

*analiza cieplna, schemat cieplny,
silnik indukcyjny*

Piotr MYNAREK*, Marcin KOWOL*, Marian ŁUKANISZYN*

MODELOWANIE, ANALIZA I WERYFIKACJA ZJAWISK CIEPLNYCH NA PRZYKŁADZIE 3-FAZOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO

W artykule przedstawiono metodę analizy cieplnej silnika indukcyjnego klatkowego w oparciu o metodę schematów cieplnych. Opracowano zastępczy schemat cieplny silnika indukcyjnego małej mocy, który został zaimplementowany w programie PLECS. Za pomocą zbudowanego modelu możliwe jest wyznaczenie zmian temperatury w poszczególnych elementach silnika w czasie jego pracy. Pozwala to na określenie na etapie projektowania stopnia wykorzystania maszyny oraz wyznaczenia obciążalności. Otrzymane wyniki z symulacji komputerowych zostały zweryfikowane pomiarami wykonanymi na modelu fizycznym silnika.

1. WSTĘP

Zjawiska cieplne stanowią niezmiernie istotny aspekt podczas projektowania oraz wyznaczania obciążalności maszyn elektrycznych. Obliczenia cieplne pozwalają określić stopień wykorzystania maszyny oraz skuteczności rozwiązań konstrukcyjnych [3]. Pomimo tego analizie cieplnej poświęca się zdecydowanie mniej uwagi niż zjawiskom elektromagnetycznym. Ta niesymetria jest szczególnie wyraźna w przypadku silników małej i średniej mocy [1]. W ostatnim czasie można jednak zauważyć zmianę tego trendu efektem czego są liczne publikacje [2, 6, 7]. Spowodowane to jest przede wszystkim rosnącymi wymaganiami odnośnie uzyskania jak największej mocy z określonych gabarytów maszyny. Dodatkowo każde zwiększenie sprawności silnika wiąże się z wymiernym efektem ekonomicznym. Dlatego celowe stają się prace związane z wyznaczeniem temperatur w poszczególnych elementach maszyn elektrycznych.

Obliczenia cieplne w elektromechanicznych przetwornikach można wykonać konstruując zastępcze schematy cieplne, bądź modele numeryczne polowe. Metoda sche-

* Politechnika Opolska, Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej,
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, m.lukaniszyn@po.opole.pl

matów cieplnych charakteryzuje się niskim kosztem numerycznym w porównaniu do modeli numerycznych wykorzystujących np. metodę elementów skończonych. Zachowuje ona jednocześnie niezbędną dokładność obliczeń. Dodatkową zaletą modelu obwodowego jest także łatwość uwzględnienia cienkich warstw izolacyjnych, co stanowi niewątpliwie duże utrudnienie w modelach polowych. Należy jednak zaznaczyć, że zbudowanie poprawnego schematu cieplnego wymaga od autora większego wysiłku podczas definiowania schematu niż w przypadku modeli polowych [5].

2. SCHEMAT CIEPLNY SILNIKA INDUKCYJNEGO

W pracy, jako obiekt badań przyjęto silnik trójfazowy produkcji zakładów Besel Sh80-6B o mocy 0,55 kW. Poszczególnym elementom analizowanej maszyny przypisano odpowiednią wartość oporu cieplnego. Wartość tych oporów w zależności od sposobu przekazywania ciepła, obliczono na podstawie zależności:

$$R_{th} = \frac{h}{\lambda S} \quad \text{dla przewodzenia} \quad (1)$$

$$R_{th} = \frac{1}{\alpha S} \quad \text{dla konwekcji} \quad (2)$$

gdzie: h – droga przepływu strumienia cieplnego, λ – współczynnik przewodności cieplnej, S – powierzchnia, przez którą przenika strumień ciepła, α – współczynnik oddawania ciepła.

W schemacie cieplnym uwzględniono pojemności cieplne poszczególnych elementów silnika, które obliczono według zależności:

$$C_{th} = c_w \rho V \quad (3)$$

gdzie: c_w – ciepło właściwe materiału, ρ – gęstość materiału, V – objętość materiału.

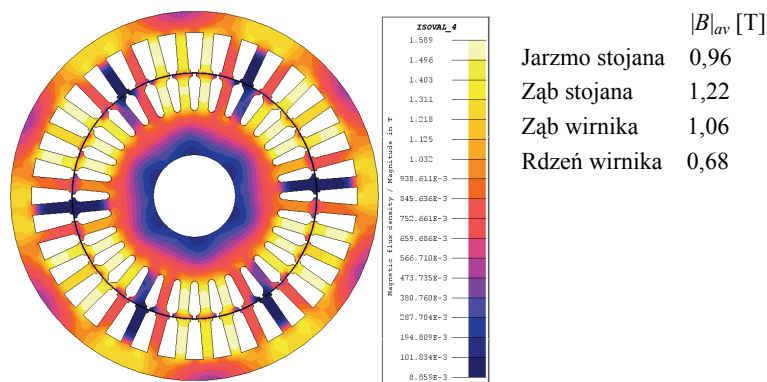
Jako źródła ciepła w silniku przyjęto występujące w nim straty mocy w miedzi oraz w żelazie. Straty w żelazie można obliczyć za pomocą wzoru [6]:

$$P_{Fe} = k_{kt} \Delta p_{B,f} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{B}{B_p} \right)^2 m_{Fe} \quad (4)$$

gdzie: k_{kt} – wsp. konstrukcyjno-technologiczny (zab rdzenia $k_{kt} = 1,5$, jarzmo $k_{kt} = 1,7$), $\Delta p_{B,f}$ – stratność blachy zmierzona przy B_p i f_p , f – częstotliwość, B – indukcja w rdzeniu przy f , m_{Fe} – masa rdzenia

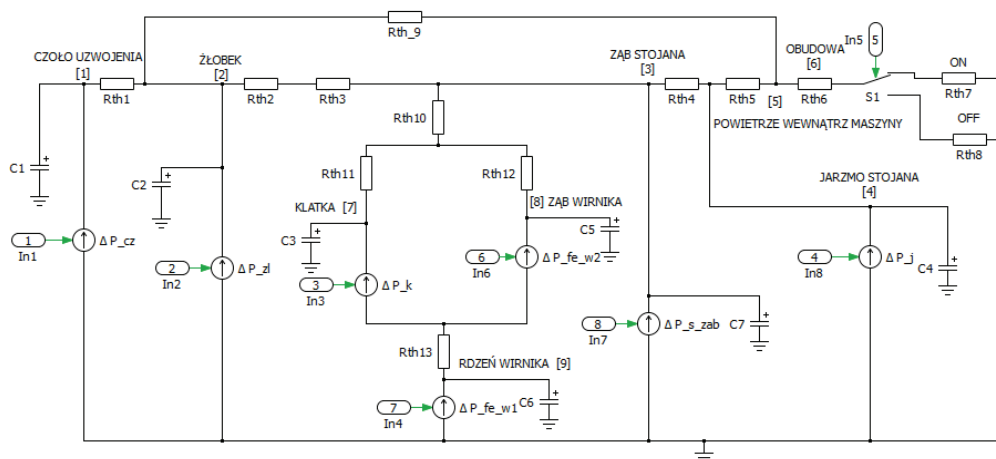
W celu wyznaczenia wartości indukcji magnetycznej w poszczególnych częściach rdzenia silnika opracowano model numeryczny w programie FLUX3D, bazujący na

MES. Na rysunku 1 zilustrowano rozkład modułu indukcji magnetycznej w silniku pracującym na biegu jałowym przy wymuszeniu napięciowym.



Rys. 1. Rozkład modułu indukcji magnetycznej w badanym silniku
Fig. 1. Magnetic flux density distribution in the motor

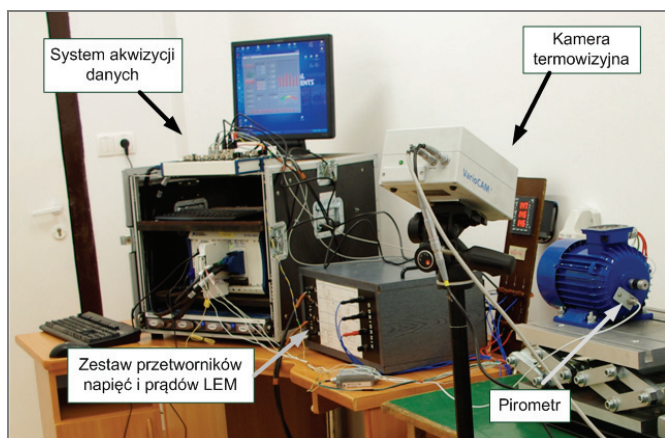
Model schematu cieplnego został zaimplementowany w programie PLESC (rys. 2). W modelu tym uwzględniono następujące uproszczenia [4]: maszyna jest symetryczna, pominięto zjawisko promieniowania, wewnątrz maszyny występuje jedynie zjawisko przewodzenia ciepła, ciepło odprowadzane jest z powierzchni silnika w drodze konwekcji, pominięto straty mechaniczne.



Rys. 2. schemat cieplny silnika klatkowego zaimplementowanego w programie PLECS
Fig. 2. Lumped-parameter thermal model of an induction motor implemented in PLECS package

3. STANOWISKO POMIAROWE

W celu zweryfikowania wyników symulacji komputerowych przeprowadzono pomiary na rzeczywistym obiekcie. W tym celu zestawiono stanowisko pomiarowe zilustrowane na rys. 2. Pomiaru temperatury dokonano za pomocą termopar typu K, pirometru oraz kamery termowizyjnej. Termopary zostały umieszczone w połączeniach czołowych uzwojenia silnika, w żłobku stojana oraz na obudowie silnika. Natomiast za pomocą pirometru mierzono temperaturę wirnika. Przyjęto założenie, że temperatura pierścienia zwierającego jest temperaturą całego wirnika. Kamery termowizyjną wykorzystano do rejestracji zmian temperatury na obudowie silnika.



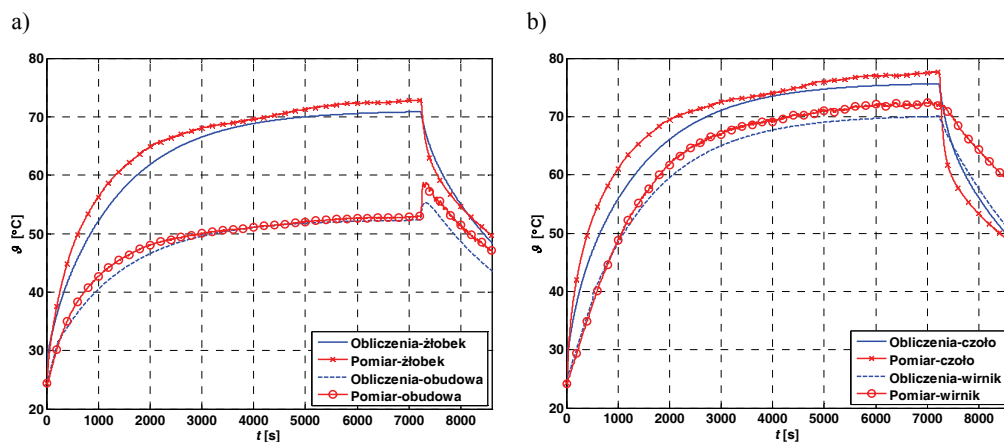
Rys. 3. Zbudowane stanowisko pomiarowe
Fig. 3. Test bench

System akwizycji danych został zbudowany w oparciu o środowisko LabView. Wykorzystano w tym celu sprzęt firmy National Instruments w skład, którego wchodzi: jednostka PXIe-8130, karty pomiarowe PXI-6133 i PXIe-4353. Opracowany system pozwala na rejestrację chwilowych jak i skutecznych wielkości elektrycznych silnika oraz rejestrację zmian temperatury w wybranych punktach pomiarowych.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Na podstawie opracowanego schematu cieplnego przeprowadzono szereg symulacji komputerowych dla biegu jałowego, obciążenia oraz stanu zwarcia silnika. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany temperatur w wybranych punktach pomiarowych jakie otrzymano na podstawie obliczeń oraz pomiarów dla biegu jałowego silnika przy

zasilaniu napięciem sieciowym. W tabeli 1 natomiast zestawiono porównanie wartości temperatury w stanie ustalonym dla przedstawionego przypadku.



Rys. 4. Zmiana temperatury w poszczególnych elementach silnika na biegu jałowym ($\vartheta_0 = 24,5^\circ\text{C}$)

Fig. 4. Simulated and measured temperatures in parts of the motor in idle run ($\vartheta_0 = 24,5^\circ\text{C}$)

Tabela 1. Zestawienie temperatury w stanie ustalonym w punktach pomiarowych

Table 1. Overview of a steady-state temperature at the measuring points

	Czoło	Żłobek	Wirnik	Obudowa
Obliczenia ∇_{ob} [°C]	75,7	72,9	70,1	52,3
Pomiary ∇_p [°C]	77,7	70,9	72,0	53,0

Jako miarę błędu pomiędzy obliczeniami a pomiarami (tab. 2) przyjęto błąd δ zdefiniowany zależnością (5):

$$\delta = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\vartheta_{pi} - \vartheta_{obi})^2} \quad (5)$$

gdzie: n – liczba próbek, ∇_p – temperatura otrzymana z pomiarów, ∇_{ob} – temperatura otrzymana z symulacji

Tabela 2. Wartość błędu δ dla poszczególnych charakterystyk nagrzewania

Table 2. Error value of δ for the individual characteristics of the heating

	Czoło	Żłobek	Wirnik	Obudowa
δ [°C]	2,83	2,15	3,47	1,61

5. WNIOSKI

Przedstawiona w pracy analiza termiczna silnika w oparciu o zastępczy schemat cieplny charakteryzuje się małym kosztem numerycznym. Wyniki obliczeń uzyskane w oparciu o zbudowany model cechują się zadawalającą zbieżnością z pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym. Małe różnice pomiędzy wynikami symulacji a pomiarami świadczą o poprawności zbudowanego modelu termicznego silnika. Występujące błędy wynikają z przyjętych założeń upraszczających. Za pomocą zbudowanego modelu można w szybki sposób, a zarazem z dostateczną dokładnością, wyznaczyć temperaturę w poszczególnych elementach silnika. Wielkości te są niezmiernie ważne z punktu widzenia eksploatacji oraz obciążalności silników.

Praca powstała dzięki współfinansowaniu ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.

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] DAJAKU G., GERLING D., *An Improved Lumped Parameter Thermal Model for Electrical Machines*, 17th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2006), September 2–5, 2006, Chania, Crete Island, Greece.
- [3] DUDZIKOWSKI I., CIURYS M., *Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudane magnesami trwałymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- [4] GNACIŃSKI P., *Wybrane zagadnienia oceny wpływu jakości energii elektrycznej na obciążenia cieplne silników indukcyjnych klatkowych małych mocy*, Prace Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2009.
- [5] KROK R., *Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego*, Monografia, Gliwice 2010.
- [6] LEFIK M., *Obliczenia cieplne silników indukcyjnych małej mocy metodami polowymi*, Rozprawa doktorska, Łódź 2011.
- [7] MILEJ W., *Modele o parametrach zmiennych maszyn indukcyjnych, ich właściwości i zastosowanie*, Rozprawa doktorska, Kraków 2007.

MODELING, ANALYSIS AND VERIFICATION OF THERMAL PHENOMENA IN A 3-PHASE INDUCTION MOTOR AS EXAMPLE

The work describes a method of thermal calculations for an induction motor. Thermal model of the analyzed motor was built based on the thermal network method and was implemented in PLECS package. A model of motor presented in the paper allows to determine temperatures of particular components of the machine. Simulation results, were verified by measurements performed on the physical model of the motor. Temperature measurements were made with use of LabView and controller PXIe-8130 with card PXI-4353 and PXI-6133.