

Bartłomiej Będkowski, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Jerzy Madej, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała

WYZNACZENIE ZASTĘPCZEJ REZYSTANCJI CIEPLNEJ IZOLACJI ŻŁOBKOWEJ - BADANIA I SYMULACJE

DETERMINATION OF EQUIVALENT THERMAL RESISTANCE OF SLOT INSULATION - RESEARCH AND SIMULATIONS

Streszczenie: Analizy numeryczne wykorzystujące metodę elementów skończonych wymagają prawidłowego przygotowania modelu obliczeniowego. Podobnie jest w przypadku analiz termicznych maszyn elektrycznych opartych o MES. Maszyna elektryczna składa się z wielu elementów, które mają różny stopień złożoności. Do stworzenia efektywnego modelu obliczeniowego konieczne staje się uproszczenie niektórych elementów. Z punktu widzenia metody elementów skończonych, a zwłaszcza przy analizie 3D, wskazane jest prawidłowe zamodelowanie podzespołów cienkościennych i kompozytowych, które generują większą ilość elementów skończonych. Przykładem takich części w wirującej maszynie elektrycznej jest uzwojenie i izolacja żłobkowa. W artykule przedstawiono monolityczny sposób modelowania uzwojenia oraz zastąpienie modelu izolacji żłobkowej parametrem zastępczej rezystancji cieplnej wyznaczanym na podstawie prostego doświadczenia. Dodatkowo w artykule pokazano wpływ impregnacji uzwojenia oraz grubości izolacji żłobkowej na temperaturę obwodu elektromagnetycznego.

Abstract: Numerical analysis, which uses the finite element method, requires proper preparation of computational model. In the case of thermal analysis of electrical machines based on FEM, the model preparation is also important. Electric machine consists of several elements, which have different degree of complexity. In order to create an effective computational model, it is necessary to make some simplifications. Taking the finite element method analysis into consideration, especially 3D analysis, it is desirable to create a correct model of thin and composite components, which generate considerable quantity of finite elements. Such parts in the rotating electrical machine are windings and slot insulation. The method of monolithic modeling of winding, and replacement slot insulation by the thermal resistance parameter determined on the basis of a simple experiment are presented in the article. The influence of impregnation of the winding and slot insulation thickness on the temperature of electromagnetic circuit is additionally shown in the article.

Słowa kluczowe: MES, rezystancja cieplna, izolacja żłobkowa, własności cieplne uzwojenia

Keywords: FEM, thermal resistance, slot insulation, winding thermal properties

1. Wstęp

Większość energii elektrycznej wytwarzanej obecnie na świecie przekształcana jest na energię mechaniczną poprzez różnego rodzaju maszyny elektryczne. Walory użytkowe tych maszyn w znacznym stopniu związane są z ich stanem termicznym. Badaniami i obliczeniami cieplnymi wirujących maszyn elektrycznych zajmuje się wiele ośrodków na świecie, o czym świadczą liczne publikacje związane z tą tematyką [1-12]. W związku z tym powstały specjalne programy do analizy termicznej maszyn elektrycznych. Przykładem może być program Motor-CAD [6], który bazuje na schematach cieplnych, ale posiada również moduły oparte o metodę elementów skończonych. Moduły te przeznaczone są do analizy bardziej skomplikowanych podzespołów maszyn elektrycznych oraz analiz przepływowych.

Podczas analiz termicznych maszyn elektrycznych, istotnym problemem jest skomplikowana struktura maszyn elektrycznych. Jedną z takich struktur jest obwód elektromagnetyczny. Składa się on z uzwojenia i rdzenia elektromagnetycznego. Między rdzeniem a uzwojeniem istnieje warstwa izolacji jest to tzw. izolacja żłobkowa. Podczas budowy modelu obliczeniowego obwodu elektromagnetycznego MES niezbędne jest jego uproszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono propozycję budowy takiego modelu. Idea budowy modelu polega na zbudowaniu monolitycznego modelu uzwojenia i zastąpieniu modelu izolacji żłobkowej parametrem zastępczej rezystancji cieplnej. W pracach [4,10] obszernie przedstawiono metodę wyznaczania zastępczej przewodności cieplnej uzwojenia, na którą wpływ ma wiele czynników,

takich jak: rodzaj impregnacji, rodzaj drutu czy współczynnik wypełnienia żłobka. W pracy tej do obliczenia przewodności cieplnej uzwojenia wykorzystano zależność podaną przez Richtera [10]. Natomiast na parametr rezystancji cieplnej między uzwojeniem, a rdzeniem złożonym z pakietu blach mają wpływ takie czynniki jak: grubość izolacji żłobkowej, jakość impregnacji, a także współczynnik wypełnienia żłobka. W pracy niniejszej zaproponowano wykorzystanie parametru zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej, który uwzględnia wpływ tych wszystkich czynników i wyznaczany jest na podstawie prostego eksperymentu.

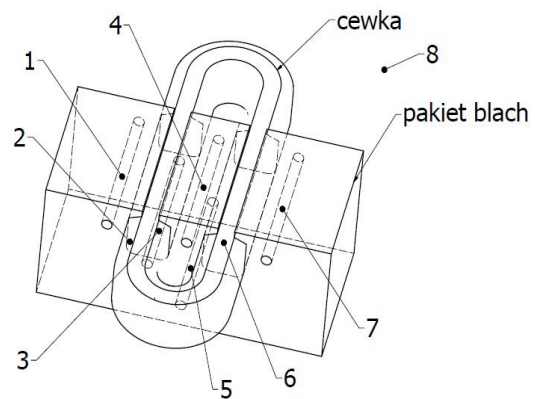
2. Doświadczalne wyznaczenie zastępczej rezystancji żłobkowej

Doświadczenie przeprowadzono na próbce obwodu elektromagnetycznego (rys. 1), która została przygotowana zgodnie ze stosowaną najczęściej technologią, według której wykonuje się stojany i wirniki uzwojone. Wycinek pakietu blach wykonano za pomocą lasera z blach elektrotechnicznych. Cewkę uzwojenia sporządzono z drutu okrągłego $\varnothing 0,71\text{mm}$. Jako izolację żłobkową zastosowano, elastyczny laminat Nen o grubości $0,23\text{mm}$. Następnie próbkę poddano impregnacji zanurzeniowej.



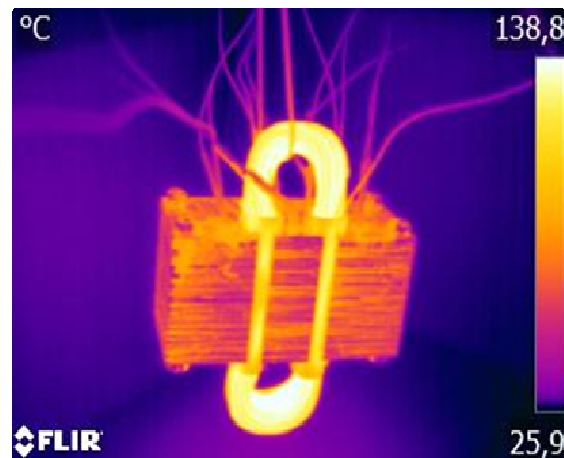
Rys. 1. Próbkę obwodu elektromagnetycznego

W próbce umieszczono czujniki temperatury Pt100, rozmieszczone jak na schemacie pokazanym na rys. 2. Czujniki (1,3,4,5,7) usytuowano w specjalnie przygotowanych otworach wewnątrz pakietu blach, (6) wewnątrz cewki, oraz pod izolacją żłobkową (2). Dodatkowo za pomocą czujnika (8) rejestrowano temperaturę otoczenia.

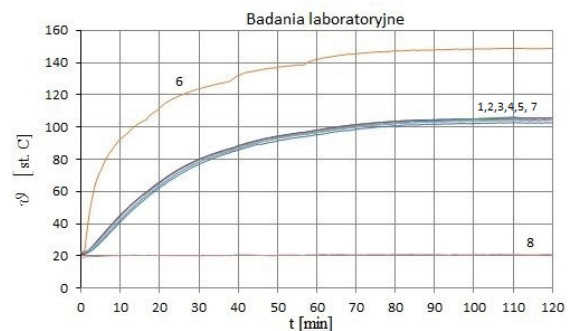


Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w próbce obwodu elektromagnetycznego

Uzwojenie próbki zasilono prądem stałym i monitorowano jego temperaturę zarówno za pomocą czujników jak i kamery termowizyjnej [5,7,11]. Eksperyment przerwano po ustabilizowaniu się wskazań temperatury, co jest jednoznaczne z osiągnięciem przez próbkę stanu ustalonego. Termogram stanu ustalonego pokazano na rys. 3, a zarejestrowaną temperaturę na rys. 4.



Rys. 3. Termogram próbki obwodu elektromagnetycznego



Rys. 4. Temperatura zarejestrowana w próbce obwodu elektromagnetycznego

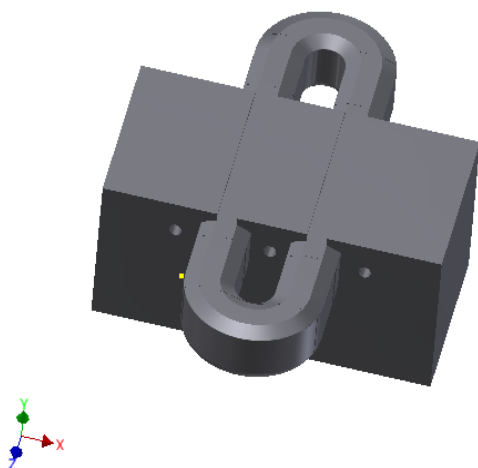
W oparciu o opisane doświadczenie określono parametr zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłbkowej R_{cz} , wyliczony na podstawie znanej mocy przepływającej przez powierzchnię izolacji żłbkowej i spadku temperatury otrzymanego w stanie ustalonym. [13]

$$R_{cz} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}/A} \quad (1)$$

Dla przedstawionej próbki parametr ten przyjmuje wartość $0,0073 \text{ Km}^2/\text{W}$.

3. Analiza numeryczna

Przeprowadzone doświadczenie zamodelowano w programie do analiz termicznych. W tym celu zbudowano przestrzenny model badanej próbki (rys. 5).



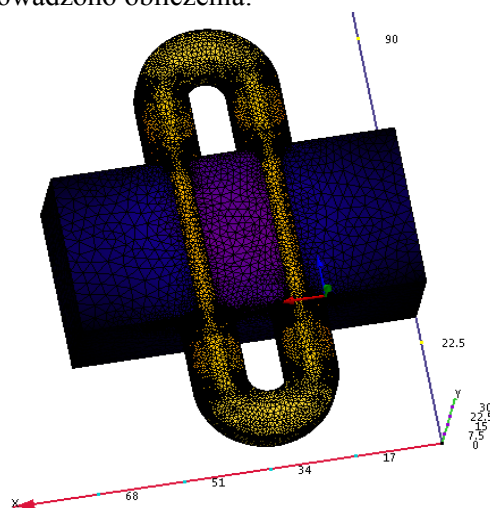
Rys. 5. Model przestrzenny próbki obwodu elektromagnetycznego

Następnie model ten zaimportowano do programu obliczeniowego. Jako warunki brzegowe analizy podano warunki panujące w czasie eksperymentu. Przyjęto temperaturę początkową próbki równą temperaturze otoczenia $\sim 21^\circ\text{C}$ oraz moc dostarczaną przez cewkę zasilaną prądem stałym równą $\sim 20\text{W}$. Przy oddawaniu ciepła do otoczenia uwzględniono zjawisko promieniowania i konwekcji naturalnej, przyjmując współczynnik wymiany na poziomie 7 W/m^2 . W modelu obliczeniowym pominięto bryłowy model izolacji żłbkowej i wprowadzono zastępczy parametr kontaktowej rezystancji cieplnej izolacji żłbkowej $R_{cz}=0,0073 \text{ Km}^2/\text{W}$ określony na podstawie doświadczenia. Dla pakietu blach przyjęto następujące własności cieplne: $Cp_b=490 \text{ J/kgK}$, $lb_z=3 \text{ W/mK}$, $lb_{xy}=30 \text{ W/mK}$. A dla uzwojenia: $Cp_u=380 \text{ J/kgK}$, $lu_{xy}=190 \text{ W/mK}$, $lu_z=0,45 \text{ W/mK}$.

Zastępczą przewodność cewki w kierunku prostopadłym do nawijania lu_z określono na podstawie wzoru podanego przez Richtera obowiązującego dla cewki z przewodów okrągłych ściśle nawiniętych i przylegających do siebie przy założeniu, że wszystkie wolne przestrzenie zostały wypełnione lakierem. [10]

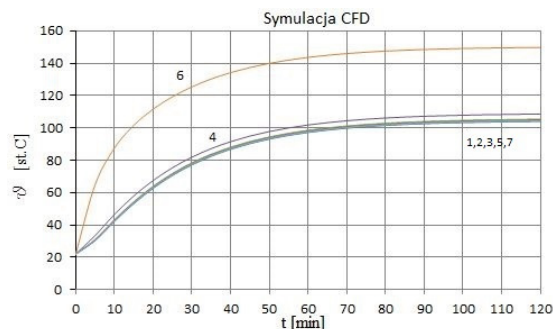
$$lu_z = c \cdot l \quad (2)$$

Współczynnik c zależy od stosunku średnicy drutu bez izolacji d do średnicy drutu izolowanego d' . Dla drutu zastosowanego w uzwojeniu próbki o średnicach $d=0,71$ oraz $d'=0,789$ współczynnik ten przyjmuje wartość $c=4,5$. Przy założonej przewodności cieplnej izolacji drutu $l_i = 0,1 \text{ W/mK}$ zastępcza przewodność cieplna uzwojenia w kierunku prostopadłym do nawijania cewek lu_z przyjmuje wartość $0,45 \text{ W/mK}$. Dla tak przyjętych parametrów model poddano dyskretyzacji (rys. 6) i przeprowadzono obliczenia.



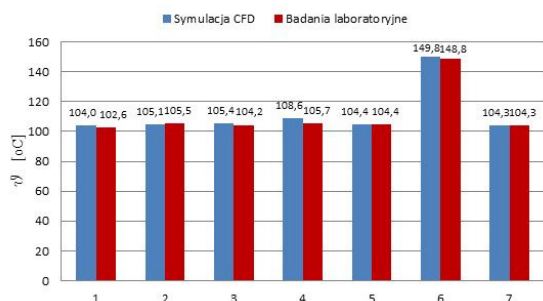
Rys. 6. Model dyskretny próbki obwodu elektromagnetycznego

Wyniki symulacji numerycznej przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Temperatura obliczona w wyniku symulacji numerycznej

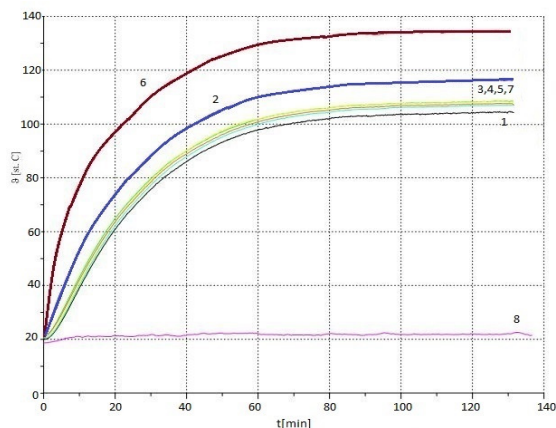
Na rys. 8 przedstawiono porównanie temperatury otrzymanej w wyniku symulacji numerycznej i zarejestrowanej w stanie ustalonym w punktach pomiarowych podczas doświadczenia. Różnica wyników nie przekracza 2%.



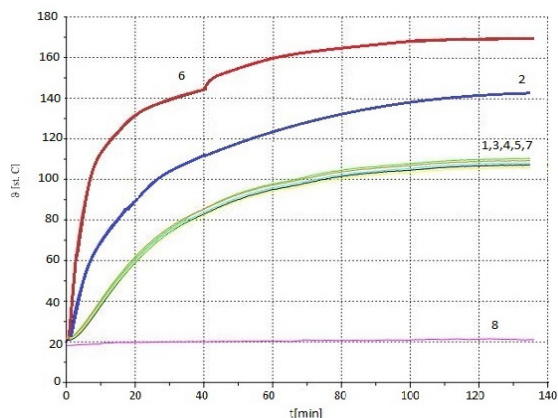
Rys. 8. Obliczona i zmierzona temperatura obwodu elektromagnetycznego po 120 min

4. Wpływ izolacji żłobkowej i impregnacji na parametry cieplne obwodu elektromagnetycznego

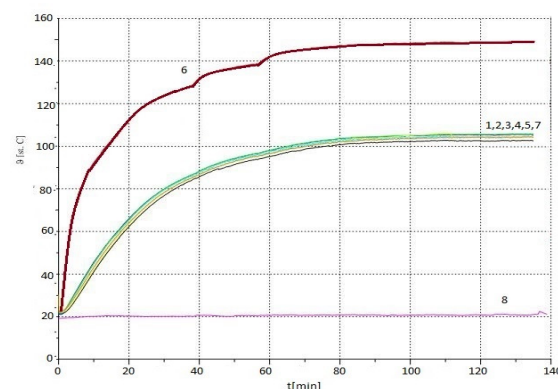
W celu oceny wpływu takich parametrów jak impregnacja uzwojenia i grubość izolacji żłobkowej przygotowano 3 próbki uzwojenia z wycinkiem pakietu blach jak na rys. 1. W próbkach zastosowano dwie różne grubości izolacji żłobkowej 0,15 mm i 0,23 mm a jedną próbkę z izolacją żłobkową 0,23 mm poddano impregnacji. Na uzwojenie cewek podano jednakowy prąd i za pomocą termopar (rys. 2) dokonano pomiaru rozkładu temperatury. Wyniki przedstawiono na wykresach rys. 9-11.



Rys. 9. Temperatura zarejestrowana w nieimpregnowanej próbce obwodu elektromagnetycznego z izolacją żłobkową 0,15mm



Rys. 10. Temperatura zarejestrowana w nieimpregnowanej próbce obwodu elektromagnetycznego z izolacją żłobkową 0,23mm



Rys. 11. Temperatura zarejestrowana w impregnowanej próbce obwodu elektromagnetycznego z izolacją żłobkową 0,23mm

Można zauważyć, że zmiana grubości izolacji żłobkowej 0,15 na 0,23 (rys. 9 i 10) spowodowała wzrost temperatury uzwojenia o ponad 30°C, natomiast impregnacja próbki (rys. 10 i 11) obniżyła temperaturę uzwojenia o około 20°C.

5. Podsumowanie

Obliczenia termiczne maszyn elektrycznych są bardzo istotne, lecz wiarygodność wyników zależy od przyjętego modelu obliczeniowego. Zaproponowany model pozwala na efektywne obliczenia, a jego uproszczona budowa sprawia, że może on być zastosowany przy konstruowaniu modelu obliczeniowego całej maszyny. Zaproponowany parametr zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej, określony na bazie prostego eksperymentu, pozwala uwzględnić wpływ wielu czynników wynikających z zastosowanej technologii produkcji, takich jak: grubość izolacji żłobkowej, rodzaj impregnacji, czy współczynnik wypełnienia żłobka. Czyn-

niki te mają istotny wpływ na temperaturę uzwojenia, co pokazano na rys. 9-11.

6. Literatura

- [1]. Będkowski B., Madej J.: „Możliwości metod 3D FEM i CFD w analizie systemów chłodzenia maszyn elektrycznych - część wstępna”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL*, (94), nr 1, 2012, s. 139-143.
- [2]. Bennion K.: „Electric Motor Thermal Management” National Renewable Energy Laboratory, Washington 2012.
- [3]. Hendershot J. R., Miller T. J. E.: „Design of brushless permanent-magnet motors” Magna Physics Pub., 1994.
- [4]. Kanzaki H., Sato K., Kumagai M.: „A Study of an Estimation Method for Predicting the Equivalent Thermal Conductivity of an Electric Coil” *Trans. JSME*, 56 (526), 1990, 1753-1758.
- [5]. Kuchynkova H., Hajek V.: „Measurment of temperature of electrical Machines using thermovision camera”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL* 2010; 87: 139-134.
- [6]. Mejuto C., Mueller M., Shanel M., Mebarki A., Staton D.: „Thermal modelling investigation of heat paths due to iron losses in synchronous machines” *Proc. IEEE PEMD*, 2008, s. 225–229.
- [7]. Mukosiej J.: „Problem dokładności badań cieplnych maszyn elektrycznych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL*, nr 100, 2013, s. 67-72.
- [8]. Mynarek P., Kowol M.: „Analiza cieplna silnika PMSM za pomocą metody elementów skończonych i schematów cieplnych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL* 2014; 4(104): 49-54.
- [9]. Nategh S., Wallmark O., Leksell M., Zhao S.: „Thermal Analysis of a PMaSRM Using Partial FEA and Lumped Parameter Modeling” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, 2012, s. 477-488.
- [10]. Pełczewski W.: „Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych” Warszawa: PWT, 1956.
- [11]. Polak A., Barański M.: „Termograficzne badania maszyn elektrycznych – na co należy zwrócić szczególną uwagę”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL* 207; 76: 133-136.
- [12]. SanAndres U., Almandoz G., Poza J., Ugalde G.: „Design of Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics and Analytical Thermal Models” *Industrial Electronics. IEEE Transactions* 2014; 8(61): 4383–4391.
- [13]. Thomas L. C.: „Heat Transfer – Professional Version, 2nd Edition” Capstone, 1999.

Autorzy

mgr inż. Bartłomiej Będkowski
b.bedkowski@komel.katowice.pl

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188

prof. ATH dr hab. inż. Jerzy Madej
juma@ath.bielsko.pl
Akademia Techniczno-Humanistyczna,
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
Katedra Podstaw Budowy Maszyn,
43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2