

*błąd graniczny, współczynnik sprawności, sprawność,
estymacja współczynnika sprawności, silnik klatkowy*

Radosław FIGURA*, Leszek SZYCHTA*

WPLYW BŁĘDÓW POMIAROWYCH NA CHARAKTERYSTYKĘ ESTYMACJI WSPÓŁCZYNNIKA SPRAWNOŚCI SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO

W artykule zaprezentowano dwie metody estymacji współczynnika sprawności silnika klatkowego w trakcie jego pracy. Jako pierwsza z metod została przedstawiona metoda NAGT (*Non-intrusive air gap torque*) zaczerpnięta z literatury zagranicznej. Druga metoda to zmodyfikowana przez autorów metoda NAGT. Dla obydwu metod zostały wyznaczone błędy graniczne określone metodą różniczki zupełnej. Zaprezentowane zostały wyniki estymacji współczynnika sprawności z wykorzystaniem omówionych metod dla czterech trójfazowych silników indukcyjnych klatkowych małej mocy. Dokonano porównania otrzymanych wyników oraz omówiono wpływ wprowadzonych modyfikacji na skuteczność metody estymacji współczynnika sprawności silnika.

1. WSTĘP

Zwiększanie efektywności energetycznej procesów przemysłowych jest zagadnieniem wciąż rozwijanym i analizowanym przez placówki naukowe i wdrożeniowe. Około 69% energii elektrycznej w przemyśle zużywają silniki elektryczne, z czego najliczniejszą grupę stanowią silniki indukcyjne klatkowe zasilane z sieci niskiego napięcia [1]. W celu zmniejszenia energochłonności procesów przemysłowych wprowadzane są coraz bardziej rygorystyczne normy dotyczące efektywności przetwarzania energii w silnikach elektrycznych [2]. Wprowadzanie nowych technologii i materiałów wykorzystywanych do produkcji silników elektrycznych w celu zwiększenia wartości współczynnika sprawności znamionowej może nie wystarczyć w przypadkach, gdy system sterowania będzie dopuszczał przetwarzanie energii w nieefektywnych obszarach pracy silnika. Dlatego energooszczędne systemy sterowania powinny posiadać informację o współczynniku sprawności silnika w trakcie jego pracy. Istnieje

* Wydział Transportu i Elektrotechniki, Politechnika Radomska im. Kazimierza Pułaskiego, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, r.figura@pr.radom.pl

wiele metod estymacji współczynnika sprawności silnika. Wśród nich można wyróżnić metody estymacji bazujące na pomiarach wielkości elektrycznych po stronie uzwojeń stojana maszyny. W niniejszym artykule wyznaczono błędy graniczne wprowadzane przez przyrządy pomiarowe oraz porównano metody estymacji współczynnika sprawności silnika indukcyjnego klatkowego.

2. WYBRANE METODY ESTYMACJI WSPÓŁCZYNNIKA SPRAWNOŚCI SILNIKA KLATKOWEGO

Wpływ błędów pomiarowych wykonano dla metod umożliwiających estymację współczynnika sprawności η silnika w trakcie jego pracy, bez konieczności mechanicznej ingerencji poprzez instalację na wale silnika dodatkowych przyrządów pomiarowych. Wybrane metody estymacji oparte są o wyznaczanie momentu elektromagnetycznego w szczeliny powietrznej silnika.

2.1. METODA NAGT

Metodę NAGT (*Non-intrusive air-gap torque method*) – bezinwazyjnego wyznaczania współczynnika sprawności η pracującego silnika, zaprezentowano w pracach [3, 4]. Metoda ta jest modyfikacją metody AGT, która w pierwszej wersji stosowana była do wyznaczania momentu T_{ag} w szczeliny powietrznej maszyn synchronicznych [5].

Na podstawie równania napięciowego silnika sformułowanego dla stojana w postaci wektorowej oraz iloczynu wektorowego strumienia i prądu stojana wyznaczono wartość momentu elektromagnetycznego t_{ag} zgodnie z zależnością:

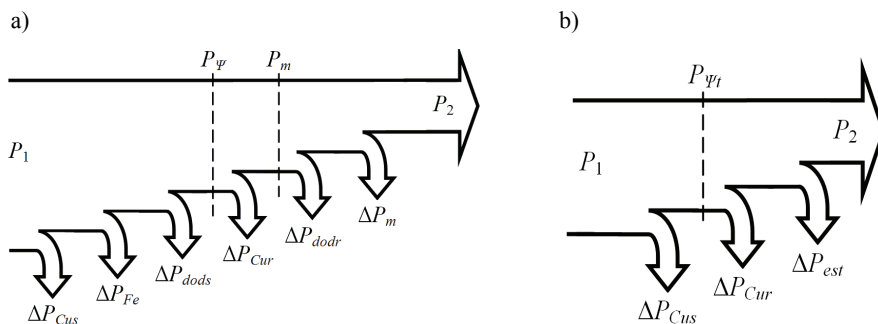
$$t_{ag} = \frac{\sqrt{3}p}{3} \left[\begin{aligned} &(i_U - i_V) \int (u_{WU} + R_s(2i_U + i_V)) dt \\ &+ (2i_U + i_V) \int (u_{UV} + R_s(i_U - i_V)) dt \end{aligned} \right] \quad (1)$$

Na podstawie wartości chwilowej momentu t_{ag} wyznaczono wartość średnią momentu T_{ag} . Wartości momentu elektromagnetycznego T_{ag} i prędkości obrotowej n_s wirowania pola magnetycznego umożliwia określenie mocy P_ψ (rys.1) pola wirującego w silniku zgodnie z zależnością:

$$P_\psi = \frac{2\pi T_{ag} n_s}{60} \quad (2)$$

Na podstawie podziału strat mocy silnika indukcyjnego (rys. 1), przyjmując, że $\Delta P_{dodr} = 1,8\% P_2$ [3, 4], $\Delta P_m = 1,2\% P_2$ [3, 4], $\Delta P_{Cur} = s P_\psi$, wynika, że moc użyteczną P_2 można określić jako:

$$P_2 = \frac{\pi}{30,9} T_{ag} n \quad (3)$$



Rys. 1. Uproszczony podział strat mocy w silniku indukcyjnym klatkowym dla:
a) metody NAGT, b) zmodyfikowanej metody NAGT

Fig. 1. A simplified spread of power losses across a squirrel-cage induction motor for:
a) NAGT method, b) modified of NAGT method

Współczynnik sprawności η_H dla silnika indukcyjnego wyznaczony został jako iloraz mocy użytecznej do mocy czynnej pobranej przez silnik.

2.2. ZMODYFIKOWANA METODA NAGT

Na podstawie metody NAGT opracowano zmodyfikowaną metodę NAGT do estymacji współczynnika sprawności silników indukcyjnych klatkowych o mocach do 2,2 kW. Modyfikacje dotyczyły głównie wprowadzenia strat estymowanych ΔP_{est} zależnych od prędkości obrotowej n wirnika, uwzględniających straty ΔP_{Fe} występujące w rdzeniu stojana. Uproszczony podział strat mocy dla zmodyfikowanej metody NAGT (rys. 1b) zawiera dwa rodzaje strat mocy: straty ΔP_{Cus} w uzwojeniu stojana, straty ΔP_{Cur} w uzwojeniu wirnika oraz straty estymowane ΔP_{est} . Straty estymowane ΔP_{est} zostały określone jako suma strat ΔP_{Fe} w rdzeniu stojana, dodatkowych strat obciążeniowych ΔP_{dods} stojana, strat mechanicznych ΔP_m oraz strat dodatkowych ΔP_{dodr} występujących w wirniku:

$$\Delta P_{est} = \frac{n}{n_s} (\Delta P_{Fes} + \Delta P_{dods}) + \Delta P_{dodr} + \Delta P_m \quad (4)$$

Ze względu na rozbudowany aparat matematyczny określający straty cząstkowe, zastosowano wyznaczanie strat estymowanych ΔP_{est} jako funkcję prędkości obrotowej n [10, 11]:

$$\Delta P_{est}^* = \beta (n^*)^\alpha \quad (5)$$

gdzie: ΔP_{est}^* – względna wartość strat estymowanych; n^* – względna wartość prędkości obrotowej wirnika; β – współczynnik korekcyjny; α – wykładnik potęgi, gdzie $\alpha \in \mathbb{R}$.

Współczynnik sprawności η_m silnika indukcyjnego w omawianej metodzie określony jest zgodnie z zależnością:

$$\eta_m = \frac{P_1 - \Delta P_{Cus} - \Delta P_{est}}{P_1} \quad (6)$$

3. WPŁYW BŁĘDÓW POMIAROWYCH NA ESTYMACJĘ WSPÓŁCZYNNIKA SPRAWNOŚCI

Dokładność metody NAGT oraz zmodyfikowanej metody NAGT zależy od wprowadzonych założeń i uproszczeń oraz od dokładności zastosowanych przyrządów pomiarowych. Obydwie metody opierają się na pomiarze wartości chwilowych dwóch napięć przewodowych (u_{UV} , u_{WU}), dwóch prądów fazowych (i_U , i_V), pomiarze wartości rezystancji R_s uzwojenia stojana, pomiarze częstotliwości f napięcia zasilającego silnik oraz estymacji prędkości obrotowej n . Dla obydwu metod wyznaczono błąd graniczny δ_g estymowanej wartości współczynnika sprawności silnika. Błąd ten wyznaczono metodą różniczki zupełnej na podstawie klasy dokładności przyrządów pomiarowych.

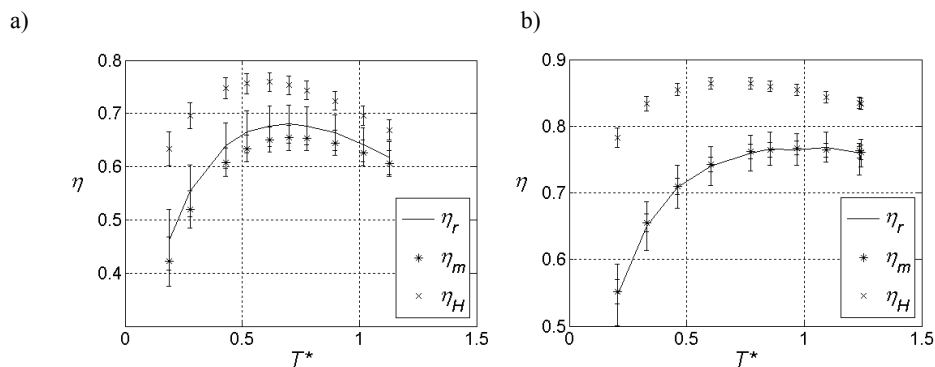
Obliczenia wykonano dla czterech silników (tab.1) oraz dla częstotliwości $f = 25$ Hz i $f = 50$ Hz napięcia zasilającego. Otrzymane wyniki porównano z wartością współczynnika sprawności η_r (rys. 3) zmierzoną metodą bezpośrednią zgodnie z normą PN-EN 60034-2-1-2010 [12]. Wartość współczynnika sprawności η_r nazwano wartością rzeczywistą.

Tabela 1. Dane znamionowe badanych silników
Table 1. Rating data of tested motors

L.p.	Producent	P_N [kW]	U_N [V]	I_N [A]	n_N [obr/min]	cos [-]	η [-]
1	TAMEL	1,50	380	3,7	1420	0,80	0,77
2	INDUKTA	2,20	400	5,0	2870	0,77	0,82
3	BESEL	0,75	400	2,7	670	0,61	0,66
4	BESEL	1,50	400	4,2	900	0,70	0,71

Na rysunku 2 zilustrowano estymowane wartości współczynników sprawności η_H i η_m oraz wartość rzeczywistą współczynnika sprawności η_r . Przy każdym punkcie naniesiono słupki błędów granicznych wynikających z klasy zastosowanych przyrządów pomiarowych. Z wykonanych obliczeń wynika, że rząd wielkości błędu granicznego δ_{gH} dla metody NAGT, jest porównywalny z błędem granicznym δ_{gm} zmodyfikowanej metody NAGT. Największą wartość błędu granicznego $\delta_{gH} = 6,5\%$, odnotowano dla silnika nr 3 przy częstotliwości $f = 25$ Hz napięcia zasilającego. W tym samym przypadku błąd graniczny δ_{gm} wyniósł 10%, a błąd pomiaru wartości

rzeczywistej oszacowany został na poziomie 7,5%. Tak wysokie wartości błędów występują przy wartościach względnego momentu T^* poniżej 0,5.



Rys. 2. Charakterystyka współczynnika sprawności η w funkcji względnego momentu T^* występującego na wale silnika nr 1: a) dla $f = 25$ Hz, b) dla $f = 50$ Hz

Fig. 2. Efficiency η as a function of relative shaft torque T^* of motor no 1:

a) $f = 25$ Hz, b) $f = 50$ Hz

Spowodowane było to zbyt wysokimi zakresami pomiarowymi urządzeń w stosunku do wartości wielkości mierzonych takich jak prąd I_s uzwojenia stojana czy moment T na wale silnika.

Przyjęte w metodzie NAGT wartości strat mechanicznych oraz dodatkowych strat obciążeniowych [3, 4] powodują, że estymowane wartości współczynnika sprawności η_H są zawyżone w stosunku do rzeczywistego współczynnika sprawności η_r . Metoda NAGT może znaleźć zastosowanie tylko dla konkretnych typów oraz producentów silników, przytoczonych w publikacjach [3, 4]. Metoda nie dała satysfakcjonujących wyników w przypadku badanych silników (tab.1). Wprowadzenie modyfikacji do metody NAGT polegającej na określeniu strat estymowanych w funkcji prędkości obrotowej spowodowała, że słupki błędów wartości estymowanej współczynnika sprawności η_m oraz słupki błędów wartości rzeczywistego współczynnika sprawności η_r nachodzą na siebie wzajemnie.

4. WNIOSKI

Wykonane badania laboratoryjne umożliwiły porównanie omówionych metod estymacji współczynnika sprawności silnika indukcyjnego klatkowego. Wykorzystując te same dane pomiarowe otrzymano różne błędy graniczne dla każdej z metod estymacji. Powstałe różnice spowodowane są przyjęciem odmiennych założeń. W przypadku metody NAGT błąd graniczny δ_{gH} jest mniejszy w porównaniu z błędem granicznym δ_{gm} zmodyfikowanej metody NAGT. Mniejszy błąd pomiarowy nie przekłada się jed-

nak na mniejszy błąd estymacji współczynnika sprawności. Zmodyfikowana metoda NAGT charakteryzuje się większym błędem pomiarowym δ_{gm} w stosunku do błędu δ_{gH} , jednak w przypadku badanych silników błąd estymacji współczynnika sprawności jest zdecydowanie mniejszy. W celu dalszej weryfikacji zmodyfikowanej metody NAGT przewiduje się kontynuację badań silników indukcyjnych.

LITERATURA

- [1] CORINO S., ROMERO E., MANTILLA L.F., *How the efficiency of induction motor is measured?*, Department of Electrical Engineering and Energy, E.T.S.I.I. y T., Universidad de Cantabria.
- [2] PN-EN 60034-30, *Maszyny elektryczne wirujące - Część 30, Klasy sprawności silników indukcyjnych klatkowych trójfazowych jednobiegowych (kod IE)*, PKN, Warszawa 2009.
- [3] LU B., HABETLER T.G., HARLEY R.G., *A Survey of Efficiency Estimation Methods of In-Service Induction Motors with Considerations of Condition Monitoring Requirements*, Electric Machines and Drives, IEEE International Conference, 2005.
- [4] LU B., HABETLER T.G., HARLEY R.G., *System and method to determine electric motor efficiency nonintrusively*, US Patent No.: US 8010318 B2, 08.2011.
- [5] KUECK J.D., *Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition*, Oak Ridge Nat. Lab., TN, Pulp and Paper Industry Technical Conference, Conference Record of 1998 Annual, Portland, ME, USA, 1998.
- [6] PLAMITZER A.M., *Maszyny elektryczne*, WNT, Warszawa 1982.
- [7] PEŁCZEWSKI W., KRYNKE M., *Metoda zmiennych stanu w analizie dynamiki układów napędowych*, WNT, Warszawa 1984.
- [8] SZCZEPANIAK C., KRAHEL A., OGOŃSKA-SCHWEITZER E., *Pomiar rezystancji uzwojeń maszyn indukcyjnych podczas pracy*, Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 232, 2007.
- [9] CZARNECKI L., *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [10] FIGURA R., SZYCHTA E., SZYCHTA L., *In-Service Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor*, Electronics and Electrical Engineering, 8/2011 (114), Kaunas, 2011.
- [11] FIGURA R., SZYCHTA L., *Estymacja sprawności silnika indukcyjnego klatkowego pracującego w zespole pompowym*, Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne nr 92/2011, BOBRME Komel, Katowice 2011.
- [12] PN-EN 60034-2-1 *Maszyny elektryczne wirujące – Część 2-1: Znormalizowane metody wyznaczania strat i sprawności na podstawie badań*, PKN, Warszawa 2010.

THE MEASUREMENT ERROR EFFECT IN THE EFFICIENCY ESTIMATION OF SQUIRREL-CAGE MOTOR

Two non-intrusive methods of estimating efficiency of a squirrel-cage induction motor are presented. The first method (Non-intrusive air gap torque) was taken from foreign literature. The second method is modified by the authors of NAGT method. Both are based on determination of electromagnetic torque in the motor's air gap. The error limits are determined for both methods by the total differential method. Estimation results are presented using the efficiency factor. Boundary errors of these methods and results of efficiency estimations are compared to those measured directly in accordance with a reference standard.