

# Pomiar częstotliwości prądu wirnika i obliczenie parametrów pracy silnika indukcyjnego klatkowego

Tadeusz Glinka, Adam Decner

## 1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe zasilane bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej, zainstalowane w różnych układach napędowych, pracują 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 poosiowego. Na tarczy łożyskowej zamocowali cewkę pomiarową i na stacji prób zmierzili charakterystykę wartości skutecznej napięcia indukowanego 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 to, 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 poosiowego przykładaną na czas pomiaru do zewnętrznej strony tarczy łożyskowej. 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

**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 czół 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, przykładana 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  $\tau_2$  i obliczana jest częstotliwość  $f_2$ . Bazując na parametrach znamionowych silnika i częstotliwości  $f_2$  obliczane są parametry na wale silnika: prędkość obrotowa  $n$ , moment  $T$  i moc  $P$ .

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

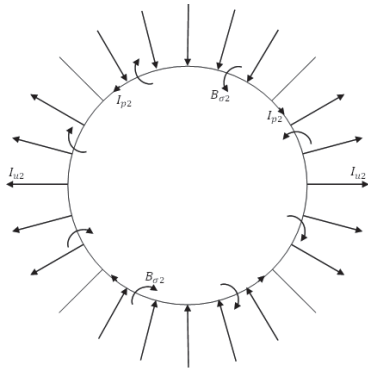
**Summary:** Squirrel-cage induction motors, powered directly from the power grid, do not measure the rotational speed. It is possible to measure the frequency  $f_2$  of the rotor current. The measurement is based on the axial flux of the winding fronts of the rotor  $\Phi_{\sigma 2}$  and the stator  $\Phi_{\sigma 1}$ . 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  $\tau_2$  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  $P$ .

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

sinusoidy. Kierunek przepływu prądu pod sąsiednimi biegunami jest przeciwny – rysunek 1. Prąd  $I_{p2}$  w pierścieniu wiruje, względem jarzma wirnika, z prędkością kątową  $\omega_2 = 2\pi f_2$ .

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  $B_{\sigma 2}$

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



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 jazmem wirnika i tarczami łożyskowymi jest także strumień rozproszenia  $\Phi_{\sigma 1}$  czoł uzwojenia stojana, jest to strumień wirujący z prędkością kątową  $\omega_1 = 2\pi f_1$ . 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:

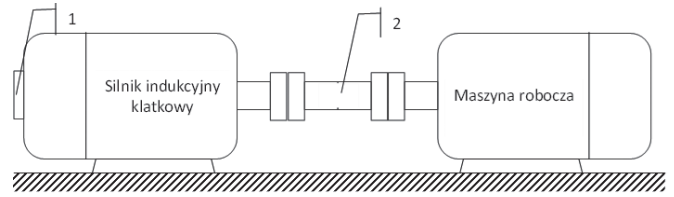
$$e = N \frac{d(\Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 1})}{dt} \quad (5)$$

W przebiegu  $e$  zawarta jest składowa napięcia:

$$e_{\sigma 2} = N \frac{d\Phi_{\sigma 2}}{dt}, \quad (5)$$

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



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

cewki pomiarowej magnetoelektryczny woltomierz prądu stałego z zerem w środku skali. Wskazówka woltomierza będzie się wahać z częstotliwością  $f_2$ . Mierząc stoperem np. czas  $k$  okresów  $\tau_2$  określimy stosunkowo dokładnie częstotliwość:

$$f_2 = \frac{k}{(k\tau_2)} \quad (5)$$

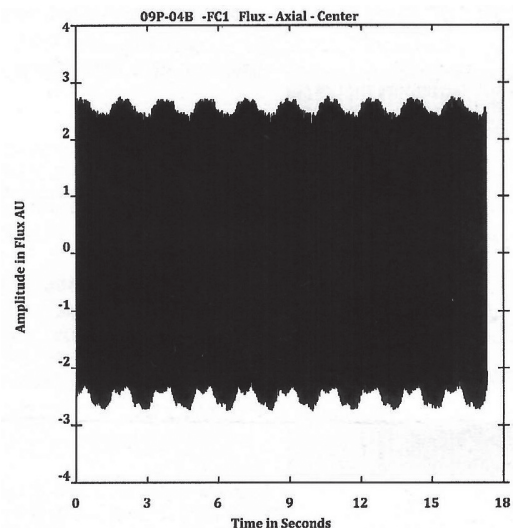
Można także wykorzystać filtr dolnoprzepustowy napięcia  $e$  i w ten sposób uzyskać przebieg napięcia  $e_{\sigma 2}$ .

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 tarczy 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:

$$T = \frac{f_2}{f_{2N}} T_N \quad (5)$$

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  $f_2$  obliczamy z przebiegu  $e$  przedstawionego na rysunku 3 z  $k = 9$  okresów modulacji,  $9\tau_2 = 15,8$  s.

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

Na rysunku 4 przedstawiono cewkę pomiarową i dwie możliwości pomiaru okresu  $\tau_2$  zmiany napięcia  $e_{\sigma 2}$ .

### 3. Określenie 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  $f_2$ :

$$n = \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) n_1 = (1 - s) n_1 \quad (5)$$

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

$$T = \frac{f_2}{f_{2N}} T_N = \frac{s}{s_N} T_N \quad (5)$$

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

Moc mechaniczna  $P_2$  na wale silnika:

$$P_2 = \omega_m T = \pi \frac{n}{30} T = \frac{(1 - s)s}{s_N} P_N \quad (5)$$

Poszczególne symbole oznaczają:

$n_1 = (60f_1)/p$  – prędkość synchroniczną,

$p$  – liczbę 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;  $f_1 = 50$  Hz;  $n_N = 991$  obr./min;  $T_N = 7713$  N·m;  $\eta_N = 95,3\%$ ;  $\cos\varphi_N = 0,89$ ;  $I_N = 90,8$  A;  $T_f/T_N = 1,0$ ;  $I_f/I_N = 5,6$ ;  $T_{\max}/T_N = 2,3$ ;  $J = 6,7$  kgm<sup>2</sup>;  $m = 4310$  kg; opisane 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.

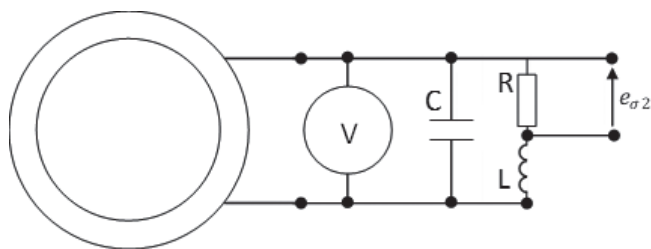
Poślizg znamionowy:

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 991}{1000} = 0,009 \quad (5)$$

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

Poślizg:

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{0,57}{50} = 0,0114 \quad (5)$$



Rys. 4. Cewka pomiarowa i układ do pomiaru okresu  $\tau_2$ : woltmierzem V napięcia stałego bądź filtrem dolnoprzepustowym CLR

Punkt pracy na charakterystyce mechanicznej: prędkość obrotowa wirnika

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

moment obciążenia

$$T = \frac{0,0114}{0,009} 7713 = 9770 \text{ Nm}$$

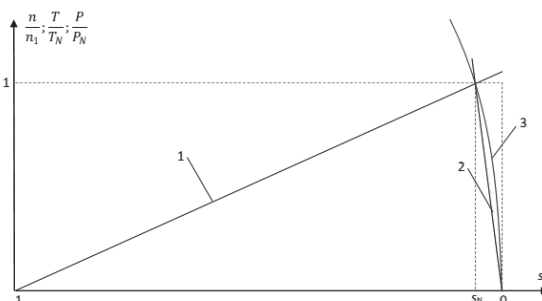
moc na wale silnika

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

$$\frac{P_2}{P_N} = \frac{1011}{800} = 1,26 \quad (5)$$

Silnik jest przeciążony o około 26%.

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



Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne silnika, w jednostkach względnych, w funkcji poślizg: 1 – prędkość obrotowa  $n/n_1$ , 2 – moment  $T/T_N$ , 3 – moc  $P/P_N$

### 4. Podsumowanie


Silniki indukcyjne klatkowe, zasilane wprost z sieci elektroenergetycznej, nie są wyposażane w przetworniki pomiaru prędkości obrotowej, a warunki w których 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 czoł 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 przykładą 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  $\tau_2$  i oblicza częstotliwość  $f_2$ . Bazując na parametrach znamionowych silnika i częstotliwości  $f_2$  oblicza się parametry na wale silnika: prędkość obrotową  $n$ , moment  $T$  i moc  $P$ .

### Literatura

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

okresowej diagnostyki silników indukcyjnych w zakładach przemysłowych. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* ISSN 0239-3646, nr 4/2014, ss. 247 – 252.

 Tadeusz Glinka, Adam Decner.  
Łukasiewicz – Górnośląski Instytut  
Technologiczny, Gliwice

artykuł recenzowany