

Tadeusz Glinka, Adam Decner

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

POMIAR CZĘSTOTLIWOŚCI PRĄDU WIRNIKA I OBLICZENIE PARAMETRÓW PRACY SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO

ROTOR CURRENT FREQUENCY MEASUREMENT AND CALCULATION OF SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR OPERATING PARAMETERS

Streszczenie: Silniki indukcyjne klatkowe, zasilane wprost z sieci elektroenergetycznej, nie mają pomiaru prędkości obrotowej. Istnieje możliwość pomiaru częstotliwości f_2 prądu wirnika. Pomiar bazuje na strumieniu osiowym czoł uzwojeń wirnika $\Phi_{\sigma 2}$ i stojana $\Phi_{\sigma 1}$. Strumień $\Phi_{\sigma 1}$ ma podstawową harmoniczną $f_1 = 50$ Hz, a strumień $\Phi_{\sigma 2}$ częstotliwość f_2 . Cewkę, o dużej liczbie zwojów, przykłada się do tarczy łożyskowej koncentrycznie z osią wału silnika. Za pomocą cewki mierzone jest napięcie e indukowane przez strumień ($\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1}$). Składową napięcia $e_{\sigma 2}$ proporcjonalną do strumienia $\Phi_{\sigma 2}$ wirnika uzyskuje się z filtru dolnoprzepustowego. Z przebiegu $e_{\sigma 2}$ odczytywany jest okres τ_2 i obliczana jest częstotliwość f_2 . Bazując na parametrach znamionowych silnika i częstotliwości f_2 obliczane są parametry na wale silnika: prędkość obrotową n , moment T i moc P .

Abstract: Squirrel-cage induction motors, powered directly from the power grid, do not measure the rotational speed. It is possible to measure the frequency f_2 of the rotor current. The measurement is based on the axial flux of the winding fronts of the rotor $\Phi_{\sigma 2}$ and the stator $\Phi_{\sigma 1}$. The flux $\Phi_{\sigma 1}$ has the fundamental harmonic $f_1 = 50$ Hz, and the flux $\Phi_{\sigma 2}$ has the frequency f_2 . A coil with a large number of turns is applied to the bearing shield concentrically with the axis of the motor shaft. The coil measures the voltage e induced by the flux ($\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1}$). The voltage component $e_{\sigma 2}$ proportional to the rotor flux $\Phi_{\sigma 2}$ is obtained from the low-pass filter. The period τ_2 is read from the waveform $e_{\sigma 2}$ and the frequency f_2 is calculated. Based on the nominal parameters of the motor and the frequency f_2 , the parameters on the motor shaft are calculated: rotational speed n , torque T and power P .

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny klatkowy, pomiar napięcia indukowanego przez strumień osiowy, częstotliwość prądu wirnika, parametry na wale silnika

Keywords: squirrel-cage induction motor, measurement of the voltage induced by axial flux, rotor current frequency, parameters on the motor shaft

1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe zasilane bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej, zainstalowane w różnych układach napędowych, pracą przy stałej prędkości obrotowej i nie mają pomiaru prędkości obrotowej, gdyż pomiar ten jest zbędny. Natomiast w różnych pomiarach testowych, np. maszyny roboczej zainstalowanej na stanowisku pracy napędzanej silnikiem, zachodzi potrzeba określenia: prędkości obrotowej n , momentu T i mocy P maszyny roboczej. Największy problem stwarza bezpośredni pomiar momentu. Jeśli jest dostęp do wału, wówczas na wale nakleja się tensometry i instaluje układ pomiaru i transmisji sygnału z wału do aparatury pomiarowej. Pozostaje do rozwiązania cechowanie układu pomiarowego.

W artykule [1] autorzy proponują bezkontaktowe wyznaczenie momentu obciążenia silnika indukcyjnego na stanowisku pracy w oparciu o pomiar strumienia osiowego. Na tarczy łożyskowej zamocowali cewkę pomiarową i na Stacji prób zmierzili charakterystykę wartości skutecznej napięcia indukowanego

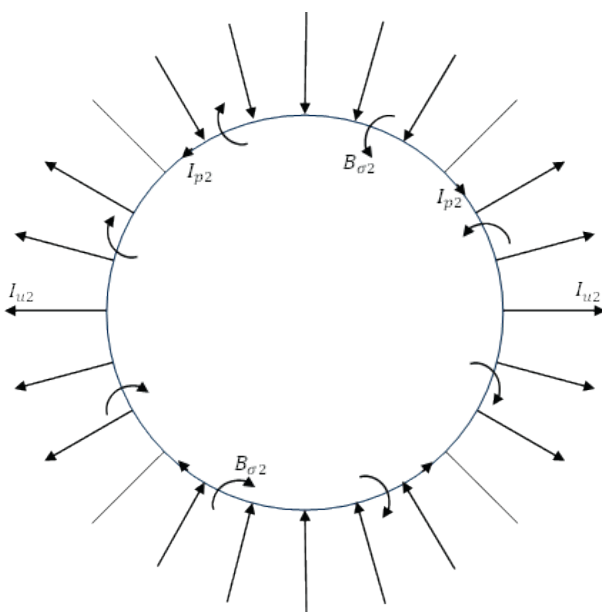
wanego w cewce pomiarowej w funkcji moment obciążenia silnika. Charakterystyka ta jest zbliżona do linii prostej. Tym samym wykazali, że metoda bezkontaktowa pomiaru momentu obciążenia silników może być aplikowana w pomiarach na stanowiskach pracy silników, w tym także w pomiarach realizowanych on-line. Niedogodnością tej metody pomiaru momentu jest, że cewka musi być wcześniej na stałe zamocowana na tarczy łożyskowej, a charakterystykę wzorcową, napięcia w funkcji momentu, należy wcześniej wyznaczyć na stacji prób.

W tym artykule proponujemy bezkontaktowy pomiar częstotliwości prądu wirnika. Pomiar taki można wykonywać na stanowiskach pracy silników indukcyjnych klatkowych. Znając częstotliwość prądu w uzwojeniu wirnika i dane znamionowe silnika, można określić bieżące parametry obciążenia silnika: prędkość obrotową, moment i moc. Do pomiaru częstotliwości prądu wirnika wykorzystamy cewkę pomiarową strumienia osiowego przykładaną na czas pomiaru do zewnętrznej strony tarczy łożysko-

wej. Cewka nie musi być zamontowana na stałe i nie wymaga cechowania.

2. Pomiar częstotliwości prądu wirnika

Wirnik silnika indukcyjnego klatkowego, po obydwóch stronach jarzma, ma pierścienie zawierające pręty uzwojenia. Oś pierścieni pokrywa się z osią wału silnika. W czasie pracy silnika w pierścieniach płynie prąd I_{p2} , którego wartość na obwodzie zmienia się schodkowo, od pręta do pręta, według sinusoidy. Kierunek przepływu prądu pod sąsiednimi biegunami jest przeciwny (Rys. 1). Prąd I_{p2} w pierścieniu wiruje, względem jarzma wirnika, z prędkością kątową $\omega_2 = 2\pi f_2$.



Rys. 1. Uzwojenie wirnika o liczbie par biegunów $p = 2$, prądy I_{u2} w prętach uzwojenia wirnika powodują, że prąd I_{p2} na obwodzie pierścienia zmienia się schodkowo

Jak widać z rysunku 1 prąd w pierścieniu tylko na $1/2p = 1/4$ obwodu pierścienia płynie w jednym kierunku, a pod sąsiednimi biegunami ma kierunek przeciwny. Prąd I_{p2} wzbudza wokół łuku pręta $1/2p$ indukcję $B_{\sigma 2}$. Kierunek indukcji $B_{\sigma 2}$ pod sąsiednimi biegunami jest przeciwny. Rozkład indukcji $B_{\sigma 2}$ w przestrzeni tarczy łożyskowej tworzy strumień rozproszenia pierścienia $\Phi_{\sigma 2}$. Sumaryczny prąd pierścienia jest równy zero i nie wzbudza strumienia. Prąd pierścienia I_{p2} i strumień rozproszenia $\Phi_{\sigma 2}$ zmieniają się z częstotliwością f_2 . Strumień rozproszenia $\Phi_{\sigma 2}$ oprócz podstawowej częstotliwości f_2 ma składową o częstotliwości żłobkowej f_{z2} , wynika to ze schodkowej zmiany prądu pod biegunami.

W przestrzeni między jarzmem wirnika i tarczami łożyskowymi jest także strumień rozproszenia $\Phi_{\sigma 1}$ czoł uzwojenia stojana, jest to strumień wirujący z

prędkością kątową $\omega_1 = 2\pi p f_1$. Strumień rozproszenia $\Phi_{\sigma 1}$ oprócz podstawowej częstotliwości f_1 ma składową o częstotliwości żłobkowej stojana f_{z1} . Ponadto strumienie $\Phi_{\sigma 2}$, $\Phi_{\sigma 1}$ zawierają składowe determinowane asymetrią uzwojenia wirnika (np. przy uszkodzonych połączeniach prętów z pierścieniami) i składowe reluktancyjne wynikające z tolerancji technologicznych wykonania obwodu magnetycznego maszyny. Strumienie $\Phi_{\sigma 2}$, $\Phi_{\sigma 1}$ mają zatem swoje harmoniczne. Z rozważań wynika, że strumień $\Phi_{\sigma 2} \ll \Phi_{\sigma 1}$, a częstotliwość jego zmiany $f_2 < 1$ Hz, gdyż jest to częstotliwość poślizgowa $f_2 = s f_1$ wirnika względem strumienia wirującego stojana. Strumień sumaryczny ($\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1}$) wychodzi częściowo na zewnątrz tarcz łożyskowych i względem cewki pomiarowej, przyłożonej do tarczy łożyskowej, jest strumieniem zmiennym i indukuje w cewce napięcie e . Sam strumień $\Phi_{\sigma 2}$, z uwagi na małą wartość i bardzo małą częstotliwość, jest praktycznie niemierzalny. W znamionowych warunkach pracy silnika poślizg $s_N \approx (0,005 \div 0,010)$, a częstotliwość $f_2 \approx (0,025 \div 0,5)$ Hz. Dzięki temu, że strumień $\Phi_{\sigma 2}$ moduluje strumień $\Phi_{\sigma 1}$, który ma większą wartość i częstotliwość $f_1 = 50$ Hz można mierzyć strumień $\Phi_{\sigma 2}$. W cewce pomiarowej o liczbie zwojów $N > 1000$ strumień ($\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1}$) indukuje napięcie:

$$e = N \frac{d(\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1})}{dt} \quad (1)$$

W przebiegu e zawarta jest składowa napięcia:

$$e_{\sigma 2} = N \frac{d\Phi_{\sigma 2}}{dt} \quad (2)$$

z której określamy częstotliwości f_2 .

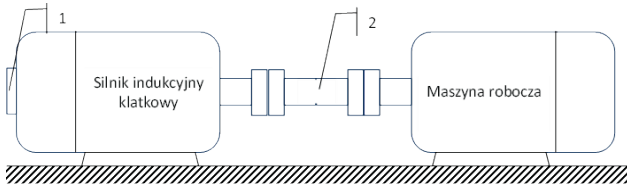
Napięcie e indukowane w cewce pomiarowej jest zmodulowane napięciem $e_{\sigma 2}$ i dzięki temu można zmierzyć częstotliwość modulacji f_2 . Najprostszą metodą pomiaru jest przyłączyć do cewki pomiarowej magnetoelektryczny woltomierz prądu stałego z zerem w środku skali. Wskazówka woltomierza będzie się wahać z częstotliwością f_2 . Mierzac stoperem np. czas k okresów τ_2 określimy stosunkowo dokładnie częstotliwość:

$$f_2 = \frac{k}{(k\tau_2)} \quad (3)$$

Można także wykorzystać filtr dolnoprzepustowy napięcia e i w ten sposób uzyskać przebieg napięcia $e_{\sigma 2}$.

Częstotliwość f_2 umożliwia, bazując na parametrach znamionowych silnika, obliczyć parametry na wale: prędkość obrotową n , moment T i moc P silnika.

Na rysunku 2 przedstawiono stanowisko pomiarowe napięcia e indukowanego przez strumień osiowy ($\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1}$) w cewce pomiarowej przyłożonej do tar-

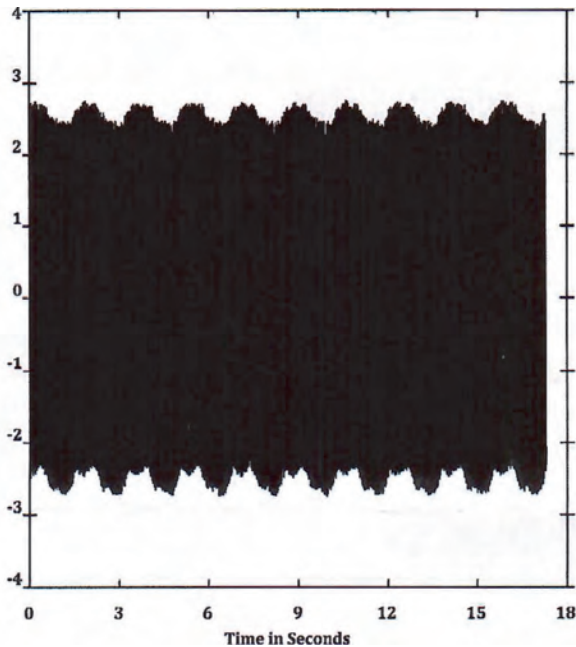


Rys. 2. Bezdotykowy pomiar napięcia e indukowanego w cewce 1 przez strumień osiowy i pomiar momentu na wale 2

czy przeciwnapędowej silnika indukcyjnego klatkowego. Na wale silnika lub maszyny roboczej, jeśli jest to możliwe, można zainstalować tensometryczny układ pomiaru momentu T i wykorzystując częstotliwość f_2 wyskalować go:

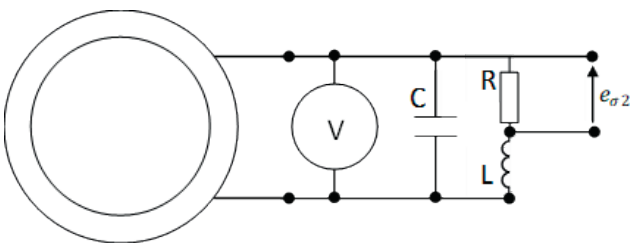
$$T = \frac{f_2}{f_{2N}} T_N \quad (4)$$

Przykładowy przebieg napięcia e zarejestrowany na cewce pomiarowej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przebieg napięcia e indukowanego przez strumień osiowy ($\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1}$) silnika klatkowego [3]

W widmie napięcia e widoczna jest częstotliwość f_2 prądu wirnika. Częstotliwość f_2 z przebiegu e na rysunku 3 obliczamy z $k = 9$ okresów modulacji, $9\tau_2 = 15,8$ s.



Rys. 4. Cewka pomiarowa i układ do pomiaru okresu τ_2 : woltomierzem V napięcia stałego bądź filtrem dolnoprzepustowym CLR

$$f_2 = \frac{9}{(9\tau_2)} = \frac{9}{(15,8)} = 0,57 \quad (5)$$

Na rysunku 4 przedstawiono cewkę pomiarową i dwie możliwości pomiaru okresu τ_2 zmiany napięcia $e_{\sigma 2}$.

3. Określenia parametrów pracy silnika

Zmierzoną częstotliwość f_2 prądu wirnika, z rysunku 3, wykorzystamy do obliczenia parametrów pracy silnika.

Prędkość obrotowa n jest liniową funkcją częstotliwości f_2 :

$$n = \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) n_1 = (1 - s)n_1 \quad (6)$$

Charakterystyka mechaniczna silnika $T = f(s)$ w zakresie poślizgów $0 < s < 1,5s_N$ jest liniowa:

$$T = \frac{f_2}{f_{2N}} T_N = \frac{s}{s_N} T_N \quad (7)$$

i na płaszczyźnie (n, T) przechodzi przez punkty: $[n_1, 0]$ i $[n_N, T_N]$.

Moc mechaniczna P_2 na wale silnika:

$$P_2 = \omega_m T = \pi \frac{n}{30} T = \frac{(1 - s)s}{s_N} P_N \quad (8)$$

Poszczególne symbole oznaczają:

- $n_1 = (60f_1)/p$ – prędkość synchroniczna,
- p – liczba par biegunów,
- T – moment obciążenia,
- s – poślizg wirnika względem strumienia wirującego.

3.1 Przykład

Silnik indukcyjny klatkowy Sf 450 Y6 ma parametry znamionowe: $P_N = 800$ kW, $U_N = 6$ kV, $f_N = 50$ Hz, $n_N = 991$ obr/min, $T_N = 7713$ Nm, $\eta_N = 95,3\%$ $\cos\varphi_N = 0,89$, $I_N = 90,8$ A, $T_f/T_N = 1,0$, $I_f/I_N = 5,6$, $T_{\max}/T_N = 2,3$, $J = 6,7$ kg·m², $m = 4310$ kg, odpisane z katalogu [2]. Z prędkości znamionowej silnika wynika, że silnik ma liczbę par biegunów $p = 3$, a prędkość synchroniczna wynosi $n_1 = 1000$ obr/min.

Poślizg znamionowy:

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 991}{1000} = 0,009 \quad (9)$$

Silnik napędza maszynę roboczą. Częstotliwość prądu wirnika $f_2 = 0,57$ Hz.

Poślizg:

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{0,57}{50} = 0,0114 \quad (10)$$

Punkt pracy na charakterystyce mechanicznej:
– prędkość obrotowa wirnika

$$n = \left(1 - \frac{0,57}{50}\right) 1000 \approx 989 \quad (11)$$

– moment obciążenia

$$T = \frac{0,0114}{0,009} 7713 = 9770 \text{ Nm} \quad (12)$$

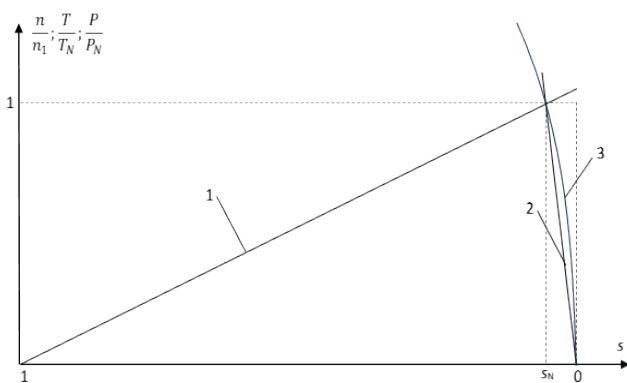
– moc na wale silnika

$$P_2 = \pi \frac{989}{30} 9770 \cdot 10^{-3} = 1011 \text{ kW} \quad (13)$$

$$\frac{P_2}{P_N} = \frac{1011}{800} = 1,26 \quad (14)$$

Silnik jest przeciążony o około 26%.

Charakterystyka mechaniczna $T = f(n)$ silnika jest przedstawiona na rysunku 5.



Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne silnika w funkcji poślizg: 1 – prędkość obrotowa, 2 – moment, 3 – moc

4. Podsumowanie

Silniki indukcyjne klatkowe, zasilane wprost z sieci elektroenergetycznej, nie są wyposażane w przetworniki pomiaru prędkości obrotowej, a warunki w któ-

rych silnik jest zabudowany (np. kombajn górniczy) uniemożliwiają wykonanie bezpośredniego pomiaru prędkości obrotowej. Bezdotkowy pomiar częstotliwości f_2 prądu wirnika rozwiązuje ten problem. Częstotliwość f_2 jest źródłem informacji o prędkości obrotowej n , momencie obciążenia T i mocy mechanicznej P silnika. Pomiar częstotliwości f_2 prądu wirnika bazuje na strumieniu rozproszenia czół uzwojeń wirnika $\Phi_{\sigma 2}$ i stojana $\Phi_{\sigma 1}$ wychodzącego poza tarczę łożyskową. Strumień $\Phi_{\sigma 1}$ ma podstawową częstotliwość $f_1 = 50$ Hz, a strumień $\Phi_{\sigma 2}$ ma częstotliwość f_2 prądu wirnika. Pomiar napięcia e indukowanego przez strumień $(\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1})$ wykonuje się cewką o dużej liczbie zwojów, korzystnie $N > 1000$. Cewkę przykładają się do tarczy łożyskowej koncentrycznie z osią wału silnika. Składową napięcia $e_{\sigma 2}$ proporcjonalną do prądu I_2 wirnika uzyskuje się poprzez filtr dolnoprzepustowy. Z przebiegu $e_{\sigma 2}$ odczytuje się okres τ_2 i oblicza częstotliwość f_2 . Bazując na parametrach znamionowych silnika i częstotliwości f_2 oblicz się parametry na wale silnika: prędkość obrotową n , moment T i moc P .

Literatura

- [1] J. Petryna, M. Sułowicz, A. Duda, Z. Ławrowski, K. Guziec: *Bezkontaktowe wyznaczenie momentu obciążenia silnika indukcyjnego na stanowisku pracy w energetyce w oparciu o pomiar strumienia osiowego*. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe ISSN 0239-3646, nr 2/2019, s. 87-90.
- [2] Katalog silników Cantoni Grup, Zakład Emit
- [3] A. Biernat, P. Góralski: *Zastosowanie pomiaru strumienia osiowego do okresowej diagnostyki silników indukcyjnych w zakładach przemysłowych*. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe ISSN 0239-3646, nr 4/2014, s. 247-252.

Autorzy

prof. dr inż. Tadeusz Glinka, dr inż. Adam Decner

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec