

Radosław Figura, Leszek Szychta  
 POLITECHNIKA RADOMSKA im. Kazimierza Pułaskiego  
 Wydział transportu i Elektrotechniki

## ESTYMACJA SPRAWNOŚCI SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO PRACUJĄCEGO W ZESPOLE POMPOWYM

### SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR EFFICIENCY ESTIMATION WORKING WITH PUMP UNIT

**Abstract:** Energy-saving control system of pump drive are designed to minimize power consumption. Energy consumption in pump units depends on the instantaneous efficiency of the pump and motor. The paper was presented non-invasive method for determining the coefficient of efficiency induction-cage motor fed from a source with adjustable frequency. The method has been implemented through the method of determining air gap torque in the motor. Proposes a new method of determining the mechanical losses in the induction-cage motor. Influence of the mechanical power loss estimating on the motor efficiency determining was presented. The article presented the results of laboratory tests and simulations.

#### 1. Wstęp

Zwiększanie efektywności energetycznej procesów eksploatacyjnych ogranicza zapotrzebowania na energię przez użytkowników końcowych. Dodatkowe korzyści zawierają się w zmniejszeniu emisji szkodliwych substancji, poprawie warunków zdrowotnych oraz zmniejszeniu energochłonności krajowego produktu brutto [8]. Ocenia się, że same pompownie wodociągowe zawierające zespoły pompowe, zużywają w Polsce około 2.000 GWh energii elektrycznej rocznie. Poprawa efektywności energetycznej związana jest ze zmniejszeniem jednostkowego współczynnika energochłonności pompowania  $e$  [kWh/m<sup>3</sup>] [8].

Na jednostkową energochłonność pompowania wpływają: współczynnik sprawności  $\eta_p$  pompy, oraz współczynnik sprawności  $\eta_s$  silnika indukcyjnego. Elementem wpływającym również na efektywność energetyczną pompowania jest współczynnik  $W$  dopasowania mocy nominalnej  $P_{2N}$  silnika do mocy nominalnej  $P_N$  pompy, określony zależnością [8]:

$$W = \frac{P_N}{P_{2N}} \quad (1)$$

Na zmiany efektywności energetycznej pompowni wodociągowej istotny wpływ ma zastosowany system sterowania pracą zestawów pompowych. Umożliwia on zachowanie stałej lub zmiennej prędkości obrotowej  $n$  zespołów pompowych [1,7]. Jest to niezbędne dla dostosowania wydajności pomp do rozbioru. Podczas zmiany prędkości obrotowej  $n$  zespołu pompowego następuje zmiana współczynnika

sprawności pompy i silnika. Zmienia się, zatem jednostkowy współczynnik  $e$  energochłonności pompowania. Jego minimalizacja związana jest z pracą zespołu pompowego w ograniczonym przedziale prędkości obrotowych, dla których energochłonność pompowania jest najmniejsza. Wymaga to estymacji współczynnika sprawności pompy oraz silnika w trybie on-line. W niniejszej pracy przedstawiono sposób estymacji współczynnika sprawności silnika indukcyjnego klatkowego w oparciu o metodę wyznaczania momentu elektromagnetycznego w szczelinie powietrznej silnika.

#### 2. Współczynnik sprawności silnika indukcyjnego klatkowego

Znanych jest kilkanaście metod wyznaczania współczynnika sprawności  $\eta_s$  silnika indukcyjnego. Można je podzielić następująco [2]:

- metody wykorzystujące pośredni pomiar poślizgu,
- metody oparte na pomiarze prądu fazowego stojana,
- metody bazujące na schemacie zastępczym,
- metody wyznaczania strat cząstkowych,
- metody wyznaczania momentu w szczelinie powietrznej,
- metody pomiaru momentu na wale silnika.

Ze względu na przyjęty w artykule aplikacyjny charakter bezinwazyjnej oceny efektywności energetycznej w trybie on-line przyjęto do wyznaczenia współczynnika sprawności  $\eta_s$  metodę wyznaczania momentu elektromagnetycznego w szczelinie powietrznej silnika. W metodzie

tej współczynnik sprawności  $\eta_s$  definiowany jest następującą zależnością:

$$\eta_s = \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

gdzie:  $P_1$  – średnia moc czynna pobrana przez silnik;  $P_2$  – średnia moc użyteczna oddana przez silnik.

Zakładając sinusoidalnie zmienne wartości napięć i prądów symetrycznie zasilających silnik, słuszną jest zależność na średnią moc  $P_1$  pobraną przez silnik [4,5]:

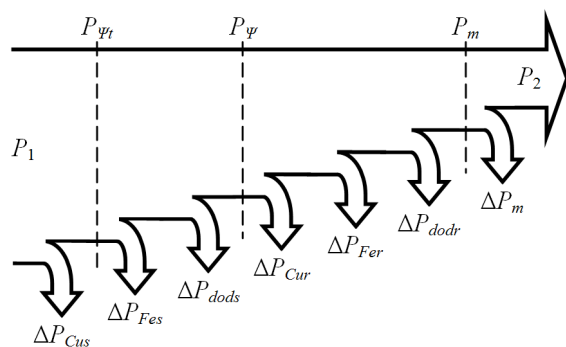
$$P_1 = u_U i_U + u_V i_V + u_W i_W \quad (3)$$

gdzie:  $u_U, u_V, u_W$  – chwilowe wartości napięć zasilających silnik;  $i_U, i_V, i_W$  – chwilowe wartości prądów przewodowych.

Wyznaczenie mocy  $P_2$  oddawanej przez silnik w warunkach laboratoryjnych wykonano pośrednio przez pomiar średniej wartości momentu  $T$  oraz średniej wartości prędkości obrotowej  $n$  wirnika, według zależności [6]:

$$P_2 = \frac{2\pi T n}{60} \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Stosowanie powyższej metody pomiaru mocy  $P_2$  nie znajduje zastosowania praktycznego. Do dalszych rozważań przyjęto, że moc  $P_2$  można wyznaczyć korzystając z metody podziału strat mocy występujących w silniku indukcyjnym oraz z wyznaczenia momentu elektromagnetycznego w szczelinie powietrznej silnika [2,4]. Uogólniony podział strat mocy w silniku indukcyjnym przedstawiony został za pomocą wykresu Sankey'a (rys. 1).



Rys. 1. Podział strat mocy silnika indukcyjnego klatkowego

Z podziału strat mocy silnika indukcyjnego (rys. 1) wynika zależność między mocą użyteczną  $P_2$  oraz mocą strumienia  $P_\psi$ :

$$P_2 = P_\psi - \Delta P_{Cur} - \Delta P_{Fer} - \Delta P_{dodr} - \Delta P_m \quad (5)$$

gdzie:  $\Delta P_{Cur}$  – straty w uzwojeniu wirnika;  $\Delta P_{Fer}$  – straty mocy w rdzeniu wirnika;  $\Delta P_{dodr}$  – dodatkowe straty obciążeniowe wirnika;  $\Delta P_m$  – straty mechaniczne silnika.

Straty mocy  $\Delta P_{Cur}$  w uzwojeniu wirnika określone są zależnością:

$$\Delta P_{Cur} = s P_\psi \quad (6)$$

Moc  $P_\psi$  strumienia w szczelinie powietrznej wyznacza się na podstawie średniej wartości momentu elektromagnetycznego  $T_{ag}$  występującego w szczelinie powietrznej i prędkości obrotowej  $n_s$  wirowania pola magnetycznego:

$$P_\psi = \frac{2\pi T_{ag} n_s}{60} \quad (7)$$

Uwzględniając zależności (6) oraz (7) moc użyteczną  $P_2$  określić można zależnością:

$$P_2 = \frac{2\pi T_{ag} n}{60} - \Delta P_{Fer} - \Delta P_{dodr} - \Delta P_m \quad [\text{W}] \quad (8)$$

Zależność (8) stanowi podstawę do estymowania mocy użytecznej  $P_2$  na wale silnika w trybie on-line przez system sterowania napędem elektrycznym.

### 3. Moment elektromagnetyczny w szczelinie silnika

Wartość chwilowa elektromagnetycznego momentu  $t_{agt}$  w silniku indukcyjnym klatkowym jest zdefiniowana, jako moduł iloczynu wektora chwilowych wartości strumieni stojana  $\psi_s$  oraz wektora chwilowych wartości prądów stojana  $i_s$  [4,5]:

$$t_{agt} = p |\psi_s \times i_s| \quad (9)$$

gdzie:  $p$  – liczba par biegunów w silniku;  $\psi_s$  – wektor chwilowych wartości strumieni stojana;  $i_s$  – wektor chwilowych wartości prądów fazowych stojana.

Na podstawie równania napięciowego dla stojana silnika zapisanego w postaci wektorowej, wektor strumienia  $\psi_s$  określa zależność:

$$\psi_s = \int (\mathbf{u}_s - \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s) dt \quad (10)$$

gdzie:  $\mathbf{R}_s$  – macierz rezystancji fazowych uzwojenia stojana;  $\mathbf{u}_s$  – wektor chwilowych wartości napięć fazowych zasilających silnik.

Na podstawie zależności (9) oraz (10) dla trójprzewodowego, sinusoidalnego i symetrycznego układu zasilania silnika trójfazowego otrzymuje się wyrażenie na chwilowy moment elek-

tromagnetyczny  $t_{agt}$  w szczelinie powietrznej określony, jako:

$$t_{agt} = \sqrt{3}p \left[ \begin{array}{l} i_V \int (u_U - R_s i_U) dt - \\ - i_U \int (u_V - R_s i_V) dt \end{array} \right] \quad (11)$$

Dla napięć międzyfazowych zależność (11) można przedstawić w postaci:

$$t_{agt} = \sqrt{3}p \left[ \begin{array}{l} i_V \int \left( \frac{u_{UV} - u_{WU}}{3} - R_s i_U \right) dt + \\ + i_U \int \left( \frac{2u_{UV} + u_{WU}}{3} + R_s i_V \right) dt \end{array} \right] \quad (12)$$

Wektor  $\psi_s$  (10) określa chwilowe wartości strumieni fazowych w szczelinie powietrznej dla uproszczonego modelu silnika. W modelu tym pominięte zostały straty  $\Delta P_{Fes}$  w rdzeniu stojana oraz dodatkowe straty obciążeniowe  $\Delta P_{dods}$  w stojanie. Zatem wyznaczony moment  $t_{agt}$  (12) nie odpowiada rzeczywistemu momentowi  $t_{ag}$  występującemu w szczelinie silnika.

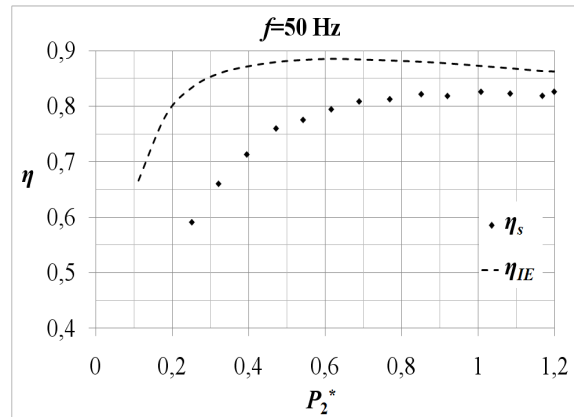
W pracach [2,4] założono, że moment  $t_{agt}$  równy jest momentowi  $t_{ag}$ . Pominięto również straty mocy  $\Delta P_{Fer}$  w rdzeniu wirnika. Wartość dodatkowych strat obciążeniowych przyjęto wg normy IEEE 112 (tab. 1) funkcję mocy  $P_2$  oddawaną przez silnik.

Tabela 1. Dodatkowe straty obciążeniowe

Zakres mocy silnika	Procentowy udział strat dodatkowych $\Delta P_{dodr}$ w mocy użytecznej $P_2$
1 – 90 kW	1,8%
91 – 375 kW	1,5%
376 – 1850 kW	1,2%
1851 kW and up	0,9%

Straty mechaniczne określono również, jako procentową wartość z mocy  $P_2$  oddawaną przez silnik i oszacowano je na poziomie  $1,2\%P_2$ .

W przypadku silnika o mocy 2,2 kW wyznaczenie współczynnika sprawności zgodnie z powyższymi założeniami spowodowało za wyższenie estymowanej wartości współczynnika sprawności  $\eta_{IE}$  w stosunku do współczynnika sprawności  $\eta_s$  wyznaczonego na stanowisku laboratoryjnym metodą bezpośrednią [7] (rys. 2). Niedokładność metody estymacji sprawności wynika z dokonanych uproszczeń. Adaptacja tej metody do systemów sterowania pracą pomp wymaga modyfikacji w celu zmniejszenia błędu estymacji.



Rys. 2. Estymacja współczynnika sprawności wg [2,4]

Strumień wyznaczony z zależności (10) pozwala na wyznaczenie mocy  $P_{\psi t}$  (rys. 1). Zatem moc  $P_{\psi}$  strumienia jest określona zależnością:

$$P_{\psi} = P_{\psi t} - \Delta P_{Fes} - \Delta P_{dods} \quad (13)$$

Uwzględniając zależność (6) oraz (7) moc użyteczna uwzględniającą wszystkie straty mocy wyszczególnione w podziale strat (rys.1) określona jest zależnością:

$$P_2 = \frac{2\pi T_{agt} n}{60} - \Delta P_{est} \quad (14)$$

gdzie:  $\Delta P_{est}$  – straty estymowane określone zależnością:

$$\Delta P_{est} = \frac{n}{n_s} (\Delta P_{Fes} + \Delta P_{dods}) - \Delta P_{Fer} - \Delta P_{dodr} - \Delta P_m \quad (15)$$

#### 4. Straty estymowane $\Delta P_{est}$

Wyznaczanie strat cząstkowych składających się na straty estymowane  $\Delta P_{est}$  według znanych z literatury zależności nie znajduje praktycznego zastosowania w wyznaczaniu współczynnika sprawności silnika indukcyjnego przez system sterowania napędem elektrycznym w trybie online. Wyniki badań dla tak przyjętych założeń zawierają duże rozbieżności między wynikami sprawności estymowanych  $\eta_{IE}$  i rzeczywistych  $\eta$  (rys. 2). W niniejszej pracy przyjęto, że straty estymowane są funkcją prędkości obrotowej  $n$  ( $\Delta P_{est} = f(n)$ ). Wynika stąd, że dla prędkości obrotowej równej zero straty estymowane  $\Delta P_{est}$  wynoszą zero. W przypadku uzyskania prędkości nominalnej  $n=n_N$  wirnika, straty estymowane odpowiadają wartości nominalnej  $\Delta P_{est}(n_N) = \Delta P_{estN}$ , które zgodnie z (15) dla wartości minimalnych określa zależność:

$$\Delta P_{estN} = \frac{2\pi}{60} T_{agtN} n_N - P_{2N} \quad (16)$$

gdzie:  $P_{2N}$  – nominalna moc silnika;  $n_N$  – nominalna prędkość obrotowa silnika;  $T_{agtN}$  – średnia wartość nominalnego momentu  $t_{agtN}$  w szczelinie powietrznej silnika określonego następującą zależnością:

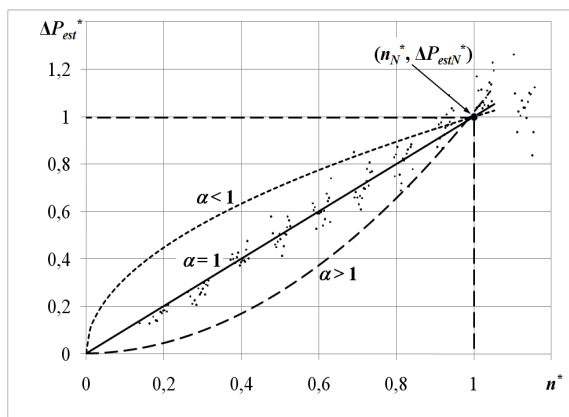
$$t_{agtN} = \sqrt{3} p \left[ i_{VN} \int \left( \frac{u_{UVN} - u_{WUN}}{3} - R_s i_{UN} \right) dt + i_{UN} \int \left( \frac{2u_{UVN} + u_{WUN}}{3} + R_s i_{VN} \right) dt \right] \quad (17)$$

gdzie:  $i_{UN}$ ,  $i_{VN}$  – chwilowe wartości prądów w uzwojeniach stojana dla wartości skutecznej prądu  $I=I_N$ ;  $u_{UVN}$ ,  $u_{WUN}$  – chwilowe wartości napięć przewodowych dla wartości skutecznej napięcia  $U=U_N$ .

Uzyskana nominalna wartość strat estymowanych  $\Delta P_{estN}$  stanowi drugi punkt charakterystyki  $\Delta P_{est}=f(n)$  (rys. 3). Autorzy przyjęli, że dwa punkty dla  $n=0$  oraz  $n=n_N$  należą do charakterystyki strat estymowanych, którą zdefiniowali następująco:

$$\Delta P_{est}^* = (n^*)^\alpha \quad (18)$$

gdzie:  $\Delta P_{est}^*$  – względna wartość strat estymowanych odniesiona do wartości nominalnej tych strat  $\Delta P_{estN}$ ;  $n^*$  – względna wartość prędkości obrotowej wirnika odniesiona do wartości nominalnej  $n_N$ ;  $\alpha$  – wykładnik potęgi i  $\alpha \in \mathbb{R}$ .



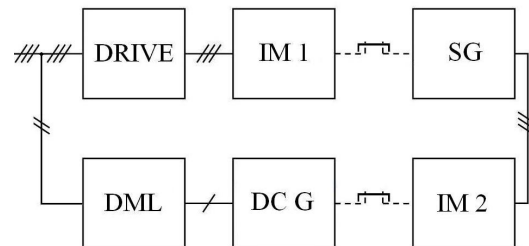
Rys. 3. Charakterystyka strat estymowanych w funkcji prędkości obrotowej dla wybranych współczynników  $\alpha$

Nie istnieje żadna reguła wyznaczająca wartość wykładnika  $\alpha$ . Przyjęto, że empiryczne działania pozwalają określić wartość współczynnika  $\alpha$  (rys. 3). Na obecnym etapie prac założono a priori wartość współczynnika  $\alpha=1$ . Zmiany

strat estymowanych  $\Delta P_{est}$  dla  $\alpha=1$ ,  $\alpha>1$  oraz  $\alpha<1$  ilustruje rysunek 3. Wokół prostej dla  $\alpha=1$  występują punkty ilustrujące straty estymowane wyznaczone laboratoryjnie.

## 5. Badania laboratoryjne

Badania sprawności silnika indukcyjnego wykonano wykorzystując stanowisko laboratoryjne, którego schemat blokowy ilustruje rysunek 4. Badano silnik IM 2, o mocy nominalnej  $P_{2N}=2,2\text{kW}$  i nominalnej prędkości obrotowej  $n_N=1425$  obr/min. Źródło trójfazowego symetrycznego zasilania napięciem sinusoidalnie zmiennym stanowi generator synchroniczny SG o mocy nominalnej  $S_{GN}=4,0$  kVA. Silnik IM2 obciążono prądnicą prądu stałego DCG, której generowana energia elektryczna oddawana była do sieci energetycznej poprzez tyrystorowy zespół DML. Zespół napędowy DML wraz programowanym miernikiem prędkości obrotowej umożliwił obciążenie silnika zgodnie z charakterystyką pompową (rys. 5). Z rysunku 5b wynika, że przy zmianach momentu  $T^*$  zmienia się również prędkość obrotowa  $n$  silnika.



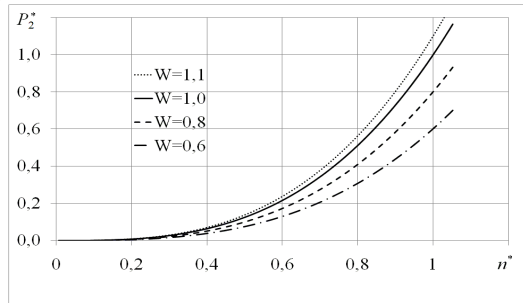
Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Uzyskane charakterystyki mocy użytecznej  $P_2$  i momentu  $T$  są wzajemnie przesunięte w zależności od współczynnika dopasowania  $W$  (rys. 5). W praktyce przyjmuje się, że silnik jest przewymiarowany w stosunku do obciążenia a więc  $W<1$ . Silnik indukcyjny wyposażony został w czujnik temperatury. Pozwoliło to na wprowadzenie do obliczeń poprawki korygującej rezystancję uzwojeń stojana zmierzoną metodą techniczną w temperaturze  $22^\circ\text{C}$ . Prędkość obrotową  $n$  oraz moment  $T$  na wale silnika mierzono momentomierzem zainstalowanym na wale między silnikiem IM2 a prądnicą DCG.

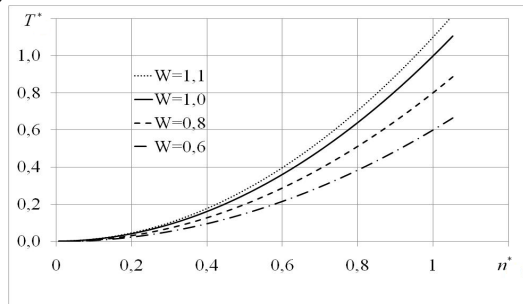
Badania wykonano dla wybranych wartości współczynnika dopasowania  $W$  ( $W=1,1$ ;  $W=1,0$ ;  $W=0,8$ ;  $W=0,6$ ). Na podstawie zmierzonych wartości napięć i prądów fazowych określono moc czynną (3) pobraną przez silnik. Wartości momentu  $T$  i prędkości obrotowej wału  $n$  odczy-

tane z momentomierza stanowiły podstawę do wyznaczenia rzeczywistej mocy użytecznej  $P_2$  (4) oddanej przez silnik. Na tej podstawie rzeczywistą wartość współczynnika sprawności  $\eta_s$  silnika obliczono z zależności (2).

a)



b)



Rys. 5. Charakterystyka obciążenia silnika o charakterze pompowym: a) moc  $P_2^{*1}$  na wale silnika, b) moment  $T^{*2}$  na wale silnika

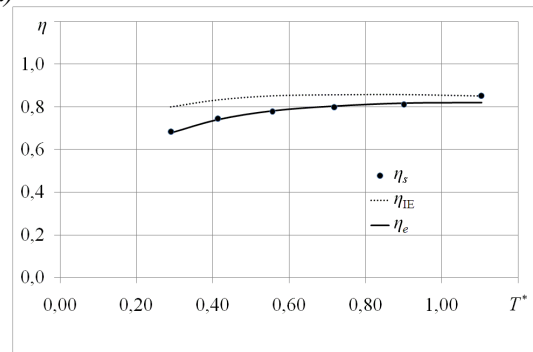
Estymację współczynnika sprawności wykonano dwiema metodami.

W metodzie pierwszej moc strumienia  $P_\psi$  określono z pominięciem dodatkowych strat obciążeniowych w stojanie oraz strat mocy w rdzeniu stojana i wirnika zgodnie z literaturą [2,3,4]. Estymowaną wartość współczynnika sprawności silnika wyznaczoną tą metodą oznaczono indeksem „IE” ( $\eta_{IE}$ ). W metodzie drugiej moc strumienia  $P_\psi$  wyznaczono z uwzględnieniem strat wyszczególnionych w bilansie mocy (rys. 1) a straty estymowane  $\Delta P_{est}$  obliczone zostały zgodnie z zależnością (18). Estymowaną wartość współczynnika sprawności silnika oznaczono w tym przypadku indeksem „e” ( $\eta_e$ ).

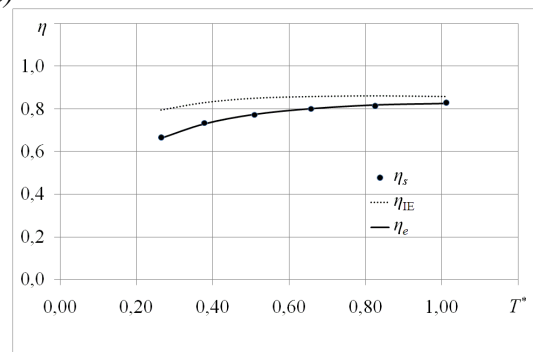
Podczas zmian prędkości obrotowej  $n$  przyjęto, że spełniony jest następujący warunek:

$$\frac{U}{U_N} = \frac{f}{f_N} \quad (19)$$

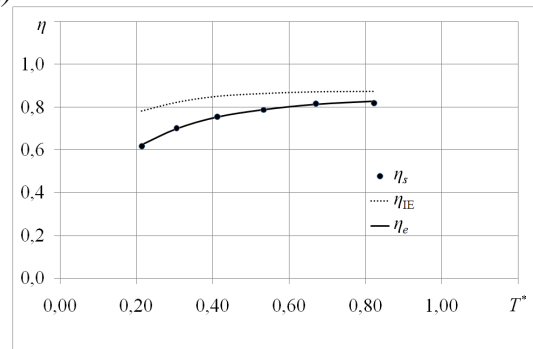
a)



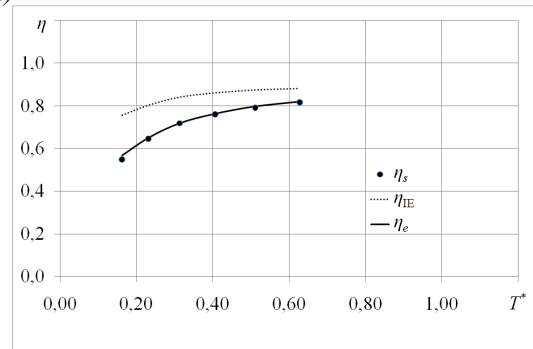
b)



c)



d)



Rys. 6. Charakterystyki współczynnika sprawności  $\eta$  dla wybranych współczynników dopasowania  $W$ : a)  $W=1,1$ ; b)  $W=1,0$ ; c)  $W=0,8$ ; d)  $W=0,6$

<sup>1</sup>  $P_2^*$  – względna wartość mocy  $P_2$  odniesiona do wartości mocy nominalnej  $P_{2N}$  badanego silnika.

<sup>2</sup>  $T^*$  – względna wartość momentu  $T$  odniesiona do wartości momentu nominalnego  $T_N$  badanego silnika.

Wyznaczoną eksperymentalnie wartość współczynnika sprawności  $\eta_s$  oraz estymowane wartości współczynnika sprawności  $\eta_{IE}$  oraz  $\eta_e$  w funkcji względnego momentu  $T^*$  na wale silnika zostały przedstawione na rysunku 6. Charakterystyki te uwzględniają współczynnik  $W$  dopasowania mocy  $P_N$  pompy do mocy  $P_{2N}$  silnika. Powoduje to zmniejszenie momentu  $T^*$  dla malejącego współczynnika  $W$ .

Z rysunku 6 wynika, że przyjęta charakterystyka zmian strat estymowanych  $\Delta P_{est}(n)$  powoduje uzyskanie dużej zgodności sprawności estymowanej  $\eta_e$  ze sprawnością rzeczywistą  $\eta_s$ . Błąd względny wartości estymowanej współczynnika sprawności  $\eta_e$  w stosunku do współczynnika rzeczywistej sprawności  $\eta_s$  nie przekracza 4%. Przy zastosowaniu wielkości dodatkowych strat obciążeniowych oraz strat mechanicznych według [2,4] oraz normy IEEE 112 estymacja nie jest możliwa do wykorzystania w układach sterowania napędem elektrycznym dokonujących wyznaczania współczynnika sprawności silnika indukcyjnego w trybie online. Błąd względny estymowanej wartości współczynnika sprawności  $\eta_{IE}$  osiąga wartość ponad 30% w stosunku do wartości rzeczywistej sprawności  $\eta_s$  i zwiększa się wraz ze zmniejszaniem obciążenia występującego na wale badanego silnika.

## 7. Wnioski

Z porównania estymowanej wartości współczynnika sprawności silnika indukcyjnego z jego wartością wyznaczoną laboratoryjnie uzyskano dostateczną zbieżność wyników przy założeniu liniowości zmian strat estymowanych w funkcji prędkości obrotowej. Uzyskanie tych wyników stanowiło główny cel pracy. Można stąd wnioskować, że przyjęta w artykule metoda obliczania sprawności silnika indukcyjnego może zostać zastosowana w układach sterowania napędów elektrycznych. Dzięki temu istnieje możliwość takiego sterowania, aby uzyskać jak największą wartość współczynnika efektywności energetycznej. Ze względu na empi-

ryczny charakter badań, należy dokonać dalszej weryfikacji wyników uwzględniając różnych producentów, klasy sprawności silników oraz ich moce znamionowe. Uzyskane wyniki powinny znaleźć zastosowanie szczególnie w aplikacjach pompowych. O ich końcowym efekcie zdecydują dalsze prace dotyczące sprawności pomp i sieci wodociągowych.

## 8. Literatura

- [1] Figura R., Szychta L.: *Extreme control for pump set of irrigation systems*. Monographs No 122, Faculty of Transport, 2008, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.
- [2] Hsu, J.; Kueck, J. D.; Olszewski, M.; Casada, D. A.; Otaduy, P. J.; Tolbert, L. M.: *Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods*. IEEE Trans. on ind. Applic., 1998, vol. 34, no. 1.
- [3] *IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators*. IEEE 112, 2004.
- [4] Lu B., Habetler T. G., Harley R. G.: *A Nonintrusive and In-Service Motor Efficiency Estimation Method using Air-Gap Torque with Considerations of Condition Monitoring*. IEEE 2006. 41st IAS Annual Meeting.
- [5] Pełczewski W., Krynke M.: *Metoda zmiennych stanu w analizie dynamiki układów napędowych*. WNT, Warszawa 1984.
- [6] Plamitzer A. M.: *Maszyny elektryczne*. WNT, Warszawa, 1982.
- [7] Polska Norma PN-EN 60034-2-1, *Maszyny elektryczne wirujące - Część 2-1: Znormalizowane metody wyznaczania strat i sprawności na podstawie badań (z wyjątkiem maszyn pojazdów trakcyjnych)*, PKN, kwiecień 2010r.
- [8] Szychta L.: *Zasady doboru systemu sterowania pompowni wodociągowych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2006.

## Autorzy

Mgr inż. Radosław Figura, Politechnika Radomska im. K. Pułaskiego, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, 048 361 77 62, r.figura@pr.radom.pl,  
Dr hab. inż. Leszek Szychta prof. PRad, Politechnika Radomska im. K. Pułaskiego, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, 048 361 77 62, l.szychta@pr.radom.pl.

## Recenzent

*Prof. dr hab. inż. Ludwik Antal*