

Bolesław BRÓDKA<sup>\*/\*\*</sup>  
Jacek SAPAŁA<sup>\*</sup>  
Radosław ŁOPATKIEWICZ<sup>\*\*</sup>

## **OBLICZANIE WYDAJNOŚCI UKŁADU CHŁODZENIA ON-AN TRANSFORMATORA ENERGETYCZNEGO ŚREDNIEJ MOCY**

W artykule zawarto wyniki wstępnych prac, mających na celu opracowanie narzędzia obliczeniowego służącego do wyznaczania wydajności układu chłodzenia transformatora energetycznego średniej mocy. Do rozważań przyjęto transformatory o naturalnym obiegu oleju i naturalnym obiegu powietrza (ON-AN). Jako przykładową jednostkę obrano transformator o mocy 10 MVA (110/15 kV) produkcji firmy Power Engineering w Czerwonaku. Wyniki obliczeń porównano z wynikami próby nagrzewania transformatora, podczas zwarcia pomiarowego, wykonanej w fabryce. Ze względu na skomplikowany kształt elementów konstrukcyjnych transformatora (kadź, radiatory, część aktywna), narzędzie obliczeniowe wykorzystuje geometrię w przestrzeni. Wymiary wszystkich elementów otrzymano od producenta transformatora. Geometrię transformatora odpowiednio uproszczono w celu ograniczenia złożoności obliczeń. Obliczenia wykonano przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics. Opracowane narzędzie obliczeniowe obejmuje jedynie zjawisko konwekcji i przejmowania ciepła z uzwojeń do oleju a następnie z oleju do ścianek kadzi i radiatorów. Ze względu na dużą zbieżność wyników obliczeń z wynikami próby nagrzewania, narzędzie obliczeniowe będzie rozwijane i poprawiane w przyszłości. W publikacji zawarte zostały dalsze kierunki prac.

SŁOWA KLUCZOWE: transformator, radiator, układ chłodzenia ON-AN

### **1. WPROWADZENIE**

Transformatory energetyczne pracują w różnych warunkach atmosferycznych, zmiennych w ciągu roku. Zmienne jest także ich obciążenie, od biegu jałowego do przeciążenia. Jednocześnie zamawiający (eksploatatorzy w Polsce) wymagają od nich długoletniej pracy sięgającej nawet 40 i więcej lat. Okres wymaganej pracy transformatora znacząco odbiega od międzynarodowych standardów. W krajach Ameryki Północnej, dla cyklicznej zmiany obciążenia w ciągu doby, przeciętna uznawana żywotność układu izolacyjnego transformatora olejowego wynosi 20,5 roku [1]. Powodem

---

\* Politechnika Poznańska.  
\*\* Power Engineering S.A.

zwiększonych oczekiwań polskich spółek energetycznych może być doświadczenie w zarządzaniu majątkiem sieciowym mającym już niejednokrotnie trzydzieści i więcej lat. W Polsce, transformatory często pracują w układzie rezerwy jawnej lub przy średniorocznym obciążeniu 30-60%. W przeciwieństwie do krajów Ameryki Północnej, polscy operatorzy nastawieni są na długoterminne okresy zwrotu z inwestycji, zapewniając przy zakupie dostateczny zapas mocy transformatora na następne lata.

Jednym z czynników znacząco przyspieszających proces starzenia izolacji papierowo-olejowej takiego transformatora jest temperatura pracy. Normalne warunki pracy, zgodnie z PN-EN 60076-1 [2] dla transformatorów tego typu, występują przy 20°C otoczenia bez nasłonecznienia. W takich warunkach wykonywana jest próba nagrzewania transformatora. W rzeczywistości transformator może pracować w skrajnie odmiennych warunkach: przy temperaturze powietrza 40°C (w cieniu), wraz z nasłonecznieniem części transformatora oraz długotrwałym przeciążeniem do 120 %. Wówczas procesy starzenia układu izolacyjnego przebiegają kilkukrotnie szybciej.

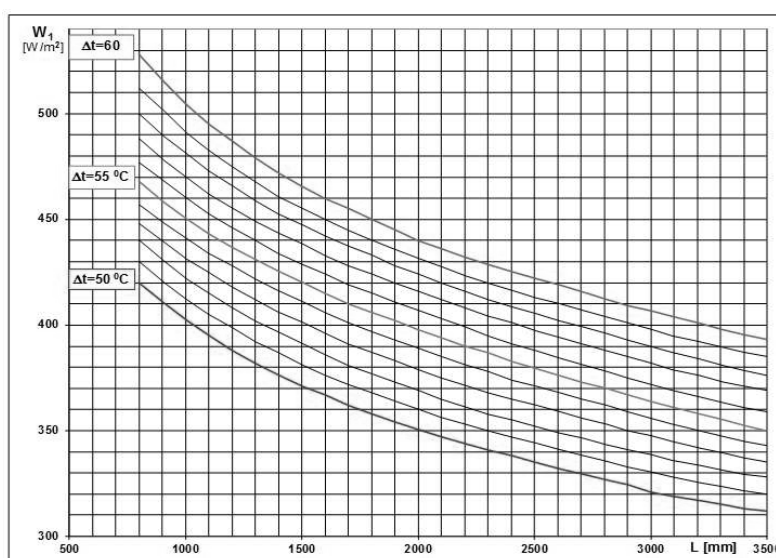
Zespół projektowy transformatorów musi przewidzieć różne warunki pracy transformatora oraz wypracować taką konstrukcję, która spełni wszystkie wymagania klienta i obowiązujących norm. Obecnie okres projektowania transformatorów w zakresie mocy od 10 do 40 MVA wynosi od miesiąca do dwóch miesięcy. Niejednokrotnie rozpoczęcie produkcji następuje już po pierwszych dwóch tygodniach od rozpoczęcia prac projektowych. W tym czasie należy wykonać wiele obliczeń oraz pełną dokumentację rysunkową większości elementów. Niezbędna jest zatem szybka i prosta metoda wyznaczania przyrostów temperatury w transformatorze.

## 2. UPROSZCZONE METODY OBLICZENIOWE

Ze względu na łatwość i szybkość wykonywania obliczeń, bardzo często wykorzystuje się uproszczoną metodę wyznaczania wydajności cieplnej układu chłodzenia transformatora energetycznego. W przypadku gdy transformator wyposażony jest w radiatory nadbudowane na kadzi, wydajność cieplną takiego układu chłodzenia wyznacza się w oparciu o powierzchnię żeber radiatorów oraz boków kadzi i płyty pokrywy. Wydajność cieplną powierzchni radiatorów odczytuje się z wykresu (rys. 1) jaki dostarcza producent radiatora. Następnie wydatek cieplny, wynikający z powierzchni, koryguje się o kilka współczynników empirycznych zależnych między innymi od: liczby żeber, odległości pomiędzy sąsiednimi radiatorami oraz różnicy poziomu środka radiatora względem poziomu środka uzwojenia.

Wadą tej metody jest duża rozbieżność wyniku próby nagrzewania od wartości temperatury obliczonej. Wartość temperatury oleju w górnej warstwie

może różnić się nawet o 10°C. Skutkiem powyższej różnicy jest przeliczanie wydajności układu chłodzenia dla przyrostu temperatury oleju wynoszącej 50°C a nie tak jak to wymaga norma 60°C. Efektem tego typu uproszczenia może być przewymiarowanie radiatorów. W przypadku gdy próba nagrzewania nie będzie pozytywna, producent jest zmuszony do zamiany radiatorów na większe, co generuje zwiększone koszty oraz może powodować opóźnienia w terminie dostawy produkowanej jednostki.

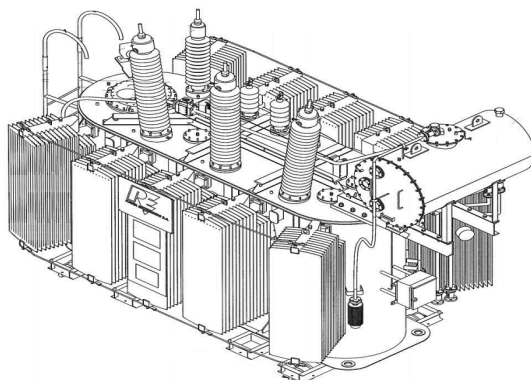


Rys. 1. Krzywe wydajności cieplnej powierzchni radiatora typu FG w zależności od długości żebra oraz przyrostu temperatury oleju w górnej warstwie transformatora względem powietrza [3]

### 3. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań był transformator energetyczny TORc 10000/110 o mocy 10 MVA produkcji Power Engineering S.A. w Czerwonaku. Rzut aksonometryczny gabarytu transformatora przedstawiono na rysunku 2. Transformatory tego typu produkowane są głównie dla spółek dystrybucyjnych i montowane są w głównych punktach zasilania. Podstawowe parametry znamionowe omawianego transformatora są następujące:

- napięcie znamionowe 115/16,5 kV,
- napięcie zwarcia 10,14 %,
- straty biegu jałowego 6,7 kW,
- straty obciążeniowe na zaczeple znamionowym 56,9 kW,
- straty obciążeniowe na zaczeple skrajnym ujemnym 76,8 kW.



Rys. 2. Widok transformatora TORc 10000/110

Analizowany transformator został wytypowany do obliczeń ze względu na największą symetrię rozmieszczenia radiatorów wśród jednostek produkowanych w firmie Power Engineering S.A. Ponadto jednostka ta produkowana była w latach 2012-2014 i dostępna była do niej pełna dokumentacja rysunkowa i wyniki prób. Podczas projektowania układu chłodzenia powyższego transformatora, liczbę i wielkość radiatorów dobrano przy pomocy metody uproszczonej. Do obliczeń wydajności układu chłodzenia przyjęto temperaturę, w górnej warstwie oleju, równą 50°C.

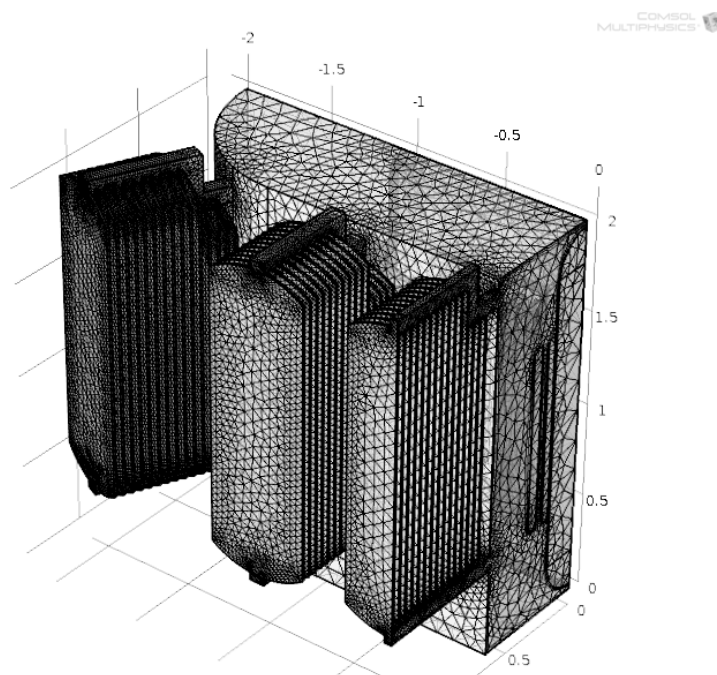
#### 4. NARZĘDZIE OBLICZENIOWE

Na podstawie geometrii transformatora TORc 10000/110 opracowany został uproszczony trójwymiarowy model ćwiartki transformatora. Uproszczenie polegało na przedstawieniu uzwojeń pod postacią rury, rdzenia jako walec oraz radiatorów z żebrami bez przetłoczeń. W modelu pominięto także przyrosty temperatury w blasze kadzi oraz radiatorów. Geometrii rdzenia przypisano straty jałowe, natomiast geometrii uzwojeń przypisano straty obciążeniowe na skrajnym ujemnym zaczeple. Otoczenie transformatora zamodelowano jako powietrze o stałej temperaturze 20°C.

Obliczenia wykonano przy użyciu metody elementów skończonych. W obliczeniach założono nieliniowe zależności zmiany parametrów oleju od temperatury (ciepło właściwe, gęstość, przewodność cieplna). Wartości poszczególnych parametrów oleju zaczerpnięto z przewodnika CIGRE [4].

Do obliczeń użyto oprogramowanie Comsol Multiphysics wyposażone w moduł Heat Transfer zawierający w sobie opis zjawisk fizycznych wymiany ciepła i przepływu płynów. Obliczenia wykonano dla czasu od 0 sekund do 15 godzin z automatycznym zapisem i krokiem co 600 s. Dla czasu 0 s temperatura transformatora odpowiadała temperaturze otoczenia.

Wyniki obliczeń wykonano przy różnej wielkości siatki dyskretnej, jednak wyniki zaprezentowano dla przypadku o najgęstszej użytej siatce (318 tys. czworościanów). Widok siatki przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Widok geometrii transformatora użytej do obliczeń wraz z siatką elementów skończonych

## 5. WYNIKI OBLICZEŃ

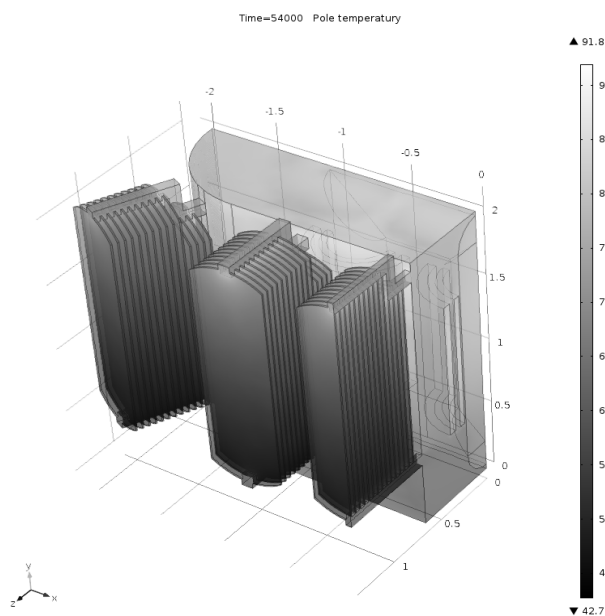
Wynikiem obliczeń było otrzymanie rozkładu pola temperatury transformatora dla różnych chwil czasu nagrzewania. Otrzymano także zależność temperatury w funkcji wysokości kadzi transformatora oraz w funkcji wysokości żebra radiatora. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie przyrostów temperatury oleju w trzech punktach transformatora: pod pokrywą, w kolektorze dolnym i kolektorze górnym radiatora. Tabela zawiera porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów otrzymanymi podczas próby nagrzewania transformatora.

Ze względu na oddawanie energii cieplnej przez płytę pokrywy, temperatura tuż pod samą płytą pokrywy obniża się o kilka stopni Celsjusza. W transformatorze, czujnik temperatury montowany jest w specjalnej kieszeni, na głębokości około 15 cm. Obliczenia wykazały podobną zmianę temperatury pod pokrywą. Dlatego w tabeli zamieszczono maksymalny przyrost temperatury (na głębokości około 10 cm od pokrywy).

Tabela 1. Wartości przyrostów temperatury obliczonej i zmierzonej w różnych punktach transformatora

Lp.	Punkt	Wartość zmierzona	Wartość obliczona
		°C	°C
1.	Przyrost temperatury pod pokrywą	59,3	60
2.	Przyrost temperatury w dolnym kolektorze	34,2	32
3.	Przyrost temperatury w górnym kolektorze	59,8	58

Widok pola temperatury po 15 godzinach nagrzewania przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Pole temperatury transformatora po 15 godzinach nagrzewania

## 6. WNIOSKI

Wyniki obliczeń przyrostów temperatury transformatora w charakterystycznych punktach nie odbiegają znacząco od wyników otrzymanych podczas próby nagrzewania. Dla trzech analizowanych punktów maksymalna różnica wynosi jedynie 2,2°C.

Opracowane narzędzie obliczeniowe, w porównaniu z metodą uproszczoną, daje znacząco mniejsze różnice pomiędzy wynikami obliczeń a wynikami próby nagrzewania. W przypadku metody uproszczonej, dla analizowanej konstrukcji transformatora, otrzymano różnicę 9,3°C.

Zaprezentowane narzędzie obliczeniowe zawiera kilka wad. Jedną z najważniejszych to odbiegający od rzeczywistości układ obiegu oleju w uzwojeniach. Przyrost temperatury w uzwojeniach znacząco odbiega od danych literaturowych. Układ izolacyjny transformatora jest znacząco rozbudowany poprzez zastosowanie szeregu tulei, klinów, przekładek między cewkowymi oraz pierścieni kątowych. Aktualnie zaprezentowane narzędzie obliczeniowe nie nadaje się do analizy przyrostów temperatury w uzwojeniach.

W celu łatwego wykorzystania opisanego oprogramowania w przyszłości do obliczeń przyrostów temperatury na nowo projektowanych jednostkach, wymagane będzie powiązanie geometrii modelu z dokumentacją wykonawczą transformatora.

Planowane są już kolejne obliczenia dla pozostałych jednostek produkowanych w Power Engineering S.A. Jednostki brane pod uwagę będą miały różną moc i różną geometrię uzwojeń. Być może w przyszłości, przy wykorzystaniu omawianego narzędzia obliczeniowego, będzie można analizować wpływ zmiany konstrukcji transformatora na zmianę przyrostu temperatury w produkowanych jednostkach. Podobne prace rozwojowe są już opisywane w literaturze [5].

## LITERATURA

- [1] IEEE Std C57.91™-2011, IEEE Guide for Loading MineralOil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators.
- [2] PN-EN 60076-1:2014, Transformatory -- Część 1: Wymagania ogólne.
- [3] Katalog radiatorów produkcji Power Engineering S.A.
- [4] CIGRE brochure, Experiences in Service with New Insulating Liquids, October 2010, no.436, WG A2-35.
- [5] Johnson D, Simulation Enables the Next generation Of power Transformers And shunt Reactors, IEEE Spectrum, vol 51, is. 5, pp. S6-S8 (May 2014).

## CALCULATION OF EFFICIENCY OF ON-AN COOLING SYSTEM ON MID POWER TRANSFORMER

Results of preliminary calculation efficiency of ON-AN transformer cooling system are shown in the article. The results are shown for transformer 10 MVA. The transformer was produced in Power Engineering in Czerwonak. The results was compared with results of temperature-rise type test made in factory. Calculation was made as 3D model. All geometrical parameters was obtained from manufacturer of transformer. Geometry of transformer was simplified to made calculation less complex. Software COMSOL Multiphysics was used for the calculation. Convection and heat transfer from windings to oil and from oil to walls of radiators was only used in this calculations. In view of large convergence of calculation results and temperature-rise type test results the calculation tool will revise and expand.