

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ПОЛІМЕРНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ПІД ВПЛИВОМ ВИЩИХ ГАРМОНІК ТА ФОРМИ ГАЗОВИХ МІКРОВКЛЮЧЕНЬ

М.А. Щерба^{1*}, докт. техн. наук, Є.О. Троценко^{1**}, канд. техн. наук,
О.Р. Проценко^{1***}, канд. техн. наук, М.С. Гуторова^{2****}, канд. техн. наук

¹ НТУ України "КПІ ім. Ігоря Сікорського",

просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: m.shcherba@gmail.com.

² Інститут електродинаміки НАН України,

просп. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

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

Описано фактори, які впливають на інтенсифікацію часткових розрядів в газових мікрОВКЛЮЧЕННЯХ в полімерній ізоляції силових кабелів. До таких факторів відносяться амплітуда, частота і форма напруги електроживлення, а також розмір, форма і розташування відносно електричного поля мікрОВКЛЮЧЕННЯ. Шляхом математичного моделювання показана залежність напруженості електричного поля всередині мікрОВКЛЮЧЕННЯ від його форми в контексті можливості досягнення напруженості пробою газу для ініціації часткового розряду. Експериментально продемонстровано, що збільшення пульсацій постійної випрямленої напруги збільшує в діелектрику кількість часткових розрядів в одиницю часу. Слід звернути увагу, що впливи вищих гармонічних складових напруги на ізоляцію силових кабелів є додатковими до впливів за синусоїдних режимів роботи, і поява гармонік під час випробування кабелів і розробки рекомендацій до режимів їхньої експлуатації на даний час не регламентується. Бібл. 12, рис. 3.

Ключові слова: силовий кабель, полімерна ізоляція, частковий розряд, вищі гармоніки, математичне моделювання, напруженість електричного поля.

Вступ. Діелектричні матеріали сучасних кабельних систем зазвичай експлуатуються в більш жорстких умовах, ніж прогнозується виробником, оскільки форма напруги в електромережі часто відмінна від синусоїдної. Наявність багатьох видів нелінійного навантаження та збільшення кількості відновлюваних джерел енергії призводить до появи, окрім основної частоти, додаткових вищих гармонічних складових, які формують загальну несинусоїдну напругу. В результаті ресурс полімерної ізоляції силових кабелів додатково зменшується у порівнянні з прогнозованим під час використання в умовах синусоїдного живлення [1].

Важливим фактором, що впливає на старіння і, згодом, пробій кабельної ізоляції, є виникнення часткових розрядів (ЧР) в мікропорожнинах, заповнених газом (газових мікрОВКЛЮЧЕННЯХ) [2, 3]. Також вимірювання рівня ЧР стало потужним інструментом неінвазійної діагностики поточного стану ізоляції [4]. Ряд дослідників, зокрема [5], зазначають, що несинусоїдна форма напруги живлення призводить до змін інтенсивності ЧР, порівнюючи з синусоїдною, і цим пояснюють пришвидшене старіння полімеру. Проте, незважаючи на прогрес у розумінні процесів ЧР, значну кількість експериментальних [6] і теоретичних робіт [7], потребує уточнення опис механізму змін у ЧР за несинусоїдної прикладеної напруги і кількісна оцінка факторів впливу.

Необхідними умовами виникнення ЧР у газовому мікрОВКЛЮЧЕННІ є одночасне: 1) перевищення напруженості електричного поля (ЕП) E у газі значення напруженості пробою $E_{пр} \approx 3$ кВ/мм ($E > E_{пр}$); 2) наявність вільних електронів для започаткування лавини розряду. В свою чергу, на виконання цих двох умов впливають параметри електроживлення: амплітуда, частота і форма прикладеної напруги, а також параметри мікрОВКЛЮЧЕННЯ: розмір, форма і розташування

© Щерба М.А., Троценко Є.О., Проценко О.Р., Гуторова М.С., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-6616-4567>; ** <https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-7719-3336>; **** <https://orcid.org/0000-0003-4259-7530>

© 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>

відносно напрямку ЕП. Узагальнення факторів, які впливають на активність ЧР, та взаємозв'язків між ними наведено у вигляді блок-схеми на рис. 1. В даній роботі увагу зосереджено на впливі форми газового мікрովключення та степені несинусоїдності прикладеної напруги на інтенсивність ЧР.

Метою роботи є аналіз факторів, які визначають інтенсивність часткових розрядів в газових мікрովключеннях в полімерній ізоляції силових кабелів задля оцінки впливу коефіцієнту гармонік напруги електроживлення, та форми мікрովключень на перебіг часткових розрядів.

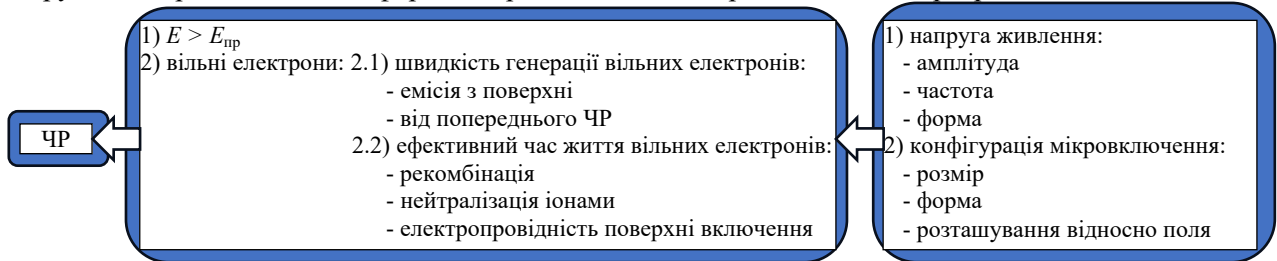


Рис. 1

Влив конфігурації мікрովключення. На першому етапі досліджувався вплив форми порожнини в діелектрику на інтенсивність у ній ЧР. Зміна у формі включення, згідно теорії електромагнітного поля, змінює величину напруженості ЕП у газі.

Розподіл ЕП в діелектриках описується рівняннями

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

де D – електричне зміщення; ρ – густина вільного заряду; J – густина струму.

З рівнянь (1) і (2) можна отримати вираз для електричного потенціалу φ

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) + \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = 0, \quad (3)$$

де σ – питома електропровідність матеріалу; ε – його діелектрична проникність.

Використовуючи рівняння (3), доповнене умовами Діріхле та Неймана на границі поділу ізоляція-повітря, у програмному пакеті для математичного моделювання *Comsol Multiphysics* методом скінчених елементів обчислено напруженість ЕП в газовому мікрովключенні (алгоритм більш детально описаний у [8, 9]). За прикладеної змінної напруги живлення розраховано миттєві значення напруженості ЕП в газових мікрովключеннях форми еліпсоїда обертання з максимальним розміром 50 мкм в зшитій поліетиленовій ізоляції високовольтного кабелю 110 кВ.

Результати обчислень наведено у відносних одиницях для їхньої інтерпретації на загальний випадок. Напруженість ЕП представлено у вигляді коефіцієнта підсилення поля $k_E = E/E_0$, де E_0 – напруженість однорідного поля в ізоляції. Для опису форми еліпсоїдального мікрովключення вказується коефіцієнт форми $k_\phi = a/b$ – співвідношення його півосей перпендикулярно і вздовж ЕП. На рис. 2, а наведено просторовий розподіл ЕП, де темне тонування відповідає найбільшій напруженості, яка спостерігається у газовому включенні. На рис. 2, б наведено залежність напруженості ЕП в газі (величини k_E) від форми включення, тобто від коефіцієнта k_ϕ . У разі $k_\phi > 1$ еліпсоїд витягнутий перпендикулярно полю, за $k_\phi < 1$ – вздовж поля. Так для мікрովключення

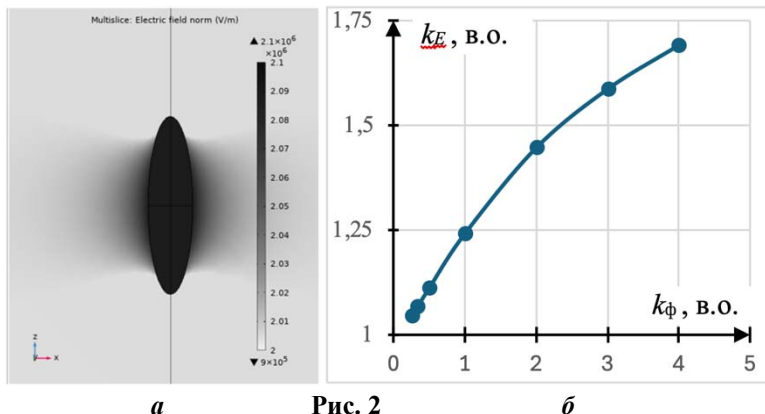


Рис. 2

фіксованого об'єму у випадку зміні k_ϕ від 1/4 до 4 напруженість ЕП в газі зростає на 60% (величина k_E від 1,05 до 1,70). Таким чином, для оцінки інтенсивності ЧР конфігурацію газового мікрովключення варто враховувати. Наведемо приклад, де проаналізуємо два включення різної форми у зовнішньому ЕП. Якщо в одному з них спостерігається напруженість поля 2,5 кВ/мм (пробою немає, оскільки електрична міцність повітря 3 кВ/мм), то в іншому

напруженість більша на 60%, тобто 4 кВ/мм (пробій газу відбувається).

Вплив степені несинусоїдності. На другому етапі дослідимо вплив степені несинусоїдності напруги живлення на інтенсивність ЧР. На наявність вільних електронів для початку ЧР впливають два фактори: швидкість їхньої генерації (тобто яка кількість електронів з'являється в газі в одиницю часу) та їхній ефективний час життя (яка кількість електронів зникає з плином часу). Вільні електрони в газі можуть з'являтися внаслідок емісії з поверхні мікровключення під дією електричного поля (вивільнення з неглибоких потенціальних ям) та залишатися від попереднього ЧР. Ефективний час життя вільних електронів визначається наступними процесами спаду вільного заряду: рекомбінацією електронів (перехід їх із зони провідності назад до зони валентності), нейтралізацією іонами газу, спаданням заряду через електропровідність стінки мікровключення (яка до речі з часом під дією електрофізичних впливів буде змінювати своє значення).

Зі зростанням частоти за час одного періоду коливання спад вільного заряду через описані вище механізми буде меншим і зросте імовірність наявності вільних електронів для започаткування лавини розряду. Одночасно з цим збільшується кількість моментів досягнення амплітудних значень ЕП, що пришвидшує загальну генерацію електронів. На основі цих двох факторів сформовано гіпотезу про збільшення кількості подій ЧР в діелектрику в одиницю часу зі зростанням степені несинусоїдності напруги. Для перевірки гіпотези проводилися експериментальні вимірювання ЧР в повітряних порожнинах діелектрика, а саме електротехнічного картону з порами. Як показано у [10], фізика пробою повітряного проміжку і перебіг ЧР у електротехнічному картоні та зшитому поліетилені схожі, оскільки діелектрики в обох випадках виступають зовнішнім середовищем, а розряди відбуваються в повітрі порожнини.

З використанням системи вимірювання ЧР, яку детально описано в [11], проведено експеримент по дослідженню ЧР за різних форм прикладеної напруги. Діелектрик піддавався впливу постійної напруги з різним коефіцієнтом пульсацій за допомогою схеми півхвильового випрямлення напруги. Коли імпульс струму, викликаний ЧР, проходить через детектор, він перетворюється в сигнал напруги, пропорційний заряду імпульсу на вході детектора. Оскільки заряд, що виникає в зоні розряду, не можна виміряти безпосередньо, то використовувалося поняття уявного заряду, тобто заряду, який через інжекцію між електродами змінив би напругу на них (і на вимірювальних приладах) на величину, еквівалентну реальній події ЧР. Уявний заряд вимірюється в пікокулонах (пКл) і зазвичай досягає десятків або сотень пКл. Поріг чутливості вимірювальної схеми 0,1–0,5 пКл, що було підтверджено схемою калібрування, описаною у [11].

Амплітуда пульсацій регулювалася зміною ємності вихідного фільтра випрямляча. Коефіцієнт пульсацій γ (%) дорівнює

$$\gamma = \frac{U_{\sim}}{U_{=}} \cdot 100, \quad (4)$$

де U_{\sim} – амплітудне значення змінної складової пульсації напруги; $U_{=}$ – постійна складова.

На рис. 3 показано результати вимірювання часткових розрядів через дію додатної постійної напруги 5 кВ з коефіцієнтами пульсацій $\gamma = 6,35\%$ (рис. 3, а) і $15,52\%$ (рис. 3, б).

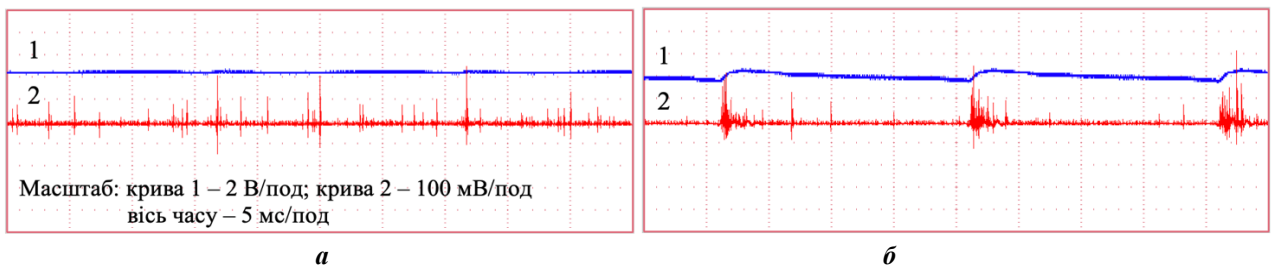


Рис. 3

Крива 1 відповідає напрузі, прикладеній до діелектрика, крива 2 – імпульсам ЧР. Збільшення коефіцієнта пульсацій γ , що визначає форму кривої 1, відповідає росту амплітуди вищих гармонічних складових, тобто збільшенню степені несинусоїдності напруги. З осцилограм можна зробити два висновки: по-перше, імпульси ЧР зміщуються в область з максимальною швидкістю росту напруги (концентруються в певних часових областях на рис. 3, б), що узгоджується з експериментами у [12]. По друге, зі збільшенням рівня пульсацій зростає кількість імпульсів ЧР в одиницю часу (порівняння рис. 3, а і б). Експеримент підтверджує гіпотезу про інтенсифікацію ЧР в діелектрику, а саме

спостерігається збільшення кількості подій розряду в одиницю часу зі зростанням амплітуд вищих гармонічних складових.

Висновки. 1. На активність часткових розрядів у газових мікровключеннях в полімерній ізоляції силових кабелів впливають параметри електроживлення: амплітуда, частота і форма прикладеної напруги, а також параметри мікровключення: розмір, форма і розташування відносно напрямку електричного поля. Для зародження часткового розряду потрібно одночасне перевищення напруженості електричного поля в газі значення пробою та наявність вільних електронів для започаткування лавини розряду. Підвищення частоти напруги живлення, а також її несинусоїдність, тобто наявність вищих гармонічних складових, впливають на зазначені фактори, інтенсифікуючи процес виникнення часткових розрядів. Зі зростанням частоти напруги збільшується швидкість генерації вільних електронів в газі, оскільки частина електронів залишилася від попереднього розряду, а також збільшується ефективний час життя вільних електронів, оскільки ефекти від рекомбінації, нейтралізації іонами газу та спадання заряду через електропровідність стінки мікровключення тривають менший час.

2. Шляхом математичного моделювання встановлено залежність напруженості електричного поля всередині повітряного мікровключення від його форми в контексті можливості досягнення напруженості пробою газу для ініціації часткового розряду. Так для еліпсоїдального мікровключення в залежності від співвідношення його півосей та орієнтації відносно електричного поля в ізоляції напруженість поля всередині мікровключення може зростати на 60% і більше.

3. Для часткових розрядів в діелектрику на прикладі електроізоляційного картону з порами експериментально продемонстровано, що підвищення степені несинусоїдності напруги живлення (підвищення пульсацій постійної випрямленої напруги) збільшує кількість розрядів в одиницю часу та зміщує їх у часову область з максимальною швидкістю зросту напруги. Отримані результати узгоджуються з теоретичними припущеннями стосовно природи залежності інтенсивності часткових розрядів від частоти напруги живлення.

Дослідження виконано за Проєктом № 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. Mazzanti G., Montanari G.C. Electrical aging and life models: the role of space charge. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005. Vol. 12. No 5. Pp. 876-890. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1522183>.

2. Fothergill J.C. Ageing, space charge and nanodielectrics: ten things we don't know about dielectrics. *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Winchester, UK, 08-13 July 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSD.2007.4290739>.

3. Choudhary M., Shafiq M., Kiitam I., Hussain A., Palu I., Taklaja P. A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables. *Energies*. 2022. Vol. 15(9). 3408. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093408>.

4. Morita S., Fuse N., Takahashi T., Takahashi T., Zahra S., Hozumi N. Space charge measurement of 23-mm-thick XLPE cable at ambient and high temperatures. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2022. Vol. 29(4). Pp. 1491-1497. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3185579>.

5. Fard M.A., Reid A.J., Hepburn D.M., Gallagher H. Influence of voltage harmonic phenomena on partial discharge behavior at HVDC. *IEEE International Conference on Dielectrics*, Montpellier, France, 03-07 July 2016. Pp. 548-551. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICD.2016.7547663>.

6. Zhou C., Chen G. Influences of frequency on space charge formation in polyethylene under high voltage AC electric fields. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Des Moines, IA, USA, 19-22 October 2016. Pp. 117-120. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2014.6995880>.

7. Pan C., Chen G., Tang J., Wu K. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2019. Vol. 26(3). Pp. 981-1000. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.007945>.

8. Щерба М.А., Подольцев А.Д. Распределение электрического поля и плотности тока возле водных включений полимерной изоляции высоковольтных кабелей с учетом ее нелинейных свойств. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 11-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.011>.

9. Щерба М.А., Розискулов С.С., Васильева О.В. Зависимость возмущений электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водных микровключений. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 17-19.

10. Florkowski M. Influence of insulating material properties on partial discharges at dc voltage. *Energies*. 2020. Vol. 13(17). 4305. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13174305>.

11. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Protsenko O. Partial Discharge as Threat to Insulation of High Voltage Direct Current Transmissions. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 24-27. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764201>.

12. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Y. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. No 2/1(40). Pp. 37-44. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.126626>.

INTENSIFICATION OF PARTIAL DISCHARGES IN THE POLYMER INSULATION OF POWER CABLES UNDER THE INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS AND THE FORMS OF GAS MICROINCLUSIONS

M.A. Shcherba¹, Ye.O. Trotsenko¹, O.R. Protsenko¹, M.S. Gutorova²

¹ NTU Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: m.shcherba@gmail.com.

² Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

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

The factors affecting the intensification of partial discharges in gas microinclusions in polymer insulation of power cables are described. Such factors include the amplitude, frequency, and shape of the power supply voltage, as well as the size, shape, and orientation in the electric field of the microinclusion. Mathematical modeling shows the dependence of the field strength inside the microinclusion on its shape in the context of the possibility of reaching the gas breakdown field strength for the initiation of a partial discharge. It has been experimentally demonstrated that an increase in pulsations of the direct rectified voltage increases the intensity of partial discharges in the dielectric. It should be noted that the effects of higher harmonics on the insulation of power cables are additional to the effects of sinusoidal operating modes, and the appearance of harmonics during cable testing and development of recommendations for their operating modes is currently not regulated. References 12, figures 3.

Key words: power cable, polymer insulation, partial discharge, higher harmonics, mathematical modeling, electric field strength.

1. Mazzanti G., Montanari G.C. Electrical aging and life models: the role of space charge. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005. Vol. 12. No 5. Pp. 876-890. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1522183>.

2 Fothergill J.C. Ageing, space charge and nanodielectrics: ten things we don't know about dielectrics. *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Winchester, UK, 08-13 July 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSD.2007.4290739>.

3. Choudhary M., Shafiq M., Kiitam I., Hussain A., Palu I., Taklaja P. A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables. *Energies*. 2022. Vol. 15(9). 3408. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093408>.

4. Morita S., Fuse N., Takahashi T., Takahashi T., Zahra S., Hozumi N. Space charge measurement of 23-mm-thick XLPE cable at ambient and high temperatures. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2022. Vol. 29(4). Pp. 1491-1497. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3185579>.

5. Fard M.A., Reid A.J., Hepburn D.M., Gallagher H. Influence of voltage harmonic phenomena on partial discharge behavior at HVDC. *IEEE International Conference on Dielectrics*, Montpellier, France, 03-07 July 2016. Pp. 548-551. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICD.2016.7547663>.

6. Zhou C., Chen G. Influences of frequency on space charge formation in polyethylene under high voltage AC electric fields. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Des Moines, IA, USA, 19-22 October 2016. Pp. 117-120. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2014.6995880>.

7. Pan C., Chen G., Tang J., Wu K. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2019. Vol. 26(3). Pp. 981-1000. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.007945>.

8. Shcherba M.A., Podoltsev O.D. Electric field and current density distribution near water inclusions of polymer insulation of high-voltage cables in view of its nonlinear properties. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 11-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.011>. (Rus)

9. Shcherba M.A., Roziskulov S.S., Vasilyeva O.V. Dependence of electric field disturbances in dielectrics on the dispersion of closely spaced water micro-inclusions. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 4. Pp. 17-19. (Rus)

10. Florkowski M. Influence of insulating material properties on partial discharges at dc voltage. *Energies*. 2020. Vol. 13(17). 4305. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13174305>.

11. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Protsenko O. Partial Discharge as Threat to Insulation of High Voltage Direct Current Transmissions. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 24-27. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764201>.

12. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Y. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. No 2/1(40). Pp. 37-44. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.126626>.

Надійшла 20.05.2024

Остаточний варіант 24.06.2024