

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Р. О. ГАНУС

ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ УТОЧНЕНОЇ МОДЕЛІ ВТРАТ НА СТРУМИ ВИТОКУ ПО ЗАБРУДНЕННЯМ НА ПОВЕРХНЯХ ІЗОЛЯТОРІВ

Робота присвячена виявленню перспектив створення моделі втрат на струми витоку по забрудненням на поверхнях ізолятора. Метою був пошук математичних моделей, що достатньо точно опишуть втрати на струми витоку для оцінки їх значення для об'єднаної енергетичної системи України. Оцінено існуючу широко застосовану методику розрахунку втрат на струми витоку. Встановлено, що вона не є доречною, оскільки в її основі закладено використання виключно опору ізолятора з незмінним його значенням, що не відображає дійсної картини. Тому з метою покращення існуючої моделі, запропоновано іншу, в якій враховуються усі атмосферні явища, що впливають на провідність по поверхні ізолятора, серед яких тумани, мряка, дощі та роса, що фіксуються за допомогою градацій. Встановлено, що значний вплив зумовлює швидкість вітру та вологість шару забруднення на поверхні ізолятора. Наведено графіки середньої за одноразове зволоження потужності втрат електроенергії у гірлянді ізоляторів за різних кліматичних умов. Методику використано для розрахунку потужності втрат в мережі змінного струму напругою 35 кВ та наведено в таблиці. За результатами дослідження встановлено, що таким чином можна динамічно визначити втрати залежно від кліматичних умов на ізоляторах в будь-якій точці, залежно від наявних метеорологічних даних. Переглянуто методику визначення провідності шару забруднення на поверхні ізолятора. Показано яким чином представляється опір забруднення та методику його розрахунку, що дозволяє в подальшому визначити провідність забруднення, розглянуто вплив опадів на очищення поверхні ізолятора від забруднень. Встановлено, що під прямими опадами очищення ізоляторів є незначним, а вологість шару забруднення збільшується, що збільшує і його провідність. У висновках встановлено, що модель має високий потенціал та необхідність урахування діелектричних втрат.

Ключові слова: забруднення поверхні ізолятора, провідність забруднення, урахування атмосферних явищ, струм витоку, ізолятори в високовольтній мережі, математична модель.

S. YU. SHEVCHENKO, R. O. HANUS

PROSPECTS FOR CREATING A REFINED MODEL OF LEAKAGE CURRENT LOSSES DUE TO CONTAMINATION ON INSULATOR SURFACES

This paper is devoted to identifying the prospects for creating a model of leakage current losses due to contamination on insulator surfaces. The aim of this study was to find mathematical models that would describe leakage current losses accurately enough to assess their importance for the integrated power system of Ukraine. The existing, widely used methodology for calculating leakage current losses was evaluated and found to be inappropriate because it is based solely on the insulator resistance with a constant value of m , which does not reflect the actual situation. Therefore, in order to improve the existing model, another one is proposed, which takes into account all atmospheric phenomena that affect the conductivity on the insulator surface, including fog, drizzle, rain and dew, which are recorded using gradations. It was found that the wind speed and humidity of the contamination layer on the insulator surface have a significant impact. The graphs of the average power loss rate for a single wetting in a garland of insulators under different climatic conditions are presented. The methodology was used to calculate the power loss rate in a 35 kV AC network and is presented in the table. The results show that it is possible to dynamically determine losses depending on climatic conditions on insulators at any point, depending on the available meteorological data. The methodology for determining the conductivity of the contamination layer on the insulator surface has been revised. It is shown how the resistance of contamination is represented, the method of its calculation, which allows further determining the conductivity of contamination, and the effect of precipitation on the cleaning of the insulator surface from contamination. It is established that under direct precipitation, insulator cleaning is insignificant, and the humidity of the contamination layer increases, which increases its conductivity. The conclusions show that the model has a high potential and the need to take into account dielectric losses.

Keywords: contamination of the insulator surface, conductivity of contamination, consideration of atmospheric phenomena, leakage current, insulators in a high-voltage network, mathematical model.

Вступ. У посібнику для практичних розрахунків [1] втрати електроенергії через струм витоку по ізоляторах повітряних ліній електропередачі цілком справедливо віднесено до технічних втрат. Вони зумовлені фізичними процесами, що відбуваються при передачі електроенергії електричними мережами і виражаються в перетворенні частини електроенергії в тепло в елементах мереж. Ці втрати не можуть бути вимірянні. Їхні значення можуть бути отримані розрахунковим шляхом на основі відомих законів електротехніки. Однак запропонована в посібнику методика розрахунку втрат електроенергії через струм витоку по ізоляторах повітряних ліній електропередачі при зволоженні їх забрудненої поверхні видається недостатньо обґрунтованою.

Мета статті. Виявлення перспектив створення уточненої моделі втрат на струми витоку, що дозволить оцінити вплив втрат на енергетику країни та необхідність надати певне рішення.

Аналіз літератури. Потужність втрат в одному ізоляторі пропонується розраховувати залежно від опору ізолятора. При цьому допускається, що значення опору ізолятора в період зволоження залишається незмінним. Таке припущення не може бути визнано обґрунтованим. Воно не відображає електрофізичних процесів при зволоженні забрудненої ізоляції. У процесі зволоження із розчину електроліту на поверхні ізолятора випаровується волога, утворюються кільцеві підсушені зони, періодично виникають і згасають часткові дуги. При цьому струм витоку має імпульсний характер, коли на фоновий струм накладаються кидки

© С. Ю. Шевченко, Р. О. Ганус, 2023

струму витоку (імпульси) під час горіння часткової дуги.

Крім того, у процесі зволоження відбувається вимивання солей із шару забруднення. Використовувати при розрахунку струму витоку, значення опору ізолятора, виміряне без цих процесів, як це пропонується в [1], є помилковим. Наприклад, значення струмів витоку, розраховані згідно з методикою, що розглядається, для гірлянди ізоляторів повітряних ліній електропередачі 110 кВ становлять 8 мА і 76 мА для районів з 1-м і 7-м ступенем забруднення атмосфери відповідно. Однак експериментально встановлено [2], що навіть у граничному випадку, коли ізолятори перебувають у передрозрядному режимі, лише амплітуди імпульсів струмів витоку становлять 10 мА і більше. У нормальному експлуатаційному режимі, при правильно вибраному рівні ізоляції, ці значення будуть меншими. Очевидно, що результати розрахунків втрат електроенергії по струмах витоку, значення яких можна порівняти з амплітудами імпульсів цих струмів під час роботи ізоляторів у передрозрядному режимі, будуть необґрунтовано завищені. Крім того, струм витоку залежить не тільки від ступеня забруднення поверхні ізолятора, тобто від ступеня забруднення атмосфери або, згідно Правил улаштування електроустановок, від ступеня забруднення [3], але й значною мірою від виду та інтенсивності зволоження, що ніяк не враховується у розглянутій методиці розрахунку. Також у методиці не враховується просторова структура зволожуючих метеоявищ. У [4] розглянуто так званий коефіцієнт розподіленості метеоявищ $K_{p.m.}$, що показує, яка частина траси повітряних ліній електропередачі охоплена цим метеоявищем. Середньорічне значення $K_{p.m.}$ різних зволожуючих метеоявищ згідно [4] становить в середньому приблизно 0,5.

Також існує розроблена, більш фізично обґрунтована на думку авторів, методика розрахунку втрат електроенергії через струм витоку по ізоляційних конструкціях зовнішніх електроустановок [5, 6].

Основна частина. Відповідно до цієї методики річні втрати в одиничній ізоляційній конструкції (гірлянди ізоляторів) розраховуються як:

$$A = K [T_T M(P_T) + T_M M(P_M) + T_D M(P_D) + T_R M(P_R)],$$

де $M(P_T)$, $M(P_M)$, $M(P_D)$ та $M(P_R)$ – математичне очікування потужності втрат енергії в одиничній ізоляційній конструкції відповідно при туманах, мряці, дощах та росі, кВт;

T_T , T_M , T_D , та T_R – річна тривалість туманів (при позитивній температурі повітря), мряки, дощів та роси, год.

Значення (P_T) , $M(P_M)$, $M(P_D)$ та $M(P_R)$ при заданому ступені забрудненості ізоляції розраховуються за формулами:

$$M(P_T) = \sum_{i=1}^6 \Psi(U_{Ti}) P_T(U_{Ti});$$

$$M(P_M) = \sum_{i=1}^{11} \Psi(U_{Mi}) P_M(U_{Mi});$$

$$M(P_D) = \sum_{i=1}^{13} \Psi(U_{Di}) P_D(U_{Di});$$

$$M(P_R) = P_R(Q_R),$$

де $\Psi(U_{Ti})$ – вірогідність i -ї швидкості вітру (U_{Ti}) при туманах (6 градацій);

$\Psi(U_{Mi})$ – вірогідність i -ї швидкості вітру (U_{Mi}) при мряці (11 градацій);

$\Psi(Q_{Di})$ – вірогідність дощів i -ї інтенсивності (Q_{Di}) (13 градацій);

$P_T(U_{Ti})$, $P_M(U_{Mi})$, $P_D(U_{Di})$ та $P_R(Q_R)$ – потужність втрат енергії при заданій степені забруднення ізоляції, відповідно під час туманів, мряки та дощів при i -й швидкості вітру та роси при постійній, характерній для середньої смуги України, інтенсивності випадання роси (Q_R), кВт.

Потужність втрат енергії при туманах і морозі визначається залежно від швидкості вітру, оскільки в цих випадках волога потрапляє на поверхню ізолятора в результаті інерційного осадження, тобто інтенсивність зволоження поверхні ізолятора прямо пропорційна швидкості вітру. Ступінь забруднення ізоляції оцінюється величиною поверхневої провідності при зволоженні шару забруднення до насичення (χ_f). Зв'язок поверхневої провідності при зволоженні шару забруднення до насичення може бути визначений з даних, наведених у нормативних документах [3].

Значення $P_T(U_{Ti})$, $P_M(U_{Mi})$, $P_D(U_{Di})$ та $P_R(Q_R)$ визначалися з використанням динамічної математичної моделі зміни електричних характеристик ізоляції в процесі її зволоження різного по вигляду та інтенсивності. На рис. 1, як приклад, наведені значення $P_T(U_{Ti})$ і $P_D(U_{Di})$ при різному ступені забруднення ізоляції.

У моделі враховані основні процеси при зволоженні забрудненої ізоляції: випаровування води із шару зволожуваного забруднення через струми витоку, утворення підсушених зон, виникнення та гасіння часткових дуг (режим переміжних дужок), вимивання солей із шару забруднення та інші. Результати моделювання якісно та кількісно добре узгоджуються з експериментальними даними авторів та інших дослідників. Тут слід зазначити, що якщо експериментальних даних про втрати електроенергії через струм витоку вкрай мало, то даних про інтенсивність електрокорозії арматури ізоляторів у контактній мережі залізниць постійного струму

накопичено чимало. Як втрати електроенергії, і інтенсивність електрокорозії пропорційні кількості електрики. Таким чином, хороша узгодженість результатів моделювання процесів електрокорозії та більшої кількості експериментальних даних непрямым чином підтверджують також і адекватність моделі процесів втрат електроенергії через струм витоку. У

табл. 1 наведено результати розрахунку потужності втрат в окремих ізоляторах гірлянд мережі змінного струму 35 кВ. Потужність втрат, розрахована згідно з [5, 6], визначалася як середньозважена для туманів, мряки та дощів, тривалість яких характерна для України, потужність втрат при росі не врахована через їх мале значення.

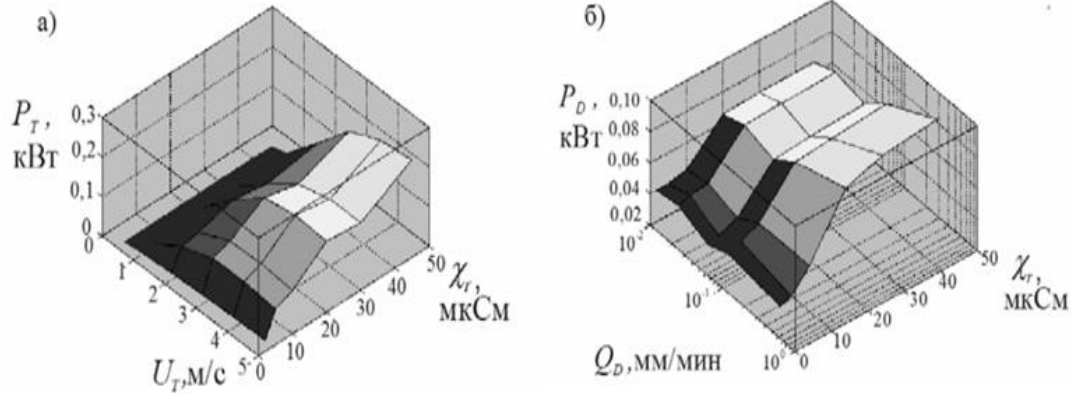


Рисунок 1 – Середня за одноразове зволоження потужність втрат електроенергії у гірлянді ізоляторів:
а) при тумані залежно від ступеня забруднення ізоляції та швидкість вітру;
б) при дощі залежно від ступеня забруднення ізоляції та інтенсивності дощу

Таблиця 1 – Потужність втрат P , кВт

Найменування величини	Шар забруднення		
	2	3	5
Число ізоляторів в гірлянді	3	4	5
Напруга на одному ізоляторі гірлянди, кВ	8,33	6,25	5,00
Потужність втрат, розрахована згідно [1], P , кВт	0,061	0,081	0,093
Потужність втрат, розрахована згідно [5, 6], P , кВт	0,009	0,015	0,014

Таким чином, потенціально, можна динамічно визначати втрати залежно від кліматичних умов на ізоляторі в будь-якій точці, де наявні метеорологічні данні. Однак для цього необхідно встановити провідність шару забруднення. Для цього, згідно з рекомендаціями по визначенню характеристик поверхневого шару ізоляторів, можна визначити питому провідність шару забруднення ізолятору або ділянок його поверхні, що розраховується по формулі:

$$\chi_R = \frac{k_\phi}{R},$$

де k_ϕ – коефіцієнт форми ізолятора або ділянки поверхні; R – опір ізолятора або ділянки поверхні при насиченні шару забруднення вологою, МОм.

Тобто, типовість форми ізоляторів дозволяє звести пошук до розрахунку опору ізолятора або ділянки при насиченні шару забруднення вологою.

На рис. 2 омічний опір забрудненої поверхні представлено чотирма резисторами, де:

- R_1 – опір залишкового шару пилу на поверхні;

- R_2 – опір обтрушуваних шарів пилу на поверхні;
- R_3, R_4 – опір, зумовлений іонізованим газом та пилом міжелектродного проміжку.

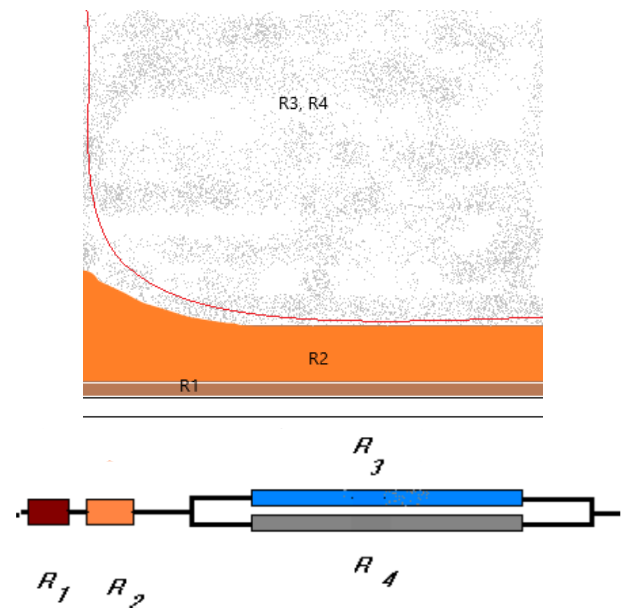


Рисунок 2 – Умовне зображення омічного опору поверхні

Величина омічного опору шару визначається поверхневим R_n і об'ємним R_o опорами частинок. На сильний опір сильний вплив має наявність у газі води та кислот. Збільшення вологості пилу від 1 до 15 % може призводити до зменшення величини питомого електричного опору від одного до трьох і більше порядків. Об'ємний опір часток знижується при підвищенні температури [7].

Електричний опір окремої частки можна, при певних припущеннях, уявити як паралельне з'єднання поверхневого опору R_{Π} та об'ємного – R_o . Сумарний опір частки з урахуванням контактного опору R_k буде:

$$R = \frac{R_{\Pi} \cdot R_o}{R_{\Pi} + R_o} + R_k.$$

Опір шару частинок, розташованих на поверхні, можна представити наступним чином:

$$R_{\Sigma} = \frac{n}{m} \cdot \left[\frac{R_{\Pi} \cdot R_o}{R_{\Pi} + R_o} + R_k \right],$$

де n – число частинок за товщиною шару (кількість шарів частинок), m – число частинок, що знаходяться на площі шару [8].

Знаючи значення n і m можна орієнтовно розрахувати величину опору однієї частки монодисперсного шару. При цьому слід мати на увазі, що відповідно до рис. 1, крім опору шару пилу на осадній поверхні R_1 , R_2 необхідно враховувати опір інших резисторів R_3 , R_4 .

Однак також слід враховувати те, що опади паралельно впливають не тільки на вологість забруднень, але й на їх кількість [9]. Це питання потребує складного моделювання, однак, загалом можна звести очищення ізолятору до графіку, наведеному на рис. 3.

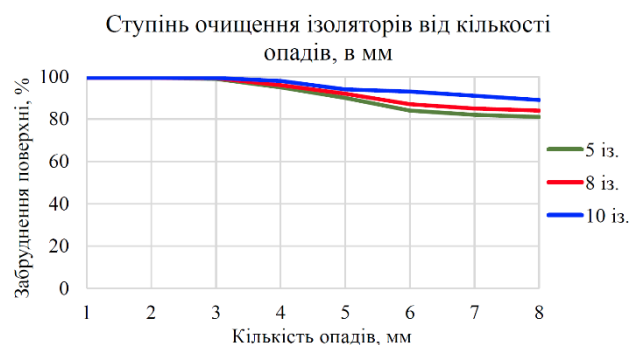


Рисунок 3 – Графік очищення ізоляторів під прямим дощем

Особливістю є те, що під прямими опадами очищення відбувається гірше зі збільшенням кількості ізоляторів, оскільки найінтенсивніше очищення відбувається тільки на верхні кришці ізолятора та по ребрам. І при цьому зволоженість шару пилу зростає, що провокує збільшення струмів витоку [10].

Висновки. Все це дає змогу створити модель, що даватиме змогу визначати втрати в лініях, на площах, чи навіть, при наявності достатніх обчислюваних потужностей, у всій країні, динамічно.

Хотілося б відзначити, що для повноти оцінки втрат електроенергії через струм витоку необхідно враховувати і діелектричні втрати, хоча потужність цих втрат значно нижча за потужність втрат через струм провідності.

Список літератури

- Sachülka. Bestimmung des Isolations Widerstandes und der Kapazität einzelner Leiter von Wechselstromanlagen während des Betriebes. *ETZ*. 1907. P. 457–485.
- Степанчук К. Ф., Клімович Г. С., Краско О. С. Термін служби ізоляції покритих проводів ВЛП 10 кВ при дотику гілок дерев та інших заземлених предметів. *Енергетика*. 2002. № 5. С. 28–34.
- Yaowen L. Analysis of the detection method of insulators deterioration based on optical electric field sensors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 714, no. 4. 042047. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/714/4/042047>.
- Liu X., Miao X., Jiang H., Chen J. Box-Point detector: a diagnosis method for insulator faults in power lines using aerial images and convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 36, no. 6. P. 3765–3773. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2020.3048935>.
- Rahman E. U., Zhang Y., Ahmad S., Ahmad H. I., Jobaer S. Autonomous vision-based primary distribution systems porcelain insulators inspection using UAVs. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 3. P. 974. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21030974>.
- Tan J. Automatic insulator detection for power line using aerial images powered by convolutional neural networks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1748. 042012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1748/4/042012>.
- Wu Y., Yao J., Li T., Fu P., Liao W., Zhang M. Application of image processing techniques in infrared detection of faulty insulators. *Communications in Computer and Information Science*. Berlin, Heidelberg, 2014. P. 189–198. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-45643-9_20.
- Ha H., Han S., Lee J. Fault detection on transmission lines using a microphone array and an infrared thermal imaging camera. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012. Vol. 61, no. 1. P. 267–275. DOI: <https://doi.org/10.1109/tim.2011.2159322>.
- Nyamupangedengu C., Luhlanga L. P., Letlape T. Acoustic and HF detection of defects on porcelain pin insulators. *2007 IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa (PowerAfrica 2007)*, Johannesburg, South Africa, 16–20 July 2007. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/pesaf.2007.4498111>.
- Samaitis V., Mažeika L., Jankauskas A., Rekuviėnė R. Detection and localization of partial discharge in connectors of air power lines by means of ultrasonic measurements and artificial intelligence models. *Sensors*. 2020. Vol. 21, no. 1. P. 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010020>.

References

- Sachülka, “Bestimmung des Isolations Widerstandes und der Kapazität einzelner Leiter von Wechselstromanlagen während des Betriebes,” *ETZ*, p. 457–485, 1907.
- K. F. Stepanchuk, H. S. Klimovych, and O. S. Krasko, “Termin sluzhby izoliatsii pokrytykh provodiv VLP 10 kV pry dotyku hilok derev ta inshykh zazemlenykh predmetiv [Insulation service life of coated 10 kV overhead line wires when touching tree branches and other grounded objects],” *Enerhetyka*, no. 5, p. 28–34, 2002.
- L. Yaowen, «Analysis of the detection method of insulators deterioration based on optical electric field sensors,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 714, no. 4, Mar. 2021, Art. no. 042047, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/714/4/042047>.
- X. Liu, X. Miao, H. Jiang, and J. Chen, “Box-Point detector: A diagnosis method for insulator faults in power lines using aerial images and convolutional neural networks,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 6, p. 3765–3773, 2021. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2020.3048935>.
- E. U. Rahman, Y. Zhang, S. Ahmad, H. I. Ahmad, and S. Jobaer, “Autonomous vision-based primary distribution systems porcelain insulators inspection using UAVs,” *Sensors*, vol. 21, no. 3, pp. 974, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21030974>.
- J. Tan, “Automatic insulator detection for power line using aerial images powered by convolutional neural networks,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1748, Jan. 2021, Art. no. 042012, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1748/4/042012>.

7. Y. Wu, J. Yao, T. Li, P. Fu, W. Liao, and M. Zhang, "Application of image processing techniques in infrared detection of faulty insulators," in *Communications in Computer and Information Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 189–198, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-45643-9_20.
8. H. Ha, S. Han, and J. Lee, "Fault detection on transmission lines using a microphone array and an infrared thermal imaging camera," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 1, p. 267–275, Jan. 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2011.2159322>.
9. C. Nyamupangedengu, L. P. Luhlanga, and T. Letlape, "Acoustic and HF detection of defects on porcelain pin insulators," in *2007 IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa (PowerAfrica 2007)*, Johannesburg, South Africa, Jul. 16–20, 2007, p. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/pesaf.2007.4498111>.
10. V. Samaitis, L. Mažeika, A. Jančauskas, and R. Rekuviene, "Detection and localization of partial discharge in connectors of air power lines by means of ultrasonic measurements and artificial intelligence models," *Sensors*, vol. 21, no. 1, pp. 20, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s21010020>.

Надійшла (received) 19.06.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Шевченко Сергій Юрійович (Sergii Shevchenko) – 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@kpi.edu.ua.

Ганус Роман Олексійович (Roman Hanus) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2442-6087>; e-mail: mrgans.roma@gmail.com.