

Грабко Володимир Віталійович, д.т.н., проф., професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +380976024820, vgrabko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4666-1758

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021

Грабко Валентин Володимирович, к.т.н., доц., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +380672620402, gvv.1982@gmail.com

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021

Кучерявий Андрій Васильович, аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +380669102272, andriikucheriavyi98@gmail.com

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021

ДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТОК СИЛОВОГО СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Анотація. В роботі спрямовано увагу на строк служби ізоляції обмоток силового сухого трансформатора, що працює при певному навантаженні та у заданому температурному діапазоні. На підставі паспортних даних розроблено математичні модель, застосування якої дозволяє оцінювати процес витрачання робочого ресурсу ізоляції під дією температури навколишнього середовища та при певному навантаженні трансформатора. Відповідно до математичної моделі розроблена структура пристрою, яка дозволяє оцінювати стан залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового сухого трансформатора як в режимі малих навантажень, так і в режимі перевантаження за певних температурних впливів навколишнього середовища.

Ключові слова: силовий сухий трансформатор, ізоляція обмоток, робочий ресурс, математична модель, пристрій.

Grabko Volodymyr, Dr Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +380976024820, vgrabko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4666-1758

Vinnitsia National Technical University

95, Khmelnytske shose, Vinnitsia, 21021

Grabko Valentyn, PhD, Docent, Docent of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +380672620402, gvv.1982@gmail.com

Vinnitsia National Technical University

95, Khmelnytske shose, Vinnitsia, 21021

Kucheryaviy Andriy, Postgraduate Student of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +380669102272, andriikucheriavyi98@gmail.com

Vinnitsia National Technical University
95, Khmelnytske shose, Vinnitsia, 21021

ON THE QUESTION OF ASSESSMENT OF THE RESIDUAL RESOURCE OF THE INSULATION OF THE WINDING OF A POWER DRY TRANSFORMER

Abstract. The work focuses on the service life of the insulation of the windings of a power dry transformer operating at a certain load and in a given temperature range. Based on the passport data, a mathematical model has been developed, the application of which allows assessing the process of consumption of the working resource of the insulation under the influence of ambient temperature and at a certain transformer load. In accordance with the mathematical model, a device structure has been developed that allows assessing the state of the residual operating life of the insulation of the windings of a power dry transformer both in the low-load mode and in the overload mode under certain environmental temperature influences.

Keywords: power dry transformer, winding insulation, working life, mathematical model, device.

Постановка задачі. Відомо, що силові трансформатори малої та середньої потужності широко використовуються в межах електропостачання різноманітних підприємств [1, 2]. Особливу позицію серед них обіймають сухі трансформатори, популярність застосування яких з кожним роком зростає. Це обумовлено тим, що сухі трансформатори не створюють умов вибухо- та пожежонебезпеки із-зі відсутності трансформаторного масла, не забруднюють навколишнє середовище, простіші в обслуговуванні, мають низькі енергетичні втрати, можуть встановлюватись близько до точок споживання електроенергії тощо. Саме тому в багатьох літературних джерелах акцентується увага на вдосконалення таких силових трансформаторів [3-6]. Очевидно, що механізм охолодження обмоток сухих трансформаторів суттєво відрізняється від масляних трансформаторів, що визначає термін старіння ізоляції обмоток, а, отже, і термін роботи трансформатора в цілому [7].

Відомий ряд методів та засобів, які дозволяють оцінювати залишковий робочий ресурс силових трансформаторів, якими передбачається відслідковування зміни ряду параметрів, зокрема, вимірювання рівня часткових розрядів, визначення параметрів ізоляції, стан обмоток тощо [8, 9]. Ці методи діагностування та контролю технічного стану трансформаторів

діляться на неперервні та періодичні, які застосовуються під час профілактичних та планових ремонтів трансформаторів або у вигляді неперервного моніторингу їх технічного стану [10-12].

Практично всі відомі методи та засоби визначення рівня роботоздатності силових трансформаторів доповнюють один одного для підвищення рівня достовірності оцінки їх технічного стану.

В даній роботі пропонується підхід, який також дозволяє оцінювати стан ізоляції сухого силового трансформатора і є додатковим інформаційним джерелом перевірки його роботоздатності.

Очевидно, що робота силового трансформатора в режимі повного навантаження або перевантаження скорочує номінальний термін його роботи.

Метою роботи є розробка математичної моделі та пристрою для оцінки залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового сухого трансформатора.

Виклад основного матеріалу дослідження. В роботі [7] наведено графічно (рисунок 1) залежність потужності силового сухого трансформатора від середньої температури навколишнього середовища, що визначає термін його роботи. Акцентовано увагу, що коли робоча точка режиму роботи силового сухого трансформатора не піднімається вище наведеної на рис. 1 залежності, то термін експлуатації останнього є номінальним. Перевантаження без скорочення терміну служби допускаються за умови, що перевантаження компенсуються фактичним навантаженням, меншим за номінальну потужність трансформатора. І, звичайно, коли трансформатор працює в режимі перевантаження термін його експлуатації скорочується.

Очевидно, що якщо забезпечити автоматизований контроль зазначених параметрів, то можна відслідковувати ступінь старіння ізоляції сухого трансформатора.

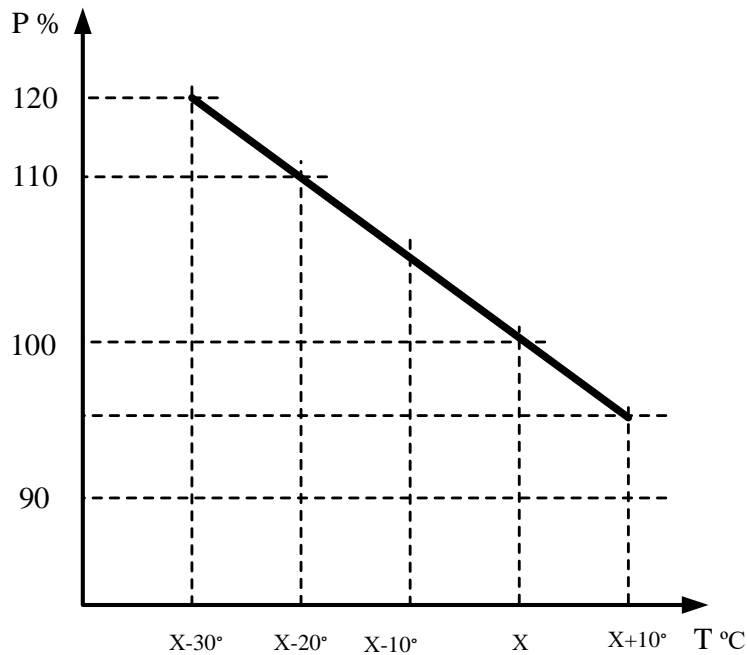


Рисунок 1 – Залежність потужності трансформатора від середньої температури, що відповідає номінальному терміну служби

Представимо наведену залежність (рис. 1) як математичну модель у вигляді формул. На підставі рисунку 1 зазначимо, що номінальний термін служби ізоляції обмоток

$$H = \varphi(P, T^{\circ}), \quad (1)$$

де P – потужність трансформатора (у % від номінальної потужності), T° – температура навколишнього середовища в $^{\circ}\text{C}$; X – середньорічна температура. Для силового трансформатора, що експлуатується без особливих вимог, середньорічна температура вважається 20°C [7].

З формули (1) витікає, що номінальний ресурс роботи ізоляції силового трансформатора можемо представити певним числом, яке в процесі експлуатації трансформатора зменшується і в момент наближення до нуля вважається, що робочий ресурс вичерпано та подальша експлуатація трансформатора здійснюється під пильною увагою оперативного персоналу.

Для технічної реалізації пристрою для оцінки залишкового ресурсу ізоляції сухого трансформатора доцільно представити число, що відповідає номінальному робочому ресурсу, у вигляді певного двійкового цифрового коду, значення якого зменшується з різною швидкістю в залежності від

частоти імпульсів, якою моделюється процес старіння і яка залежить від температури навколишнього середовища та потужності трансформатора в поточний період часу.

З врахуванням викладених міркувань представимо математичну модель оцінки робочого ресурсу ізоляції обмоток силового сухого трансформатора у вигляді:

$$\forall P \leq P(K) \xrightarrow{\left\{ \begin{array}{l} K=T_{min}^{\circ}, T_{max}^{\circ} \\ P(K) \leq P(K)_{доп} \end{array} \right.} \left\{ \begin{array}{l} H = H_{НОМ}, \\ t = t_{НОМ}, \\ f \leq f_{НОМ} \end{array} \right. \quad (2)$$

та

$$\forall P > P(K) \xrightarrow{\left\{ \begin{array}{l} K=T_{min}^{\circ}, T_{max}^{\circ} \\ P(K) > P(K)_{доп} \end{array} \right.} \left\{ \begin{array}{l} H = H_{НОМ}, \\ t < t_{НОМ}, \\ f > f_{НОМ} \div f_{max}, \end{array} \right. \quad (3)$$

де $H_{НОМ}$ – номінальний ресурс роботи сухого трансформатора; $t_{НОМ}$ – номінальний термін експлуатації трансформатора; $f_{НОМ}$ – номінальна частота формування імпульсів, якими визначається робочий ресурс ізоляції обмоток силового сухого трансформатора; $N = H/f$ – кількість імпульсів, якими визначається робочий ресурс при поточній частоті імпульсів f ; $P(K)_{доп}$ – допустима потужність сухого трансформатора, що визначається графіком (рис. 1) при зміні температури навколишнього середовища від найменшого до найбільшого значень; min та max – індекси при відповідних змінних, які задають їх найменше та найбільше значення.

Зазначимо також, що коли споживана потужність близька до нуля частота імпульсів також наближається до нульової.

Відповідно до математичної моделі в роботі пропонується структура пристрою для оцінки залишкового ресурсу ізоляції обмоток сухого трансформатора, що наведена на рис. 2.

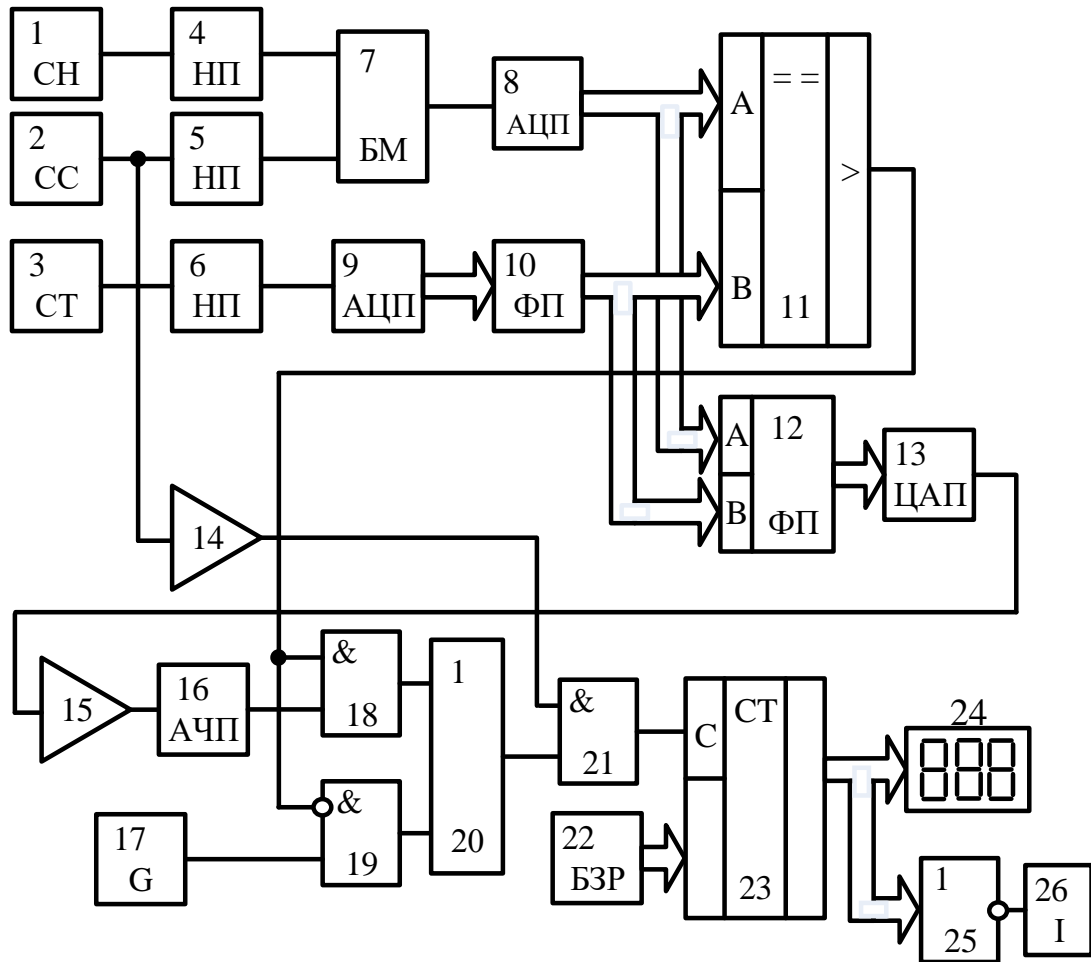


Рисунок 2 – Структурна схема пристрою для оцінки залишкового ресурсу ізоляції обмоток сухого трансформатора

На рис. 2 введено такі позначення: 1 – сенсор напруги; 2 – сенсор струму; 3 – сенсор температури; 4, 5, 6 – нормуючі перетворювачі; 7 – блок множення; 8, 9 – аналого-цифрові перетворювачі; 10 – функціональний перетворювач; 11 – цифровий компаратор; 12 – функціональний перетворювач; 13 – цифро-аналоговий перетворювач; 14 – компаратор; 15 – підсилювач сигналу; 16 – аналого-частотний перетворювач; 17 – генератор імпульсів; 18, 19 – елементи І; 20 – елемент АБО; 21 – елемент І; 22 – блок задання ресурсу; 23 – лічильник імпульсів; 24 – цифровий індикатор; 25 – елемент АБО-НІ; 26 – індикатор.

Принцип роботи пристрою для оцінки залишкового ресурсу ізоляції обмоток сухого трансформатора пояснюється так. Підкреслимо, що сенсори напруги 1 та струму 2 встановлені в колі живлення силового трансформатора,

а сенсор температури 3 використовується для вимірювання температури навколишнього середовища, в якому експлуатується силовий трансформатор.

В процесі експлуатації силового трансформатора сигнали з сенсора напруги 1 та сенсора струму 2 подаються через нормуючі перетворювачі 4 та 5 в блок множення 7, на виході якого формується сигнал, що відповідає поточному значенню споживаної потужності, і в аналого-цифровому перетворювачі 8 перетворюється у відповідний цифровий код.

Аналогічним чином сигнал з виходу сенсора температури 3 через нормуючий перетворювач 6 надходить в аналого-цифровий перетворювач 9, вихідний цифровий код якого подається на функціональний перетворювач 10, на виході якого формується цифровий код, що відповідає значенню потужності відповідно до графіка $P = f(T^\circ)$ (рисунок 1). Отже, коли поточна споживана через трансформатор потужність менша від потужності, що задається графіком (рис. 1) і формується на виході функціонального перетворювача 10 в цифровому коді, то під дією сигналу поточного значення споживаної потужності з виходу аналого-цифрового перетворювача 8 на виході цифрового компаратора 11 формується сигнал логічного нуля, що свідчить про те, що ресурс ізоляції обмоток силового трансформатора не використовується в повному обсязі, який задається заводом виробником. Очевидно, що при такій експлуатації силового трансформатора загальний ресурс ізоляції обмоток а, отже, і термін його експлуатації перевищує номінальний термін роботи.

Вихідним сигналом логічного нуля з виходу цифрового компаратора 11 відкривається елемент І 19 і послідовність імпульсів з виходу генератора імпульсів 17 надходить через елемент АБО 20, через відкритий елемент І 21 в лічильник імпульсів 23. Підкреслимо, що елемент І 21 відкривається при наявності сигналу на виході компаратора 14 за умови протікання порогового значення струму через силовий трансформатор. Слід зазначити, що генератор імпульсів 17 налаштовується на мінімальну частоту імпульсів, що відповідає максимальному терміну ресурсу ізоляції обмоток сухого трансформатора.

Якщо силовий трансформатор працює в режимі перевантаження, тобто його робоча точка знаходиться вище залежності, зображеної на рис. 1, на виході цифрового компаратора 11 формується сигнал логічної одиниці. Одночасно на виході функціонального перетворювача 12 формується цифровий код, що відповідає робочій точці трансформатора відповідно до залежності $P = f(T^\circ)$ (рис. 1) в поточний момент часу. Цей код через цифро-аналоговий перетворювач 13, через підсилювач сигналу 15 поступає на вхід аналого-частотного перетворювача 16, на виході якого формується послідовність імпульсів певної частоти, що залежить від позиції робочої точки силового трансформатора. При цьому з виходу аналого-частотного перетворювача 16 через елемент I 18, через елемент АБО 20 та елемент I 21 послідовність імпульсів надходить в лічильник 23. Очевидно, що в такому режимі роботи трансформатора кількість імпульсів, що надходить в лічильник за одиницю часу, більша в порівнянні з номінальним режимом роботи.

Зазначимо, що в момент ввімкнення пристрою з блока задання ресурсу 22 в лічильник 23 заноситься цифровий код, що відповідає номінальному терміну експлуатації трансформатора. Цей код зменшується нерівномірно в процесі роботи останнього в залежності від частоти надходження імпульсів в лічильник 23 і відповідає залишковому робочому ресурсу ізоляції трансформатора.

Поточне значення залишкового робочого ресурсу відображається на цифровому індикаторі 24, а в момент вичерпання робочого ресурсу на виході елемента АБО-НІ 25 з'являється сигнал, що надходить в індикатор 26 та є сигналом експлуатаційному персоналу щодо стану роботоздатності трансформатора.

Підкреслимо, що для підвищення достовірності оцінки залишкового робочого ресурсу обмоток трансформатора доцільно замість лінійного підсилювача 15 застосувати нелінійний, проте це питання потребує додаткового дослідження.

У разі, коли робоча точка силового трансформатора знаходиться тільки нижче залежності, наведеної на рис. 1, оперативний персонал отримує додаткове підтвердження щодо гарантованого терміну експлуатації трансформатора.

Висновки.

Відповідно до паспортних даних силового сухого трансформатора, якими окреслюються режими його роботи, розроблена математична модель, застосування якої дозволяє автоматизувати процес відслідковування скорочення терміну роботоздатності ізоляції обмоток за споживаною через трансформатор потужністю в поточний момент часу та температурою навколишнього середовища, в якому експлуатується трансформатор.

За запропонованою математичною моделлю розроблена структура пристрою для оцінки залишкового робочого ресурсу ізоляції силового сухого трансформатора. Продемонстрована можливість відслідковування прискореного витрачання робочого ресурсу ізоляції обмоток за умов роботи трансформатора в режимі перевантаження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Осташевський М. О., Юр'єва О.Ю. (2017) *Електричні машини і трансформатори: навч. посібник*. Харків : ФОП Панов А. М. 452 с.
2. Martin Heathcote, Ray Arnold (2016) *J and P Transformer Book*, (14th Edition), 1008 p.
3. Aksu, İ. Ö., Demirdelen, T. (2018). «A comprehensive study on dry type transformer design with swarm-based metaheuristic optimization methods for industrial applications». *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(14), 1743–1752.
4. Demirdelen T., Esenboga, B., Aksu I. O., Ozdogan A., Yavuzdeger A., Ekinci F., Tümay M. (2022). «Modeling and experimental validation of dry-type transformers with multiobjective swarm intelligence-based optimization algorithms for industrial application». *Neural Computing and Applications*, 34(2), 1079–1098.
5. Rodríguez S., Sánchez N., Gómez D. (2019). «Optimization of geometric parameters of power transformer using bee's algorithm». *Annals of Electrical and Electronic Engineering*, 2(7), 7–10.
6. Esenboga B., Demirdelen T. (2020). «Efficiency and cost based multi-optimization and thermal/electromagnetic analyses of 3-phase dry-type transformer». *IETE Journal of Research*, 1–13.
7. «Трансформатори силові сухі типів ТСЗГЛ, ТСГЛ, ТСЗГЛО, ТСГЛО потужністю від 100 до 2500 кВ·А класу напруги 6–10 кВ» (2024) Настанова щодо експлуатування 1ВП.717.001 НЕ, ТОВ Укрелектроапарат, 18 с.
8. Kulkarni S. V., Khapard S. A. (2013) *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics Second Edition*. CRC Press Taylor & Francis Group, 742 p.

9. Грабко В. В. Березницький Д.О. (2010) *Діагностування трансформаторів власних потреб та систем технологічних захистів енергоблока теплової електростанції* : монографія. Вінниця: ВНТУ. 124 с.
10. Denysiuk S., Prytyskach S. (2014) «Development of the On-line Power Transformer State Monitoring System». *International Journal of Computing and Technology*, Vol. 1, Issue 5, pp. 191–195.
11. Li S., Li J. (2017) «Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective». *High Voltage*, vol. 2, no. 2, pp. 82–91.
12. Islam M. M., Lee G. and Hettiwatte S. N. (2017). «A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers». *Electrical Engineering*, 100(2). pp. 581–605.

REFERENCES:

1. Ostashevskiy M. O., Yur'yeva O.Yu. (2017) *Electrical machines and transformers: a textbook*. Kharkiv : FOP Panov A. M., 452 p.
2. Martin Heathcote, Ray Arnold (2016) *J and P Transformer Book*, (14th Edition), 1008 p.
3. Aksu İ. Ö., Demirdelen T. (2018). «A comprehensive study on dry type transformer design with swarm-based metaheuristic optimization methods for industrial applications». *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(14), 1743-1752.
4. Demirdelen T., Esenboga B., Aksu I. O., Ozdogan A., Yavuzdeger A., Ekinçi F., Tümay M. (2022). «Modeling and experimental validation of dry-type transformers with multiobjective swarm intelligence-based optimization algorithms for industrial application». *Neural Computing and Applications*, 34(2), 1079-1098.
5. Rodríguez S., Sánchez N., Gómez D. (2019). «Optimization of geometric parameters of power transformer using bee's algorithm». *Annals of Electrical and Electronic Engineering*, 2(7), 7–10.
6. Esenboga B., Demirdelen T. (2020). «Efficiency and cost based multi-optimization and thermal/electromagnetic analyses of 3-phase dry-type transformer». *IETE Journal of Research*, 1–13.
7. «Dry-type power transformers TSZGL, TSGL, TSZGLO, TSGLO with a capacity of 100 to 2500 kV•A, voltage class 6–10 kV» (2024) Operating instructions 1VP.717.001 NE, TOV Ukrelectroaparat, 18 p.
8. Kulkarni S.V., Khapard S.A. (2013) *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics Second Edition*. CRC Press Taylor & Francis Group, 742 p.
9. Grabko V. V. Berezytskyi D. O. (2010) *Diagnostics of transformers for own needs and technological protection systems of a thermal power plant power unit*: monograph. Vinnytsia : VNTU. 124 p.
10. Denysiuk S., Prytyskach S. (2014) «Development of the On-line Power Transformer State Monitoring System». *International Journal of Computing and Technology*, Vol. 1, Issue 5, pp. 191–195.
11. Li S., Li J. (2017) «Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective». *High Voltage*, vol. 2, no. 2, pp. 82–91.
12. Islam M. M., Lee G. and Hettiwatte S. N. (2017). «A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers». *Electrical Engineering*, 100(2). pp. 581–605.

Надійшла до редакції 28.12.2024 р.