

# ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВИТРАЧАННЯ РОБОЧОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вінницький національний технічний університет

*Силовий трансформатор є одним з найвідповідальніших і найдорожчих активів в електроенергетичних системах та мережах. Вихід з ладу силового трансформатора може призвести не тільки до простою всього тракту передачі електроенергії, але й до небезпеки для персоналу та навколишнього середовища. Однією з основних причин виходу з ладу силового трансформатора є погіршення стану ізоляції обмоток. На ізоляцію обмоток трансформатора впливають багато різних чинників, але одним із основних чинників є вплив температури, зумовленої протіканням по обмотках трансформатора струмів різної величини.*

*Силовий трансформатор піддається впливам довготривалих та короткотривалих навантажень. Відомі методи та засоби, які дозволяють оцінювати технічний стан за довготривалих навантажень. Питанням впливу короткотривалих навантажень приділено в літературі уваги менше, хоча їхній вплив на теплове старіння ізоляції обмоток очевидний. Розроблено метод та математичну модель, яка дозволяє оцінювати тепловий вплив на ізоляцію обмоток незалежно від тривалості такого впливу. Суть методу базується на визначенні кількості теплоти, яка виділяється під час протікання по обмотках струму з подальшим розповсюдженням тепла в них та елементах конструкції трансформатора, що дозволяє побудувати поверхню розподілу температури від точки виділення тепла.*

*Запропоновано структуру пристрою для оцінювання залишкового робочого ресурсу ізоляції силового трансформатора, яка базується на основі розробленої математичної моделі. Детально викладено реалізацію цього підходу.*

*Важливо зауважити, що запропонований метод не вимагає значних капіталовкладень і відповідає вимогам точності та надійності.*

*Розроблений метод може бути рекомендований для використання підприємствами електроенергетичної галузі в задачах діагностування силових масляних трансформаторів. Метод може інтегруватися в систему моніторингу всього електроенергетичного обладнання розподільчого пристрою електростанції або підстанції, що дозволяє зменшити певним чином витрати на технічне обслуговування електрообладнання.*

**Ключові слова:** пристрій, діагностування, силовий трансформатор, ізоляція, обмотка, теплове старіння.

## Вступ

Відомо, що в електричних мережах трансформатори відносяться до основного електрообладнання. Робочий ресурс трансформаторів, як і будь-якого іншого електрообладнання, з часом зменшується. Однією з основних причин виходу з ладу трансформаторів є погіршення технічного стану ізоляції обмоток, на яку впливають різні чинники [1]. Однією з основних причин, через які погіршується стан ізоляції, є вплив температури, зумовлений навантаженням трансформатора. Відомо, що силові трансформатори піддаються різноманітним за рівнем навантаженням та перевантаженням, які мають характер довгострокового або короткострокового впливу.

На сьогодні, існує низка методів та математичних моделей, які дозволяють оцінити стан зносу ізоляції за довгострокових навантажень або перевантажень. За їхнього використання розроблено пристрої, що дозволяють діагностувати технічний стан обмоток трансформаторів та оцінювати перспективу тривалості їхньої нормальної роботи без виведення силового трансформатора з експлуатації [2]. Проте, можуть виникати і короткочасні навантаження і, особливо, перевантаження, які протягом короткого терміну спричиняють виділення тепла в обмотки та суміжні елементи конструкції трансформатора. Часто таке виділення тепла залишається поза увагою оперативного

персоналу, оскільки в багатьох випадках воно на рівень температури на поверхні обмотки або на поверхні бака силового трансформатора ніяк не впливає через теплопровідність. Але очевидно, що такі навантаження також впливають на стан ізоляції обмоток, особливо в місцях, ближчих до середини шарів обмотки, і результати їхнього впливу виявити набагато складніше. Тому раннє виявлення місць можливого пошкодження ізоляції обмоток силових трансформаторів дозволяє прогнозувати їхню роботоздатність та підвищити надійність роботи, що в свою чергу підвищує надійність роботи електричних мереж в цілому.

Зазначимо, що таким підходам у відомій літературі приділяється менше уваги.

Зрозуміло, що для використання будь-якого методу діагностування і прогнозування робочого ресурсу ізоляції обмоток у процесі роботи силового трансформатора необхідним є створення відповідного пристрою, апаратна реалізація якого задовольняє вимогам точності та надійності.

В роботі [3] запропоновано метод та математичну модель, застосування яких дозволяє оцінити технічний стан ізоляції обмоток силового трансформатора в умовах дії на них короткочасних та довготривалих стрибків навантаження. Суть методу полягає у тому, що у разі виникнення навантаження та виділення відповідної кількості теплоти внаслідок протікання струму, використовуючи закони теплопровідності, можна визначити розподіл температурного поля від середини обмотки до її поверхні з урахуванням втрат тепла, що розповсюджується у внутрішній конструкції силового трансформатора. Відповідно до розробленої математичної моделі визначення температури в будь-якій точці обмотки трансформатора описується формулою

$$T_x = T_M + \frac{q_v \delta}{\alpha} + \frac{q_v \delta^2}{2\lambda} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\delta} \right)^2 \right], \quad (1)$$

де  $x$  — відстань від середини шару провідників до точки дослідження температури (м),  $T_M$  — температура трансформаторного масла ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $q_v$  — об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ),  $\lambda$  — еквівалентна теплопровідність шару провідника матеріалу ( $\text{Вт}/\text{м}$ ),  $\delta$  — товщина половини пластини провідника (м),  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі.

Підкреслимо, що за наведеною формулою (1) обчислюється розподіл температури в кожному шарі провідників обмотки, з якого визначається шукана найвища температура ізоляції обмоток, що використовується для подальших розрахунків з оцінювання ступеня вичерпання робочого ресурсу ізоляції обмоток трансформатора.

Визначення температури стінки провідника обмотки  $q_v$  ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ) здійснюється за формулою

$$q_v = \frac{Q_v}{V}, \quad (2)$$

де  $Q_v$  — тепловиділення у провіднику довжиною один метр (Вт);  $V$  — об'єм провідника ( $\text{м}^3$ ).

Тепловиділення у провіднику довжиною один метр визначається за формулою

$$Q_v = I^2 \cdot R_{\text{ал}}, \quad (3)$$

де  $R_{\text{ал}}$  — опір алюмінію (Ом);  $I$  — струм, що протікає по провіднику (А).

Згідно з [3] коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  розраховується для різних значень температури трансформаторного масла, оскільки фізичні властивості теплопровідності, в'язкості і число Прандтля для трансформаторного масла змінюються в залежності від температури.

Відповідно до формули Монтзінгера за «восьмиградусним правилом» теплового старіння електротехнічної ізоляції, яке використовується як закон старіння ізоляції, витрати робочого ресурсу ізоляції визначаються за формулою

$$\tau_T = \tau_0 \cdot e^{-a\Delta T}, \quad (4)$$

де  $\tau_T$  — строк служби ізоляції в режимі роботи, який викликаний перегрівом ізоляції  $\Delta T$ ;  $\tau_0$  — строк служби ізоляції за нагріву ізоляції, який відповідає номінальному режиму роботи трансформатора;  $a$  — коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу ізоляції.

Перегрів  $\Delta T$  визначається за таким виразом

$$\Delta T = T_x - T_n, \quad (5)$$

де  $T_n$  — температура нагріву ізоляції за номінального режиму роботи трансформатора ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_x$  — фактична температура нагріву ізоляції ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Застосуємо цю математичну модель для реалізації пристрою оцінювання залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора за тепловим старінням. Сутність роботи пристрою полягатиме в тому, щоб за вимірюваними температурою трансформаторного масла і струмом, що протікає в обмотках, визначити ступінь старіння ізоляції з її послідовним накопиченням до моменту повного вичерпання робочого ресурсу і відповідного повідомлення оперативному персоналу.

*Метою роботи є створення пристрою для оцінювання залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора за тепловим старінням з використанням промислової елементної бази і, як наслідок, підвищення надійності експлуатації силових трансформаторів.*

### Результати дослідження

Для реалізації поставленої задачі застосуємо зазначену вище математичну модель, яка дозволяє визначити еквівалентне теплове старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора за короткочасних і довготривалих стрибків навантаження з урахуванням температури трансформаторного масла на різних рівнях бака силового трансформатора.

Враховуючи вищезгадані твердження та сучасні технології створення технічних засобів, очевидно, що пристрій має містити сукупність цифрових блоків для реалізації представленої математичної моделі. З математичної моделі [3] впливає необхідність поточного вимірювання двох параметрів та декількох параметрів геометрії конструкції силового трансформатора, від яких залежить інтенсивність спрацювання робочого ресурсу ізоляції. Очевидно, що пристрій міститиме відповідні сенсори, вихідні аналогові сигнали яких необхідно представляти в цифровій формі для подальшого врахування та обробки.

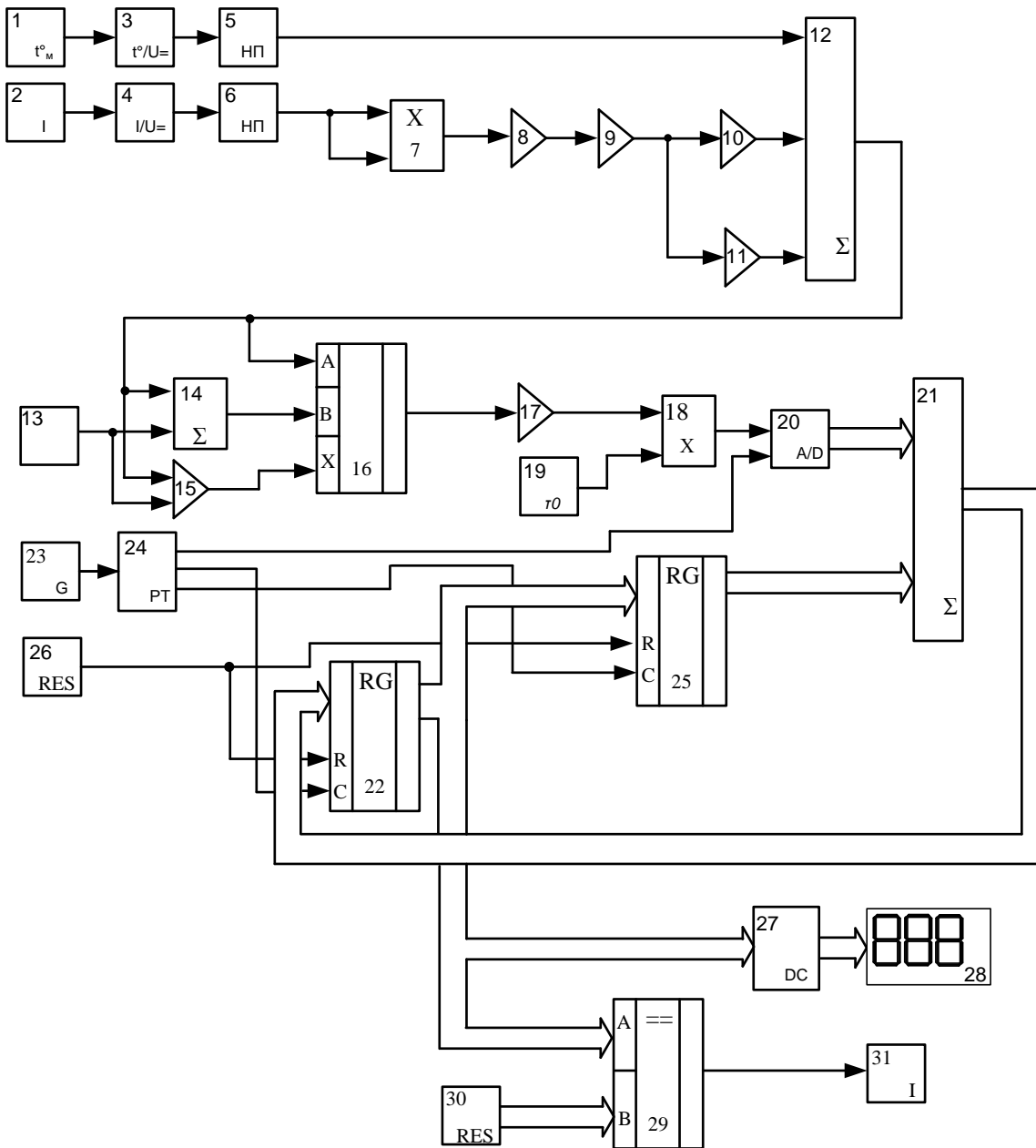
Використаємо підхід логіко-структурного синтезу для розробки складових пристрою, в яких здійснюється обробка аналогових сигналів [4].

З урахуванням вищезазначеного запропонована структурна схема пристрою для оцінювання залишкового робочого ресурсу ізоляції силового масляного трансформатора, основана на законах теплопередачі (рис.).

Для оцінки залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора сенсори пристрою розподілені по об'єкту таким чином: сенсор температури 1 установлений в баку трансформатора та призначений для вимірювання температури трансформаторного масла у найнагрітішій точці. Сенсор струму 2 встановлений в колі вторинної обмотки силового масляного трансформатора. Ці два сенсори дозволяють оцінити вплив температури на ізоляцію обмотки трансформатора у найнагрітішій точці. Підкреслимо, що за допомогою сенсорів 1 і 2 у відповідності до розробленої математичної моделі, можна оцінювати температуру нагріву ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, який працює як в режимі тривалих, так і короткочасних навантажень.

Запропонований пристрій працює так. З подачею напруги живлення блок установки нуля 26 формує імпульс, яким обнулюються регістри 22 та 25. Одночасно генератор сигналів 23 починає формувати відповідну послідовність імпульсів.

Під час вимірювання робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора сигнал з сенсора температури 1 через перетворювачі 3 та 5 подається на вхід аналогового суматора 12. Також сигнал з сенсора струму 2 через перетворювачі 4 та 6 подається у блок множення 7, а з його виходу надходить сигнал на масштабувальний перетворювач 8. На виході останнього формується сигнал  $Q = I^2 R$ , який передається на вхід масштабувального перетворювача 9, в якому здійснюється перетворення за формулою  $q = Q/V$ . Сигнал з виходу перетворювача 9 надходить на масштабувальні перетворювачі 10 і 11. Зауважимо, що в масштабувальному перетворювачі 10 здійснюється формування вихідного сигналу відповідно до виразу  $q_1 \delta / \alpha$ , а в масштабувальному перетворювачі 11 формується сигнал згідно з математичним виразом  $q_1 \delta^2 / 2\lambda$ . Вихідні сигнали з обох перетворювачів 10 і 11 надходять на входи аналогового суматора 12, вихідний сигнал з якого одночасно подається на входи аналогового комутатора 16, суматора 14 та компаратора 15. В компараторі 15 порівнюється сигнал з виходу суматора 12 з сигналом блока задання температури 13 і формується сигнал логічної одиниці для керування аналоговим компаратором 16.



Структурна схема пристрою для оцінювання залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі: 1, 2 — сенсор температури трансформаторного масла та сенсор струму відповідно; 3, 4 — перетворювач температури в напругу постійного струму та перетворювач струму в напругу постійного струму відповідно; 5, 6 — нормувальні перетворювачі сигналів; 7 — блок множення; 8, 9, 10 та 11 — масштабувальні перетворювачі; 12 — суматор; 13 — блок задання температури; 14 — суматор; 15 — компаратор; 16 — аналоговий комутатор; 17 — масштабувальний перетворювач; 18 — блок множення; 19 — блок задання ресурсу ізоляції в нормальному режимі експлуатації; 20 — аналого-цифровий перетворювач; 21 — цифровий суматор; 22 — регістр; 23 — генератор сигналів; 24 — розподільувач тактів; 25 — регістр; 26 — блок установки нуля; 27 — дешифратор; 28 — цифровий індикатор; 29 — цифровий компаратор; 30 — блок задання ресурсу ізоляції; 31 — індикатор

У випадку, коли сигнал з аналогового суматора 12 більший сигналу блока задання температури 13, на виході компаратора 15 формується сигнал логічної одиниці і вихідний сигнал суматора 14 через аналоговий комутатор 16 надходить на вхід масштабувального перетворювача 17. Блок задання температури 13, вихідний сигнал якого пропорційний температурі  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ , призначений для перемикання за допомогою компаратора 15 та аналогового комутатора 16 сигналів, що дозволяють оцінити витрачання робочого ресурсу ізоляції обмоток трансформатора в нормальному режимі експлуатації, тобто коли температура обмотки не перевищує  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ , і в режимі перевантаження, коли робоча температура більша зазначеної. У першому випадку сигнал з виходу суматора 12

подається безпосередньо через аналоговий комутатор 16 в канал вимірювання відпрацьованого ресурсу ізоляції, а в другому випадку сигнал через суматор 14 та аналоговий комутатор 16 надходить в канал вимірювання відпрацьованого ресурсу з урахуванням підвищеного навантаження трансформатора, що спричиняє нагрів обмотки трансформатора вище 95 °С. Вихідний сигнал аналогового комутатора 16 надходить на вхід масштабувального перетворювача 17, в якому обчислюється значення  $e^{0,087 \cdot \Delta T}$  та подається на перший вхід блока множення 18, на другий вхід якого подається в аналоговій формі сигнал з виходу блока задання ресурсу ізоляції 19, що відповідає номінальному терміну роботи ізоляції в нормальному режимі експлуатації. З виходу блока множення 18 сигнал надходить на вхід АЦП 20, в якому він перетворюється в цифровий код. Зауважимо, що зазначений цифровий код відповідає еквівалентному ресурсу ізоляції за одиницю часу.

Накопичення відпрацьованого ресурсу ізоляції визначається таким чином. За сигналами з виходу генератора імпульсів 23 на виходах розподільвача тактів 24 по черзі формуються короткочасні сигнали логічної одиниці. За сигналом на першому виході розподільвача тактів 24 в АЦП 20 аналоговий сигнал перетворюється в цифровий код і надходить на цифровий суматор 21. Враховуючи те, що в момент ввімкнення зазначеного пристрою регістр 25 обнулюється, то на виході цифрового суматора 21 з'являється код, аналогічний коду на виході АЦП 20. Цей цифровий код подається на вхід регістра 22 і за сигналом з другого виходу розподільвача тактів 24 записується в нього.

За сигналом з третього виходу розподільвача тактів 24 цифровий код з регістра 22 перезаписується в регістр 25. Під час чергового перетворення аналогового сигналу в цифровий код в АЦП 20 за сигналом з першого виходу розподільвача тактів 24 в цифровому суматорі 21 додається поточне значення відпрацьованого ресурсу ізоляції зі значенням, отриманим в попередньому циклі. Результат додавання заноситься в регістр 22 і перезаписується в регістр 25. Таким чином, в циклі вимірювання ресурсу ізоляції в регістрі 22 накопичується цифровий код, що відповідає відпрацьованому ресурсу ізоляції обмотки в номінальному режимі роботи та в режимі перевантаження.

Інформація про відпрацьований ресурс через дешифратор 27 виводиться на цифровий індикатор 28.

Одночасно цифровий код з виходу регістра 22 надходить в цифровий компаратор 29, в якому здійснюється порівняння з цифровим кодом, записаним в блоці задання ресурсу ізоляції 30. У разі збігу цих кодів на виході цифрового компаратора 29 з'являється сигнал, який активує індикатор 31, що і є повідомленням оперативному персоналу про вичерпання робочого ресурсу ізоляції обмоток та необхідність виведення трансформатора з експлуатації.

## Висновки

Відповідно до запропонованої математичної моделі для оцінювання залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора розроблено пристрій, який дозволяє в процесі експлуатації силового трансформатора фіксувати короткочасні та довготривалі температурні впливи на стан ізоляції обмоток та накопичувати інформацію щодо відпрацьованого робочого ресурсу ізоляції обмоток з оперативним повідомленням обслуговувальному персоналу про технічний стан ізоляції обмоток.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. В. Тюрюмина, А. П. Батрак, и В. С. Секацкий, «Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов в зарубежных странах,» *Молодой ученый*, № 8, с. 321-325, 2016.
- [2] В. В. Грабко, В. В. Грабко, і О. В. Паланюк, «Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора,» *Патент України G01R 31/00. № 141472 МПК (2006)*, 10.04.2020.
- [3] V. Grabko, S. Tkachenko, and O. Palaniuk, "Determination of temperature distribution on windings of oil transformer based on the laws of heat transfer," *ScienceRise*, no. 5, pp. 3-13, 2021.
- [4] Р. В. Антипенский, и А. Г. Фадин, *Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств*. М.: Техносфера, 2007, 128 с.

Рекомендована кафедрою комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.08.2022

**Паланиук Олександр В'ячеславович** — аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, e-mail: oleksanderp020895@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**O. V. Palaniuk<sup>1</sup>**

## **Device for Assessing Working Resource Consumption of Power Oil Transformer Windings**

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*A power transformer is one of the most responsible and expensive assets in power systems and networks. Failure of a power transformer can lead not only to downtime of the entire electricity transmission path, but also to danger to personnel and the environment. One of the main reasons for the failure of a power transformer is the deterioration of the insulation of the windings. The insulation of the transformer windings is affected by many different factors, but one of the main factors is the effect of temperature due to the different values of the currents flowing through the transformer windings.*

*The power transformer is exposed to the effects of long-term and short-term loads. There are known methods and tools that allow you to assess the technical condition under long-term loads. In the literature, less attention is paid to the issue of the influence of short-term loads, although their influence on the thermal aging of the winding insulation is obvious. The author has developed a method and a mathematical model that allows to estimate the thermal effect on the insulation of the windings regardless of the duration of such an effect. The essence of the method is based on the determination of the amount of heat that is released when the current flows through the windings with the subsequent heat spread over the windings and structural elements of the transformer, which allows you to build a temperature distribution surface from the point of heat release.*

*The paper proposes the structure of the device for estimating the residual working life of the insulation of the power transformer, which is based on the basis of the developed mathematical model. The article describes the implementation of this approach in detail.*

*It is important to add that the proposed method does not require significant capital investments and meets the requirements of accuracy and reliability.*

*The developed tool can be recommended for use by energy companies in the tasks of diagnosing power oil transformers, which can be integrated into the monitoring system of all electrical equipment of the distribution device of a power plant or substation, which allows to reduce in a certain way the costs of maintenance of electrical equipment.*

**Keywords:** device, diagnostics, power transformer, insulation, winding, thermal aging.

**Palaniuk Oleksandr V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, e-mail: oleksanderp020895@gmail.com