

Piotr MYNAREK\*  
Marcin KOWOL\*

## SCHEMAT CIEPLNY SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO MAŁEJ MOCY

W pracy przedstawiono metodę analizy cieplnej silnika indukcyjnego klatkowego. Model termiczny analizowanego silnika został zbudowany na podstawie metody schematów cieplnych i zaimplementowany środowisku MATLAB/SIMULINK przy wykorzystaniu dodatkowego toolboxa PLECS. Za pomocą zbudowanego modelu można w stosunkowo łatwy sposób wyznaczyć przyrosty temperatury w poszczególnych elementach silnika, a zwłaszcza w części połączeń czołowych oraz części żłobkowej uzwojenia. Wielkości te są niezmiernie ważne podczas projektowania jak i eksploatacji maszyn elektrycznych. Otrzymane wyniki z symulacji zostały zweryfikowane pomiarami wykonanymi na modelu fizycznym silnika.

### 1. WSTĘP

Jednym z głównych czynników decydujących o niezawodności jak i obciążalności maszyn elektrycznych jest temperatura ich uzwojeń. Dlatego też, zjawiska ciepłe zachodzące w silnikach elektrycznych stanowią ważny aspekt podczas ich projektowania oraz wyznaczania ich obciążalności. Zbyt duże nagrzewanie się poszczególnych elementów silnika, zwłaszcza uzwojeń, powoduje skrócenie czasu jego eksploatacji. Jest to efekt bardzo niekorzystny w przypadku silników małych i średnich mocy, w których to żywotność jest w dużym stopniu uzależniona od stanu izolacji. Dlatego celowe stają się prace związane z wyznaczeniem maksymalnej temperatury uzwojenia [3].

Do analizy cieplnej silników stosuje się często modele polowe, wykorzystujące metodę elementów skończonych [5, 6]. Szeroko stosowane są jednak także modele obwodowe. Najczęściej stosowaną metodą obwodową jest metoda cieplnych schematów zastępczych [1, 4]. Metoda ta wykorzystuje analogie pomiędzy obwodami elektrycznymi i cieplnymi. Podstawowe elementy obwodów elektrycznych takie jak rezystor i kondensator przyjmują nową interpretację fizyczną. Rezystory reprezentują opory cieplne poszczególnych elementów silnika, a kondensatory przedstawiają ich pojemności cieplne. Natomiast prądom jak i napięciom odpowiadają odpowiednio strumienie cieplne oraz różnice

---

\* Politechnika Opolska.

temperatur. Jako źródła ciepła w silniku przyjmuje się wszystkie straty jakie powstają w tym elektromechanicznym przetworniku.

Modele obwodowe charakteryzują się dużo mniejszym kosztem numerycznym niż modele polowe, przy czym nie wpływa to na zmniejszenie dokładności obliczeń cieplnych [3]. Dodatkowo do zalet modeli obwodowych należy także zaliczyć łatwość uwzględnienia w modelu cienkich warstw izolacyjnych, co stanowi niewątpliwie dużą trudność w modelach polowych.

W artykule przedstawiono zastępczy schemat cieplny silnika indukcyjnego. Za pomocą tego modelu można w prosty sposób wyznaczyć temperaturę w poszczególnych elementach silnika, a zwłaszcza uzwojenia w części połączeń czołowych oraz części żłobkowej.

## 2. SCHEMAT CIEPLNY SILNIKA

W pracy, jako obiekt badań przyjęto silnik trójfazowy produkcji zakładów Besel Sh80-6B o mocy 0.55kW. Na podstawie danych konstrukcyjnych analizowanej maszyny zbudowano model cieplny silnika (rys. 1). Każdemu elementowi silnika, przez który przepływa cząstkowy strumień ciepła przypisano określony opór cieplny ( $R_{th}$ ). W zbudowanym modelu przyjęto, że występuje jedynie zjawisko przewodzenia oraz konwekcji. Dlatego też, podczas wyznaczania poszczególnych oporów cieplnych skorzystano z dwóch zależności (1, 2). W przypadku, gdy przepływ ciepła zachodzi poprzez zjawisko przewodzenia  $R_{th}$  obliczono z zależności:

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

gdzie:  $h$  – droga przepływu strumienia cieplnego,  $\lambda$  – współczynnik przewodności cieplnej,  $S$  – powierzchnia, przez którą przenika strumień ciepła  
Natomiast w przypadku zjawiska konwekcji opór cieplny obliczono ze wzoru:

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

gdzie:  $\alpha$  – współczynnik oddawania ciepła

Dodatkowo każdemu elementowi silnika można przypisać poza oporem cieplnym także określoną pojemność cieplną, którą można obliczyć w następujący sposób:

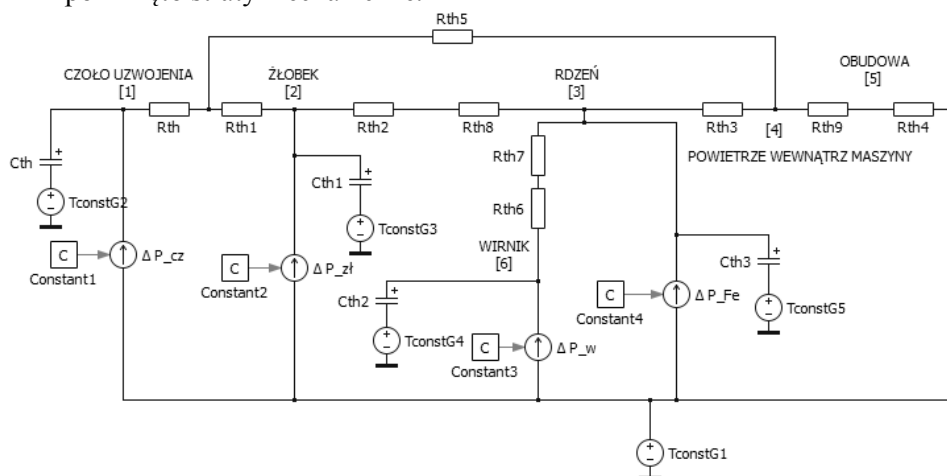
$$C_{th} = c_w \rho V \quad (3)$$

gdzie:  $c_w$  – ciepło właściwe materiału,  $\rho$  – gęstość materiału,  $V$  – objętość materiału.

W zbudowanym modelu cieplnym silnika przyjęto następujące założenia upraszczające [3]:

- maszyna jest symetryczna,
- elementy silnika zamodelowano jako pojedyncze węzły,
- pominięto zjawisko promieniowania,

- wewnątrz maszyny występuje jedynie zjawisko przewodzenia ciepła,
- ciepło odprowadzane jest z powierzchni silnika w drodze konwekcji,
- pominięto straty mechaniczne.



Rys. 1. Schemat cieplny silnika klatkowego zaimplementowany w PLECSie

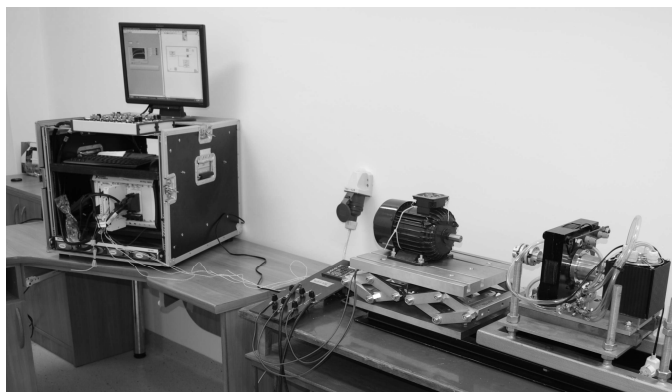
W schemacie cieplnym przedstawionym na rysunku 1 z racji pracującego wentylatora zamocowanego na wale silnika przyjęto, że ciepło z obudowy silnika jest odprowadzane poprzez konwekcje wymuszoną. Na podstawie literatury [5] oraz doświadczenia autorów przyjęto, że współczynnik oddawania ciepła jest stały dla wszystkich zewnętrznych powierzchni silnika i wynosi on  $\alpha=30$  [W/m<sup>2</sup>K]. Natomiast parametry materiałów jakich użyto do budowy silnika zostały przyjęte na podstawie danych producenta oraz literatury [2, 5].

### 3. WERYFIKACJA POMIAROWA

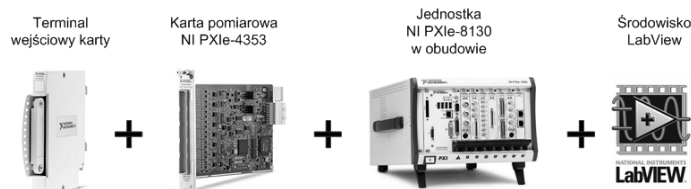
#### 3.1. Stanowisko pomiarowe

W celu zweryfikowania wyników symulacji przeprowadzono pomiary na rzeczywistym obiekcie. W tym celu zestawiono stanowisko pomiarowe zilustrowane na rysunku 2. Pomiaru temperatury dokonano za pomocą termopar typu K. Termopary te umieszczono w połączeniach czołowych uzwojenia silnika, w żłobku stojana oraz na obudowie.

System rejestracji (rys. 3) zmian temperatury zbudowano za pomocą środowiska LabView oraz jednostki NI PXIe-8130 wyposażonej w kartę pomiarową NI PXIe-4353. Dodatkowo, dzięki zastosowaniu terminalu NI TB-4353 o masywnej obudowie ograniczono wpływ wahań temperatury otoczenia na wyniki pomiarów.



Rys. 2. Zbudowane stanowisko pomiarowe



Rys. 3. Struktura systemu pomiarowego

### 3.2. Wyniki obliczeń i pomiarów

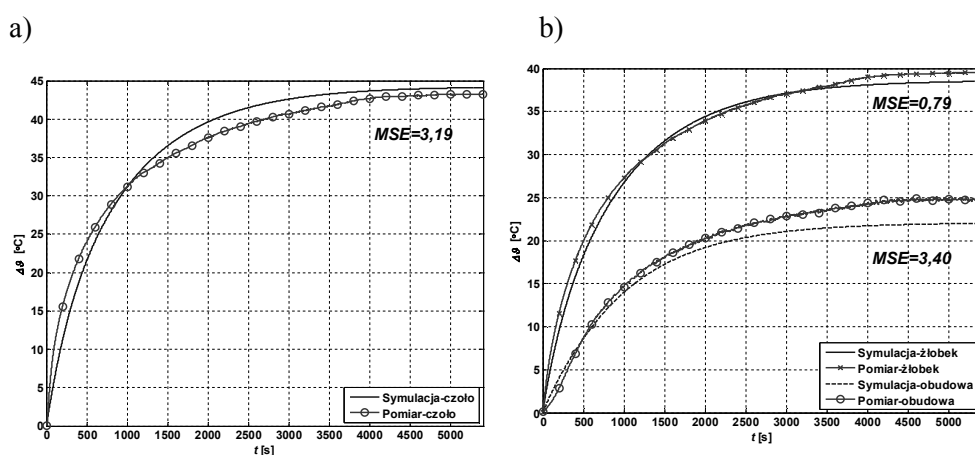
Na podstawie zbudowanego schematu cieplnego przeprowadzono szereg symulacji. Na rysunku 4 przedstawiono przyrosty temperatur jakie otrzymano z symulacji komputerowych, które zostały zweryfikowane pomiarowo. Jako miarę błędu pomiędzy obliczeniami a pomiarami przyjęto błąd średniokwadratowy ( $MSE$ ) zdefiniowany jako:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vartheta_{pi} - \vartheta_{oi})^2 \quad (4)$$

gdzie:  $n$  - liczba próbek,  $\vartheta_p$  - temperatura otrzymana z pomiarów,  $\vartheta_o$  - temperatura otrzymana z symulacji.

Rysunek 4.a przedstawia przyrost temperatury w połączeniach czołowych uzwojenia. Jest to punkt newralgiczny w maszynie, ze względu na jej obciążalność oraz żywotność. W punkcie tym, występuje najwyższa temperatura w silniku. Mając na uwadze zjawisko cieplnego starzenia się izolacji elektrycznej uzwojenia informacja o temperaturze jaka panuje w tym miejscu jest niezmiernie ważna. Błąd  $MSE$  na poziomie 3,19 pomiędzy symulacją komputerową a pomiarami można uznać za zadawalający. Natomiast na rysunku 4.b przedstawiono przyrosty

temperatur w części żłobkowej uzwojenia oraz obudowie silnika. Zbieżność wyników symulacji jakie otrzymano z tych dwóch punktów z pomiarami, także należy uznać za zadawalającą. Przyrost temperatury na obudowie cechuje się błędem  $MSE$  na poziomie 3,40. Błąd ten jest spowodowany trudnościami związanymi z wyznaczeniem prawidłowego współczynnika konwekcji. Wartość tego parametru w dużym stopniu zależy od ruchu powietrza wymuszonego pracą wentylatora silnika oraz geometrii samej obudowy maszyny. Dodatkowo współczynnik ten nie jest jednorodny dla całej obudowy silnika [1, 5].



Rys. 4. Przyrost temperatury w poszczególnych elementach silnika ( $T_0=22,5^\circ\text{C}$ )

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy analiza termiczna silnika w oparciu o zastępczy schemat cieplny charakteryzuje się małym kosztem numerycznym. Zbudowany model cechuje 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 maksymalną temperaturę uzwojenia. Wielkość ta jest niezmiernie ważna z punktu widzenia eksploatacji oraz obciążalności silników. Model ten można z powodzeniem zastosować jako jeden z elementów zabezpieczenia termicznego silnika. Metoda ta nie wymaga ingerencji w konstrukcję silnika, czyli montowania dodatkowych czujników temperatury. Ogranicza to więc dodatkowe koszty, co jest istotne w przypadku silników małej i średniej mocy.

## 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 (ICEM2006), September 2-5, 2006, Chania, Crete Island, Greece.
- [3] 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.
- [4] Krok R., Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego, Monografia, Gliwice, 2010.
- [5] Lefik M., Obliczenia cieplne silników indukcyjnych małej mocy metodami polowymi, Rozprawa doktorska, Łódź, 2011.
- [6] Milej W., Modele o parametrach zmiennych maszyn indukcyjnych, ich właściwości i zastosowanie, Rozprawa doktorska, Kraków, 2007.

### LUMPED-PARAMETER THERMAL MODEL OF A SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR

The article describes a method of thermal calculations of squirrel cage induction motor. Thermal model of the analysed motor was built on the basis of on the thermal network method and was implemented in MATLAB/SIMULINK environment by using an optional toolbox PLECS. A thermal model of a motor presented in the paper allows to determine temperatures of particular components of the machine, especially in end winding and slot part of the winding. Hence thermal phenomena which occur in electric motors are an important aspects while designing them and in their exploitation. Simulation results, which had been obtained, were verified by measurements performed on the physical model of the motor. Temperature measurements were made with support of the environment LabView and controller NI PXIe-8130 with card NI PXI-4353.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Praca powstała dzięki współfinansowaniu ze środków  
Europejskiego Funduszu Społecznego