

Przemysław GOŚCIŃSKI*, Zbigniew NADOLNY*

POMIARY WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA OLEJU MINERALNEGO STOSOWANEGO JAKO IZOLACJA TRANSFORMATORÓW W ZALEŻNOŚCI OD DŁUGOŚCI ELEMENTU GRZEJNEGO

Poprawna praca transformatora elektroenergetycznego uwarunkowana jest wieloma czynnikami. Jednym z nich jest odpowiednio niska temperatura pracy transformatora. Zbyt wysoka ma wiele negatywnych następstw, do których zaliczyć można przede wszystkim szybkie starzenie się układu izolacyjnego. Temperatura zależy od obciążenia linii przesyłowej i wymiany ciepła w transformatorze. Wymiana ciepła zależy między innymi od współczynnika przejmowania ciepła oleju, który stanowi izolację transformatora. Współczynnik ten zależy od wielu czynników, do których należy długość elementu grzejnego (uzwojeń), która może występować w szerokim zakresie wartości, od kilkunastu do kilkuset centymetrów. W artykule przedstawiono wyniki pomiaru współczynnika przejmowania ciepła w zależności od długości elementu grzejnego. Długość ta równa była 0,4; 0,8 i 1,6 m. Uzyskane wyniki posłużą konstruktorom i operatorom transformatorów elektroenergetycznych do wyznaczania temperatury, co wpłynie na bezpieczną ich pracę.

SŁOWA KLUCZOWE: współczynnik przejmowania ciepła α , transformator, pole temperaturowe, olej mineralny, długość elementu grzejnego.

1. WPROWADZENIE

Ciecze elektroizolacyjne są nieodzowną częścią transformatora energetycznego wysokiego napięcia. Wraz z elementami celulozowymi, takimi jak papier transformatorowy, przegrody preszpanowe oraz przekładki izolacyjne, stanowią układ izolacyjny transformatora. Głównymi zadaniami cieczy, stosowanych w transformatorach, są zapewnienie odpowiedniego poziomu izolacji elektrycznej oraz odprowadzenie ciepła będącego skutkiem strat w uzwojeniach i w rdzeniu. Ponadto, ciecze elektroizolacyjne stanowią barierę przed przedostawaniem się wilgoci i powietrza, oraz ograniczają intensywność wyładowań niezupełnych. Wskutek impregnacji materiałów celulozowych cieczami elektroizolacyjnymi poprawiają one ich wytrzymałość elektryczną [1-3].

* Politechnika Poznańska

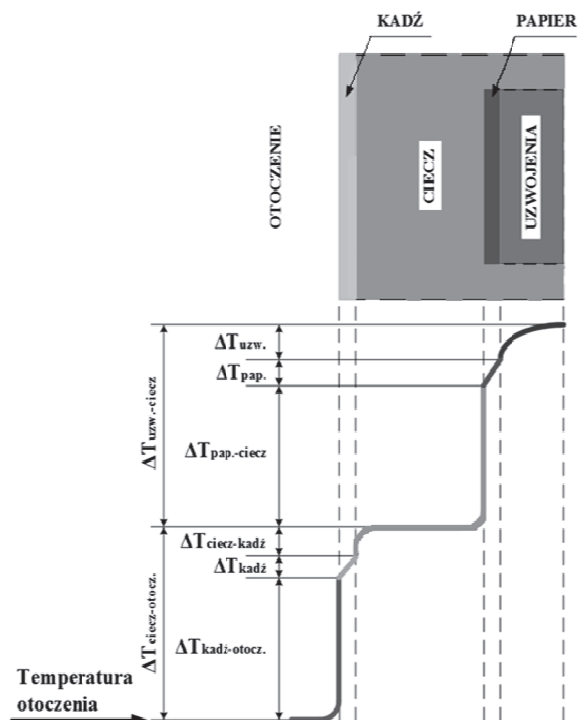
Najchętniej stosowaną cieczą elektroizolacyjną w transformatorach jest obecnie olej mineralny. Główną przyczyną jest to, że na przestrzeni ostatniego stulecia znacząco udoskonalono proces jego produkcji, który jest produktem destylacji ropy naftowej. Wskutek tego olej mineralny jest nadal najtańszą i najczęściej stosowaną cieczą elektroizolacyjną w transformatorach. Należy również dodać, że właściwości materiałowe oleju zostały bardzo dobrze rozpoznane, co daje możliwość zaprojektowania i zbudowania transformatorów cechujących się pożądanymi właściwościami konstrukcyjnymi i eksploatacyjnymi. Niestety, restrykcyjne regulacje przeciwpożarowe, oraz odnoszące się do środowiska naturalnego, dotyczące np. biodegradowalności, sprawiły, że producenci transformatorów energetycznych poszukują alternatywnych dla oleju cieczy elektroizolacyjnych [4, 5].

Najważniejszymi właściwościami cieplnymi cieczy są lepkość kinematyczna ν , przewodność cieplną λ , gęstość ρ , ciepło właściwe c_p oraz rozszerzalność cieplna β . Wzrost współczynnika przewodności cieplnej λ , gęstości ρ , ciepła właściwego c_p oraz rozszerzalności β pociąga za sobą wzrost zdolności cieczy do chłodzenia. Natomiast wzrost lepkości ν skutkuje obniżeniem jej zdolności do transportu ciepła. Opisane właściwości mają wpływ na współczynnik przejmowania ciepła α , a co za tym idzie na wartość spadku temperatury między poszczególnymi elementami transformatora [6].

Temperatura uzwojeń oraz układu izolacyjnego są kluczowymi parametrami determinującymi czas technicznego życia urządzenia elektroenergetycznego. Podwyższona ma wiele negatywnych następstw, do których zalicza się spadek napięcia przebicia, spadek rezystancji, rozpad łańcuchów celulozy, wzrost współczynnika strat dielektrycznych, zagrożenie pożarowe, wzrost ciśnienia w kadzi, lub spadek żywotności izolacji transformatora wg prawa 8-miu stopni Montsingera. Zatem ważne jest poznanie zjawisk fizycznych, od których zależy transport ciepła w transformatorze [7, 8].

Wymiana ciepła w transformatorze odbywa się na drodze: źródło ciepła \rightarrow papier zaimpregnowany cieczą elektroizolacyjną \rightarrow ciecz elektroizolacyjna \rightarrow metalowa obudowa \rightarrow powietrze, co przedstawiono na rysunku 1. Ciecz elektroizolacyjna nasycza izolację stałą wnikając w jej strukturę oraz wypełnia wnętrze transformatora. Zatem odpowiada ona za transport ciepła. Transport ten zależy od dwóch zjawisk. Pierwsze związane jest z przewodzeniem ciepła przez papier zaimpregnowany cieczą, drugie z kolei z przejmowaniem ciepła przez ciecz [6].

Przewodzenie ciepła przez papier powiązane jest z współczynnikiem przewodności cieplnej właściwej λ papieru. Natomiast przejmowanie ciepła przez ciecz obejmuje wiele właściwości, jak przewodność cieplną λ cieczy, lepkość ν , gęstość ρ , ciepło właściwe c_p oraz rozszerzalność cieplną β . Parametrem łączącym wszystkie te właściwości cieplne cieczy jest jej współczynnik przejmowania ciepła α .



Rys. 1. Rozkład temperatury w transformatorze olejowym [7, 8]

Na podstawie rysunku 1 można stwierdzić, że całkowity spadek temperatury w transformatorze między źródłem ciepła a otoczeniem składa się z spadku temperatury między uzwojeniem a cieczą elektroizolacyjną $\Delta T_{uzw-ciecz}$ oraz spadku pomiędzy cieczą a otoczeniem $\Delta T_{ciecz-otocz}$. Spadek temperatury między uzwojeniem a cieczą składa się ze spadku w izolacji papierowej ΔT_{pap} oraz spadku między izolacją papierową a cieczą $\Delta T_{pap-ciecz}$. Natomiast spadek temperatury między cieczą a otoczeniem składa się ze spadku temperatury między cieczą a kadzią $\Delta T_{ciecz-kadź}$, spadku w kadzi $\Delta T_{kadź}$ oraz spadku pomiędzy kadzią a otoczeniem $\Delta T_{kadź-otocz}$.

Jak zatem widać, spadek temperatury w cieczy elektroizolacyjnej ma istotny wpływ na całkowity spadek temperatury w transformatorze. Wyznacza się go z poniższej zależności:

$$\Delta T_{ciecz} = \frac{p}{\alpha} \quad (1)$$

gdzie: ΔT_{ciecz} - spadek temperatury w cieczy elektroizolacyjnej, w K, p - powierzchniowe obciążenie cieplne, w $W \cdot m^{-2}$, α - współczynnik przejmowania ciepła cieczy, w $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Z kolei współczynnik α wyraża się następującą zależnością:

$$\alpha = c \cdot \lambda^{1-n} \cdot g^n \cdot \delta^{3n-1} \cdot \beta^n \cdot \Delta T^n \cdot \rho^n \cdot c_p^n \cdot \nu^{-n} \quad (2)$$

gdzie: c - stała zależna od rodzaju przyjmowania ciepła (laminarny, turbulentny), $\delta_{char.}$ - wymiar charakterystyczny (długość elementu grzejnego), w m, g - przyspieszenie ziemskie, w $m \cdot s^{-2}$, n - stała zależna od rodzaju przyjmowania ciepła.

Narzędziem służącym do analizy rozkładu temperatury w transformatorze jest symulacja komputerowa. Obecnie popularnym podejściem jest przeprowadzanie symulacji na modelu trójwymiarowym. W okresie ostatnich kilku lat nastąpił rozwój programów, które są stosowane do symulacji rozkładu temperatury w transformatorze (ANSYS Fluent, SOLIDWORKS Flow Simulation, COMSOL Multiphysic) [9].

Obecnie w biurach konstrukcyjnych w trakcie przeprowadzania symulacji komputerowej rozkładu temperatury stosuje się procedurę, posługując się zależnościami (1) i (2). We wzorze (1) zakłada się, że współczynnik przyjmowania ciepła α oleju ma stałą wartość. Ponieważ jednak współczynnik α zależy między innymi od długości elementu grzejnego $\delta_{char.}$ (patrz zależność (2)), takie założenie może skutkować błędnym wyznaczeniem rozkładu temperatury.

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Jak wspomniano we wcześniejszym rozdziale, współczynnik przyjmowania ciepła α oleju mineralnego zależy od długości elementu grzejnego $\delta_{char.}$, co nie jest uwzględniane w symulacji komputerowej rozkładu pola temperatury w transformatorze. Wynikiem tego może być błędne wyznaczenie rozkładu temperatury, a tym samym znaczące skrócenie żywotności transformatora. Z tego powodu autorzy podjęli się zadania wyznaczenia współczynnika przyjmowania ciepła α oleju mineralnego w zależności od parametru $\delta_{char.}$

Długość elementu grzejnego równa była 0,4; 0,8 i 1,6 m. Jest to typowy przedział długości stosowany w dzisiejszych konstrukcjach transformatorów. Powierzchniowe obciążenie cieplne p wynosiło $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, co odpowiada najwyższemu obciążeniu stosowanemu w transformatorach. Układ pomiarowy do wyznaczenia współczynnika α przedstawiono na rysunku 2 i został on szczegółowo opisany w publikacji [10].

3. WYNIKI POMIARÓW

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika przyjmowania ciepła α w zależności od długości elementu grzejnego $\delta_{char.}$ Współczynnik α został wyznaczony według poniższego równania, które jest przekształconą formą równania (1) i procedury pomiarowej szczegółowo opisanej w publikacji [10]:

$$\alpha = \frac{P}{\Delta T_{ciecz}} \quad (3)$$



Rys. 2. Układ do wyznaczania współczynnika przyjmowania ciepła α cieczy elektroizolacyjnej [10]

Tabela 1. Współczynnik przyjmowania ciepła α oleju mineralnego w zależności od długości elementu grzejnego $\delta_{char.}$

Długość elementu grzejnego $\delta_{char.}$ [m]	Seria pomiarowa	T_{kadz} [°C]	$T_{grzałka}$ [°C]	ΔT [°C]	Średni współczynnik przyjmowania ciepła α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
0,4	1	39,7	57,5	17,8	168,49
	2	39,6	57,2	17,6	
	3	39,5	57,4	17,9	
	4	39,1	57,1	18,0	
	5	39,2	57,5	18,3	
	Średnia	39,4	57,3	17,9	
0,8	1	50,6	77,2	26,6	114,89
	2	49,6	76,1	26,5	
	3	50,7	76,5	25,8	
	4	52,0	78,3	26,3	
	5	52,5	78,5	26,0	
	Średnia	51,1	77,3	26,2	
1,6	1	80,9	110,1	29,2	104,09
	2	80,2	109,0	28,8	
	3	81,0	110,1	29,1	
	4	79,9	109,0	29,1	
	5	80,8	109,3	28,5	
	Średnia	80,6	109,5	28,9	

Na podstawie wyników pomiarów, zamieszczonych w tabeli 1, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem długości elementu grzejnego $\delta_{char.}$ współczynnik przyjmowania ciepła α oleju mineralnego maleje. Czterokrotnemu wzrostowi

wi δ_{char} . towarzyszy spadek współczynnika α o około 38%. Uzyskane wyniki są zgodne z równaniem (2). Współczynnik α zależy od długości elementu grzejnego w potęgę $3n-1$. Stała n dla przepływu laminarnego, a taki rodzaj przepływu oleju mineralnego występuje w transformatorze, równa jest 0,125. Oznacza to, że potęga wyrażenia δ_{char} równa jest -0,652. Można powiedzieć, że współczynnik α zależy w przybliżeniu od odwrotności pierwiastka z wyrażenia δ_{char} .

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika przejmowania ciepła α oleju mineralnego w zależności od długości elementu grzejnego δ_{char} . Dowiedziono, że wraz ze wzrostem długości elementu grzejnego współczynnik α maleje w sposób nieproporcjonalny, co jest zgodne z ogólnie przyjętym równaniem opisującym współczynnik przejmowania ciepła. Uzyskane wyniki dla oleju mineralnego – cieczy elektroizolacyjnej najczęściej stosowanej jako element izolacji transformatora – będą z pewnością bardzo przydatne zarówno konstruktorom jak i operatorom transformatorów elektroenergetycznych wysokiego napięcia

LITERATURA

- [1] Molenda J., Makowska M., Oleje transformatorowe, eksploatacja-diagnostyka, regeneracja, Instytut Technologii i Eksploatacji, Radom, 2010.
- [2] Flisowski Z., Technika Wysokich Napięć, WNT, Warszawa, 1998.
- [3] Gacek Z., Wysokonapięciowa technika izolacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1996.
- [4] Rouse T.O., Mineral oil in transformers, „IEEE Electrical Insulation Magazine” 1998, nr 3, t. 14, s. 6-16.
- [5] CIGRE Working Group A2.35, Experiences in service with new insulating liquids, “CIGRE Brochure” 2010, nr 436, s. 6-8.
- [6] Gościński P., Dombek G., Nadolny Z., Bródka B., Analiza współczynnika przejmowania ciepła cieczy elektroizolacyjnych wykorzystywanych, jako izolacja w urządzeniach elektroenergetycznych, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, vol. 82, pp. 219-226, 2015.
- [7] Jezierski E., Transformatory. Podstawy teoretyczne, Wydanie III, WNT, Warszawa, 1965.
- [8] Jezierski E., Transformatory, WNT, Warszawa, 1983.
- [9] Gościński P., Dombek G., Nadolny Z., Bródka B., Matematyczne modelowanie pola temperaturowego transformatora energetycznego, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, vol. 85, pp. 323-332, 2016.
- [10] Gościński P., Dombek G., Nadolny Z., Autorski układ do pomiaru współczynnika przejmowania ciepła cieczy elektroizolacyjnych, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, vol. 90, pp. 11-19, 2017.

**MEASUREMENT OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF MINERAL OIL,
USED AS TRANSFORMER INSULATION, AS A FUNCTION OF LENGTH
OF HEAT ELEMENT**

This paper presents results of measurement of heat transfer coefficient of mineral oil as a function of heat element length. The length was 0.4, 0.8 and 1.6 m. Obtained results can be used by designer and operators of transformers to estimate temperature distribution, what makes the work of transformer more safe.

(Received: 29.01.2018, revised: 02.03.2018)

