupta P., Hossain N., Periyasami G., Das P. Effect of carbons' structure and type on AC electrical properties of polymer composites: predicting the percolation threshold of permittivity through different models. *Colloid and Polymer Science*. 2023. Vol. 301. Pp. 1001–1019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00396-023-05120-2>
35. Беспрозванних А.В., Бойко А.Н. Распределение плотности поверхностных зарядов на границе раздела контактирующих изолированных проводников кабелей. *Технічна електродинаміка*, 2014. № 6. С. 18–23.
36. Беспрозванних А.В., Бойко А.Н., Рогинский А.В. Влияние диэлектрического барьера на распределение электрического поля в высоковольтной композитной изоляции электрических машин. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 6. С. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.09>

ELECTROPHYSICAL PROCESSES IN COMPOSITE SEMICONDUCTOR SCREENS AND THEIR INFLUENCE ON THE DIELECTRIC PARAMETERS OF HIGH VOLTAGE POWER CABLES

G.V. Bezprozvannykh¹, M.V. Grynshyna²

¹ National Technical University “Kharkov Polytechnic institute”,
Str. Kirpichova 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.

² TOV «Interkabel Kiev»,

5, Dachnaya Str., p. Kapitanovka, Kiev-Svyatoshinsky district, Kiev region, 08112, Ukraine.

E-mail: ¹ Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua; ² m.grynshyna@interkabel.ua.

The methodology for modelling the percolation process in semiconductor shields of power high-voltage cables is proposed. The semiconductor screen is represented by a two-dimensional lattice model with a polymer matrix filled with conductive carbon black particles. Model matrix's of the composite, depending on the probability of filling and the concentration of the conductive filler, agree with micrographs of the distribution of soot in the polyethylene matrix of the semiconducting screen of the power cable. Taking into account the stochastic of the percolation process, the concentration range of the conductive filler, which determines the flow threshold in the presented model, was determined. Disturbances are observed on the experimental time dependence of the absorption current of the power cable, which is indirect evidence of the accumulation of surface charges at the interface between the semiconductor screen and high-voltage polymer insulation. The time dependences of the electric capacity and the tangent of the dielectric loss angle at a frequency of 120 Hz confirm the stochastic nature of the process of accumulation of surface charges. This process causes a time-delayed interphase polarization in power high-voltage cables. References 36, figure 5.

Key words: power cable, semiconducting screen, conductive filler, flow threshold, inter-phase polarization, absorption current, dielectric parameters.

1. Shidlovsky A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Cables with polymer insulation for ultra-high voltage. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. 550 p. (Rus)
2. Mazzanti G., Marzinotto M. Extruded Cables For High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development. Wiley-IEEE Press, Hoboken, 2013, 384 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118590423>.
3. Tanaka T., Montanari G.C., Mülhaupt R. Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation — Perspectives for processing technologies, material characterization and future applications. *IEEE Transaction Dielectric Electrical Insulation*. 2004. No 11. Pp. 763–784. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2004.1349782>.
4. Polymer Insulation Applied for HVDC Transmission. Editor Prof. Boxue Du. 2021. 674 p. Springer Singapore. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-9731-2>.
5. Huang X., Zhang J., Jiang P. Thermoplastic insulation materials for power cables: History and progress. *High Voltage Engineering*. 2018. Vol. 44. Pp. 1377–1398. DOI: <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20180430001>.
6. Pleša I., Notingher P.V., Sumereder C., Muhr M. Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications. *Polymers*. 2016. Vol. 8(5). P. 173. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym8050173>.
7. Adnan M., Abdul-Malek Z., Lau K.Y., Tahir M. Polypropylene-based nanocomposites for HVDC cable insulation. *IET Nanodielectrics*. 2021. Vol. 4. Issue 3. Pp. 84-97. DOI: <https://doi.org/10.1049/nde2.12018>.
8. Roy M., Nelson J.K., Schadler L.S., Zou C., Fothergill J.C. The influence of physical and chemical linkage on the properties of nanocomposites. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Nashville, TN, USA, 16–19 October 2005. Pp. 183–186. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2005.1560651>.
9. Balasubramanian N., Ramesh K.B. Role, effect, and influences of micro and nano-fillers on various properties of polymer matrix composites for microelectronics: A review. *Polymer Adventure Technology*. 2018. Vol. 29. Pp. 1568–1585. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.4280>.
10. Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. Synthesis of technological modes of cooling and radiation exposure of electrical insulation of cables. Monograph. Kharkiv: Madrid, 2021. 179 p. (Ukr)
11. 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>.
12. Bezprozvannykh G.V., Rogynskyi O.V. Structural and technological solutions for improving the electrical characteristics of the high-voltage composite electrical insulation system of electric machines. Monograph. Kharkiv: Madrid, 2023. 137 p. (Ukr)
13. 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>.
14. 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>.
15. Ji M., Min D., Wu Q., Liu W., Li S., Qin S., Zhu S. Ultra-low electrical conductivity originated from ordered and tightly aggregated interfacial regions in polymer nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 233. Pp. 109649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109649>.

16. Spahr M., Gilardi R., Bonacchi D. Carbon Black for Electrically Conductive Polymer Applications. *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016. Pp 1–26 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37179-0_32-2.
17. Brzhezyskyi V.O., Mykhaylov V.M., Isakova A.V., Rudakov V.V., Gurn A.G., Naboka B.G. et al. Technique and electrophysics of strong electric fields. Kharkiv, NTU KhPI LLC Tornado, Kyiv NTUU KPI, 2004. 930 p. (Rus)
18. Guo C., Li J., Gao Y., Liu B., Du B. Effect of Nanoparticle Type on Charge Transport Characteristics of LDPE/Micro-BN composite with High Thermal Conductivity. *IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), IEEE*. 2023. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMPE57831.2023.10139611>.
19. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G., Moskvityn E.S. Justification of the electrophysical characteristics of semiconducting shields of high-voltage power cables with cross-linked insulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2010. No 3. Pp. 44–47. (Rus)
20. Kucheriava I. M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 2. Pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2017.02.019>.
21. Nadolny Z. Electric Field Distribution and Dielectric Losses in XLPE Insulation and Semiconductor Screens of High-Voltage Cables. *Energies*. 2022. Vol. 15 (13). P. 4692. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134692>.
22. Zolotarev V.M., Zolotarev V.V., Buzko S.V., Antonets T.Yu., Naumenko A.A. Effect of shield conductivity on dielectric losses in cables. *Bulletin of the National Technical University KhPI*. 2014. No 21. Pp. 50–54. (Rus)
23. Liu T., Fothergill J., Dodd S.J., Nilsson U.H. Influence of semicon shields on the dielectric loss of XLPE cables. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE CEIDP. 2009. Pp. 395–398. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377792>.
24. Bezprozvannykh G.V., Grynyshina M.V. Efficient parameters of dielectric absorption of polymeric insulation with semiconductor coatings of power high voltage cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. No 3. Pp. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.06>.
25. Lau K.Y., Vaughan A.S., Chen G., Hosier I.L., Holt A.F. Absorption current behaviour of polyethylene/silica nanocomposites. *Journal of Physics Conference Series*. 2013. No 472. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/472/1/012003>.
26. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. Taylor, London, 2017. 192 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315274386>.
27. Rotheron R. Fillers for polymer applications. Springer, 2017. 317 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>.
28. Dykhne A.M., Snars A.A., Zhenirovsky M.I. Sustainability and chaos in two-dimensional random media and LC chains. *The successes of physical sciences*. 2004. Vol. 174. No 8. Pp. 887–894. (Rus)
29. Emets Yu.P. Modeling electrophysical characteristics of the dielectric environment with a periodic structure. *Journal of Technical Physics*. 2004. Vol. 74. No 12. Pp. 1–9. (Rus)
30. Mamunya E.P., Davidenko V.V., Lebedev E.V. Relationship between critical concentration and geometric parameters of filler particles in electrically conductive polymer compositions. *Doklady Akademiya nauk USSR, seriya B*. 1991. No 5. Pp. 124–127. (Rus)
31. Dykhne A.M. Conductivity of a two -dimensional two -phase system. *Journal of experimental and technical physics*. 1970. Vol. 59. Pp. 110–114. (Rus)
32. Yemets Yu.P. Dispersion of the dielectric constant of two-component media. *Journal of Experimental and Technical Physics*. 2002. Vol. 121. No 12. Pp. 1339–1351. (Rus)
33. Bunde A., Havlin S. Fractals and isordered systems. Springer Verlag, Heidelberg, 1996. 350 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-51435-7>.
34. Rahaman M., Gupta P., Hossain N., Periyasami G., Das P. Effect of carbons' structure and type on AC electrical properties of polymer composites: predicting the percolation threshold of permittivity through different models. *Colloid and Polymer Science*. 2023. Vol. 301. Pp. 1001–1019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00396-023-05120-2>.
35. Bezprozvannykh A.V., Boyko A.N. Distribution of surface charge density at the interface of contacting insulated conductors of cables. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 6. Pp. 18–23. (Rus)
36. Bezprozvannykh A.V., Boyko A.N., Roginsky A.V. The influence of the dielectric barrier on the distribution of the electric field in the high-voltage composite insulation of electric machines. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No 6. Pp. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.09>. (Rus)

Надійшла 26.02.2024

Остаточний варіант 26.03.2024