

*mikrosilnik, indukcyjny,
jednofazowy, symulacja, pomiar*

Marcin J. WILK*
Krzysztof MAKOWSKI*

WERYFIKACJA POMIAROWA MODELU OBWODOWEGO JEDNOFAZOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO Z POMOCNICZYM UZWOJENIEM KONDENSATOROWYM

W artykule przedstawiono model obwodowy jednofazowego silnika indukcyjnego z pomocniczym uzwojeniem kondensatorowym opracowany w środowisku programu RMxpert. Dokonano oceny dokładności modelu porównując charakterystyki symulacyjne z pomierzonymi. Weryfikacji dokonano na przykładzie charakterystyki obciążenia oraz charakterystycznych punktów pracy silnika. Zastosowany model jednofazowego silnika indukcyjnego oparty na metodzie składowych symetrycznych pozwala uwzględnić wymiary geometryczne silnika jak i właściwości magnetyczne i elektryczne materiałów użytych do budowy silnika.

1. WPROWADZENIE

Jednofazowe silniki indukcyjne znajdują szerokie zastosowanie w napędach elektrycznych urządzeń gospodarstwa domowego, a także w pomocniczych napędach przemysłowych. Przez zastosowanie kondensatora w uzwojeniu pomocniczym uzyskuje się przesunięcie prądu w stosunku do prądu uzwojenia głównego ($\alpha \approx 90^\circ$). Dzięki temu w szczelinie powietrznej silnika wytwarzane jest pole magnetyczne wirujące, konieczne do powstania momentu rozruchowego. Ze względu na eliptyczny kształt pola wirującego moment rozruchowy jest stosunkowo niewielki i wynosi $(0,5-1) T_n$. W celu zwiększenia momentu rozruchowego stosuje się dodatkowy kondensator rozruchowy, który ze względu na generowanie strat jest wyłączany po rozruchu [1, 2].

Obiektem badań był jednofazowy silnik indukcyjny ogólnego przeznaczenia typu SEg 56-2A o mocy 90 W seryjnej produkcji fabryki BESEL, którego dane znamionowe przedstawiono w tabeli 1.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: krzysztof.makowski@pwr.wroc.pl, marcin.j.wilk@pwr.wroc.pl

Tabela. 1 Podstawowe dane katalogowe badanego silnika
Table 1. Basic data of tested motor

P	n	I_n	η	$\cos\varphi_n$	T_n	I_r/I_n	T_r/T_n	T_{\max}/T_n	C_r	J
[kW]	[rpm]	[A]	[%]	[-]	[N·m]	[-]	[-]	[-]	[μ F]	[kg·m ²]
0,09	2840	0,9	55	0,83	0,30	2,8	0,5	1,6	3	0,00007

2. OBWODOWY MODEL SYMULACYJNY SILNIKA

Do opracowania modelu symulacyjnego wykorzystano konstrukcję jednofazowego silnika indukcyjnego z pomocniczym uzwojeniem kondensatorowym typu SEg 56-2A. Stojan silnika składa się z dwóch niesymetrycznych uzwojeń głównego oraz pomocniczego, które rozłożono w 18 żłóbkach. Zastosowany w uzwojeniu pomocniczym kondensator pracy o pojemności 3 μ F pozwala na uzyskanie odpowiedniego momentu rozruchowego i znamionowego. Wirnik silnika stanowi klatka aluminiowa złożona z 11 prętów.

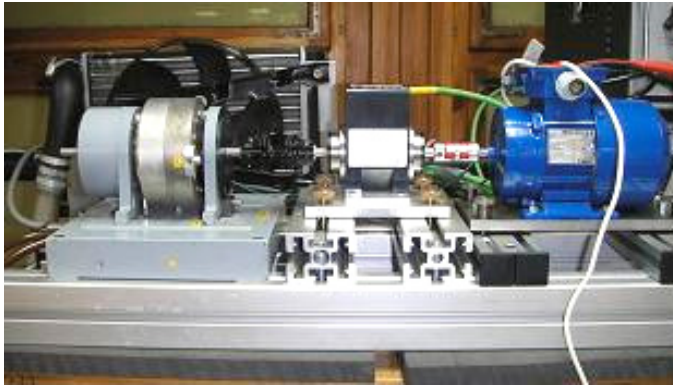
Na podstawie parametrów geometrycznych, elektrycznych oraz materiałowych przy wykorzystaniu modułu RMxprt pakietu Ansoft Maxwell opracowano model obwodowy badanej maszyny. Analiza jednofazowego silnika indukcyjnego prowadzona jest na podstawie metody składowych symetrycznych, w której zakłada się rozkład wypadkowego pola magnetycznego na dwie składowe zgodną oraz przeciwną. W wyniku, czego schemat zastępczy maszyny jest wypadkową dwóch maszyn wirujących w kierunku zgodnym i przeciwnym. Na podstawie wprowadzonych podstawowych danych konstrukcyjnych silnika obliczane są odpowiednie parametry oraz wyznaczane są charakterystyki pracy badanej maszyny [3, 4]. Dzięki uwzględnieniu charakterystyki magnesowania i stratności blach możliwe jest wyznaczenie strat występujących w rdzeniu silnika. Rzeczywista temperatura wirnika w stanie ustalonym pracy silnika jest wyższa niż temperatura stojana i dla badanego silnika wynosi ok. 125 °C, zatem pewną wadą zastosowanego modelu jest przyjęta stała temperatura pracy zarówno uzwojeń stojana jak i wirnika wynosząca 75 °C.

Program umożliwia wyznaczenie charakterystyk silnika w całym zakresie prędkości wirnika [0-3000 obr/min], jak również wartości zmiennych stanu silnika (moment obrotowy, prędkość obrotowa, prąd wypadkowy, sprawność, współczynnik mocy) dla charakterystycznych punktów pracy (znamionowego, biegu jałowego i zablokowanego wirnika).

3. WERYFIKACJA POMIAROWA MODELU SILNIKA

W celu oceny dokładności modelu obliczeniowego wykonano analogiczne pomiary silnika w zakresie pracy silnikowej na stanowisku (rys. 1) zawierającym:

- źródło zasilania wraz z autotransformatorem,
- układ badany: jednofazowy silnik indukcyjny–momentomierz–hamownica indukcyjna,
- układ pomiarowy:
 - pomiar napięcia zasilania – przetwornik typu LEM, napięcia kondensatora – sonda różnicowa,
 - pomiar prądu wypadkowego – przetwornik LEM,
 - pomiar momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej – przetwornik momentu Magtrol TM-306,
- wyświetlacz Magtrol 3410,
- komputer PC z kartą pomiarową NI-6123 500KHz/kanal,
- wirtualny przyrząd pomiarowy opracowany w środowisku Labview.



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego
Fig. 1. View of measurement setup of single-phase induction motor

Posługując się programem RMxpert, można wyznaczyć straty w rdzeniu magnetycznym silnika, przy czym całkowite straty obejmują straty histerezowe, wiropądowe oraz nadmiarowe. Straty całkowite są zdefiniowane, jako[5]:

$$p_v = k_c (fB_m)^2 + k_h fB_m^2 + k_e (fB_m)^{1,5} = K_1 B_m^2 + K_2 B_m^{1,5} \quad (1)$$

przy czym współczynniki K_1 oraz K_2 można zapisać, jako:

$$\begin{aligned} K_1 &= k_h f + k_c f^2 \\ K_2 &= k_e f^{1,5} \end{aligned} \quad (2)$$

Aby obliczyć współczynniki K_1 oraz K_2 należy zminimalizować wyrażenie:

$$f(K_1, K_2) = \sum [p_{vi} - (K_1 B_{mi}^2 + K_2 B_{mi}^{1,5})]^2 = \min \quad (3)$$

w którym:

P_{vi} , B_{mi} oznacza i -ty punkt charakterystyki stratności,

σ – konduktywność,

d – grubość pakietu blach,

f – częstotliwość, przy czym współczynniki strat histerezowych k_h oraz nadmiarowych k_e określono, jako:

$$k_h = \frac{K_1 - k_c f^2}{f} \quad (4a)$$

$$k_e = \frac{K_2}{f^{1,5}} \quad (4b)$$

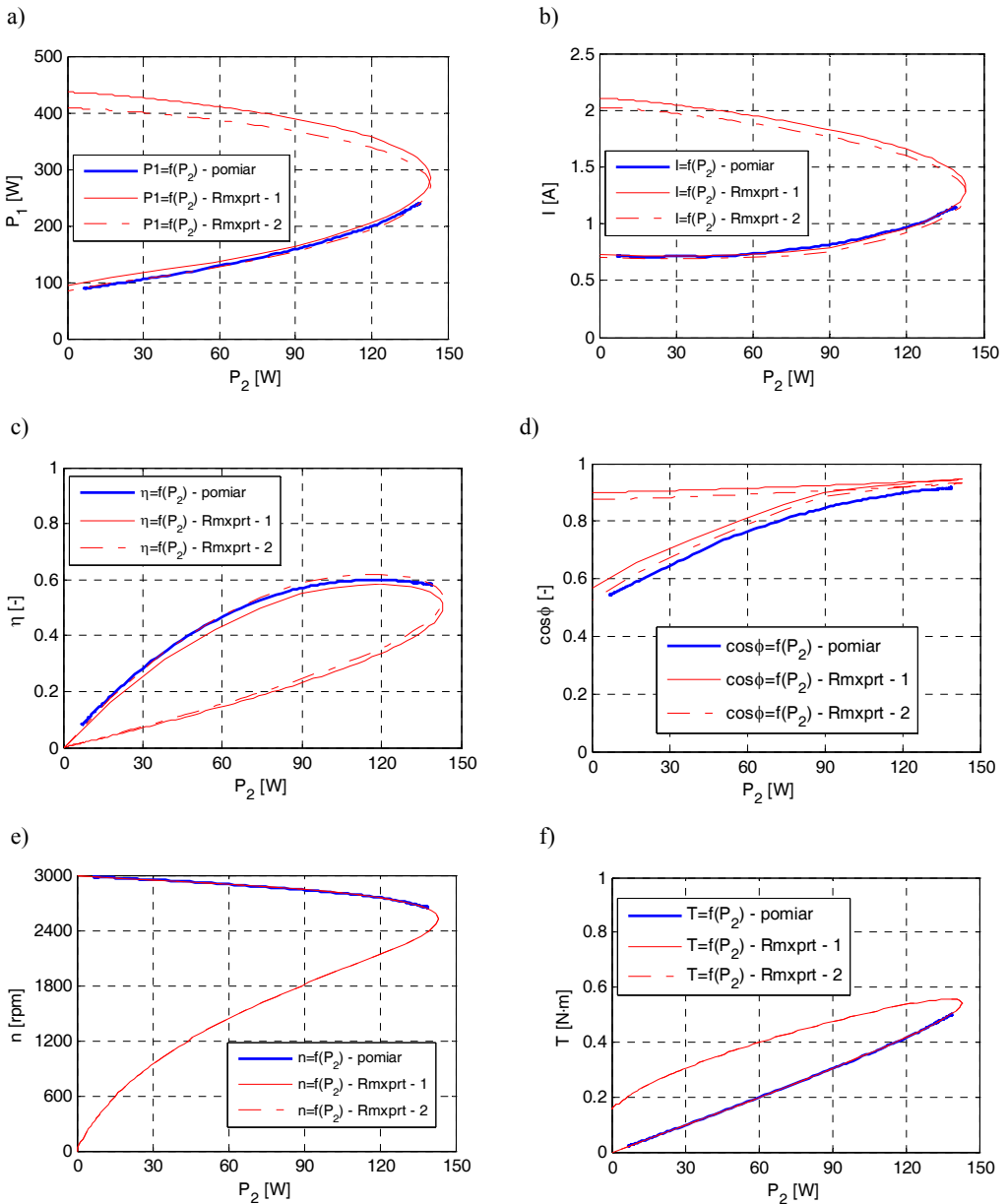
natomiast współczynnik strat wiroprowadowych k_c :

$$k_c = \pi^2 \sigma \frac{d^2}{6} \quad (4c).$$

Powyższe współczynniki strat zależą od rodzaju użytej blachy do pakietowania rdzenia magnetycznego, charakterystyki stratności, współczynnika pakietowania, konduktywności oraz częstotliwości. W przypadku blachy prądnicowej M600-50A współczynniki te wyniosły odpowiednio $K_h = 194 \text{ w/m}^3$, $K_c = 18,86 \text{ w/m}^3$, $K_e = 1,37 \text{ w/m}^3$ przy konduktywności wynoszącej $\sigma = 3,333 \cdot 10^6 \text{ S/m}$.

Pomiary charakterystyk badanego silnika przeprowadzono dla podstawowych stanów statycznych, czyli biegu jałowego, zablokowanego wirnika oraz obciążenia. W celu oceny dokładności modelu porównano charakterystyki obciążenia symulacyjne oraz otrzymane eksperymentalnie (rys. 2).

Porównania wyników obliczeń i pomiarów dla charakterystycznych punktów pracy silnika przedstawiono w tabeli 2. Charakterystyki obciążenia zmierzono w zakresie zmian mocy ok. 0–140 W, natomiast symulacyjnie wyznaczono dla całego zakresu zmian prędkości obrotowej (poślizgu). Zarówno prędkość obrotowa jak i moment wykazują dużą zgodność z pomiarem. Prąd pobierany wykazuje dużą zgodność w przypadku modelu uwzględniającego straty w rdzeniu magnetycznym natomiast w przypadku modelu bez strat prąd jest niższy ok. 3%. Moc pobierana przez silnik jest zgodna z modelem nieuwzględniającym strat w zakresie małych obciążeń (<60 W), natomiast moc w przypadku uwzględnia strat jest wyższa o ok. 4%. Również sprawność modelu 2 jest zgodna w zakresie małych obciążeń natomiast w znamionowym punkcie pracy różnica wynosi $\pm 2\%$. Uzyskany za pomocą modeli współczynnik mocy jest wyższy o 3–4% (4% dla modelu 1, 3% dla modelu 2) od zmierzonego współczynnika mocy silnika w całym zakresie pomiaru mocy.



Rys. 2. Charakterystyki obciążenia: a) moc pobierana, b) prąd pobierany, c) współczynnik mocy, d) sprawność, e) prędkość obrotowa, f) moment obrotowy badanego silnika

Fig. 2. Load characteristics: a) input power b) input current, c) power factor, d) efficiency, e) rotational speed and f) torque of tested motor

legenda: — RMxprt - 1 model uwzględniający straty w żelazie P_{FE}
 - - RMxprt - 2 model nie uwzględniający strat w żelazie P_{FE} , — pomiar

Tabela 2. Wartości zmiennych stanu silnika dla podstawowych prób statycznych
Table 2. Motor data for standard steady-state tests of motor

A. Moc znamionowa 90 W						
Wartość	Moment obrotowy	Prąd pobierany	Moc pobierana	Współczynnik mocy	Sprawność	Prędkość obrotowa
Jednostka	[N·m]	[A]	[W]	[-]	[-]	[rpm]
RMxp _{prt} – 1 (ΔP_{FE})	0,30 (0,304)	0,79	163,75	0,89	0,55	2848
RMxp _{prt} – 2		0,75	153,59	0,88	0,59	
Pomiar	0,30 (0,301)	0,80	158,20	0,85	0,57	2841
B. Próba biegu jałowego						
Wartość	Prąd pobierany	Moc czynna	Moc bierna	Współczynnik mocy	Prędkość obrotowa	
Jednostka	[A]	[W]	[Var]	[-]	[rpm]	
RMxp _{prt} – 1 (ΔP_{FE})	0,73	98,8	138,9	0,59	2993	
RMxp _{prt} – 2	0,70	88,7	135,4	0,55		
Pomiar	0,73	84,9	140,5	0,51	2980	
C. Próba zahamowanego wirnika						
Wartość	Prąd roruchowy	Moment rozruchowy	Moc czynna	Moc bierna	Współczynnik mocy	
Jednostka.	[A]	[N·m]	[W]	[Var]	[-]	
RMxp _{prt} – 1 (ΔP_{FE})	2,11	0,154	436,1	234,2	0,90	
RMxp _{prt} – 2	2,03		407,8	225,3	0,88	
Pomiar	2,01	0,169	421,5	210,8	0,89	

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Moduł RMxp_{prt} wykorzystany do budowy modelu obwodowego jednofazowego silnika indukcyjnego z pomocniczym uzwojeniem kondensatorowym pozwala uwzględnić wymiary maszyny oraz właściwości magnetyczne i elektryczne materiałów użytych do budowy silnika. W celu oceny dokładności modelu symulacyjnego silnika porównano charakterystyki obciążenia wyznaczone eksperymentalnie oraz symulacyjnie. Dokonano również analogicznego porównania w charakterystycznych punktach pracy silnika tj. znamionowym, rozruchowym oraz biegu jałowego. W zakresie stabilnej pracy silnika oba modele symulacyjne wykazują dużą zgodność z pomiarem, niewielkie rozbieżności wynikają m.in. z różnych warunków symulacji i pomiaru. W warunkach rzeczywistych występowały zmiany temperatury silnika, jak również, zastosowany układ zasilania powodował zniekształcenie napięcia zasilającego, natomiast dla symulacji przyjęto stałą temperaturę oraz sinusoidalne napięcie za-

silania o częstotliwości 50 Hz. Ze względu na krótki czas obliczeń model może być wykorzystany do parametrycznych badań wrażliwości zmiennych parametrów, jakimi są pojemność kondensatora pracy oraz wymiary pręta wirnika w procesie optymalizacji silnika.

LITERATURA

- [1] MAKOWSKI K., WILK M.J., *Symulacja polowo-obwodowa charakterystyk pracy jednofazowego silnika indukcyjnego z pomocniczym uzwojeniem kondensatorowym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, R. 86, nr 4, s. 213–216.
- [2] YEADON W.H., YEADON A.W., *Handbook of small electric motors*, McGraw-Hill, 2001.
- [3] BOLDEA I., NASAR S.A., *Induction machine design handbook*, CRC Press, 2010.
- [4] Maxwell Online Help, Maxwell V12.1.
- [5] BERTOTTI G., BOGLIETTI A., CHIAMPI M., CHIARABAGLIO D., FIORILLO F., LAZZARI M., *An improved estimation of iron losses in rotating electrical machines*, IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 27, No. 6, November 1991, pp. 5007–5009.

EXPERIMENTAL VALIDATION OF CIRCUIT MODEL OF A SINGLE-PHASE CAPACITOR INDUCTION MOTOR

The paper presents the analytical model of single-phase capacitor induction motor implemented in RMxpert software. Evaluation of model accuracy has been made by comparison of calculated curves for nominal load condition with experimental one. Verification was made by example of load characteristics and for characteristic operation points of the motor. Applied model of single-phase capacitor induction motor based on method of symmetrical components takes into account geometrical dimensions of the motor and the electric and magnetic properties of materials used to build motor.