

Henryk Banach
Politechnika Lubelska, Lublin

WYZNACZANIE OPTYMALNYCH PARAMETRÓW ZASILANIA DLA MINIMALIZACJI STRAT MOCY W SILNIKU INDUKCYJNYM

DETERMINATION OF OPTIMAL SUPPLYING PARAMETERS FOR POWER LOSSES MINIMIZATION IN AN INDUCTION MOTOR

Abstract: The minimizing of total losses in a squirrel-cage induction motor can be achieved by flux control. For every load exists an optimal value of voltage for the scalar control, and optimal values of stator current components for the vector control, which reduces the losses. These optimal supplying parameters can be determined by using an analytical method, which was worked out by author. The application of this method requires knowledge of core and mechanical losses, magnetization characteristic, resistances and reactances of motor windings. The investigation of proposed method was made for a small motor with rated data: $P_N = 1.1$ kW and $n_N = 1415$ rev/min. For this motor two steering characteristics $U_{opt} = f(T_s)$ were prepared; first through laboratory measurements and second using the analytical method. The both characteristics made for five selected frequencies 50, 40, 30, 20, 10 Hz are compared in Fig. 3. The comparison shows the close agreement of both characteristics. In addition two characteristics of stator current components for 50 Hz and 30 Hz are presented in Fig. 1 and Fig. 2. These results proved usefulness of the proposed analytical method for calculation of optimal supply parameters.

1. Wstęp

Wśród ogromnej liczby silników indukcyjnych eksploatowanych w przemyśle można wyróżnić takie, które ze względu na wymogi procesów technologicznych pracują ze zmiennym obciążeniem. W silnikach, szczególnie tych zasilanych z przemienników częstotliwości istnieje potencjalna możliwość minimalizowania strat mocy. Możliwa jest ona przez dopasowanie odpowiedniej wartości strumienia magnetycznego do aktualnego obciążenia [1]. Stosowne zmiany strumienia w maszynie można uzyskać przez dobór odpowiedniej wartości napięcia zasilającego w przypadku sterowania skalarne, bądź też przez dobór wartości składowych prądu stojana I_{sd} i I_{sq} w przypadku sterowania wektorowego. Ogólnie strategię sterowania, znajdującą zastosowanie do minimalizacji strat, można podzielić na strategię poszukiwawczą i strategię opartą na modelu strat.

Strategie poszukiwawcze dokonują doboru optymalnej wartości strumienia dla aktualnego obciążenia przez przyjęcie odpowiedniego kryterium. Takimi kryteriami może być minimum mocy pobieranej przez silnik, bądź też minimum prądu stojana [2, 3, 4]. Strategie oparte na tych kryteriach realizowane są przez specjalne układy optymalizacyjne, nadzorujące pracę przemiennika częstotliwości współpracującego z silnikiem klatkowym. Układ taki może dokonywać zmiany napięcia zasilającego, aż pobie-

rana moc z sieci bądź też pobierany prąd stojana osiągnie minimum. Często w procesie poszukiwań optymalnego, ze względu na straty mocy punktu pracy, stosowane są algorytmy oparte na sieciach neuronowych bądź też algorytmy genetyczne [7]. Strategie poszukiwawcze cechuje najczęściej długi czas dochodzenia do punktu pracy optymalnej. W procesie tym występują również pulsacje momentu elektromagnetycznego wywołane skokowymi zmianami wartości parametrów zasilania. Niekorzystną cechą jest również duża wrażliwość na przypadkowe zmiany obciążenia bądź napięcia zasilającego [5]. Strategie te nie wymagają znajomości parametrów silnika i to stanowi ich najcenniejszą zaletę. Parametry te mogą się zmieniać w trakcie pracy maszyny i nie będzie to miało negatywnego wpływu na proces minimalizacji strat.

Strategie oparte na modelu strat stwarzają możliwość analitycznego wyznaczenia optymalnych parametrów zasilania. Wykorzystywany w tej metodzie model strat bazuje na schemacie zastępczym silnika klatkowego i równaniach opisujących poszczególne elementy strat w powiązaniu z wielkościami maszyny. Niestety, modele strat przedstawiane w literaturze budowane są na bazie założeń wprowadzających duże uproszczenia, które negatywnie wpływają na dokładność wyznaczania poszukiwanych para-

metrów zasilania. Sprowadzają się one najczęściej do:

- linearyzacji charakterystyki magnesowania maszyny,
- posługiwania się momentem elektromagnetycznym, a nie momentem i mocą na wale maszyny,
- pomijaniem dodatkowych strat obciążeniowych, które w przypadku silnika klatkowego stanowią istotny składnik w bilansie strat.

Zastosowanie uproszczonego modelu strat sprawia, że obliczone wartości parametrów zasilania mogą się znacznie różnić od wartości rzeczywistych. Zarówno Y.Hori w roku 2001 i 2003, [4, 12], jak F.Abrahamsen w roku 2002 [11] wskazywali na niezadawalającą dokładność dotychczasowych metod w odniesieniu do sterowania wektorowego i konieczność opracowania nowej metody. Należy zaznaczyć, że dotyczyło to również wyznaczania parametrów na potrzeby sterowania skalarne. Brak takiej metody skłonił Y.Horiego do zaproponowania metody hybrydowej polegającej na tym, że w pierwszym etapie wyznacza się analitycznie przybliżone wartości parametrów zasilania, a następnie korzysta się ze strategii poszukiwawczej podczas dochodzenia do punktu pracy optymalnej [12]. Takie rozwiązanie zapewnia wydajne skrócenie całego procesu minimalizacji.

W związku z tym pojawiła się konieczność zbudowania dokładnego modelu strat dla silnika indukcyjnego, na podstawie którego byłoby możliwym opracowanie metody do wyznaczania optymalnych wartości parametrów zasilania.

2. Opis metody

Stworzenie dokładnego modelu strat udało się osiągnąć przez powiązanie pewnych parametrów i wielkości silnika w odpowiedni sposób. Powstał on na bazie następujących założeń:

- uwzględnienia rzeczywistej charakterystyki magnesowania,
- posłużeniu się mocą na wale silnika,
- uwzględnieniu dodatkowych strat obciążeniowych,
- założeniu stałej wartości częstotliwości napięcia zasilającego,
- przyjęciu sinusoidalnego kształtu napięcia zasilającego i prądu silnika.

Budowa modelu strat jest niezbędna do sformułowania warunku na minimum strat w silniku indukcyjnym dla zadanej wartości mocy na wale i dla zadanej częstotliwości. Przy założeniu, że współczynnik mocy dla wirnika w stanie obciążenia będzie równy jedności $\cos\varphi_r = 1$ i pominięciu prądu związanego ze stratami w rdzeniu I_{Fe} , prąd stojana można wyrazić jako

$$I_s^2 = I_r^2 + I_m^2 \quad (1)$$

gdzie: I_r – prąd wirnika sprowadzony na stronę stojana, I_m – prąd magnesujący.

Straty całkowite P_t w silniku będą sumą strat składowych

$$P_t = 3R_s I_s^2 + 3R_r I_r^2 + P_{Fe} + P_m \quad (2)$$

gdzie: $3R_s I_s^2$ - straty w uzwojeniu stojana, $3R_r I_r^2$ - straty w uzwojeniu wirnika, P_{Fe} - straty w rdzeniu, P_m - straty mechaniczne, R_r - rezystancja uzwojenia wirnika sprowadzona na stronę stojana.

Po wstawieniu wyrażenia (1) do zależności (2) otrzymuje się

$$P_t = 3R_s I_r^2 + 3R_s I_m^2 + 3R_r I_r^2 + P_{Fe} + P_m \quad (3)$$

Dalsze rozważania wymagają wyznaczenia prądu wirnika. W tym celu należy posłużyć się mocą idealną P_δ , która może być przedstawiona jako

$$P_\delta = 3U_i I_r \cos\varphi_r \quad (4)$$

gdzie: U_i – napięcie indukowane w uzwojeniu wirnika sprowadzone na stronę stojana.

Zakładając, że dla obciążonego silnika $\cos\varphi_r = 1$, równanie mocy idealnej można przedstawić w przybliżeniu jako

$$3U_i I_r = P + 3R_r I_r^2 + P_m \quad (5)$$

gdzie: P – moc wydawana na wale.

Z powyższego równania można wyznaczyć prąd wirnika

$$I_r = \frac{3U_i - \sqrt{9U_i^2 - 12R_r(P + P_m)}}{6R_r} \quad (6)$$

Po wstawieniu wyrażenia (6) do równania strat (3) otrzymuje się

$$P_t = 3R_s I_m^2 + 3(R_s + R_r) \times \left[\frac{3U_i - \sqrt{9U_i^2 - 12R_r(P + P_m)}}{6R_r} \right]^2 + P_{Fe} + P_m \quad (7)$$

Napięcie indukowane $U_i = f(I_m)$ oraz straty w rdzeniu $P_{Fe} = f(I_m)$ mogą być wyrażone w funkcji prądu magnesującego jako wielomian n-tego stopnia. Stopień wielomianu dobiera się tak, aby zapewnić dokładną aproksymację funkcji. Po zróżniczkowaniu strat całkowitych po prądzie magnesującym i przyrównaniu otrzymanego wyrażenia do zera otrzymuje się warunek na minimum strat silnika przy zadanej mocy na wale

$$3(R_s + R_r)I_r^2 (\ln I_r)' = 3R_s I_m^2 (\ln I_m)' + \frac{1}{2} P_{Fe} (\ln P_{Fe})' \quad (8)$$

gdzie: $(R_s + R_r)I_r^2$ - straty na rezystancjach uzwojeń od sprowadzonego na stronę stojana prądu wirnika I_r , $3R_s I_m^2$ - straty w uzwojeniu stojana od prądu magnesującego I_m , P_{Fe} - straty w żelazie.

W nawiasach znajdują się wyrażenia w postaci logarytmów naturalnych poszczególnych wielkości. Pochodne liczone z wyrażeń w nawiasach są pochodnymi po prądzie magnesującym. Z powyższej zależności (8) można wyznaczyć optymalny prąd magnesujący dla założonej wartości mocy na wale. Równanie to można rozwiązać jedynie na drodze numerycznej korzystając z profesjonalnego programu, np. Mathematica lub Mathcad. Po wyznaczeniu poszukiwanej wartości prądu magnesującego, można obliczyć wartości pozostałych wielkości takich jak:

- napięcie indukowane,
- prąd wirnika,
- straty w rdzeniu,
- prąd strat w rdzeniu,
- prąd stojana,
- przybliżoną wartość współczynnika mocy stojana $\cos \varphi_s$ na podstawie znajomości składowych prądu stojana,
- napięcie zasilania.

Zastosowanie przedstawionej metody wymaga znajomości następujących parametrów i wiel-

kości silnika klatkowego dla założonej wartości częstotliwości:

- strat w żelazie $P_{Fe} = f(I_m)$
- charakterystyki magnesowania silnika $U_i = f(I_m)$,
- rezystancji uzwojenia stojana i sprowadzonej rezystancji uzwojenia wirnika z uwzględnieniem strat dodatkowych obciążeniowych,
- reaktancji rozproszenia uzwojenia stojana,
- strat mechanicznych silnika.

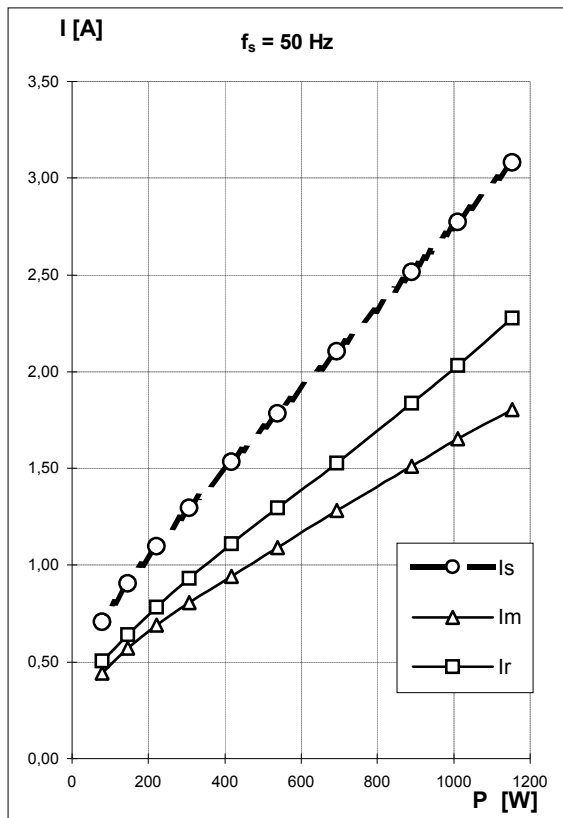
Wynika z tego, że zastosowanie opracowanej metody wymaga przeprowadzenia całego szeregu badań mających na celu wyznaczenie wymienionych powyżej parametrów. Dokładność wyznaczenia parametrów zasilania będzie zależała istotnie od dokładności określenia rezystancji uzwojeń. Do obliczeń powinny być brane rzeczywiste wartości rezystancji, właściwe dla danego stanu pracy. Takie rozwiązanie jest możliwe przez zastosowanie ciągłej estymacji rezystancji obu uzwojeń. Jeżeli to rozwiązanie ze względów technicznych bądź ekonomicznych byłoby niemożliwe, to można się posłużyć wartościami rezystancji uzwojeń dla maszyny nagrzananej. Będzie to jednak okupione pogorszeniem dokładności wyznaczenia optymalnych wartości napięcia bądź składowych prądu stojana.

Weryfikacji metody dokonano dla silnika klatkowego o następujących danych:

- typ Sg 90 S-4
- $P_N = 1,1$ kW
- $U_N = 380$ V
- $I_N = 2,8$ A
- $\cos \varphi_N = 0,8$
- $n_N = 1415$ obr/min
- rodzaj pracy S1
- producent „Tamel”

Ponieważ metoda pozwala na dokładne wyznaczenie składowych prądu stojana tj. wartości prądu wirnika sprowadzonej na stronę stojana, prądu magnesującego i prądu strat w żelazie, to wobec tego można określić optymalne składowe prądu stojana I_{sd} i I_{sq} niezbędne do sterowania wektorowego w stanie ustalonym [6]. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono jak zmieniają się poszczególne składowe prądu stojana w warunkach pracy z minimalnymi stratami dla częstotliwości 50 Hz i 30 Hz. Wyniki otrzymano na drodze obliczeń [9]. Należy podkreślić, że znajomość składowych prądu stojana pozwala również na ich zastosowanie do sterowania multiskalarnego [10].

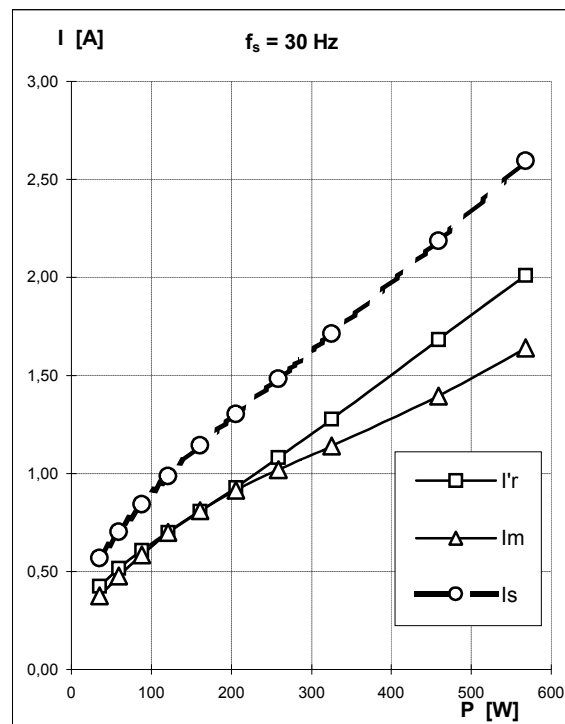
Dla kilku wybranych częstotliwości $f_s = 10, 20, 30, 40, 50$ Hz dokonano pomiarów wszystkich niezbędnych parametrów i wielkości, koniecznych do zastosowania opracowanej metody. Jednocześnie przeprowadzono pomiary laboratoryjne mające na celu wyznaczenie charakterystyk sterowania czyli zależności optymalnej wartości napięcia w funkcji mocy wydawanej $U_{opt} = f(P)$ dla wybranego silnika klatkowego [8].



Rys. 1. Prąd stojana i jego główne składowe w funkcji mocy wydawanej P dla $f_s = 50$ Hz

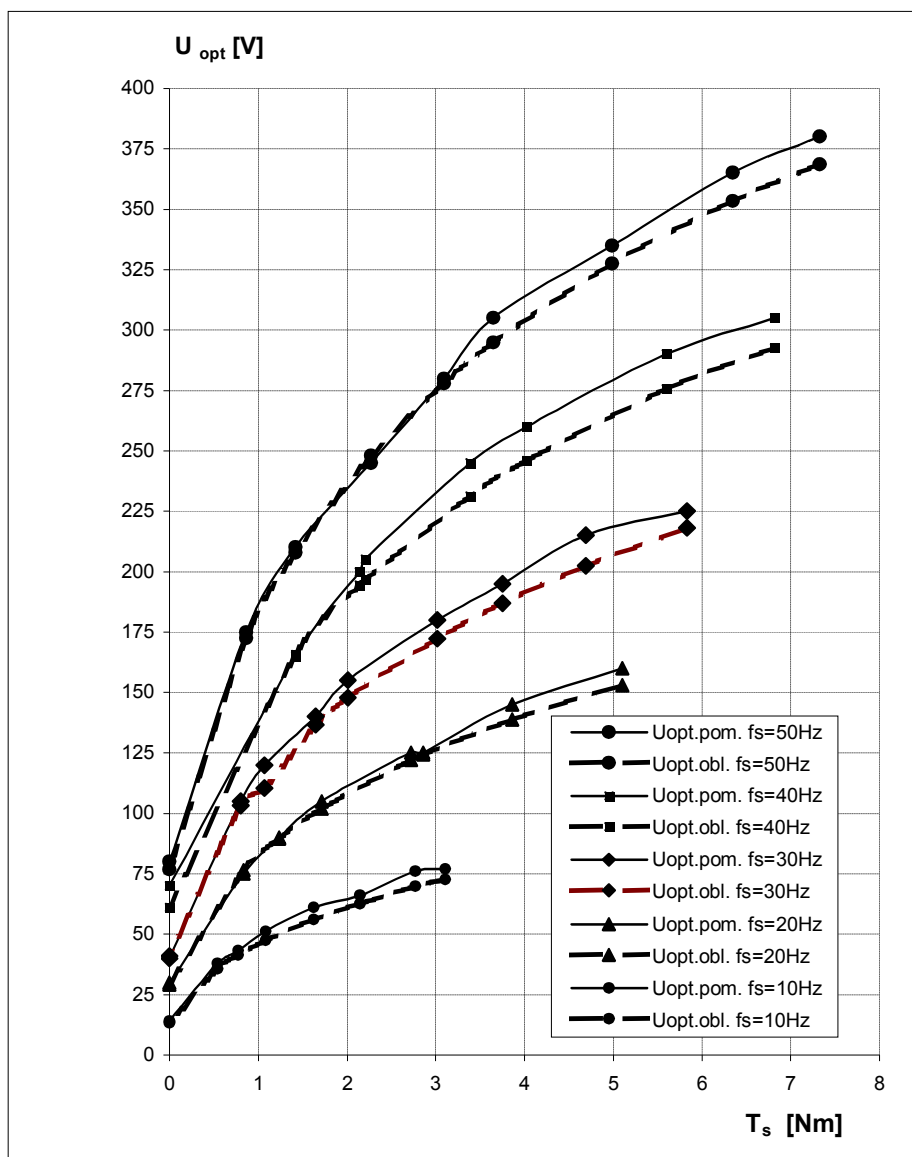
Kolejnym etapem było analityczne wyznaczenie charakterystyk sterowania, a następnie dokonanie porównania dokładności przeprowadzonych obliczeń. Takiej weryfikacji najlepiej dokonać przez przedstawienie charakterystyk sterowania otrzymanych na drodze pomiarów laboratoryjnych i obliczeń, na jednym wspólnym wykresie. W tym przypadku trafniejszym i bardziej czytelnym jest zaprezentowanie charakterystyk sterowania w funkcji momentu na

wale $U_{opt} = f(T_s)$. Przedstawione one zostały na rysunku 3.



Rys. 2. Prąd stojana i jego główne składowe w funkcji mocy wydawanej P dla $f_s = 30$ Hz

Analiza wykresów wskazuje na stosunkowo niewielką rozbieżność pomiędzy charakterystykami sterowania. Generalnie można stwierdzić, że w zakresie większych mocy obliczone charakterystyki przebiegają poniżej charakterystyk otrzymanych na drodze pomiarowej. Dla malejących częstotliwości charakterystyki napięcia optymalnego obejmują coraz mniejsze zmiany momentu na wale maszyny. Spowodowane to zostało koniecznością zachowania w trakcie badań, w miarę stałej temperatury silnika. Silnik ten o budowie zamkniętej, o chłodzeniu własnym, musiał być obciążany coraz mniejszą mocą w miarę obniżania częstotliwości, gdyż związane to było z pogarszającą się skutecznością chłodzenia. Stopniowe zmniejszanie obciążenia chroniło uzwojenia i pozostałe elementy silnika przed przegrzaniem.



Rys. 3. Charakterystyki napięcia optymalnego uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych (krzywa ciągła) i obliczeń (krzywa przerywana) dla badanego silnika klatkowego

3. Wnioski

Przedstawione w treści artykułu rozważania nad doбором odpowiedniej wartości parametrów zasilania w celu zminimalizowania strat mocy w indukcyjnym silniku klatkowym, poparte otrzymanymi wynikami prowadzą do następujących wniosków:

- opracowana metoda analitycznego wyznaczania optymalnych parametrów zasilania dla założonego obciążenia wykazała w pełni swoją przydatność do zastosowań technicznych,
- cechą szczególną prezentowanej metody jest jej prostota i duża dokładność,
- dokładność opracowanej metody w bardzo istotny sposób zależy od przyjmowanych do obliczeń wartości rezystancji uzwojeń silnika; powinny to być wartości rezystancji uzwojeń wynikające z aktualnego obciążenia silnika,
- pewną niedogodnością opisanego sposobu jest konieczność przeprowadzenia wstępnych badań laboratoryjnych mających na celu dokonanie pomiarów strat w żelazie i strat mechanicznych, pomiaru charakterystyki magnesowania oraz rezystancji uzwojeń i reakcji rozproszenia uzwojenia stojana,
- duża dokładność wyznaczenia napięć zasilających wskazuje na poprawność wyznacze-

nia prądów składowych stojana, potwierdzając tym samym możliwość zastosowania opracowanej metody do minimalizacji strat mocy w silniku indukcyjnym przy sterowaniu wektorowym i multiskalarnym,

- istotnym walorem metody jest jej uniwersalność, gdyż pozwala ona na wyznaczenie optymalnych parametrów zasilania zarówno dla potrzeb sterowania skalarnego, jak i dla sterowania wektorowego oraz multiskalarnego w stanach ustalonych.

4. Literatura

- [1] Kioskeridis I. Margaris N.: *Loss Minimization in Induction Motor Adjustable-Speed Drives*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.43, No.1, February 1996, pp. 226-231
- [2] Krygier J.: *Zagadnienia energooszczędnej pracy trójfazowych silników asynchronicznych klatkowych*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 494, Szczecin 1992
- [3] Gruszczyński P.: *Wybrane zagadnienia optymalizacji statycznej sterowania napędów przekształtnikowych*. Zeszyty Naukowe PG nr 499, Elektryka, Gdańsk 1993
- [4] Ta C-M., Hori Y.: *Convergence Improvement of Efficiency- Optimization Control of Induction Motor Drives*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.37, No. 6, November/ December 2001, pp. 1746-1753
- [5] Kusko A., Galler D.: *Control Means for Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-19, No.4, July/August 1983, pp. 561-570
- [6] Uddin AN., Nam SW.: *Development of a Non-linear and Model-Based Online Loss Minimization*

Control of an IM Drives. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 23, No Issue: 4, December 2008, pp. 1015-1024

[7] Kim D.H., Hirota K.: *Vector control for loss minimization of induction motor using GA-PSO*. Applied Soft Computing Journal, Vol. 8, Issue: 4, September 2008, pp. 1692-1702

[8] Banach H.: *Metoda doboru wartości napięcia zasilającego minimalizującego straty mocy w indukcyjnym silniku klatkowym*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 78/2007, wyd. BOBRME Komel, ss. 91-94

[9] Banach H.: *Optimal operation of a small squirrel-cage induction motor*. Proceedings of XLIII International Symposium on Electrical Machines SME 2007, 2-5 July, Poznań, pp. 143-146

[10] Adamowicz M., Krzemiński Z.: *Sterowanie silnikiem indukcyjnym w szerokim zakresie prędkości kątowej wału*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 12/2007, ss. 10-13

[11] Kaźmierkowski M.P., Krishnan R., Blaabjerg F.: *Control in Power Electronics*. Academic Press-USA, 2002

[12] Chakraborty Ch., Hori Y.: *Fast Efficiency Optimization Techniques for the Indirect Vector Controlled Induction Motor Drives*. IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 39, No. 4, July/August 2003, pp. 1070-1076

Autor

Dr inż. Henryk Banach,
e-mail: h.banach@pollub.pl
Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych,
Wydział Elektrotechniki i Informatyki,
Politechnika Lubelska,
ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin
tel.(0-81) 538-46-06