

*С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, А. Е. ПОТРИВАЙ, С. І. ДРИВЕЦЬКИЙ, В. М. ЦЮПА*

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПРОХІДНОГО ПОЛІМЕРНОГО ІЗОЛЯТОРА В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ANSYS MAXWELL

У статті проаналізовано програмні засоби моделювання карт розподілу напруженості електричного поля ізоляторів. Необхідність вирішення даного питання диктується тим, що нерівномірність електричного поля на ізоляторах спричиняє підвищення вірогідності виникнення часткових розрядів, які руйнують ізоляційний шар, тому дуже важливим є питання оптимізації напруженості електричного поля на ізоляторі. Розглянуто конструктивні особливості прохідних ізоляторів та особливості виникнення часткових розрядів в них. Розглянуто розподіл напруженості електричного поля в полімерному прохідному, що працює в мережі змінного струму без забруднень. Наведено результати моделювання електричного поля ізоляторів в програмному середовищі Ansys Maxwell, в основі моделювання якого лежить метод скінченних елементів. Виявлено точки в конструкції прохідного полімерного ізолятора 35 кВ, де концентрується найбільший рівень напруженості електричного поля. Запропоновано спосіб впливу на досліджувану при моделюванні ділянку в області з'єднання фланцю з заземлюючою плитою. Таким чином визначено використання провідної обкладки, яка розміщена між фланцем та місцем приєднання до полімерного ізолюючого шару, що дозволяє значно покращити загальний розподіл напруженості електричного поля по поверхні прохідного полімерного ізолятора та зробити його конкурентним у порівнянні з найбільш часто використовуваними на даній напрузі фарфоровими прохідними ізоляторами, за рахунок підвищення електричної міцності конструкції. За результатами дослідження запропоновано засіб оптимізації електричного поля прохідного полімерного ізолятора, що дозволяє підвищити його електричну стійкість, а також зменшити напруженість електричного поля в районі стикування фланцю з поверхнею кріплення, що, в свою чергу, запобігає виникненню передчасних часткових розрядів в ізоляційному тілі.

**Ключові слова:** напруженість, імітаційне моделювання, програмне забезпечення, похибка, точність розрахунків, метод скінченних елементів.

*S. YU. SHEVCHENKO, D. O. DANYLCHENKO, A. E. POTRYVAI, S. I. DRYVETSKYI, V. M. TSUPA*

## SIMULATION OF THE ELECTRIC FIELD OF A POLYMER BUSHING IN THE ANSYS MAXWELL SOFTWARE ENVIRONMENT

The article analyses the software tools for modelling the maps of the electric field strength of insulators. The need to address this issue is dictated by the fact that the uneven electric field on the insulators increases the probability of partial discharges that destroy the insulating layer, so it is very important to optimize the electric field strength on the insulator. The design features of bushings and features of partial discharges in them are considered. The distribution of electric field strength in a polymer pass-through operating in an AC network without contaminants is considered. The results of modelling the electric field of insulators in the software environment Ansys Maxwell, which is based on the simulation of the finite element method, are presented. Points in the construction of a 35 kV bushing polymer insulator have been identified, where the highest level of electric field strength is concentrated. A method of influencing the area under study in the area of the flange connection to the ground plate is proposed. This defines the use of a conductive cover placed between the flange and the place of connection to the polymeric insulating layer, which significantly improves the overall electric field strength distribution on the surface of the bushing polymer insulator and makes it competitive compared to the most commonly used porcelain bushings, by increasing the electrical strength of the structure. According to the results of research, a means of optimizing the electric field of the pass-through polymer insulator is proposed, which allows to increase its electric resistance and reduce the electric field strength in the area of flange contact with the mounting surface, which in turn prevents premature partial discharges in the insulating bodies.

**Keywords:** tension, simulation, software, error, calculations accuracy, finite element method.

**Вступ.** Серед головних вимог до енергосистем світу та України в тому числі є вимога по безперебійному забезпеченню електроенергією споживачів [1]. Забезпечення надійності ланок відбувається за рахунок їх рівня надійності в аварійному, післяаварійному та номінальному режимах.

Серед цих ланок на ряду з трансформаторами, вимикачами та автоматикою стоять ізолятори, оскільки вони є невід'ємною ланкою та одним з ланцюгів надійності енергосистеми. І в кожному з типів ізоляторів, що зустрічаються в системі (підвісні, прохідні, опорні), є свої характерні особливості по забезпеченню надійності.

Найбільш частою причиною руйнування саме полімерних ізоляторів є виникнення часткових розрядів, що пов'язано з нерівномірністю розподілу напруженості електричного поля по поверхні ізолятора.

**Мета статті.** Отримання карти напруженості електричного поля полімерного прохідного ізолятора та пошуку засобів його оптимізації.

**Аналіз прохідних полімерних ізоляторів.** Передумовами розробки полімерних прохідних ізоляторів були багаторічний позитивний досвід експлуатації лінійних та підстанційних ізоляторів (рис. 1), використання некрихких полімерних матеріалів як ізоляції та застосування неенергоємної технології виробництва продукції. [1–3] Освоєння зазначених матеріалів та технології дозволило створити конструкції полімерних прохідних ізоляторів з очевидними перевагами [1–7]:

- стійкість застосовуваних матеріалів до різкого перепаду температур в діапазоні від  $-60$  °C до  $+120$  °C без зміни їх властивостей;
- стійкість до статичних, динамічних та ударних навантажень;

© С. Ю. Шевченко, Д. О. Данильченко, А. Е. Потривай, С. І. Дривецький, В. М. Цюпа, 2022

- відсутність крихкої руйнації (у тому кількості та при транспортуванні);
- гідрофобність поверхні захисної оболонки, звідси здатність поверхні ізоляції до самоочищення (не потребує обслуговування у процесі експлуатації);
- низькі енерговитрати на одиницю продукції;
- значно менша маса.



Рисунок 1 – Пункт угруповання станції Львів, укомплектований керамічними та полімерними прохідними ізоляторами.

Разом з тим, як показує досвід експлуатації полімерних прохідних ізоляторів перших розробок у Росії та Україні, відзначаються ранні відмови ізоляторів класу 35 кВ по причині електричного пробою. Обстеженням пошкоджених ізоляторів, а також лабораторними дослідженнями було встановлено, що має місце електричне старіння ізоляції на найнапруженішому проміжку ізоляції струмопровід-фланець, що обумовлено протіканням часткових розрядів (рис. 2) [7–11].



Рисунок 2 – Полімерний прохідний ізолятор, що вийшов із ладу через електричне старіння ізоляції

Тому дуже важливо, з одного боку, удосконалити конструкцію ізолятора з метою оптимізації інтегрального розподілу поля в найбільш уразливій ділянці ізоляції, а з іншого – вивчити всілякі технологічні фактори, які можуть призвести до утворення локальних електрично напружених вогнищ у тілі ізоляції з тим, щоб мінімізувати їх у процесі виготовлення.

**Моделювання електричного поля полімерного прохідного ізолятора.** Сітчаста модель прохідного ізолятора (рис. 3 та 4) – це етап, в якому декодер дає зворотний зв'язок кодеру до ураженої області та намагається усунути це за допомогою алгоритму. Він має зовсім незначну похибку і може бути дуже

ефективним у поєднанні з обмеженим кодуванням передбачення [12–17].

Для наближення результатів моделювання до реальних значень використаємо в моделі заземлюючу плиту (рис. 4) [15–23].

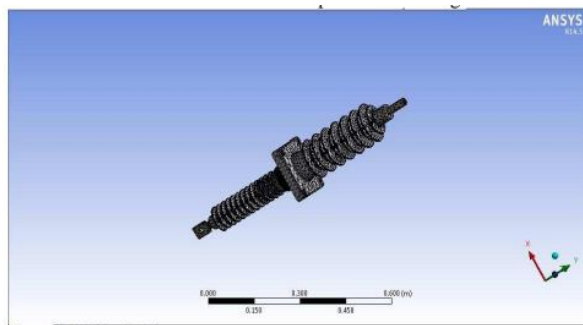


Рисунок 3 – Мешована (сітчаста) модель прохідного ізолятора

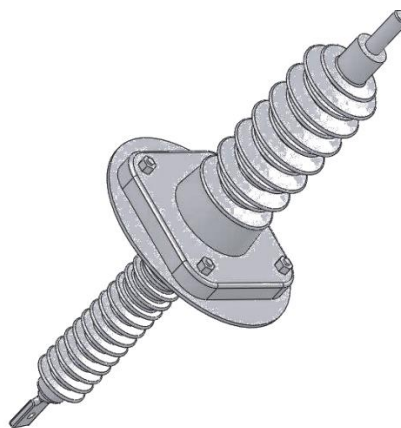


Рисунок 4 – Оптимізована модель прохідного ізолятора 35 кВ

Тепер модель готова для аналізу. Аналіз виконується з допущенням 1 % похибки для пришвидшення моделювання (по причині недостатньої потужності обчислювальної машини). Результати моделювання наведено на рис. 5 та 6.

Так за результатами моделювання визначено, що однією з проблемних ділянок є місце стику фланцю з плитою (рис. 6). Це призводить до нерівномірного розподілу напруженості по поверхні об'єкту, що потребує коригування. Усунення даного недоліку може значно підвищити ефективність використання полімерних прохідних ізоляторів, оскільки оптимізація електричного поля призводить до значно меншого ризику виникнення часткових розрядів та подальшого руйнування ізоляції, до чого є полімерні ізолятори є дуже вразливими.

Однак дана модель не є достовірною для умов експлуатації, оскільки вона не враховує впливу забрудненості поверхні ізолятора. Оскільки наявних обчислювальних потужностей недостатньо для моделювання настільки складного процесу, для аналізу були використані результати із забрудненням із [21].

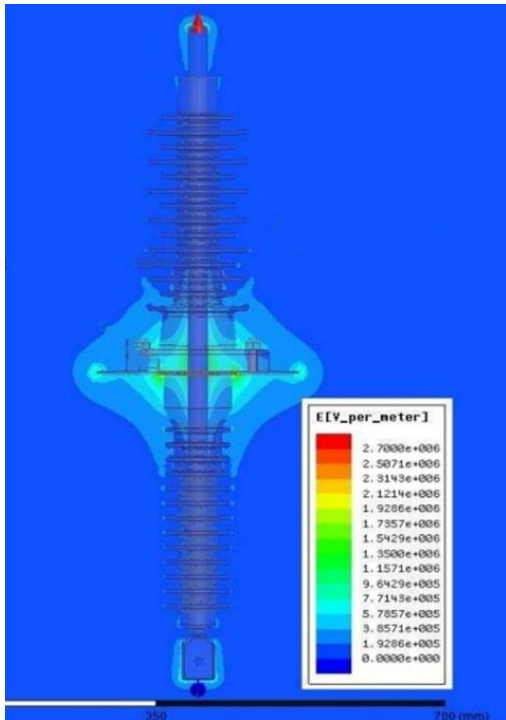


Рисунок 5 – Результати моделювання напруженості електричного поля полімерного прохідного ізолятора в програмі Ansys Maxwell

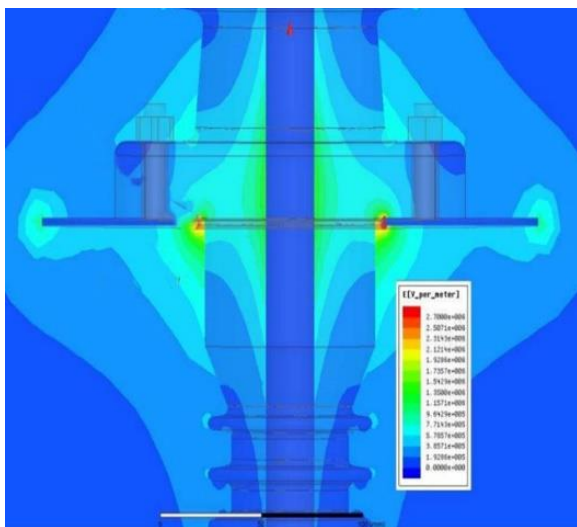


Рисунок 6 – Результати моделювання напруженості електричного поля (збільшений масштаб зони, що цікавить) полімерного прохідного ізолятора в програмі Ansys Maxwell

Моделювання в роботі [24] виконується тим же методом, що й в програмному середовищі Ansys Maxwell.

**Постановка проблеми.** Графік розподілу поля наочно ілюструє наслідок значної різниці величин діелектричної проникності гуми та склопластику, що відзначається витісненням поля з об'єму опорної трубки у бік гумових оболонок (рис. 7). З рис. 8 (крива 1) також видно, що максимальна напруженість поля у торця фланця набагато перевершує поле біля струмопроводу, що зумовлено крайовим ефектом.

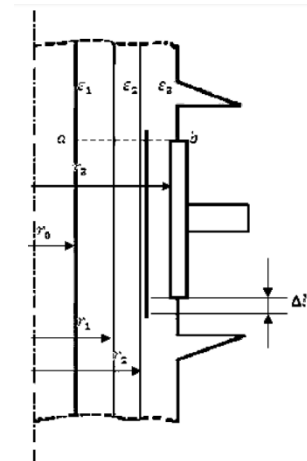


Рисунок 7 – Макет полімерного прохідного ізолятора для пояснення співвідношень

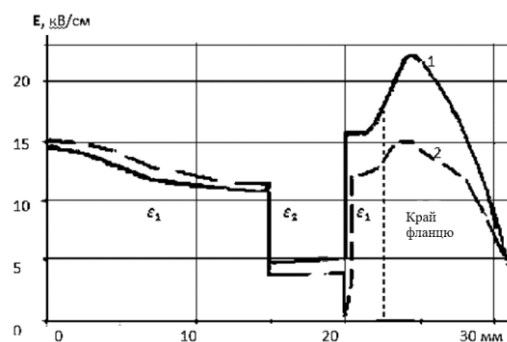


Рисунок 8 – Розподіл напруженості поля у проміжку  $a - b$  (див. рис. 7)

Як відомо, крайовий ефект вдається суттєво пом'якшити збільшуючи радіус кривизни, у разі, торцевої частини електрода. Кількісна оцінка полів, що порівнюються представлена у вигляді розподілів навантажених поверхонь країв електрода. Величини поля на цьому рисунку наведені у відносних одиницях, щодо найбільшої напруженості на поверхні краї фланця із зміненим профілем (залежність 2). Це зроблено для того, щоб наочно уявити рівень можливого вирівнювання поля. Таким чином, за допомогою оптимізації форми країв фланця за зразком електрода Рогівського [25] вдається зменшити напруженість поля нижче найбільшої напруженості поля на поверхні струмопроводу.

Як інший спосіб вирівнювання напруженості поля в області торця фланця може бути запропоновано застосування обкладок, що екранують, як таке передбачено у високовольтних вводах з паперово-масляною ізоляцією [26]. Технологія виготовлення прохідних полімерних ізоляторів не дозволяє в ізолююче тіло ввести більше двох обкладок у вигляді тонких провідних покриттів на внутрішній та зовнішній поверхнях опорного елемент. Розрахунки показують, що зниження напруженості поля у торця фланця рівня напруженості на поверхні струмопроводу [27] можна обмежитися лише однією екрануючою обкладкою на зовнішній стороні склопластикового

діелектрика. Як зазначалося вище (див. рис. 8) склопластик навантажений електрично значно слабше, ніж гумова ізоляція і цією обставиною пояснюється неефективність другої вирівнюючої обкладинки. Більше того, технічно непросто нанести на внутрішній опорній поверхні втулки покриття із заданою довжиною.

Якісно ефект вирівнювання поля провідним підшаром (екрануючою обкладкою) можна оцінити співвідношенням різниць потенціалів проміжків струмопровід–обкладка ( $\Delta\varphi_{0,2}$ ) та обкладка–фланець ( $\Delta\varphi_{2,3}$ ), іншими словами, співвідношенням цих ємностей проміжків  $C_{0,2}$  та  $C_{2,3}$ :

$$\frac{\Delta\varphi_{2,3}}{\Delta\varphi_{0,2}} = \frac{C_{0,2}}{C_{2,3}} \rightarrow \min. \quad (1)$$

При заданих діелектричних характеристиках ємність циліндричного конденсатора залежить від товщини ізоляційного прошарку та від довжини електродів: чим тонша ізоляція та чим довгі електроди, тим більша ємність [28–31]. Вочевидь, величина ємності проміжку струмопровід–обкладка ( $C_{0,2}$ ) зростає безперервно зі збільшенням довжини провідної обкладки, в той же час найбільша ємність  $C_{2,3}$  проміжку обкладка–фланець практично обмежується основою довжиною фланця. Тому, щоб слідувати умові, потрібно наносити провідний шар на опорну трубу на довжину приблизно рівну довжині фланця. Слід застерегти, що введення провідного елемента може призвести до утворення вогнищ підвищеної електричної напруги у тілі ізоляції, тому щоб уникнути такого явища доцільно наносити демпфуючі кільцеві покриття на краях екрану зі слабопровідної гуми  $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-7}$  См/м [32].

На рис. 9 представлені залежності максимальної напруженості поля на поверхні торця фланця (крива 1) і напруженості у краї провідної обкладки (крива 2) від параметра, що визначає довжину цієї обкладки щодо фланця. На рис. 9 пунктирними лініями (крива 2) ілюстрований результат вирівнювання поля в найбільш напруженій ділянці внутрішньої ізоляції введенням провідної обкладки до рівня, відповідного за умовою  $\frac{\Delta r}{\Delta R} < \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ .

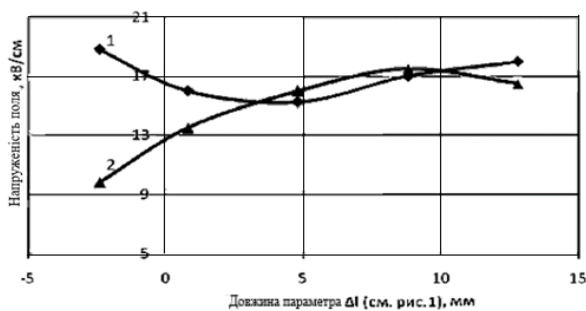


Рисунок 9 – Залежність максимальних напруженостей поля на краях фланця та обкладки від взаємного їх розташування

Як показують розрахунки, розташування опорної труби слабо позначається на величині максимальної напруженості електричного поля біля поверхні торців фланця. У той же час, як впливає з умови, чим більше радіус опорної втулки  $r_1$  при обраній товщині її стінки  $\Delta r$  тим нижче напруженість у струмопроводі. Основною функцією опорного елемента є надання необхідної механічної стійкості ізолятора до згинального обурення. Тому, з цього погляду, при заданій товщині стінки діаметр труби повинен бути, з урахуванням технологічної можливості, якомога більшим, що збільшує момент опору цього елемента [33–35].

В даний час більшість виробників високовольтних полімерних ізоляторів застосовують так звану тверду гуму. Через високу в'язкість вихідного матеріалу гума інjektується в прес-форму при високому тиску, близько 150–250 бар і полімеризація ізоляторів здійснюється на 400–500 тоннних машинах. Із застосуванням двокомпонентних еластомерів – рідких силіконових гум – спрощується реалізація конструкторських рішень, спрямованих на підвищення надійності ізоляторів, у тому числі внутрішньої електричної міцності. Низька в'язкість сировини з рідких гум дозволяє при відносно невисокому надлишковому тиску (не більше 50 бар) досягти повної герметизації вузьких зазорів між опорним елементом та фланцем, виключити наявність повітряних щілин в ізоляції, на складових поверхнях елементів ізолятора. Крім того, як показує досвід, із застосуванням рідкої гуми просто вирішується завдання одноопераційної заливки гумових оболонок, що виключається можливість потрапляння забруднень у технологічних стиках при багаторазовій заливці.

Основоючись на отриманих результатах аналізу та розрахунків можна сформулювати наступні рекомендації по оптимізації електричного поля прохідного полімерного ізолятора:

- при заданих вихідних параметрах: радіуса струмопроводу  $r_0$ , діелектричних характеристик ізоляції  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$ , визначити відносну товщину опорної втулки  $\Delta r/\Delta R$ ;
- встановити ізоляційну відстань між електродами  $\Delta R$  по формулі (2), приймаючи за максимальну напруженість поля у струмопроводі  $E_{m.m}$  електричну міцність  $\sigma_p$  використовуваної гуми враховуючи коефіцієнт запасу  $k$ ; цим визначити радіуси опорної втулки,  $r_1$  і  $r_2$ :

$$E_{m.l} \leq k\sigma_p; \quad (2)$$

- перевірити опорну втулку на механічну міцність. В разі, якщо втулка не задовольняє за механічною міцністю (або через надмірно великий запас міцності, або внаслідок зниженої міцності), то зменшивши або збільшивши на крок радіуси  $r_1$  і  $r_2$ ; провести повторні розрахунки. Таким чином, визначити найбільш відповідні радіальні параметри ізолятора;

- краям фланця надати форму, близьку за формою краям електрода Роговського для того, щоб максимальна напруженість  $E_{m,\phi}$  у фланця не перевищувала напруженість поля  $E_{m,l}$  у струмопроводі (1);

- бажано вибрати матеріали ізоляції з близькими діелектричними проникностями, а співвідношення товщин складових ізоляцію елементів визначати у зворотній залежності від їх діелектричних проникності згідно з умовою. При цьому зазор між опорним елементом та внутрішньою поверхнею фланця має бути мінімальна;

- збільшувати радіус кривизни торцевої частини фланця або передбачити екрануючу обкладку нанесенням провідного покриття на зовнішній опорній поверхні ізоляційного елемента на протилежному від фланця ділянці з осьюовою довжиною, близькою довжина фланця; по краях обкладки нанести слабке покриття;

- мінімізувати технологічні фактори, які можуть внести сторонні вклучення в ізоляції, особливо у проміжку фланець–струмопровід. У цьому зв'язку краще використовувати як герметизуючий елемент та захисну оболонку матеріали з низькою в'язкістю.

**Висновки.** В статті було виконано моделювання напруженості електричного поля прохідного полімерного ізолятора 35кВ та були розглянуті варіанти оптимізації його електричного поля, для зменшення вірогідності розвитку часткових розрядів в діелектричному матеріалі. Після моделювання було виявлено, що найбільший рівень напруженості спостерігається у місці стикування ізолятора з поверхнею прилягання та на забруднених, вологих ребрах ізолятора. Виходячи з цих даних, було підтверджено необхідність в регулярному очищенні ізоляторів від бруду, та запропоновано два варіанти оптимізації електричного поля на ділянці в районі фланцю, де й спостерігається найбільша напруженість електричного поля за результатами моделювання. Таким чином, оптимізування напруженості електричного поля прохідного полімерного ізолятора може зробити його ще більш електрично міцним, що зробить його більш релевантним у використанні за фарфорові, та за рахунок його інших властивостей створить значний позитивний економічний ефект при експлуатації.

Підсумовуючи все вищесказане можна з упевненістю заявляти, що шляхом дослідження напруженості електричного поля на ізоляторах, шляхом моделювання, можна ефективно провести аналіз великої кількості конфігурацій ізоляторів та знайти найбільш ефективну з економічної та технічної точки зору.

### Список літератури

1. Про затвердження Кодексу системи передачі : Постанова Нац. комісії, що здійснює держ. регулювання у сферах енергетики та комунал. послуг від 14.03.2018 р. № 309 : станом на 21 трав. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 03.02.2022).

2. Al-Gheilani A., Rowe A., Li W., Wong K. L. Stress control methods on a high voltage insulator: a review. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 110. P. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.112>.
3. Tsarabaris P. T., Karagiannopoulos C. G., Theodorou N. J. A model for high voltage polluted insulators suffering arcs and partial discharges. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2005. Vol. 13, no. 2. P. 157–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2004.11.002>.
4. Takabayashi K., Nakane K., Okubo R., Kato K. High voltage DC partial discharge and flashover characteristics with surface charging on solid insulators in air. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2018. Vol. 34, no. 5. P. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2018.8445431>.
5. Guo J. Online diagnosis of power systems insulation condition in wind farms. *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Baltimore, MD, USA, 11–14 June 2017. P. 433–436. DOI: <https://doi.org/10.1109/eic.2017.8004658>.
6. Lopez-Roldan J., Tang T., Gaskin M. Design and testing of UHF sensors for partial discharge detection in transformers. *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 21–24 April 2008. P. 1052–1055. DOI: <https://doi.org/10.1109/cmd.2008.4580463>.
7. Álvarez F., Garnacho F., Ortego J., Sánchez-Urán M. Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment. *Sensors*. 2015. Vol. 15, no. 4. P. 7360–7387. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150407360>.
8. Bastidas P. D., Rowland S. M. Interfacial aging in composite insulators as a result of partial discharge activity. *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Baltimore, MD, USA, 11–14 June 2017. P. 13–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/eic.2017.8004690>.
9. Nazemi M. H., Hinrichsen V. Partial discharge investigation and electric field analysis of different oscillation modes of water droplets on the surface of polymeric insulator under tangential AC electric field stress. *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Bologna, Italy, 30 June – 4 July 2013. P. 194–197. DOI: <https://doi.org/10.1109/icstd.2013.6619788>.
10. Hu Q., Wang S., Yang H. et al. Effects of icing degree on ice growth characteristics and flashover performance of 220 kV composite insulators. *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 128. P. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.04.010>.
11. Mahmoodi J., Mirzaie M., Shayegani-Akmal A. A. Surface charge distribution analysis of polymeric insulator under AC and DC voltage based on numerical and experimental tests. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Vol. 105. P. 283–296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.006>.
12. Dadashi Ilkhechi H., Samimi M. H., Yousefvand R. Generation of acoustic phase-resolved partial discharge patterns by utilizing UHF signals. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Vol. 113. P. 906–915. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.06.018>.
13. Ren M., Zhuang T., Song B., Yang S. Optical partial discharge diagnostic in SF6 gas insulated system via multi-spectral detection. *ISA Transactions*. 2018. Vol. 75. P. 247–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.02.008>.
14. Lee R., Thompson J. E., Rhinehart H., Sudarshan T. S. Predischarge current measurements and optical surface field measurements associated with insulator surface flashover. *Gaseous Dielectrics III*. 2013. P. 349–355. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-029381-3.50049-6>.
15. Plueksawan W., Apiratikul P., Bhumkittipich K. N., Plangkang B. Partial discharge pattern analysis in cylindrical insulators model of transformer. *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 21–24 April 2008. P. 978–982. DOI: <https://doi.org/10.1109/cmd.2008.4580446>.
16. Ким Е. Д. Оценка термоупругих напряжений в фарфоровом проходном изоляторе. *Энергетика та електрифікація*. 2012. № 2. С. 45–48.
17. Gordon J. E. Structures, or, Why things don't fall down. 2nd ed. New York : Da Capo Press, 2003. 395 p.
18. Ушаков В. Я. Изоляция установок высокого напряжения. Москва : Энергоатомиздат, 1994. 496 с.

19. Вершинин Ю. Н. Электронно-тепловые и дотационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург : ИЭФ РАН, 2000.
20. Wu K., Suzuoki Y., Dissado L. A. The contribution of discharge area variation to partial discharge patterns in disc-voids. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2004. Vol. 37, no. 13. P. 1815–1823. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/13/013>.
21. Куперштох А. Л., Стамателатос С. П., Агорис Д. П. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках при переменном напряжении. *Письма в Журнал технической физики*. 2006. Т. 32, № 15. С. 74–80.
22. Слущер А. И., Поликарпов Ю. И., Галяров В. Л. Об элементарных актах в кинетике электрического разрушения полимеров. *Журнал технической физики*. 2006. Т. 76, № 12. С. 52–56.
23. Paoletti G., Golubev A. Partial discharge theory and applications to electrical systems. *Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Seattle, WA, USA, 21–25 June 1999. P. 124–138. DOI: <https://doi.org/10.1109/parcon.1999.779355>.
24. Гайворонский А. С. Опорные полимерные изоляторы: опыт разработки, эксплуатации и диагностирования. *XXXIII «Научно-практический семинар по диагностике»*, г. Казань. 2009.
25. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. Москва : Энергоатомиздат, 1992.
26. Куценко С. М., Климов Н. Н., Муратов В. И. Характеристики частичных разрядов в изоляторах из фарфора и поликарбоната. 7-ой ежегодный семинар «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования», г. Пермь, 2–3 марта 2010.
27. Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Губаев Д. Ф., Черномашенцев А. Ю., Евдокимов Л. И. Частичные разряды в полимерных изоляторах. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2010. № 7–8. С. 76–83.
28. Поляков Д. А., Теращенко Н. А., Нікітін К. І. Исследование отличительных особенностей характеристик частичных разрядов в проходных изоляторах. *Омский Научный Вестник*. 2021. № 6(180). С. 26–32. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-180-26-32>.
29. Голенищев-Кутузов В. А., Черномашенцев А. Ю., Голенищев-Кутузов А. В. Изучение процессов разрушения высоковольтных полимерных изоляторов методом частичных разрядов. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2008. № 11–12. С. 89–95.
30. Аввакумов М. В., Голенищев-Кутузов А. В., Захаров А. А. Цифровой метод регистрации фазовых распределений частичных разрядов изоляторов. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2002. № 11–12. С. 56–64.
31. Голудян В. В., Корявин А. Р., Трифонов В. З., Волкова О. В., Князев В. А. Электрическая прочность линейной полимерной изоляции высокого напряжения в условиях загрязнения. *Электричество*. 2006. № 9. С. 49–52.
32. Остапенко Е. И. Физические процессы при перекрытии загрязненной изоляции. *Электричество*. 2006. № 9. С. 40–49.
33. Коробейников С. М., Вечёркин М. В. Физика возникновения, характеристики и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании. *Электротехнические системы и комплексы*. 2010. № 18. С. 204.
34. Костенко М. В. Техника высоких напряжений. Москва : Высшая шк., 1973. 528 с.
35. Способ подбора формы электродов высоковольтных разрядников : пат. 2453956 Российская Федерация : H01T 1/00, H01J 17/04. № 2011106628/07 ; заявл. 22.02.2011 ; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17.
- vol. 110, pp. 95–100, Mar. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.112>.
3. P. T. Tsarabaris, C. G. Karagiannopoulos, and N. J. Theodorou, “A model for high voltage polluted insulators suffering arcs and partial discharges,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 13, no. 2, pp. 157–167, Feb. 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2004.11.002>.
4. K. Takabayashi, R. Nakane, H. Okubo, and K. Kato, “High voltage DC partial discharge and flashover characteristics with surface charging on solid insulators in air,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 34, no. 5, pp. 18–26, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2018.8445431>.
5. J. Guo, “Online diagnosis of power systems insulation condition in wind farms,” in *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Baltimore, MD, USA, Jun. 11–14, 2017, pp. 433–436, doi: <https://doi.org/10.1109/eic.2017.8004658>.
6. J. Lopez-Roldan, T. Tang, and M. Gaskin, “Design and testing of UHF sensors for partial discharge detection in transformers,” in *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, Apr. 21–24, 2008, pp. 1052–1055. doi: <https://doi.org/10.1109/cmd.2008.4580463>.
7. F. Alvarez, F. Garnacho, J. Ortego, and M. Sánchez-Urán, “Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment,” *Sensors*, vol. 15, no. 4, pp. 7360–7387, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.3390/s150407360>.
8. P. D. Bastidas and S. M. Rowland, “Interfacial aging in composite insulators as a result of partial discharge activity,” in *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Baltimore, MD, USA, Jun. 11–14, 2017, pp. 13–16, doi: <https://doi.org/10.1109/eic.2017.8004690>.
9. M. H. Nazemi and V. Hinrichsen, “Partial discharge investigation and electric field analysis of different oscillation modes of water droplets on the surface of polymeric insulator under tangential AC electric field stress,” in *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Bologna, Italy, Jun. 30–Jul. 4, 2013, pp. 194–197, doi: <https://doi.org/10.1109/icstd.2013.6619788>.
10. Q. Hu et al., “Effects of icing degree on ice growth characteristics and flashover performance of 220 kV composite insulators,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 128, pp. 47–56, Aug. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.04.010>.
11. J. Mahmoodi, M. Mirzaei, and A. A. Shayegani-Akmal, “Surface charge distribution analysis of polymeric insulator under AC and DC voltage based on numerical and experimental tests,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 105, pp. 283–296, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.006>.
12. H. Dadashi Ilkhechi, M. H. Samimi, and R. Yousefvand, “Generation of acoustic phase-resolved partial discharge patterns by utilizing UHF signals,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 113, pp. 906–915, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.06.018>.
13. M. Ren, B. Song, T. Zhuang, and S. Yang, “Optical partial discharge diagnostic in SF6 gas insulated system via multi-spectral detection,” *ISA Transactions*, vol. 75, pp. 247–257, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.02.008>.
14. R. Lee, H. Rhinehart, J. E. Thompson, and T. S. Sudarshan, “PredischARGE current measurements and optical surface field measurements associated with insulator surface flashover,” in *Gaseous Dielectrics III*. Elsevier, 2013, pp. 349–355. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-029381-3.50049-6>.
15. W. Plueksawan, P. Apiratikul, P. Boonchiam, and B. Plangkang, “Partial discharge pattern analysis in cylindrical insulators model of transformer,” in *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, Apr. 21–24, 2008, pp. 978–982, doi: <https://doi.org/10.1109/cmd.2008.4580446>.
16. E. D. Kim, “Ocenka termouprugih napyageniy v farforovom prohodnom izolyatore [Evaluation of thermo elastic stresses in a porcelain bushing],” *Energetika I Elektrifikaciya [Energetics and Electrification]*, no. 2, pp. 45–48, 2012. (in Russian)
17. J. E. Gordon, *Structures, Or, Why Things Don't Fall Down*, 2nd ed. New York: Da Capo Press, 2003.
18. V. Y. Ushakov, *Izolyatsiya Ustanovok Vysokogo Napryazheniya [Insulation of High Voltage Installations]*. Moscow: Energoatomizdat, 1994. (in Russian)

## References

1. Ukraine, National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities. (2018, Mar. 14). *Decree of the National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities no. 309, Pro zatverdzhennia Kodeksu systemy peredachi [On Approval of the Transmission System Code]*. Accessed: Feb. 3, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (in Ukrainian)
2. A. Al-Gheilani, W. Rowe, Y. Li, and K. L. Wong, “Stress control methods on a high voltage insulator: A review,” *Energy Procedia*,

19. Y. N. Vershinin, *Elektronno-Teplovyye I Dotatsionnyye Protssesy Pri Elektricheskoy Proboye Tverdykh Dielektrikov [Electron-Thermal and Subsaturaton Processes in the Electrical Breakdown of Solid Dielectrics]*. Yekaterinburg: IEP RAS, 2000. (in Russian)
20. K. Wu, Y. Suzuoki, and L. A. Dissado, "The contribution of discharge area variation to partial discharge patterns in disc-voids," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 37, no. 13, pp. 1815–1823, Jun. 2004, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/13/013>.
21. A. L. Kupershtokh, S. P. Stamatelatos, and D. P. Agoris, "Modelirovaniye chastichnykh razryadov v tverdykh dielektrikakh pri peremennom napryazhenii [Modelling of partial discharges in solid dielectrics under alternating voltage]," *Technical Physics Letters*, vol. 32, no. 15, pp. 74–80, 2006. (in Russian)
22. A. I. Slutsker, Y. I. Polikarpov, and V. L. Galyarov, "Ob elementarnykh aktakh v kinetike elektricheskogo razrusheniya polimerov [About elementary acts in the kinetics of electrical fracture of polymers]," *Technical Physics*, vol. 76, no. 12, pp. 52–56, 2006.
23. G. Paoletti and A. Golubev, "Partial discharge theory and applications to electrical systems," in *Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Seattle, WA, USA, Jun. 21–25, 1999, pp. 124–138, doi: <https://doi.org/10.1109/papcon.1999.779355>.
24. A. S. Gayvoronskiy, "Opornyye polimernyye izolyatory: Opyt razrabotki, ekspluatatsii i diagnostirovaniya [Supporting polymer insulators: Experience in development, operation and diagnostics]," in *XXXIII "Nauchno-prakticheskiy seminar po diagnostike" [XXXIII "Workshop on Diagnostics"]*, Kazan, Russian Federation. 2009. (in Russian)
25. P. M. Svi, *Metody I Sredstva Diagnostiki Oborudovaniya Vysokogo Napryazheniya [Techniques and Tools for Diagnosing High Voltage Equipment]*. Moscow: Energoatomizdat, 1992. (in Russian)
26. S. M. Kutsenko, N. N. Klimov, and V. I. Muratov, "Kharakteristiki chastichnykh razryadov v izolyatorakh iz farfora i polikarbonata [Partial discharge characteristics in porcelain and polycarbonate insulators]," in *7-oy Yezhegodnyy seminar "Metody i sredstva kontrolya izolyatsii vysokovol'nogo oborudovaniya" [7th Annual Workshop "Insulation Techniques and Tools for High Voltage Equipment"]*, Perm, Russian Federation, Mar. 2–3, 2010. (in Russian)
27. A. V. Golenishchev-Kutuzov, V. A. Golenishchev-Kutuzov, D. F. Gubaev, A. Y. Chernomashentsev, and L. I. Evdokimov, "Chastichnye razriady v polimernykh izolyatorakh [Partial discharges in polymer insulators]," *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, no. 7-8, pp. 76–83, 2010. (in Russian)
28. D. A. Polyakov, N. A. Tereshchenko, and K. I. Nikitin, "Research of partial discharge characteristics features in bushings," *Omsk Scientific Bulletin*, no. 180, pp. 26–32, 2021, doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-180-26-32>. (in Russian)
29. V. A. Golenishchev-Kutuzov, A. Y. Chernomashentsev, and A. V. Golenishchev-Kutuzov, "Izuchenie protsessov razrusheniya vysokovoltnykh polimernykh izolyatorov metodom chastichnykh razriadov [Study of fracture processes in high-voltage polymer insulators using the partial discharge method]," *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, no. 11–12, pp. 89–95, 2008. (in Russian)
30. M. V. Avvakumov, A. V. Golenishchev-Kutuzov, and A. A. Zakharov, "Tsifrovoy metod registratsii fazovykh raspredeleniy chastichnykh razryadov izolyatorov [Digital method for recording phase distributions of insulator partial discharges]," *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, no. 11–12, pp. 56–64, 2002. (in Russian)
31. V. V. Godulyan, A. R. Koryavin, V. Z. Trifonov, O. V. Volkova, and V. A. Knyazev, "The electric strength of high-voltage polymeric line insulation exposed to pollution," *Elektrichestvo [Electrical Technology]*, no. 9, pp. 49–52, 2006. (in Russian)
32. Y. I. Ostapenko, "The physical processes accompanying the flashover of contaminated insulation," *Elektrichestvo [Electrical Technology]*, no. 9, pp. 40–49, 2006. (in Russian)
33. S. M. Korobeynikov and M. V. Vecherkin, "Fizika vozniknoveniya, kharakteristiki i klassifikatsiya chastichnykh razryadov v vysokovol'tnom oborudovanii [Physics of occurrence, characteristics and classification of partial discharges in high voltage equipment]," *Elektrotekhnicheskie Sistemy I Kompleksy [Electrical Systems and Complexes]*, no. 18, p. 204, 2010. (in Russian)
34. M. V. Kostenko, *Tekhnika Vysokikh Napryazheniy [The High Voltage Technique]*. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. (in Russian)
35. A. L. Jur'ev, D. P. Nikolaev, and S. L. Ehl'jash, "Method of electrodes shapes selection for high voltage charge neutralisers," Russian Federation Patent 2453956, Jun. 20, 2012. (in Russian)

*Надійшло (received) 18.05.2022*

#### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Шевченко Сергій Юрійович (Shevchenko Serhiy Yuriyovich)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: [Sergii.Shevchenko@khpri.edu.ua](mailto:Sergii.Shevchenko@khpri.edu.ua).

**Данильченко Дмитро Олексійович (Danylchenko Dmytro Oleksiyovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: [dmytro.danylchenko@khpri.edu.ua](mailto:dmytro.danylchenko@khpri.edu.ua).

**Потривай Андрій Едуардович (Potryvay Andriy Eduardovich)** – магістрант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1250-7525>; e-mail: [potryvay.andrew99@gmail.com](mailto:potryvay.andrew99@gmail.com).

**Дривецький Станіслав Ігорович (Dryvetsky Stanislav Ihorovich)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8181-8829>; e-mail: [stanislav.dryvetskyi@khpri.edu.ua](mailto:stanislav.dryvetskyi@khpri.edu.ua).

**Цюпа Владислав Миколайович (Tsyupa Vladyslav Mykolayovich)** – студент кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4269-1941>; e-mail: [vladyslav.tsiupa@gmail.com](mailto:vladyslav.tsiupa@gmail.com).