

Paweł Dybowski, Tomasz Lerch, Waldemar Milej
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

ZJAWISKA CIEPLNE W MODELU MASZYNY SYNCHRONICZNEJ Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

THERMAL PHENOMENA IN THE MODEL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE

Streszczenie: W referacie przedstawione zostaną wyniki obliczeń polowych dla dwuwymiarowego modelu cieplnego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Wynikiem obliczeń są rozkłady temperatur w maszynie podczas symulacji oraz funkcje zmieniającej się rezystywności uzwojenia stojana oraz magnesów trwałych w czasie symulacji. Do obliczeń polowych przyjęto dwuwymiarowy model przekroju maszyny z magnesami trwałymi, dla której stojan posiada 36 żłobków, a na powierzchni wirnika umieszczone są cztery magnesy trwałe. Uzyskane rezultaty zostaną w późniejszym etapie prac wykorzystane w obliczeniach dla zwiększenia dokładności symulacji stanów dynamicznych maszyny przy pomocy modeli obwodowych.

Abstract: Results of field calculation for the two-dimensional thermal model of a synchronous motor with permanent magnets are presented in the paper. This are: the temperature distributions in the machine and the functions of the resistivity change of the stator windings and of the permanent magnets. The two-dimensional model of the synchronous machine with a permanent magnet (where stator has 36 slots and four permanent magnets are on the surface of the rotor) were assumed for the FEM calculations. The results will be a later used in calculations to increase the accuracy of simulation of dynamic states of the synchronous machine.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, magnesy trwałe, obliczenia cieplne, rezystywność uzwojenia.

Keywords: Synchronous machine, resistivity of the coil, heat calculations.

1. Wstęp

Głównym celem pracy jest opracowanie dwuwymiarowego modelu polowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi uwzględniającego zjawiska cieplne. Wyniki obliczeń mogą być uwzględnione później np. w obliczeniach dla zwiększenia dokładności symulacji stanów dynamicznych maszyny przy pomocy modeli obwodowych lub ich powiązania z wynikami obliczeń elektromagnetycznych, z których otrzymuje się między innymi wielkości strat w żelazie i strat dodatkowych [2].

Obliczenia wykonano dla zablokowanego wirnika i zasilania stojana takim napięciem, dla którego popłynie w uzwojeniach prąd znamionowy. W użytych w obliczeniach modelu obliczeniowym maszyny stojan ma 36 żłobków, a na wirniku silnika umieszczone są 4 magnesy naklejone na powierzchni walca wirnika (Rys.1). W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano rozkłady temperatur w maszynie oraz funkcje zmieniającej się w czasie rezystywności uzwojenia stojana i magnesów trwałych. Uzyskane wyniki można będzie również wykorzystać do wskazania punktów w maszynie, które uzyskują podczas pracy najwyższą temperaturę.

Określenie tych punktów daje możliwość na etapie projektowania ograniczenie wzrostu temperatury, a co za tym idzie wydłużenie żywotności, jak również ograniczenie strat i zwiększenie sprawności maszyny.

Niniejsza praca jest częścią Badań Statutowych 2017 AGH nr 11.11.120.354.

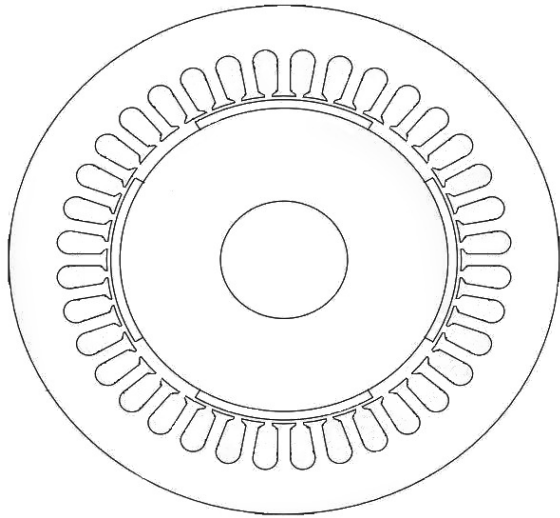
2. Model obliczeniowy

W obliczeniach symulacyjnych został przyjęty model dla silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o danych znamionowych $P_N = 4\text{kW}$, $U_N = 400\text{V}$, $f_N = 50\text{Hz}$, $n_N = 1500\text{obr/min}$, $I_N = 8,2\text{A}$.

Model geometryczny przedstawiony jest na rysunku 1. Analizowany model podzielony został na obszary cieplnie jednorodne, w którym dodano obszar powietrza otaczający badany obiekt. Dla zewnętrznych powierzchni tego obszaru założono warunek brzegowy Dirichleta pierwszego rodzaju [4].

W modelu wyodrębniono takie obszary jak: trzydzieści sześć żłobków stojana, cztery magnesy umieszczone na wirniku, szczelinę powietrzną, pakiety blach stojana i wirnika oraz wał maszyny. Dla powierzchni pomiędzy

obszarami jednorodnymi w obliczeniach przyjęto warunek brzegowy trzeciego rodzaju (warunek Fouriera).



Rys. 1. Model obliczeniowy silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

3. Obliczenia

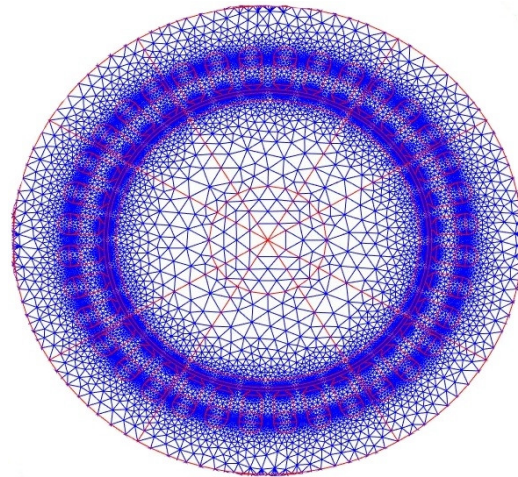
Obliczenia modelu cieplnego silnika synchronicznego wykonane zostały metodą elementów skończonych przy pomocy cząstkowych równań parabolicznych. W wyodrębnionych obszarach cieplnie jednorodnych zdefiniowano równanie ciepłe (1) przedstawiające ich nagrzewanie. Wskazane obszary różnią się między sobą własnościami fizycznymi wynikającymi z użytego materiału, a więc parametry tego równania cieplnego są różne dla tych obszarów.

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = Q \quad (1)$$

gdzie: T - temperatura ciała, c - jego ciepło właściwe, ρ - gęstość, k - współczynnik przewodzenia ciepła, Q - źródło ciepła.

Źródłem ciepła jest funkcja strat mocy wydzielona w jednostce objętości. Zmienność funkcji źródła ciepła można uzależnić od zmiany wartości prądu fazowego. W rozważanym przypadku przyjęta została stała wartość prądu, a więc zmienność źródła ciepła zależna jest tylko od wyznaczonej średniej funkcji rezystywności uzwojenia stojana (Rys. 5). Po wykonaniu obliczeń funkcję rezystywności wyznaczono iteracyjnie, gdzie przy pierwszym podejściu przyjęto stałą wartość rezystywności niezależną od temperatury, a w kolejnych iteracjach funkcję średniej rezystywności uzależniono od

zmiany temperatury, którą otrzymano w wyniku przeprowadzonych symulacji cieplnych modelu.

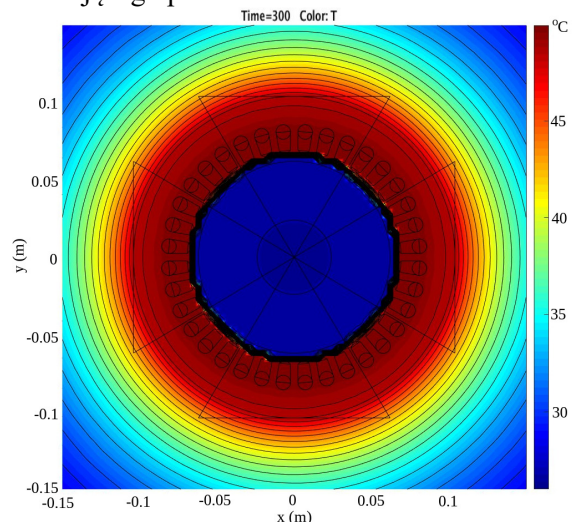


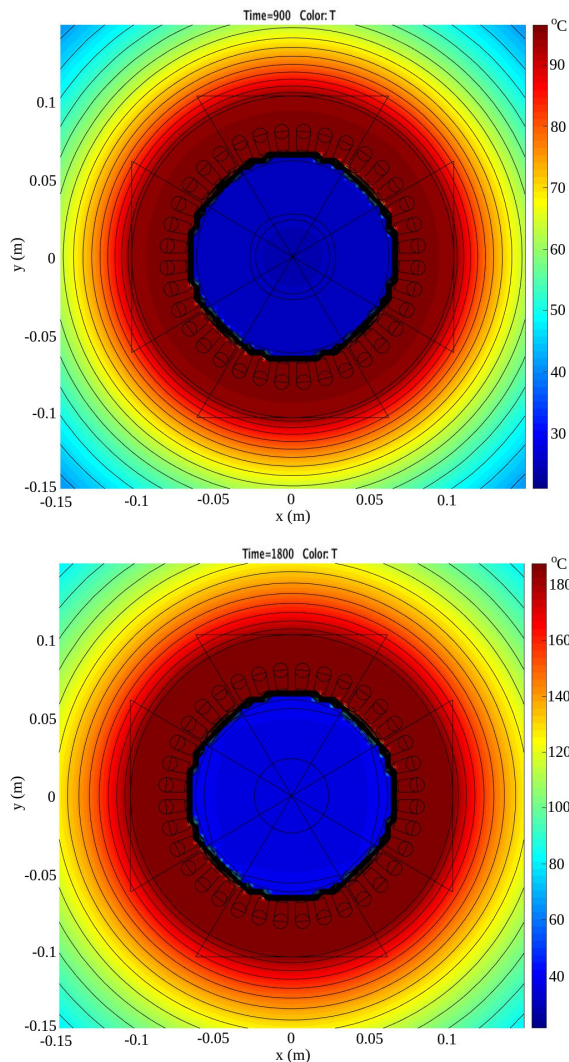
Rys. 2. Siatka obliczeniowa dla przyjętego modelu

Rysunek 2 przedstawia siatkę trójkątów, która wykorzystana była w trakcie obliczeń polowych. Różna gęstość siatki w modelu uzależniona jest od wielkości poszczególnych elementów modelu. W celu zwiększenia dokładności w niektórych obszarach siatka została zagęszczona (np. w szczelinie powietrznej).

4. Wyniki obliczeń polowych

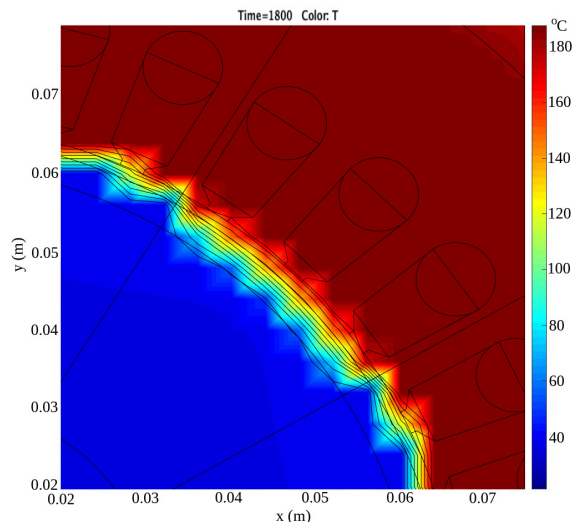
W modelu założono początkową temperaturę równą 21°C oraz brak możliwości oddawania ciepła przez wał silnika. Obliczenia obejmują tylko wymienione w pkt. 2 wybrane obszary jednorodne i nie uwzględniają procesów cieplnych zachodzących w izolacji żłobkowej czy kadłubie maszyny. Ciepło z pakietu stojana oddawane jest na zewnątrz bezpośrednio do otaczającego powietrza.





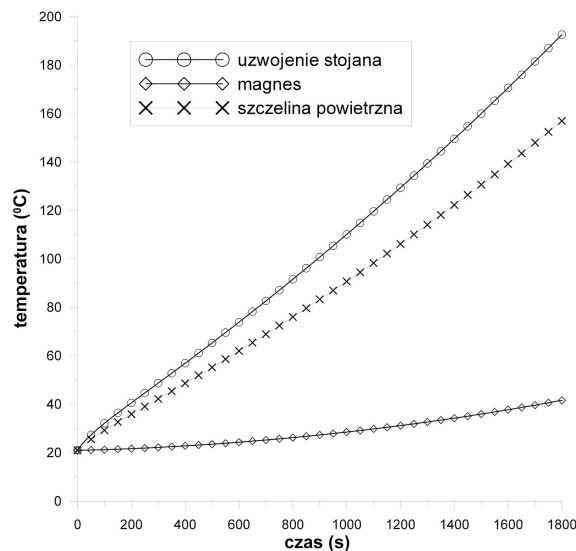
Rys. 3. Wyniki obliczeń rozkładu temperatury dla modelu

Powyżej przedstawione są wyniki obliczeń cieplnych dla dwuwymiarowych pól zmiennej temperatury w czasie w wydzielonych obszarach jednorodnych. Przykładowe obliczenia dla wybranych czasów symulacji podanych w sekundach (300, 900 i 1800 sekund) przedstawia rysunek 3. Rysunek 4 przedstawia powiększenie wybranego fragmentu maszyny dla wykonanych obliczeń cieplnych modelu po 30 minutowym nagrzewaniu, na którym widać w jaki sposób powietrze w szczelinie nagrzewa się, a następnie przekazuje ciepło do magnesów oraz pakietu wirnika. Przejęte ciepło przez magnesy i pakiet wirnika w warunkach rzeczywistych będzie odprowadzane tylko przez wał maszyny (w modelu obliczeniowym efekt oddawania ciepła przez wirnik został pominięty).



Rys. 4. Powiększenie wybranego wycinka z modelu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

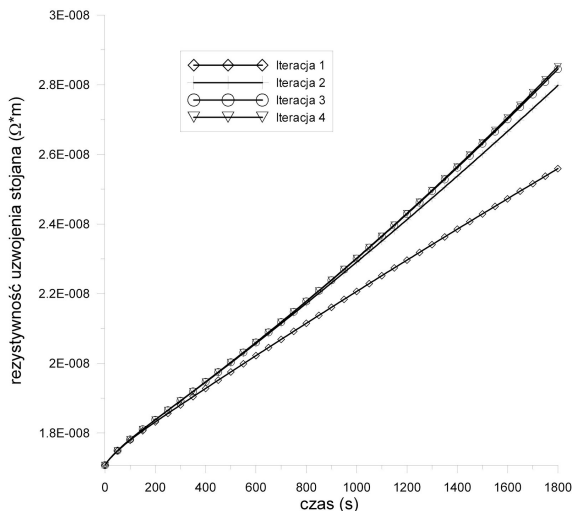
Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi narastającej średniej temperatury w czasie symulacji dla uzwojeń stojana, magnesów oraz szczeliny powietrznej. Można zauważyć, że w końcowym etapie nagrzewania różnica temperatury uzwojenia stojana i szczeliny powietrznej wynosi około 30°C. Wysoka temperatura w okolicy magnesów jest bardzo niekorzystnym zjawiskiem. Dla wyższych temperatur pracy (100-150°C) magnesy ulegają procesowi odmagnesowania, w wyniku czego może nastąpić niekontrolowane odzłudzenie się maszyny.



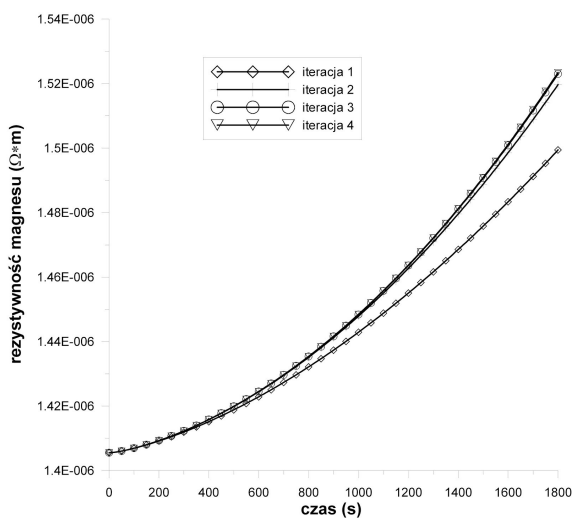
Rys. 5. Przebiegi narastającej średniej temperatury w czasie symulacji dla uzwojenia stojana oraz magnesów

Funkcje średniej rezystywności w kolejnych iteracjach [4] dla uzwojenia stojana i magnesów

trwałych przedstawiają rysunki 5 i 6. Przedstawione funkcje mają istotny wpływ na wyznaczanie parametrów maszyny i powinny być uwzględniane w obliczeniach dla modelu obwodowego maszyny z magnesami trwałymi [5], [6]. Takie podejście pozwoli zwiększyć dokładność symulacji dla stanów dynamicznych.

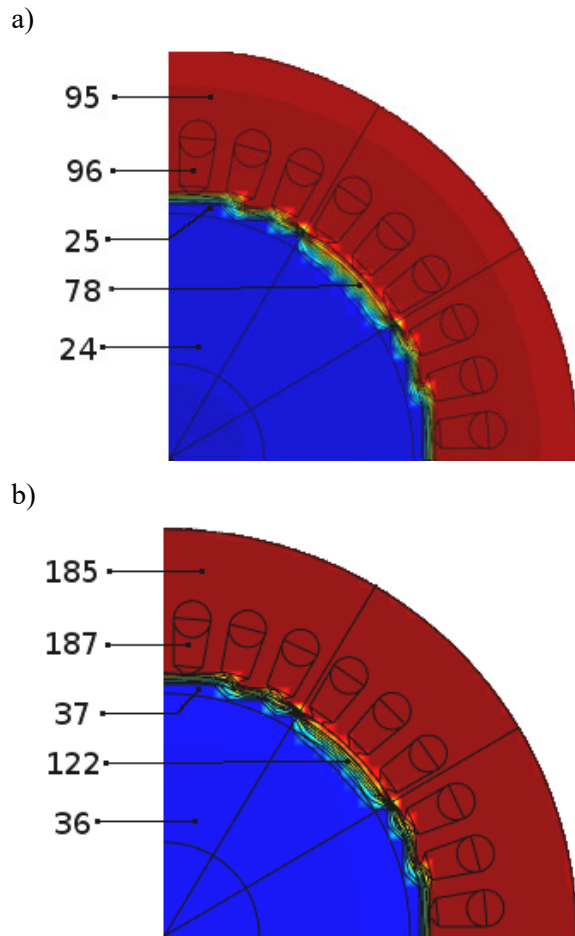


Rys. 5. Wyniki obliczeń rezystywności uzwojenia stojana



Rys. 6. Wyniki obliczeń rezystywności magnesów

Na rysunku 7 przedstawiono wartość temperatury dla wybranych punktów modelu dla czasu symulacji 15 i 30 min. Temperatura uzwojenia stojana podczas nagrzewania przez 30 min. osiąga 187°C, natomiast temperatura magnesu trwałego to 37°C. W rzeczywistości podgrzane powietrze w szczelinie przekazuje ciepło do magnesów trwałych umieszczonych na wirniku, a ciepło z wirnika maszyny oddawane jest na zewnątrz tylko poprzez wał.



Rys. 7. Wartości temperatury dla wybranych punktów modelu: a) dla 15 min. i b) dla 30 min

Tak więc, proces stygnięcia wirnika jest długotrwały nawet przy dobrym odprowadzaniu ciepła stojana przez korpus maszyny. Proces oddawania ciepła będzie utrudniony w takich maszynach jak np. silniki tarczowe bezrdzeniowe [3], [7], w których na etapie projektowania w miarę możliwości powinno się przewidzieć np. kanały wentylacyjne potrafiące odprowadzić nagromadzone ciepło na zewnątrz.

5. Wnioski

Przeprowadzone obliczenia pozwalają sformułować poniższe wnioski:

- obliczenia połowe modeli przybliżają charakter zjawisk cieplnych zachodzących w rzeczywistej maszynie,
- jest możliwa ocena zdolności maszyny do oddawania ciepła w analizowanym stanie pracy,
- zwiększenie dokładności w identyfikacji parametrów maszyny poprzez uwzględnienie zjawisk cieplnych,

- ograniczenie temperatury pracy pozwoli przedłużyć żywotność maszyny.

6. Literatura

- [1]. Milej W.: “Wpływ rozłożenia przewodów w złożeniu stojana na nagrzewanie silnika indukcyjnego”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 80, 2008, wyd. Komel, ISSN 0239-3646, s. 95-98.
- [2]. Mukosiej J.: “Problem dokładności badań cieplnych maszyn elektrycznych”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 100, 2013, wyd. Komel, ISSN 0239-3646, cz. I, s. 67-72.
- [3]. Drabek T., Latosiewicz S.: “Zastosowanie układu Halbacha w bezrdzeniowych silnikach tarczowych - Use of the Halbach array in coreless disk type motors”, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097. - 2014 R. 90 nr 1, s. 171-174.
- [4]. Milej W., Dybowski P.: “Obliczenia polowe zjawisk cieplnych w maszynie z magnesami trwałymi - Field calculations of thermal phenomena of the electrical machine permanent magnets” Przegląd Elektrotechniczny = Electrical Review, Stowarzyszenie Elektryków Polskich; ISSN 0033-2097. - 2012 R. 88 nr 6, s. 146-149.
- [5]. Drabek T., Matras A., Skwarczyński J.: “An analytical model of an electrical machine with internal permanent magnets”, Analysis and simulation of electrical and computer systems: Springer, cop. 2015. (Lecture Notes in Electrical Engineering; ISSN 1876-1100; vol. 324), ISBN: 978-3-319-11247-3; e-ISBN: 978-3-319-11248-0., s. 215-239.
- [6]. Drabek T., Matras A., Skwarczyński J.: “Weryfikacja pomiarowa parametrów modelu maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi -Verification measuring of parameters of the model electric ma-

chine with permanent magnets”, Przegląd Elektrotechniczny = Electrical Review, Stowarzyszenie Elektryków Polskich; ISSN 0033-2097. - 2014 R. 90 nr 5, s. 235-239.

[7]. Szczypior J., Jakubowski R.: “Obliczenia i badania cieplne maszyny z magnesami trwałymi i zewnętrznym wirnikiem” Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 4, 2014, wyd. Komel, ISSN 0239-3646, s. 151-156.

Autorzy

Dr inż. Paweł Dybowski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków tel. +48 126172897, e-mail: dybowski@agh.edu.pl

Dr inż. Tomasz Lerch, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków tel. +48 126174016, e-mail: lerch@agh.edu.pl

Dr inż. Waldemar Milej, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków tel. +48 126172898, e-mail: milej@agh.edu.pl.