

МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

¹Вінницький національний технічний університет

Силові масляні трансформатори є важливим компонентом електроенергетичної інфраструктури. Моніторинг стану обмоток силових масляних трансформаторів сприяє запобіганню їх передчасного виходу з ладу та значних пошкоджень обмоток, ремонт яких потребує значних фінансових витрат. Наявні засоби періодичної перевірки стану обмоток силового трансформатора є недостатньо ефективними. В роботі акцентовано увагу на підходи до аналізу оцінки ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора. Запропонована автором математична модель дозволяє здійснювати оцінку стану ізоляції обмоток силового трансформатора в умовах короткочасних та довготривалих впливів на стан ізоляції. Це дослідження спрямоване на розробку мікропроцесорного засобу для діагностування обмоток силового масляного трансформатора за тепловим старінням відповідно до запропонованої математичної моделі. Мікропроцесорна реалізація дозволяє спростити використання запропонованої математичної моделі, оскільки всі обчислення відбуваються в автоматичному режимі. Запропонований підхід не вимагає значних капіталовкладень і відповідає вимогам швидкодії.

Розроблений засіб може бути рекомендований для використання енергетичними компаніями в задачах діагностування силових масляних трансформаторів, який може інтегруватись в систему моніторингу всього електроенергетичного обладнання розподільного пристрою електростанції або підстанції. Це зменшить витрати на технічне обслуговування силового електрообладнання.

Ключові слова: мікропроцесор, діагностування, силовий трансформатор, обмотка, теплове старіння.

Вступ

Силові масляні трансформатори є важливим елементом в системі електропостачання споживачів електроенергії. Надійність електричної мережі суттєво залежить від робочого стану силового масляного трансформатора. Такі трансформатори можуть мати термін служби 25 років і більше, проте за неналежного обслуговування та експлуатації в умовах, коли навантаження має змінний характер та перевищує номінальне, термін роботи силового масляного трансформатора може скорочуватись. Тому актуальною є завдання безперервного контролю технічного стану трансформатора та прогнозування можливого вичерпання його робочого ресурсу та відмов у роботі.

Моніторинг і діагностування силових масляних трансформаторів є важливою складовою для виявлення та прогнозування несправностей і швидкого сповіщення оперативного персоналу. Для повноцінного моніторингу і діагностування різних вузлів силового трансформатора необхідно вимірювати низку параметрів роботи, зокрема: робочі напругу, струм, температуру обмоток тощо.

Моніторинг основних параметрів, які впливають на старіння обмоток силового масляного трансформатора, дозволяє оцінювати швидкість старіння та прогнозувати залишковий робочий ресурс ізоляції за різноманітними математичними моделями.

В роботах [1]—[4] запропоновані підходи, які дозволяють оцінювати інтенсивність старіння ізоляції обмоток силових трансформаторів в процесі їх експлуатації. Однак зазначені підходи орієнтовані на відслідковування процесів, що змінюються повільно в часі. Очевидно, що для визначення впливу короткочасних стрибків навантаження потрібно використовувати інші математичні моделі, які дозволяють аналізувати короткострокові процеси.

Відомі пристрої для оцінювання спрацювання робочого ресурсу силового масляного трансформатора, наприклад, в [5], якими передбачається виведення останнього з роботи на стадії профілактичних або ремонтних заходів, що є неприйнятним для використання в задачах моніторингу технічного стану силових трансформаторів.

В роботах [6]—[8] запропоновані структури пристроїв для оцінки загального робочого ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора без відключення трансформатора від електричної мережі. Пристрої дозволяють оцінювати ступінь спрацювання робочого ресурсу ізоляції обмоток трансформатора шляхом аналізу теплового стану його обмоток за вимірюваними параметрами режиму та даними навколишнього середовища. Однак вказані пристрої не враховують короткочасні стрибки навантаження, що також суттєво впливає на ступінь спрацювання робочого ресурсу обмоток силового трансформатора.

Як відомо, зі збільшенням навантаження на трансформатор збільшується струм, що протікає в обмотці, що зі свого боку призводить до нагріву обмотки трансформатора. Усі без виключення перегріву впливають на стан ізоляції обмотки трансформатора, зменшуючи тривалість роботи трансформатора. Тому важливо мати змогу прогнозувати температуру обмотки трансформатора за різних стрибків навантаження та здійснювати оцінку того, як кожний процес перегріву вплине на тривалість роботи трансформатора.

В роботі [9] запропонована математична модель, застосування якої дозволяє опосередковано визначати температуру, що впливає на стан ізоляції обмоток силового трансформатора в умовах дії на них короткочасних та довготривалих стрибків навантаження.

Суть цієї математичної моделі полягає в тому, що фіксується кожний короткий стрибок навантаження, яке перераховується в кількість тепла, що виділяється в обмотках у разі протікання струму певного значення по них, внаслідок чого відбувається підвищення температури обмоток трансформатора (із запізненням, зумовленим інерційним процесом теплопередачі).

Формула для обчислення температури впливу на обмотки має вигляд

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

де x — відстань від середини шару провідників до точки досліджуваної температури, м; T_M — температура трансформаторного масла, °С; q_v — об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти, Вт/м³; λ — еквівалентна теплопровідність матеріалу, Вт/(м·°С); δ — товщина половини пластини провідника, м; α — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м·°С).

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

Для визначення температури стінки провідника обмотки обчислюється q_v , Вт/м³ за формулою

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

де Q_v — тепловиділення у провіднику довжиною один метр, Вт; V — об'єм провідника, м³.

Тепловиділення у провіднику довжиною один метр визначається за формулою

$$Q_v = I^2 \cdot R_{ал}, \quad (3)$$

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

Згідно з [9] коефіцієнт тепловіддачі 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 прийнято як закон старіння ізоляції, витрати робочого ресурсу ізоляції визначаються за формулою

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

де τ_T — строк служби ізоляції в режимі роботи, який викликаний перегрівом ізоляції ΔT ; τ_0 — строк служби ізоляції при нагріві ізоляції, який відповідає номінальному режиму роботи трансформатора; a — коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу ізоляції.

Перегрів ΔT визначається за таким виразом:

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

де T_n — температура нагріву ізоляції за номінального режиму роботи трансформатора (°C); T_x — фактична температура нагріву ізоляції (°C).

Застосуємо вказану математичну модель для реалізації засобу оцінки технічного стану обмоток силового масляного трансформатора за температурним старінням. Суть якого полягає в тому, щоб вимірювати або отримувати через блок узгодження температуру за кожну секунду, за умови, що температура обмотки буде більша за нормальне значення і кожне значення вимірної температури підставляти у формулу (3) для отримання еквівалентного старіння в інтервалі в 1 секунду. Тобто, у разі перевищення температури визначати ціну секунди перегріву у порівнянні з секундою за нормальної роботи. Далі потрібно опрацювати всі значення вимірювань і поінформувати оперативний персонал.

Метою роботи є створення засобу оцінки технічного стану обмоток силового масляного трансформатора за температурним старінням з використанням сучасної промислової елементної бази і, як наслідок, підвищення надійності експлуатації силових трансформаторів.

Результати дослідження

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

Враховуючи вищезгадані твердження та сучасні технології створення технічних засобів, здійснено реалізацію засобу для оцінки технічного стану ізоляції обмоток силового трансформатора на базі мікроконтролера типу STM32F723ZET6, використання якого є прийнятним для побудови подібних пристроїв.

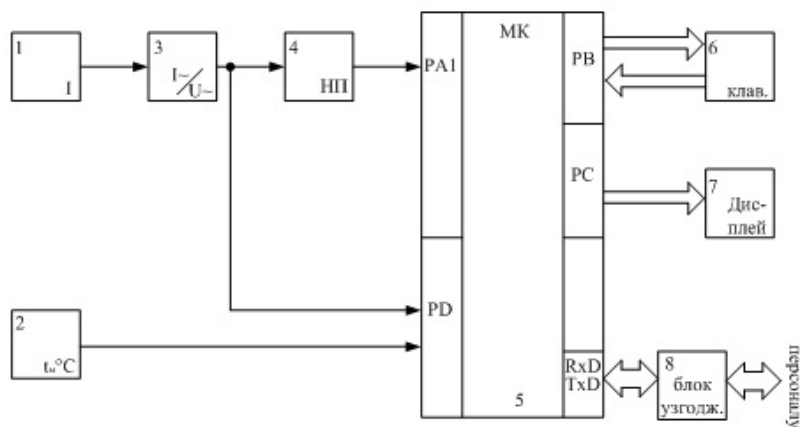


Рис. 1. Структура мікропроцесорного пристрою для оцінки ступеня теплового старіння обмоток силового масляного трансформатора

На рис. 1 показана структурна схема пристрою, на якій введено такі позначення: 1 — сенсор струму трансформатора; 2 — сенсор температури масла трансформатора; 3 — перетворювач змінного струму в змінну напругу; 4 — нормуючий перетворювач; 5 — мікроконтролер; 6 — клавіатура; 7 — дисплей; 8 — блок узгодження сигналів для передачі інформації в систему моніторингу електрообладнання.

Структура пристрою є традиційною. Зазначимо лише, що

в пристрої реалізовано циклічне опитування сенсорів 1 і 2 та обчислення залишкового ресурсу ізоляції обмоток масляного трансформатора по запрограмованій вищезгаданій математичній моделі. Дисплей та клавіатура використовуються як допоміжні засоби, необхідні для введення початкових параметрів. Також на дисплеї відображається поточне значення залишкового ресурсу. Блок узгодження сигналів 8 забезпечує передачу даних з мікроконтролера 5 в систему збору даних та відображення інформації оперативному персоналу.

Зупинимось детальніше на алгоритмі роботи пристрою для оцінки ступеня теплового старіння обмоток силового масляного трансформатора, зображеному на рис. 2.

У блоках 1—5 здійснюється ініціювання пристрою, введення сталих та поточних даних режиму роботи — номінального струму, геометричних розмірів витка обмотки, перерізу витка, матеріалу витка, товщини ізоляції, класу ізоляції, кількості витків, часу інформування, відповідно до якого пристрій сповістить оперативний персонал про оцінку наближення до вичерпання ресурсу ізоляції. Здійснюється також розрахунок констант, необхідних для використання математичної моделі згідно з [10]. Так, в блоці 4 проводиться розрахунок еквівалентної теплопровідності матеріалу одного шару провідників висотою в один провідник. Сюди входить матеріал провідників, ізоляція провідників і масляні канали між провідниками. Також в блоці 4 розраховується товщина пластини магнітопроводу, об'єм одного метра одного шару витків обмотки силового масляного трансформатора, термічний опір шару провідників і число Прандтля.

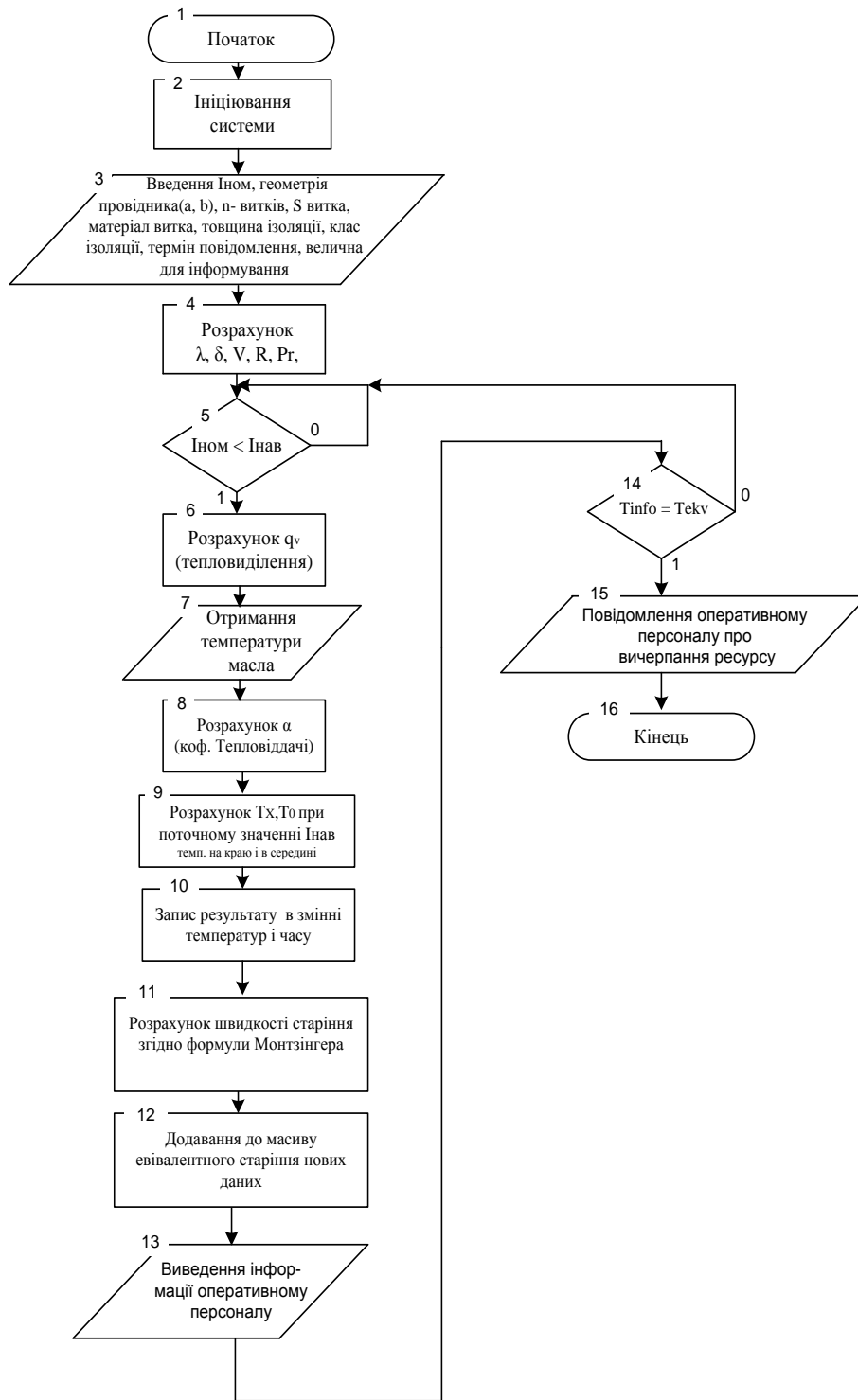


Рис. 2. Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для оцінки ступеня теплового старіння обмоток силового масляного трансформатора

Еквівалентна теплопровідність всіх елементів в шарі провідника знаходиться за формулою згідно з [10]

$$\lambda = \frac{\delta_{\text{в}}}{R_T}, \quad (6)$$

де $\delta_{\text{в}}$ — товщина всього шару матеріалу з урахуванням товщини металу, ізоляції і масляних каналів, м; R_T — термічний опір, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Товщина половини пластини магнітопроводу визначається згідно з [10] за виразом

$$\delta = 2 \cdot AB + 2\delta_{i3} + 1,5\delta_m, \quad (7)$$

де AB — ширина провідника, м; δ_{i3} — товщина ізоляції на одному провіднику, м; δ_m — товщина масляного каналу між провідниками, м.

Об'єм метала провідника визначимо за формулою

$$V = l_{пр} \cdot S_{пр}, \quad (8)$$

де $l_{пр}$ — довжина провідника, м; $S_{пр}$ — площа перерізу одного шару провідників обмотки, м².

Формула для визначення числа Прандтля для трансформаторного масла має вигляд [10]

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (9)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі поверхні провідника трансформаторному маслу, Вт/(м²·°C); ν — кінематичний коефіцієнт в'язкості трансформаторного масла, м²/с.

У блоці 5 відбувається порівняння поточного значення струму з його номінальним значенням, блок 6 — відповідає за розрахунок тепловідлення за формулою (2).

Значення поточної температури масла отримуємо з відповідного сенсора температури (блок 7 в структурі алгоритму). В блоці 8 здійснюється розрахунок коефіцієнта тепловіддачі [10].

В блоці 9 виконується розрахунок температури зовнішньої поверхні і в середині обмотки трансформатора за формулою (1).

Після виконаних розрахунків результати вносяться у масиви змінних температури в середині обмотки та часу вимірювання (блок 10). Маючи поточне значення температури в середині обмотки кожної секунди, легко, згідно з «восьмиградусним правилом» старіння ізоляції, розрахувати еквівалентний ресурс, що зменшується за кожну секунду роботи з перегрівом обмотки. Такий розрахунок виконується в блоці 11. В блоці 12 обчислюється накопичуване значення еквівалентного старіння ізоляції за формулою (3), що і характеризує процес старіння ізоляції обмоток.

Розрахована таким чином інформація щодо теплового старіння ізоляції обмоток силового трансформатора виводиться на екран пристрою та передається оперативному персоналу (блок 13). Порівняння еквівалентного значення відпрацьованого ресурсу ізоляції з введеним еталонним значенням здійснюється в блоці 14. У разі перевищення допустимої межі оперативний персонал інформується (блок 15) про можливість виникнення передаварійної ситуації у зв'язку з наближенням до вичерпання робочого ресурсу ізоляції силового трансформатора.

Зауважимо, що запропонований мікропроцесорний засіб зорієнтовано на використання сенсорів струму та температури, якими комплектуються силові трансформатори для введення їх в експлуатацію, однак є можливим застосування й інших сенсорів. Наприклад, для вимірювання температури трансформаторного масла можливе використання цифрового сенсора температури DS18B20.

Висновки

Відповідно до проаналізованих наявних методів, засобів і математичних моделей для діагностування обмоток силового масляного трансформатора за розробленою автором математичною моделлю, яка враховує короточасні та довготривалі впливи на тепловий стан обмоток силового трансформатора, запропонована мікропроцесорна реалізація пристрою для діагностування технічного стану обмоток силового масляного трансформатора з інформуванням оперативного персоналу про наближення до вичерпання їх робочого ресурсу за тепловим станом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. A. Ansari, D. Martin, and T. K. Saha, "Investigation of Distributed Moisture and Temperature Measurements in Transformers Using Fiber Optics Sensors," *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 34, no. 4, pp. 1776-1784, 2019.
- [2] S. Ghoneim, "The Degree of Polymerization in a Prediction Model of Insulating Paper and the Remaining Life of Power Transformers," *MDPI Energies*, vol. 14, no. 3, pp. 1-14, Jan. 2021.
- [3] A. M. Aciu, C. I. Nicola, Marcel Nicola, and M. C. Nițu, "Complementary Analysis for DGA Based on Duval Methods and Furan Compounds Using Artificial Neural Networks," *MDPI Energies* 2021, vol. 14, no. 3, pp. 1-22, Jan. 2021.
- [4] D. Korenciak, M. Sebok, and M. Gutten "Thermal Measurement and its Application for Diagnostics of Distribution Oil Transformers," *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, no. 62(6), pp. 583-594, 2019. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594>.
- [5] Wang Yong, et al., "High Accuracy Dielectric Loss Angle Measurement Method Based on Sampling Sequence Reconstruction [J]," *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. 33, no. 23, pp. 5607-5615, 2018.

- [6] 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.
- [7] М. П. Розводюк, В. В. Овчарук, В. С. Бомбик, і С. С. Левашов, «Пристрій для контролю технічного стану силового масляного трансформатора.» *Патент України G01R 31/62. № 135680 МПК (2020.01)*, 27.10.2020.
- [8] В. В. Грабко, В. В. Грабко, і О. В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора.» *Патент України G01R31/62. № 144739 МПК (2020)*, 26.10.2020.
- [9] 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.

Рекомендована кафедрою комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.02.2022

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

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Palaniuk¹

Microprocessor Implementation of Means for Diagnosing Winding of Power Oil Transformer

¹Vinnitsia National Technical University

Power oil transformers are an important component of the power infrastructure. Monitoring the condition of the windings of power oil transformers helps to prevent their premature failure and significant damage to the windings, the repair of which is expensive and leads to significant financial losses. Methods for periodic inspection of the state of the windings of the power transformer are not effective enough. This paper focuses on approaches to the analysis of the assessment of the insulation life of the power transformer windings. The mathematical model proposed by the author allows to estimate the state of insulation of windings of the power transformer in the conditions of short-term and long-term influences on a condition of isolation. This study is aimed at developing a microprocessor tool for diagnosing the windings of a power oil transformer by thermal aging in accordance with the proposed mathematical model. Microprocessor implementation simplifies the use of this mathematical model, as all calculations are automatic. The proposed approach does not require significant investment and meets the requirements of speed.

The developed tool can be recommended for use by power companies in diagnosing power oil transformers, which can be integrated into the monitoring system of all power equipment of the switchgear of a power plant or substation, which reduces in some way the cost of maintenance of power equipment.

Keywords: microprocessor, diagnostics, power transformer, winding, thermal aging.

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