

Piotr MYNAREK*
Marcin KOWOL*

METODA HOMOGENIZACJI UZWOJEŃ STOJANA MASZYN ELEKTRYCZNYCH

W pracy przedstawiono metodę homogenizacji uzwojeń stojana o losowym rozmieszczeniu drutów. Zaprezentowana metoda pozwala na znaczne ograniczenie kosztów numerycznych koniecznych do wyznaczenie poprawnego rozkładu temperatury w uzwojeniu oraz określenie maksymalnej temperatury w uzwojeniu. W celu weryfikacji zaprezentowanej metody wyniki zostały porównane z wartościami temperatury otrzymanymi z symulacji komputerowych obliczeniami z modelu polowego o losowym rozmieszczeniu drutów.

SŁOWA KLUCZOWE: homogenizacja, analiza cieplna, metoda elementów skończonych

1. WSTĘP

W ostatnim czasie można zaobserwować, że coraz częściej podejmowane są próby zastąpienia silników spalinowych silnikami elektrycznymi w motoryzacji lub lotnictwie. Spowodowane to jest przede wszystkim większą sprawnością silników elektrycznych jak i względami ekologicznymi. Nowe zastosowania oraz wzrost wymagań stawianych przetwornikom elektromechanicznym determinuje rozwój metod projektowania, pozwalających na uzyskiwanie maszyn o jak największej gęstości mocy [1, 6]. Głównym czynnikiem wpływającym na moc wyjściową danego przetwornika elektromechanicznego są ograniczenia cieplne, które wynikają z zachodzących w silniku zjawisk termicznych. Dodatkowo zjawiska cieplne decydują także o żywotności maszyny jak i o jej niezawodności. Jednym z podstawowych problemów podczas analizy termicznej silników elektrycznych jest poprawne zamodelowanie uzwojeń, ponieważ właśnie w tym elemencie maszyny występuje najwyższa temperatura. W obliczeniach cieplnych coraz chętniej wykorzystywane są metody polowe [3, 6], które charakteryzują się wysoką dokładnością i pozwalają na określenie obszarów lokalnego przegrzania się maszyny, czyli tzw. gorących punktów. Jednak stosowanie modeli polowych w analizie termicznej maszyn elektrycznych, napotyka wiele trudności, ponieważ modele takie wymagają dokładnego odwzorowania geometrii analizowanego

* Politechnika Opolska.

obiekty, a tym samym dużego kosztu numerycznego. Newralgicznym obszarem z punktu widzenia kosztu numerycznego są uzwojenia silnika, które z racji dużej złożoności materiałowej (druty nawojowe, lakiery, emalie oraz powietrze) wymagają uwzględnienia każdego regionu, a tym samym odpowiednio dużego zagęszczenia siatki dyskretyzacyjnej [1]. Rozwiązaniem tego problemu jest przeprowadzenie homogenizacji uzwojeń silnika [2, 6].

2. WYZNACZANIE ZASTĘPCZEGO WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ DLA UZWOJENIA

W przypadku silników małej mocy uzwojenia stojanów są wykonywane w postaci cewek wsypywanych. Losowość oraz niejednorodność rozmieszczenia drutów nawojowych wynikająca z takiej technologii wykonywania uzwojeń wprowadza dodatkową trudność w analizie cieplnej maszyny. W literaturze można znaleźć wiele metod pozwalających na wyznaczenie zastępczej przewodności cieplnej λ_{uz} . Jednym z najczęściej spotykanym podejściem mającym na celu wyznaczenie λ_{uz} jest wykorzystanie zależności [5]:

$$\lambda_{uz} = \lambda_{cu}k + \lambda_{air}(1-k) \quad (1)$$

gdzie: λ_{cu} – przewodność cieplna miedzi, λ_{air} – przewodność cieplna powietrza, k – współczynnik wypełnienia żłobka miedzią.

Wadą takiego podejścia jest jednak zdecydowanie zbyt duża wartość zastępczej przewodności cieplnej uzwojenia. Rozkład temperatury w maszynie w ujęciu globalnym jest poprawny, jednak temperatura w uzwojeniu jest zaniżona. Inną zależnością pozwalającą wyznaczyć zastępczą przewodność cieplną uzwojenia zaproponował Milton [4]:

$$\lambda_{uz} = \lambda_{air} \frac{(1+k)\lambda_d + (1-k)\lambda_{air}}{(1-k)\lambda_d + (1+k)\lambda_{air}} \quad (2)$$

gdzie: λ_d – przewodność cieplna drutu wraz z emalią.

Jednak w tym przypadku współczynnik λ_{uz} wyznaczony na podstawie zależności (2) przyjmuje zbyt małą wartość, co skutkuje zawyżaniem temperatury w uzwojeniu.

Coraz częściej można spotkać prace, w których proces homogenizacji uzwojeń przeprowadzany jest w oparciu o pomiary wycinka uzwojenia [6, 7]. Podejście takie wydaje się słuszne i praktyczne w przypadku silników z segmentowanym stojanem umożliwiającym wykorzystanie uzwojeń o dużym stopniu wypełnienia.

Zastępczy współczynnik przewodności cieplnej uzwojenia można także wyznaczyć numerycznie [3] i rozwiązanie takie wydaje się najbardziej atrakcyjne w przypadku uzwojeń wsypywanych. Proces homogenizacji uzwojenia należy jednak rozdzielić na dwa etapy, a mianowicie homogenizację pojedynczego drutu nawojowego wraz z lakierem oraz homogenizację całego uzwojenia. Podejście

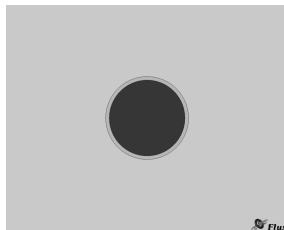
take pozwala na uwzględnienie zarówno lakieru izolacyjnego jak również struktury ułożenia drutów nawojowych w żłobku.

W procesie homogenizacji drutu na podstawie doświadczeń autorzy wykorzystali zależność:

$$\lambda_d = \left(\frac{d' - \delta_e}{2\delta_e} \right) \lambda_e \quad (3)$$

gdzie: d' – średnica drutu wraz z emalią, δ_e – grubość warstwy emalii, λ_e – przewodność cieplna emalii.

W celu sprawdzenia poprawności powyższego stwierdzenia przeprowadzono jego weryfikację numeryczną. Zamodelowano pojedynczy drut wraz z warstwą lakieru ($d = 0,75$ mm, $d' = 0.81$ mm) umieszczony w powietrzu (rys. 1). Na granicy obszaru obliczeniowego zdefiniowano warunek brzegowy pierwszego rodzaju (Dirichleta).



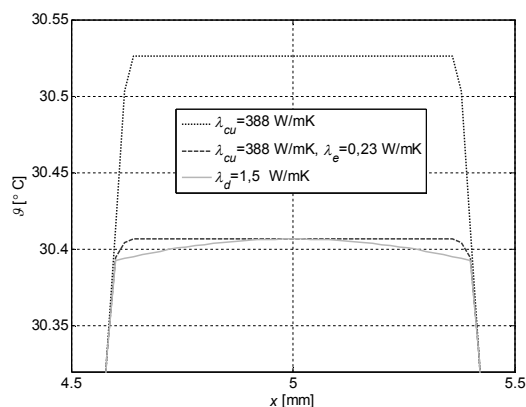
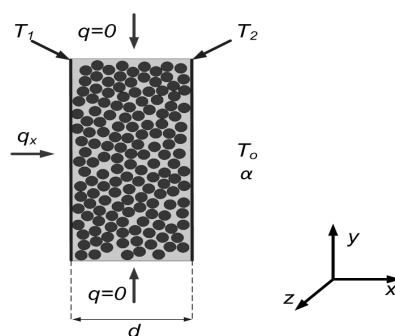
Rys. 1. Struktura próbki do obliczania zastępczej przewodności drutu

Dla tak zdefiniowanego modelu pojedynczego drutu przeprowadzono obliczenia dla następujących przypadków:

- uwzględnienie tylko miedzi ($\lambda_{cu} = 388$ W/mK), pominięcie warstwy lakieru;
- uwzględnienie miedzi oraz warstwy emalii ($\lambda_e = 0,23$ W/mK);
- zdefiniowanie zastępczej przewodności cieplnej dla całej próbki, wyznaczonej na podstawie zależności (3) ($\lambda_d = 1,5$ W/mK).

Na rys. 2 przedstawiono wyniki z poszczególnych analizowanych przypadków. Można zauważyć, że nieuwzględnienie warstwy lakieru w obliczeniach powoduje zawyżenie maksymalnej temperatury w drucie. Natomiast wyznaczona na podstawie zależności (3) przewodność λ_d dobrze odzwierciedla rozkład temperatury w badanej próbce.

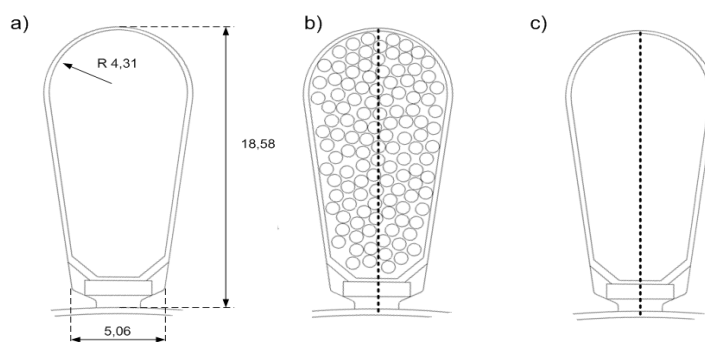
W procesie homogenizacji uzwojenia należy uwzględnić dużą losowość ułożenia się drutów w poszczególnych zezwojach analizowanego silnika. Dlatego zaproponowano wyznaczenie λ_{uz} numerycznie na podstawie próbki o strukturze podobnej do uzwojenia o losowym rozmieszczeniu drutów. Wymiary oraz współczynnik wypełnienia próbki jest zbliżone do uzwojenia rzeczywistego (rys.3) [3, 7].

Rys. 2. Zmiana temperatury w drucie dla różnych λ Rys. 3. Zdefiniowany model próbki uzwojenia wraz z definiowanymi warunkami brzegowymi, wykorzystany do wyznaczenia λ_{uz} (współczynnik wypełnienia $k=51\%$)

W celu wyznaczenia współczynnika λ_{uz} w oparciu o przedstawiony model próbki konieczne jest przypisanie odpowiednich warunków brzegowych. Na jednym z boków próbki zdefiniowano strumień ciepła o gęstości q , natomiast na przeciwległym boku próbki określono warunek brzegowy trzeciego rodzaju o zadanym współczynniku oddawania ciepła α oraz temperaturze otoczenia T_o . W celu zapewnienia przepływu ciepła tylko w jednym kierunku, pozostałe boki próbki są izolowane cieplnie ($q = 0$). Dla tak określonej próbki, obliczając temperaturę T_1 , T_2 oraz znając wymiar d możliwe jest wyznaczenie współczynnika λ_{uz} w oparciu o prawo Fouriera [2]:

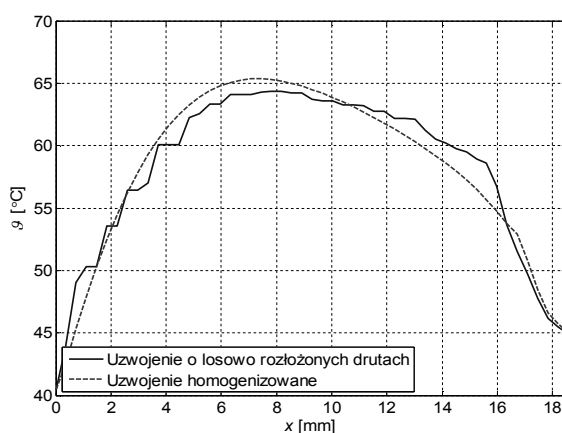
$$\lambda_{uz\ x} = \frac{q_x \cdot d}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

Dla tak zdefiniowanej próbki uzwojenia w wyniku przeprowadzonych obliczeń wyznaczona zastępcza przewodność cieplna wynosi $\lambda_{uz} = 0,1$ W/mK zarówno wzdłuż osi OX jak również OY.



Rys. 4. Wymiary żłobka (a), model o losowo rozmieszczonych drutach uzwojenia (b), model uzwojenia homogenizowanego (c)

W celu potwierdzenia poprawności wyznaczonego współczynnika λ_{liz} porównano rozkłady pola temperatury uzyskane dla modelu o losowo rozmieszczonych drutach uzwojenia oraz dla modelu homogenizowanego. Poniżej na rys. 5 zamieszczono rozkłady temperatury dla obydwu modeli uzwojenia wzdłuż linii przerywanej przedstawionej na rys. 4.



Rys. 5. Zmiana temperatury wzdłuż wysokości żłobka silnika

Zaproponowany model homogenizowanego uzwojenia charakteryzuje się znacznie mniejszym kosztem numerycznym niż model o losowym rozmieszczeniu poszczególnych drutów. Siatka dyskretyzacyjna modelu żłobka homogenizowanego zawiera ok. 1 167 elementów, podczas gdy siatka modelu rzeczywistego posiada ok. 2 915 elementów.

4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono metodę modelowania uzwojeń wsypywanych maszyn elektrycznych. Omawiana metoda pozwala na poprawne odzwierciedlenie rozkładu temperatury w uzwojeniu silnika oraz wyznaczenie w nim maksymalnej temperatury. Informacja ta jest niezwykle ważna podczas projektowania przetwornika elektromechanicznego ze względu na proces cieplnego starzenia się izolacji. Zaletą proponowanego modelu o homogenizowanych uzwojeniach jest niski koszt numeryczny w porównaniu z modelem odwzorowującym rzeczywiste uzwojenie, dzięki czemu możliwe jest szybkie przeanalizowanie nowej konstrukcji silnika, przy zachowaniu dostatecznej dokładności wyników.

LITERATURA

- [1] Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C., Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 3, March 2009, pp. 871-882.
- [2] Idoughi L., Mininger X., Bouillault F., Bernard L., Hoang E., Thermal Model with Winding Homogenization and FIT Discretization for Stator Slot, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 12, December 2011, pp. 4822-4826.
- [3] Lefik M., Obliczenia cieplne silników indukcyjnych małej mocy metodami polowymi, Rozprawa doktorska, Łódź, 2011.
- [4] Milton G. W., Bounds on the transport and optical properties of a two-component composite material, J. Appl. Phys., vol. 52, 1981, pp. 5294-5304.
- [5] 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, June 2012, pp. 477-488.
- [6] Wrobel R., Mellor P. H., Holliday D., Thermal Modeling of a Segmented Stator Winding Design, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 5, September/October 2011, pp. 2023-2030.
- [7] Wrobel R., Mellor P. H., Thermal Design of High-Energy-Density Wound Components, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 9, September 2011, pp. 4096-4104.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Piotr Mynarek jest stypendystą projektu *Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową Województwa Opolskiego* współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

THERMAL MODEL OF ELECTRICAL MACHINE WITH WINDING HOMOGENIZATION

This paper describes a method for obtaining an equivalent thermal model of a stator slot, in order to simplify the calculation of desired temperatures in an electrical machine winding. In order to evaluate the method, results from the equivalent model are compared with model of randomly placed conductors in the stator winding.