

Obliczenia numeryczne rozkładu temperatury w transformatorze dystrybucyjnym

Streszczenie. W artykule przedstawiono porównanie wyników symulacji komputerowej i wyników pomiarów z próby nagrzewania transformatora dystrybucyjnego o mocy 10 MVA wypełnionego nowym olejem mineralnym. Następnie autorzy artykułu postanowili przeprowadzić symulację komputerową w celu porównania pola temperaturowego transformatora energetycznego wypełnionego nowym olejem mineralnym z polem temperaturowym transformatora tej samej mocy wypełnionego estrem syntetycznym.

Abstract. This article presents comparison between results of computer simulation and results of heat run test for 10 MVA power transformer which was filled with a new mineral oil. Later the authors of article decided to carry out computer simulation, in order to compare the temperature field of 10 MVA power transformers which were filled a new mineral oil and a new synthetic ester. (**Numerical calculations of temperature field of power transformer**).

Słowa kluczowe: transformator dystrybucyjny, olej mineralny, ester syntetyczny, COMSOL Multiphysics.

Keywords: power transformer, mineral oil, synthetic ester, COMSOL Multiphysics.

Wprowadzenie

Transformator dystrybucyjny pełni kluczową rolę w systemie elektroenergetycznym. Od jego prawidłowego funkcjonowania zależy między innymi praca linii przesyłowych oraz innych urządzeń energetycznych. Głównym zadaniem transformatora jest zmiana i regulacja parametrów energii. W związku z tym prawidłowe jego zaprojektowanie i wykonanie, zarówno od strony mechanicznej, jak i cieplnej, jest bardzo istotne [1,2].

Zespół projektantów na etapie projektowania transformatora musi zwrócić uwagę na szereg czynników, które mogą mieć istotny wpływ na prawidłowe jego funkcjonowanie w systemie elektroenergetycznym. Do tych czynników zalicza się przede wszystkim temperaturę uzwojeń oraz układu izolacyjnego. W głównej mierze to temperatura ma znaczący wpływ na długość eksploatacji urządzenia elektroenergetycznego. Z tego powodu istotne jest, aby ciecze elektroizolacyjne wraz z materiałami celulozowymi, z którymi tworzą układ izolacyjny będący integralną częścią transformatora, charakteryzowały się jak najlepszymi właściwościami elektrycznymi i termicznymi [3,4].

Obecnie najczęściej stosowaną cieczą elektroizolacyjną w transformatorach dystrybucyjnych jest olej mineralny. Powszechność stosowania oleju mineralnego wynika z jego wielu pozytywnych właściwości oraz ich bardzo dobrego rozpoznania na przestrzeni wielu lat. Jednakże mimo to wciąż poszukiwane są alternatywne dla oleju mineralnego ciecze elektroizolacyjne. Spowodowane jest to przede wszystkim coraz bardziej restrykcyjnymi przepisami dotyczącymi ochrony środowiska naturalnego oraz bezpieczeństwa pożarowego.

Spośród dostępnych na rynku cieczy elektroizolacyjnych producenci transformatorów, jako alternatywę dla oleju mineralnego, upatrują estry syntetyczne oraz naturalne. Ostatnimi laty obserwowalny jest duży wzrost zainteresowania tymi cieczami [5,6]. W celu określenia skutków zamiany stosowanego dotąd w transformatorach oleju mineralnego na estry należałoby na wstępie przeprowadzić symulację komputerową np. pola temperaturowego. W tym celu wykorzystuje się różnego rodzaju programy komputerowe, które wspomagają proces projektowania oraz pozwalają w szybki i łatwy sposób zmodyfikować konstrukcję urządzenia w zależności od uzyskanych wyników.

W artykule przedstawiona została analiza porównawcza pola temperaturowego transformatorów dystrybucyjnych wypełnionych nowym olejem mineralnym oraz nowym

estrem syntetycznym. Analizę tę przeprowadzono w oparciu o wyniki symulacji komputerowej pola temperaturowego transformatora dystrybucyjnego o mocy 10 MVA, przy wykorzystaniu programu COMSOL Multiphysics. Otrzymane wyniki zestawiono z wynikami próby nagrzewania rzeczywistej jednostki o tej samej mocy wypełnionej olejem mineralnym.

Metody obliczeniowe

W niniejszym rozdziale opisano dziedzinę obliczeniową mechaniki płynów CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*), scharakteryzowano metodę elementów skończonych FEM (ang. *Finite Element Method*) oraz opisano narzędzie pracy, w którym wykonano symulację komputerową rozkładu pola temperaturowego transformatora dystrybucyjnego.

Obliczeniowa mechanika płynów CFD wykorzystuje algorytmy oraz metody numeryczne do rozwiązywania zagadnień przepływów płynów, umożliwiając przy tym wyznaczenie rozkładu prędkości, temperatury i ciśnienia w płynie. Programy CFD pozwalają użytkownikom uwzględnić właściwości płynów newtonowskich oraz nienewtonowskich. Obliczeniowa mechanika płynów znalazła zastosowanie między innymi do analizowania przepływów powietrza wokół samolotów i samochodów, układów chłodzenia w transformatorach dystrybucyjnych, nagrzewania urządzeń oraz wielu innych [7].

Programy CFD bazują na równaniach Naviera-Stokesa, które opisują zasadę zachowania pędu, masy oraz energii w płynie. Równania te są dyskretyzowane za pomocą metody elementów skończonych, metody różnic skończonych oraz metody pojemności skończonych. Jedną z najbardziej popularnych metod jest metoda elementów skończonych [7]. Obecnie programy, w których znalazła zastosowanie metoda elementów skończonych, składają się z trzech modułów wzajemnie ze sobą współpracujących. Zalicza się do nich:

- preprocesor – służy do przygotowania geometrii obiektu, dyskretyzacji oraz do określenia warunków brzegowych,
- solver – jest modułem służącym do rozwiązania układu równań, na podstawie których program określa poszukiwane wartości wielkości fizycznych,
- postprocesor – jest modułem, który umożliwia użytkownikowi prezentację oraz interpretację uzyskanych wyników.

Symulację komputerową można przeprowadzić zarówno dla modelu dwuwymiarowego lub trójwymiarowego. Obecnie ze względu na rozwój technologii informatycznej w biurach projektowych większość przeprowadzanych symulacji odbywa się na modelach trójwymiarowych.

Na przestrzeni ostatnich lat nastąpił ogromnym rozwój programów, które wykorzystują metodę elementów skończonych, należą do nich takie programy jak: ANSYS Fluent, SOLIDWORKS Flow Simulation, COMSOL Multiphysic oraz wiele innych.

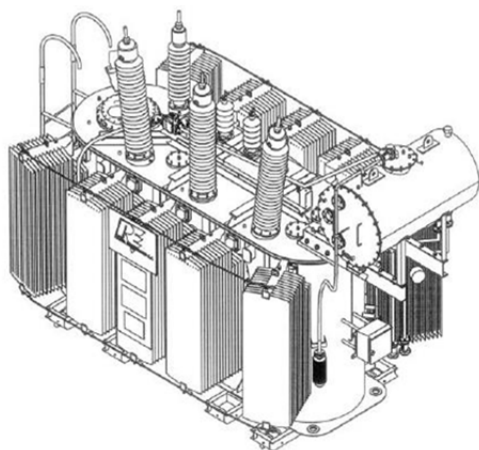
W przeprowadzonej analizie jako narzędzie pracy służące do wyznaczenia rozkładu pola temperaturowego transformatora dystrybucyjnego wybrano program COMSOL Multiphysic w wersji 4.5. Zaletą programu jest możliwość symulowania bardzo skomplikowanych zjawisk dzięki łączeniu kilku zjawisk fizycznych podczas wykonywania jednej symulacji. Program współpracuje również z programami typu CAD takimi jak Inventor, Catia lub SolidWorks, dając użytkownikowi ogromne możliwości projektowe. Ponadto posiada on wbudowaną bibliotekę przykładowych modeli.

Cel i zakres pracy

Nieustanny wzrost konkurencyjności na rynku transformatorów energetycznych wymusza na ich producentach ciągle udoskonalanie konstrukcji jednostek. Dotyczy to zwłaszcza budowy układu izolacyjnego. Autorzy artykułu w oparciu o dokumentację techniczną transformatora dystrybucyjnego o mocy 10 MVA postanowili opracować uproszczony model 3D tego transformatora. Następnie, przeprowadzono symulację komputerową pola temperaturowego, co pozwoliło na porównanie otrzymanych wyników z wynikami pomiarów uzyskanych podczas próby nagrzewania rzeczywistej jednostki. Na podstawie danych literaturowych [4,8] symulację przeprowadzono dla dwóch rodzajów cieczy elektroizolacyjnych, a mianowicie dla nowego oleju mineralnego oraz dla nowego estru syntetycznego. Otrzymane wyniki przedstawiono w kolejnych rozdziałach.

Obiekt badań

Obiektem badań był transformator dystrybucyjny o mocy 10 MVA produkowany przez firmę Power Engineering S.A z Czerwonaka. Obiekt ten został przedstawiony na rysunku 1.



Rys.1. Widok transformatora olejowego typu TORc 100000/110 o mocy 10 MVA [9]

Transformator posiada chłodzenie olejowe naturalne, części czynne transformatora chłodzone są olejem, natomiast kadz przez promieniowanie i konwekcję naturalną (ON-AN). Ponadto transformator wyposażony został w 11- stopniową regulację napięcia w górnym

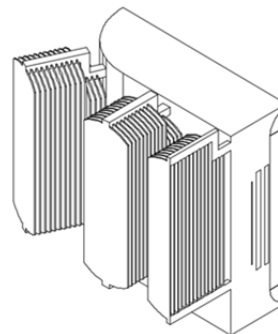
uzwojeniu w zakresie +/-16% napięcia znamionowego. Głównym elementem układu chłodzącego jest 10 radiatorów typu B-520FL. Każdy z radiatorów składa się z czterech żeber o wysokości 1,4 m oraz jedenastu żeber o wysokości 1,6 m. Radiatory zbudowane są ze zgrzewanych płyt, wytłoczonych z blachy głęboko tłoczzonej oraz przyspawanych do dwóch kolektorów, które posiadają zamknięty profil kwadratowy [9].

Przy wyborze transformatora autorzy kierowali się budową oraz liczbą radiatorów. Analizowana jednostka charakteryzuje się mało skomplikowaną budową oraz posiada najmniejszą liczbę radiatorów, co pozwala skrócić czas wykonywania obliczeń.

W trakcie próby nagrzewania do pomiaru temperatury w górnej warstwie oleju, wykorzystano sondę z czujnikiem Pt 100. Sonda pomiarowa została umieszczona 15 cm pod pokrywą. W takiej odległości od pokrywy nie obserwuje się wpływu warunków zewnętrznych na uzyskiwane wyniki pomiaru temperatury.

Model obliczeniowy

Konstrukcja transformatora energetycznego posiada wiele detali, które nie mają większego znaczenia na jego wydajność cieplną, można do nich zaliczyć między innymi: przepusty, konserwator lub szafkę sterowniczą. W związku z tym, w celu wyznaczenia pola temperaturowego transformatora dystrybucyjnego, w oparciu o dokumentację techniczną transformatora dystrybucyjnego 10 MVA, należało w pierwszym etapie przygotować uproszczoną geometrię (rys. 2).



Rys.2. Uproszczony model transformatora

Przedstawiony na rysunku 2 uproszczony model transformatora dystrybucyjnego składa się z kadzi, rdzenia, uzwojeń DN i GN, uzwojenia regulacyjnego oraz radiatorów. W celu skrócenia czasu wykonywania symulacji zrezygnowano z wytłoczeń żeber radiatorów oraz zdecydowano się na zamodelowanie tylko ćwiartki transformatora. Było to możliwe, ponieważ rzeczywista jednostka posiada symetryczny rozstaw radiatorów wzdłuż osi.

W kolejnym etapie przygotowano siatkę modelu, która ze względu na to, że warunkuje czas wykonywania obliczeń, a także wpływa na dokładność wyników, jest jedną z najistotniejszych części symulacji. Na podstawie wcześniejszego zdobytego doświadczenia zdecydowano się wykorzystać siatkę typu Normal. Siatka zbudowana była z elementów tetragonalnych oraz piramidalnych, których ilość przekraczała 13 milionów.

Do wyznaczenia pola temperaturowego transformatora dystrybucyjnego wykorzystano moduł Heat Transfer. Przy wykorzystaniu tego modułu można zasymulować wiele różnych zjawisk fizycznych. W module tym zdecydowano się wybrać komponent Conjugate Heat Transfer ze względu na jej właściwości pozwalające użytkownikowi uzależnić właściwości cieczy w zależności od temperatury.

Symulacje przeprowadzono w trybie niestacjonarnym uzależniając je w ten sposób od czasu. Zauważono, że stan ustalony podczas wykonywania symulacji osiągnięto po około 14 godzinach. Z kolei w rzeczywistej próbie nagrzewania stan ustalony osiągany jest już po 10 lub 11 godzinach. Powstałe różnice wynikają z dwóch powodów. Po pierwsze, w celu szybszego uzyskania stanu ustalonego, podczas przeprowadzania próby nagrzewania na początku podawane jest większe napięcie od znamionowego. Drugim powodem wydłużenia czasu ustalonego w symulacji komputerowej jest zastosowanie funkcji, która jest odpowiedzialna za stopniowy wzrost mocy oddawanej przez rdzeń i uzwojenia.

Dobór właściwości cieczy elektroizolacyjnych

W tabeli 1 oraz w tabeli 2 zostały przedstawione właściwości cieplne nowego oleju mineralnego oraz nowego estru syntetycznego. Analizując dane zawarte w tabeli 1 oraz 2 można zauważyć, że ester syntetyczny, w porównaniu z olejem mineralnym, charakteryzuje się znacznie większą lepkością kinematyczną i gęstością, niezależnie od temperatury. Niezależnie od temperatury lepkość kinematyczna estru syntetycznego jest około trzy razy większa od lepkości oleju mineralnego. Znaczne różnice w lepkości analizowanych cieczy elektroizolacyjnych mogą przyczynić się do pogorszenia wymiany ciepła na drodze źródła ciepła (uzwojenia) – powietrze. Może to skutkować tym, że temperatura najgorętszego miejsca (*ang. hot spot*) w transformatorze wypełnionym estrem syntetycznym będzie większa od temperatury w transformatorze wypełnionym olejem mineralnym. Analizując dane dotyczące ciepła właściwego wykorzystanych cieczy elektroizolacyjnych można zauważyć, że są one bardzo zbliżone. Estry syntetyczne charakteryzują się większą gęstością od oleju mineralnego, co może w minimalny sposób wpływać na skuteczność oddawania ciepła do otoczenia przez transformator nimi wypełniony. Porównując współczynniki przewodności cieplnej λ dla obydwu cieczy elektroizolacyjnych, zauważyć można, że ester syntetyczny niezależnie od temperatury posiada większy współczynnik przewodności cieplnej niż olej mineralny.

Tabela 1. Właściwości nowego oleju mineralnego - Nynas Nytro Taurus [4, 10]

Właściwość	Temperatura			
	25 °C	40 °C	60 °C	80 °C
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	17,08	9,59	5,37	3,43
Ciepło właściwe c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	1902	1974	2077	2187
Gęstość ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	867	857	845	832
Przewodność cieplna λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	0,133	0,13	0,128	0,126

Tabela 2. Właściwości nowego estru syntetycznego - Midel 7131 [4, 10]

Właściwość	Temperatura			
	25 °C	40 °C	60 °C	80 °C
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	55,14	28,25	14,02	8,11
Ciepło właściwe c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	1905	1964	2052	2149
Gęstość ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	964	953	940	926
Przewodność cieplna λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	0,158	0,156	0,153	0,151

Na podstawie właściwości cieplnych cieczy elektroizolacyjnych przedstawionych w tabelach 1 i 2 wyznaczono zależności opisujące zmianę poszczególnych właściwości w funkcji temperatury. Zależności te w kolejnym kroku zaimplementowano w programie symulacyjnym COMSOL.

Warunki brzegowe

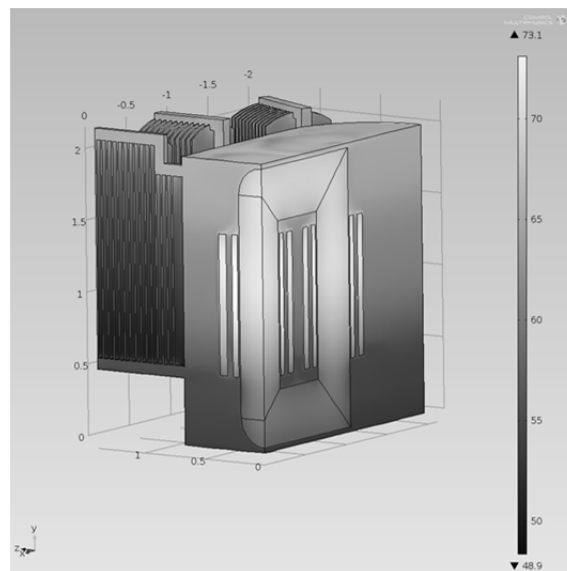
Ostatnim etapem przed wykonaniem symulacji komputerowej rozkładu pola temperaturowego

transformatora dystrybucyjnego było określenie warunków brzegowych. Jako źródło ciepła przyjęto straty w rdzeniu oraz straty w uzwojeniach wyznaczone w trakcie prób zwarciovych rzeczywistej jednostki. Wyznaczone wartości strat zaimplementowano w analizowanym modelu. Przyjęto, że temperatura początkowa T_0 wynosiła 20 °C, gdyż taką temperaturę przyjmuje się jako średnią całoroczną. Z kolei zadane ciśnienie powietrza p_0 wyniosło 1 atm [11].

Wyniki

W poniższych akapitach opisano wyniki symulacji pola temperaturowego transformatora dystrybucyjnego 10 MVA wypełnionego olejem mineralnym. Wyniki te zestawione zostały z wynikami próby nagrzewania przeprowadzonej na rzeczywistej jednostce o tej samej mocy, która również wypełniona była olejem mineralnym.

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład pola temperaturowego dla modelu transformatora dystrybucyjnego o mocy 10 MVA wypełnionego nowym olejem mineralnym. Maksymalna temperatura jaką otrzymano dla stanu ustalonego w symulacji komputerowej wyniosła 73,6 °C, a minimalna 48,9 °C. Zestawienie najważniejszych wniosków przedstawiono w tabeli 3.



Rys.3. Rozkład pola temperaturowego w modelu transformatora dystrybucyjnego 10 MVA wypełnionego nowym olejem mineralnym

Tabela 3. Przyrosty i spadki temperatury w rzeczywistym transformatorze dystrybucyjnym 10 MVA wypełnionym olejem mineralnym zmierzone podczas próby nagrzewania oraz obliczone na drodze symulacji pola temperaturowego w tej samej jednostce

	$\Delta\theta$ [°C] ¹⁾	ΔT_{rad} [°C] ²⁾
Różnice temperatury w rzeczywistym transformatorze dystrybucyjnym wypełnionym olejem mineralnym (próba nagrzewania)	59,3	26,6
Różnice temperatury w modelu transformatora dystrybucyjnego wypełnionego olejem mineralnym (symulacja)	53,6	16,1

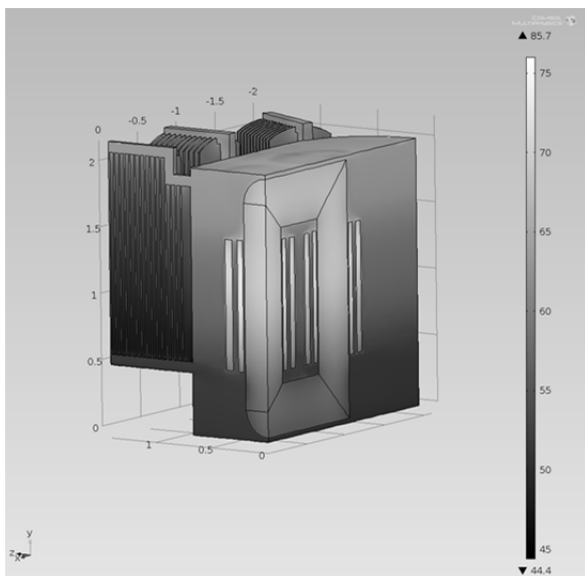
1) przyrost temperatury w górnej warstwie oleju

2) spadek temperatury na radiatorze

Analizując dane zawarte w tabeli 3 można zauważyć, że otrzymane na drodze symulacji wyniki różnią się o około 10% od wyników otrzymanych na podstawie przeprowadzonej próby cieplnej. Spowodowane jest to najprawdopodobniej tym, że w symulacji wykorzystany został uproszczony model analizowanego transformatora dystrybucyjnego. W analizowanym przypadku przyrost temperatury w górnej warstwie oleju $\Delta\theta$ rozumiany, jako

różnica między temperaturą maksymalną a temperaturą otoczenia, podczas przeprowadzonej próby cieplnej wynosił 59,3 °C, natomiast na drodze symulacji wynosił 53,6 °C. Z kolei spadek temperatury między górnym a dolnym kolektorem radiatora ΔT_{rad} wynosił w przypadku przeprowadzonej próby cieplnej 26,6 °C, natomiast na drodze symulacji 16,1 °C.

W kolejnych krokach przeprowadzono symulację rozkładu pola temperaturowego w modelu transformatora dystrybucyjnego 10 MVA wypełnionego nowym estrem syntetycznym. Uzyskany rozkład pola temperaturowego przedstawiono na rysunku 4. Analizując rysunek 4 można zauważyć, że maksymalna temperatura wyniosła 85,7 °C, natomiast minimalna temperatura na dolnym kolektorze radiatora ukształtowała się na poziomie 44,4 °C.



Rys.4. Rozkład pola temperaturowego w modelu transformatora dystrybucyjnego 10 MVA wypełnionego nowym estrem syntetycznym

W tabeli 4 przedstawiono porównanie wyników przyrostów temperatury otrzymane na drodze symulacji pola temperaturowego w modelu transformatora dystrybucyjnego 10 MVA wypełnionego olejem mineralnym i estrem syntetycznym. Jak wynika z tabeli przyrost temperatury w górnej warstwie cieczy elektroizolacyjnej $\Delta\theta$ oraz spadek temperatury na radiatorze ΔT_{rad} są większe w przypadku zastosowania estru syntetycznego jako cieczy elektroizolacyjnej. Spowodowane jest to około trzykrotnie większą lepkością kinematyczną estru syntetycznego w odniesieniu do oleju mineralnego.

Tabela 4. Przyrosty i spadki temperatury otrzymane na drodze symulacji pola temperaturowego dla transformatorów dystrybucyjnych 10 MVA wypełnionych olejem mineralnym i estrem syntetycznym

	$\Delta\theta$ [°C] ¹⁾	ΔT_{rad} [°C] ²⁾
Transformator wypełniony olejem mineralnym (model)	53,6	16,1
Transformator wypełniony estrem syntetycznym (model)	65,7	20,6

1) przyrost temperatury w górnej warstwie oleju mineralnego i estru syntetycznego
2) spadek temperatury na radiatorze

Wnioski

Po przeprowadzonej symulacji komputerowej pola temperaturowego transformatora wypełnionego nowym olejem mineralnym można dostrzec, że przyrost temperatury między górnym a dolnym kolektorem radiatora ΔT_{rad} odbiega od wyników rzeczywistych pomiarów z próby nagrzewania jednostki rzeczywistej. Powstałe rozbieżności najprawdopodobniej spowodowane są uproszczoną geometrią modelu.

W przypadku estru syntetycznego widoczny jest znaczący wzrost temperatury w transformatorze. Powodem tego jest blisko trzykrotnie większa lepkość estru syntetycznego w stosunku do oleju mineralnego. W związku z tym, w celu zastosowania estru syntetycznego jako cieczy elektroizolacyjnej, należałoby rozważyć zmianę geometrii transformatora (zwiększenie jego wymiarów), obniżenie obciążenia lub modyfikację układu chłodzenia.

Praca sfinansowana ze środków przekazanych przez MNiSzW na działalność statutową nr 04/41/DSMK/4247, nazwa zadania: „Budowa stanowiska laboratoryjnego do pomiaru współczynnika przejmowania ciepła α dla cieczy elektroizolacyjnej w zależności od różnych czynników”

Autorzy: mgr inż. Przemysław Gościński, E-mail: przemyslaw.t.goscinski@doctorate.put.poznan.pl, dr inż. Grzegorz Dombek, E-mail: grzegorz.dombek@put.poznan.pl, dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. nadzw., E-mail: zbigniew.nadolny@put.poznan.pl, dr inż. Bolesław Bródka, E-mail: boleslaw.brodka@put.poznan.pl, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

LITERATURA

- [1] Jezierski E., Transformatory. Podstawy teoretyczne, Wydanie III, WNT, Warszawa, 1965.
- [2] Jezierski E., Transformatory, WNT, Warszawa, 1983.
- [3] Bródka B., Sapała J., Łopatkiewicz R., Obliczanie wydajności układu chłodzenia ON-AN transformatora energetycznego średniej mocy, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, vol. 82, pp. 227-233, 2015.
- [4] Dombek G., Nadolny Z., Liquid kind, temperature, moisture, and ageing as an operating parameters conditioning reliability of transformer cooling system, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 18., no. 3, pp. 413-417, 2016.
- [5] 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, s. 219-226, 2015.
- [6] Brochure of CIGRE No 436, “Experiences in Service with New Insulating Liquids”, 2010.
- [7] <http://www.comsol.com/support>.
- [8] Dombek G., Nadolny Z., Przybytek P., Badanie czynników wpływających na zdolność cieczy elektroizolacyjnych do transport ciepła, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, str. 148-151, 2014.
- [9] Dokumentacja techniczna Power Engineering S.A.
- [10] Dombek G., Wpływ wybranych czynników na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych, praca doktorska, Poznań 2016.
- [11] PN-EN 60076-2:2011 - Transformatory -- Część 2: Przyrosty temperatury dla transformatorów olejowych.