

О. А. ЗАГАЙНОВА, Г. М. СЕРДЮКОВА

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДОСТОВІРНОСТІ КОНТРОЛЮ ПІД РОБОЧОЮ НАПРУГОЮ

У статті розглянуто моделювання зміни параметрів внутрішньої ізоляції високовольтних вводів для аналізу достовірності контролю під робочою напругою. Для моделювання параметрів внутрішньої ізоляції високовольтного вводу були використані дані реально встановленого вводу на підстанції. Для оцінки зв'язку діелектричних втрат ізоляції конденсаторного типу вводу з його станом використана схема заміщення, в якій активна потужність дорівнює потужності, що розсіюється в ізоляції вводу, а струм зрушений щодо напруги на той же кут, що і у даному вводі. Моделюваними параметрами є ємність внутрішньої ізоляції вводу, активний опір і опір, який моделює зміну параметрів внутрішньої ізоляції. Розраховані чисельні значення ємнісного струму через ізоляцію високовольтного вводу, активного струму, опору, а також потужності втрат для вводу, що розглядається. Розроблена спрощена схема ізоляції високовольтного вводу. Розраховані потужності втрат та виконана їх оцінка при зміні тангенса кута діелектричних втрат на 2 %. Наведена схема заміщення для ізоляції високовольтного вводу без урахування можливості зміни параметрів. Побудована модель, яка дозволяє врахувати зміну параметрів вводу, в яку паралельно підключено додатково опір. В якості схеми, що моделює параметри, була обрана схема резистивного дільника, оскільки вона забезпечує достатню точність, стабільність і потужність. Метод, який було використано для моделювання зміни параметрів внутрішньої ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів можна рекомендувати як допоміжний для аналізу чутливості пристрою контролю під робочою напругою вводів силових високовольтних трансформаторів.

Ключові слова: трансформатор, високовольтний ввід, показники ізоляції, контроль, метод, пристрій, схема заміщення, потужність, опір, тангенс кута діелектричних втрат.

O. A. ZAGAYNOVA, G. M. SERDYUKOVA

MODELLING OF CHANGES IN THE INTERNAL INSULATION PARAMETERS OF HIGH-VOLTAGE BUSHING TO ANALYZE THE RELIABILITY OF CONTROL UNDER OPERATING VOLTAGE

The article considers the modelling of changes in the parameters of the internal insulation of high-voltage bushings for the analysis of the reliability of control under operating voltage. The data of the actually installed input at the substation were used to model the parameters of the internal insulation of the high-voltage input. To assess the relationship between the dielectric losses of the capacitor-type input insulation and its condition, a substitution scheme was used, in which the active power is equal to the power dissipated in the input insulation, and the current is shifted relative to the voltage by the same angle as in this input. The modelled parameters are the capacity of the internal insulation of the input, the active resistance of the input and the resistance that simulates a change in the parameters of the internal insulation. The numerical value of the capacitive current through the insulation of the high-voltage input, the numerical value of the active current, the numerical value of the resistance, and the numerical value of the power loss for this input are calculated. A simplified high-voltage input insulation scheme has been developed. Losses were calculated and evaluated when the tangent of the dielectric loss angle was changed by 2%. The replacement scheme for isolating the high-voltage input without taking into account the possibility of changing the parameters is given. A model was built that allows you to take into account the change in input parameters, to which an additional resistance is connected in parallel. A resistive divider circuit was chosen as the circuit simulating the parameters because it provides sufficient accuracy, stability, and power. The method that was used to simulate the change in the parameters of the internal insulation of the capacitor-type high-voltage inputs can be recommended as an aid to the analysis of the sensitivity of the control device under the operating voltage of the inputs of power transformers.

Keywords: transformer, high-voltage bushing, insulation indicators, control, method, device, substitution scheme, microcircuit, power, resistance, dielectric loss angle tangent.

Вступ. Зарубіжний [1–3] і вітчизняний [4, 5], досвід експлуатації показує, що високовольтні маслонаповнені вводи є одними з найбільш пошкоджуваних вузлів високовольтних силових трансформаторів. Пошкодження маслонаповнених вводів 110–750 кВ з паперово-масляною ізоляцією були причиною багатьох аварій силових трансформаторів і масляних вимикачів. Якщо пошкодження вводу, встановленого, наприклад, на трансформаторі, супроводжується вибухом і пожежею, то матеріальний збиток досить значний через необхідність ремонту трансформатора.

Для вводів 110–750 кВ пред'являються жорсткі вимоги до якості ізоляції, тому що вони працюють при підвищених робочих електричних напруженостях та з підвищеним тепловідведенням. Для утримання працездатності вводів в експлуатації проводиться контроль ізоляції вводів під робочою напругою.

У теперішній час зростає небезпека аварійності через постійне старіння парку устаткування – наближення до кінця терміну експлуатації, обумовленого виробниками. Ця причина ставить задачу якісної оцінки стану і прогнозування працездатності маслонаповнених високовольтних вводів на одне з перших місць в системі обслуговування. Рішення такого завдання є актуальним і можливо тільки при комплексному підході до вдосконалення методів, засобів, алгоритмів і організаційно-технічних форм діагностування високовольтних вводів. Достатня велика кількість публікацій [6–8] присвячена розробці систем моніторингу стану ізоляції високовольтних вводів.

В даний час колективом авторів кафедри ПЕЕ НТУ «ХП» впроваджується пристрій контролю під робочою напругою високовольтних вводів силових трансформаторів [9, 10]. Оскільки достовірність контролю під робочою напругою багато в чому

© О. А. Загайнова, Г. М. Сердюкова, 2022

визначається чутливістю розробленого пристрою до змін стану внутрішньої ізоляції вводу, які в свою чергу призведуть до зміни значень параметрів ізоляції, важливе завдання – це оцінка чутливості пристрою до зміни параметрів внутрішньої ізоляції високовольтних вводів.

Мета статті. Розробка методу моделювання зміни параметрів внутрішньої ізоляції високовольтних вводів для підвищення ефективності рішення задач з розробки та тестування пристроїв безперервного контролю діагностики вводів силових трансформаторів.

Аналіз публікацій та постановка задачі. В статті [11] для діагностики стану ізоляції високовольтних вводів запропоновано використати метод аналізу частотних характеристик. У [12] для діагностики вводів запропоновано використовувати як метод аналізу частотної характеристики, так і метод аналізу розчинених у маслі газів. У роботах [13–15] з метою оцінки ізоляції вводів використовується аналіз спектра в частотній області. У [16] наведена імітаційна модель високовольтного вводу при напрузі постійного та змінного струму 50 Гц.

Однак, незважаючи на достатньо великий об'єм публікацій, питання моделювання зміни параметрів внутрішньої ізоляції високовольтних вводів для аналізу достовірності контролю під робочою напругою розглянуті недостатньо. Тому актуальними є дослідження, які присвячені розробці методів моделювання зміни параметрів внутрішньої ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів.

Методи дослідження. Для моделювання параметрів внутрішньої ізоляції високовольтного вводу були використані дані реально встановленого високовольтного вводу на одній із підстанцій Харківобленерго. Вихідні дані для розрахунку параметрів моделі наведені у табл. 1 та 2.

Таблиця 1 – Параметри вводу, встановленого на підстанції

Тип вводу	Номінальна напруга, кВ	Номінальний струм, А	Кліматичне виконання
ГБМТП	330	1000	У1 (помірний клімат)

Таблиця 2 – Вихідні дані для розрахунку параметрів моделі

Параметр	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Середнє значення
tg δ, %	0,59	0,57	0,57	0,57
C, пФ	627	628	627	627

Електрична модель ізоляції конденсаторного типу високовольтного маслонаповненого вводу будується відповідно до теоретичної моделі вводу.

Для оцінки зв'язку діелектричних втрат ізоляції конденсаторного типу високовольтного вводу з його станом, використовуємо схему заміщення, яка наведена на рис. 1. Ця схема була обрана з таким розрахунком, щоб активна потужність, що виділяється в даній схемі, дорівнювала потужності, що розсіюється в ізоляції вводу, а струм був би зрушений щодо напруги на той же кут, що і у даному вводі.

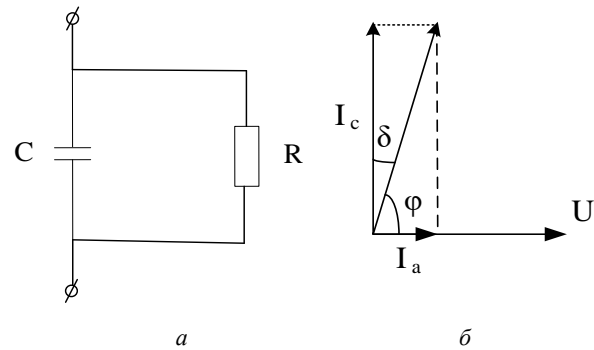


Рисунок 1 – Спрощена схема заміщення вводу (а) і векторна діаграма струмів через діелектрик з втратами (б)

Моделюваними параметрами є ємність внутрішньої ізоляції вводу, активний опір вводу і опір, який моделює зміну параметрів внутрішньої ізоляції.

Із векторної діаграми (рис. 1 б) маємо:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}, \quad (1)$$

де I_a – активний струм через діелектрик;

I_c – ємнісний струм через діелектрик;

C – ємність вводу;

R – опір вводу;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

Ємнісний струм через ізоляцію високовольтного вводу:

$$I_c = \frac{U_\phi}{X_c}, \quad (2)$$

де I_c – ємнісний струм через діелектрик;

X_c – реактивний опір;

U_ϕ – фазна напруга високовольтного вводу.

Чисельне значення ємнісного струму:

$$I_c = \frac{339,15}{\sqrt{3}} \cdot 314 \cdot 10^3 \cdot 627 \cdot 10^{-12} = 38,55 \text{ мА.}$$

Активний струм:

$$I_a = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (3)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат (див. табл. 2).

Чисельне значення активного струму:

$$I_a = 38,555 \cdot 0,0057 = 0,2197 \text{ мА.}$$

Значення розрахункового активного опору вводу:

$$R = \frac{U_\phi}{I_a}. \quad (4)$$

Чисельне значення опору:

$$R = \frac{339,15 / \sqrt{3} \cdot 10^3}{0,2197 \cdot 10^{-3}} = \frac{339,15}{0,2197 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^6 = 891,4 \text{ МОм.}$$

Спрощена модель високовольтного вводу з розрахованими параметрами наведена на рис 2.

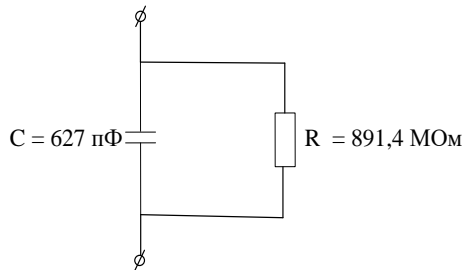


Рисунок 2 – Спрощена схема заміщення високовольтного вводу з результатами розрахунків

Потужність втрат через ізоляцію високовольтного вводу:

$$P = U_{\phi} \cdot I_a, \quad (5)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга;
 I_a – активний струм.

Чисельне значення потужності втрат для даного вводу:

$$P = 339,15 / \sqrt{3} \cdot 10^3 \cdot 0,2197 \cdot 10^{-3} = 43,0259 \text{ Вт.}$$

Оцінимо зміну потужності втрат при зміні тангенса кута діелектричних втрат на 2 %. При зміні значення тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$), рівного 0,0057, на 2 %, отримаємо значення тангенса кута діелектричних втрат:

$$\text{tg}\delta + \Delta\text{tg}\delta = 0,0057 + 0,000114 = 0,005814.$$

Активна складова струму витоків, обчислена за (3), в цьому випадку становить:

$$I_a = 38,555 \cdot 0,005814 = 0,2241 \text{ мА.}$$

Потужність втрат:

$$P = 339,15 / \sqrt{3} \cdot 10^3 \cdot 0,2241 \cdot 10^{-3} = 43,88646 \text{ Вт.}$$

Зміна потужності втрат складе:

$$\Delta P = 43,88646 - 43,0259 = 0,86 \text{ Вт.}$$

Це значення потужності втрат необхідно змодельовати для визначення можливості приладу реєструвати зміни параметрів ізоляції.

Схема, яка наведена на рис. 2, є схемою заміщення для ізоляції високовольтного вводу без урахування можливості зміни параметрів. Для побудови моделі, яка дозволить врахувати зміну параметрів вводу, необхідно паралельно підключити додатково опір, як показано на рис. 3.

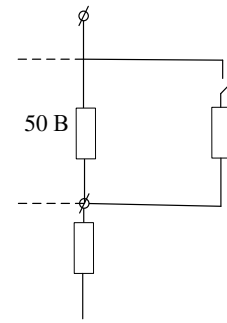


Рисунок 3 – Схема заміщення для обліку можливості зміни параметрів вводу на першому етапі моделювання

Схема на рис. 4 є моделлю вводу для урахування можливості зміни параметрів ізоляції вводу на другому етапі моделювання.

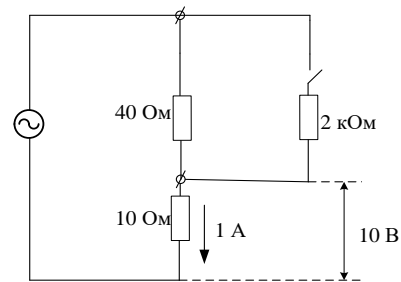


Рисунок 4 – Схема заміщення моделі вводу для урахування можливості зміни параметрів вводу на другому етапі моделювання

В якості схеми, що моделює параметри, була обрана схема резистивного дільника, оскільки вона забезпечує достатню точність, стабільність і потужність [17].

Щоб отримати значення активної складової струму, тобто відповідну зміну тангенса кута діелектричних втрат на 2 %, необхідно підключити опір, рівний 2 кОм.

Ємність ізоляції підключається паралельно до активної складової опору, відповідно до схеми на рис. 5.

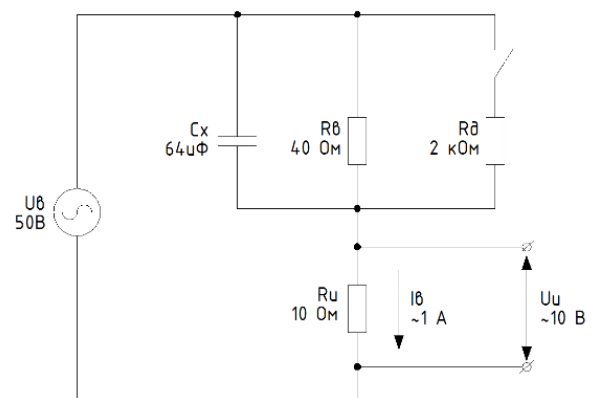


Рисунок 5 – Результуюча схема заміщення

Значення ємності:

$$C = \frac{1}{50 \cdot 314} = 0,0637 \cdot 10^{-3} \Phi = 63,7 \cdot 10^6 \text{ пФ.}$$

Як джерело змінної напруги використовувався автотрансформатор. Резистивний дільник складався з резисторів відповідних номіналів, а також підключався до резистора, що моделює зміну параметрів вводу. Ємність була набрана з декількох конденсаторів, підключених паралельно.

Експеримент проходив у два етапи. На першому етапі експеримент проходив без підключення додаткового опору. За допомогою лабораторного автотрансформатора була подана напруга, яка дорівнювала рівня 50 В. Пристроєм контролю ізоляції конденсаторного типу високовольтних маслонаповнених вводів реєструвалися значення параметрів струму, напруги, активної потужності і реактивної потужності. Ці значення, у відносних одиницях, передавалися на ПК і зберігалися у файл. На другому етапі знімалися значення параметрів струму, напруги, активної потужності і реактивної потужності з урахуванням підключення опору, що моделює зміну параметрів ізоляції конденсаторного типу високовольтних маслонаповнених вводів.

Висновки. В результаті експерименту встановлено, що при незмінних значеннях параметрів ізоляції високовольтного вводу, значення активної потужності за час вимірювання не змінюється. При зміні опору моделі високовольтного вводу на 2 кОм, що для реального вводу відповідає зміні активної потужності на 0,86 Вт, значення активної потужності змінюється на 0,192 %.

Метод, який було використано для моделювання зміни параметрів внутрішньої ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів можна рекомендувати як допоміжний для аналізу чутливості пристрою контролю під робочою напругою вводів силових трансформаторів.

Список літератури

1. Anglhuber M., Velásquez Contreras J. L. Dispersing the clouds: Gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method. *Transformer Magazine. Special Edition: Bushing*. 2017. Vol. 4, no. 5. P. 126–132.
2. Feilat E. A., Metwally I. A., Al-Matri S., Al-Abri A. S. Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2013. Vol. 7, no. 6. P. 791–796. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1059693>.
3. Septyani H. I., Arifianto I., Purnomoadi A. P. High voltage transformer bushing problems. *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, Indonesia, 17–19 July 2011. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/iceei.2011.6021566>.
4. Гришук М. О. Аналіз пошкоджуваності силових трансформаторів електроенергетичних систем. *Матеріали XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, м. Вінниця, 22–24 берез. 2017 р.
5. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Гришук М. О. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2017. № 23(1245). С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.23.07>.
6. Badicu L. V., Broniecki U., Koltunowicz W., Subocz J., Zenker M., Mrozik A. Detection of bushing insulation defects by diagnostic

monitoring. *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Xi'an, China, 25–28 September 2016. P. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.1109/cmd.2016.7757764>.

7. Chen L., Wu X., Tian Y. et al. PD defect monitoring for oil-impregnated paper bushing by measuring the inner pressure. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 53411–53418. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2912655>.
8. Meira M., Ruschetti C. R., Álvarez R. E., Verucchi C. J. Power transformers monitoring based on electrical measurements: state of the art. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12, no. 12. P. 2805–2815. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.2086>.
9. Загайнова А. А. Усовершенствованный метод и устройство контроля изоляции конденсаторного типа высоковольтного оборудования под рабочим напряжением. *Методи та прилади контролю якості*. 2013. № 1(30). С. 102–107.
10. Шутенко О. В., Загайнова О. А., Сердюкова Г. М. Безперервний контроль стану ізоляції високовольтних вводів в середовищі інформаційно-аналітичної системи «Сирена». *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2018. № 195. С. 29–32.
11. Arumugam S. Nonconventional measurements on insulation materials high voltage bushings and power cables using frequency response analysis method. *Engineering Reports*. 2020. Vol. 2, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1002/eng.2.12136>.
12. Mohseni B., Hashemnia N., Islam S. Condition assessment of power transformer bushing using SFRA and DGA as auxiliary tools. *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Wollongong, Australia, 28 September – 1 October 2016. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/powercon.2016.7753973>.
13. Zhang D., Zhao H., Yun H. et al. Study on FDS characteristics of oil-immersed paper insulation bushing under non-uniform moisture content. *IET Science, Measurement & Technology*. 2018. Vol. 12, no. 5. P. 691–697. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0595>.
14. Wang D., Zhou L., Dai C., Guo L., Liao W. Insulation defect diagnostic method for OIP bushing based on multiclass LS-SVM and cuckoo search. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, no. 1. P. 163–172. DOI: <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2895482>.
15. Qi B., Dai Q., Li C., Zeng Z., Fu M., Zhuo R. The mechanism and diagnosis of insulation deterioration caused by moisture ingress into oil-impregnated paper bushing. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 6. P. 1496. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11061496>.
16. Chen X., Li C. Influence of oil-paper insulation aging on frequency domain spectroscopy of high voltage bushing. *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Chengdu, China, 19–22 September 2016. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ichve.2016.7800819>.
17. Li N., Peng Z. Modeling of electric stress control in HV bushing using field grading material. *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena – (CEIDP 2014)*, Des Moines, IA, USA, 19–22 October 2014. P. 550–553. DOI: <https://doi.org/10.1109/ceidp.2014.6995822>.

References

1. M. Anglhuber and J. L. Velásquez Contreras, “Dispersing the clouds: Gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method,” *Transformer Magazine. Special Edition: Bushing*, vol. 4, no. 5, pp. 126–132, 2017.
2. E. A. Feilat, I. A. Metwally, S. Al-Matri, and A. S. Al-Abri, “Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 791–796, 2013, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1059693>.
3. H. I. Septyani, I. Arifianto, and A. P. Purnomoadi, “High voltage transformer bushing problems,” in *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, Indonesia, Jul. 17–19, 2011. pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/iceei.2011.6021566>.
4. M. O. Hryshchuk, “Analiz poshkodzhuvanosti sylovykh transformatoriv elektroenerhetychnykh system [Damageability analysis of power transformers in electrical power systems],” in *Materialy XLVI nauково-tekhnichnoi konferentsii pidrozdiliv VNTU [Proceedings of the XLVI Scientific-Technical Conference of the Vinnytsia National Technical University (VNTU) divisions]*, Vinnytsia, Ukraine, Mar. 22–24, 2017.

5. A. Rubanenko, M. Labzun, and M. Hryshchuk, "Definition defects of transformer equipment using frequency diagnostic parameters," *Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: New solutions in modern technologies*, no. 23(1245), pp. 41–46, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.23.07>. (in Ukrainian)
6. L. V. Badicu, U. Broniecki, W. Koltunowicz, J. Subocz, M. Zenker, and A. Mroziak, "Detection of bushing insulation defects by diagnostic monitoring," in *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Xi'an, China, Sep. 25–28, 2016, pp. 64–68, doi: <https://doi.org/10.1109/cmd.2016.7757764>.
7. L. Chen et al., "PD defect monitoring for oil-impregnated paper bushing by measuring the inner pressure," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 53411–53418, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2912655>.
8. M. Meira, C. R. Ruschetti, R. E. Álvarez, and C. J. Verucchi, "Power transformers monitoring based on electrical measurements: State of the art," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 12, pp. 2805–2815, Jul. 2018, DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.2086>.
9. A. A. Zagaynova, "Usovershenstvovanyi metod i ustroystvo kontrolya izoliatsii kondensatornogo tipa vysokovoltного oborudovaniia pod rabochim napriazheniem [Improved method and device for monitoring the insulation of capacitor-type high-voltage equipment under operating voltage]," *Methods and Devices of Quality Control*, no. 1(30), pp. 102–107, 2013. (in Russian)
10. O. Shutenko, O. Zagaynova, and G. Serdyukova, "Continuous control of the condition of isolation of bushings in the environment of information and analytical system "Sirena"," *Visnyk Kharkivskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Silskoho Hospodarstva Im. P. Vasylenka [Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture Named After P. Vasylenko]*, no. 195, pp. 29–32, 2018. (in Ukrainian)
11. S. Arumugam, "Nonconventional measurements on insulation materials high voltage bushings and power cables using frequency response analysis method," *Engineering Reports*, vol. 2, no. 4, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/eng2.12136>.
12. B. Mohseni, N. Hashemnia, and S. Islam, "Condition assessment of power transformer bushing using SFRA and DGA as auxiliary tools," in *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Wollongong, Australia, Sep. 28–Oct. 1, 2016, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/powercon.2016.7753973>.
13. D. Zhang et al., "Study on FDS characteristics of oil-immersed paper insulation bushing under non-uniform moisture content," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 691–697, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0595>.
14. D. Wang, L. Zhou, C. Dai, L. Guo, and W. Liao, "Insulation defect diagnostic method for OIP bushing based on multiclass LS-SVM and cuckoo search," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 1, pp. 163–172, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2895482>.
15. B. Qi, Q. Dai, C. Li, Z. Zeng, M. Fu, and R. Zhuo, "The mechanism and diagnosis of insulation deterioration caused by moisture ingress into oil-impregnated paper bushing," *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1496, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/en11061496>.
16. X. Chen and C. Li, "Influence of oil-paper insulation aging on frequency domain spectroscopy of high voltage bushing," in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Chengdu, China, Sep. 19–22, 2016, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/ichve.2016.7800819>.
17. N. Li and Z. Peng, "Modeling of electric stress control in HV bushing using field grading material," in *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena – (CEIDP 2014)*, Des Moines, IA, USA, Oct. 19–22, 2014, pp. 550–553, doi: <https://doi.org/10.1109/ceidp.2014.6995822>.

Надійшла (received) 23.06.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Згайнова Олександра Анатоліївна (Zagaynova Alexandra) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8558-3211>; e-mail: zagaynova@gmail.com.

Сердюкова Галина Миколаївна (Serdyukova Galina) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1557-0260>; e-mail: serdukova.galina@gmail.com.