

**Henryk Banach**  
 Politechnika Lubelska, Lublin

## METODA DOBORU WARTOŚCI NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO MINIMALIZUJĄCEGO STRATY MOCY W INDUKCYJNYM SILNIKU KLATKOWYM

### METHOD OF SUPPLY VOLTAGE SELECTION FOR POWER LOSSES MINIMIZATION IN SQUIRREL -CAGE INDUCTION MOTOR

**Abstract:** The minimizing of total losses in a squirrel-cage induction motor can be achieved through voltage control. For every load there exists an optimal value of voltage which reduces the losses. This optimal voltage can be determined by using an analytical method, which was worked out by the author. The application of this method requires knowledge of core and mechanical losses, magnetization characteristic, resistances and reactances of motor windings. The investigation of the 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. 1. The comparison shows the close agreement of both characteristics. These results proved the usefulness of the proposed analytical method for calculation of optimal voltage.

#### 1. Wstęp

Minimalizacja strat mocy w indukcyjnym silniku klatkowym pracującym ze zmiennym obciążeniem realizowana jest przez dobór odpowiedniej wartości napięcia zasilającego. Zagadnienie doboru napięcia zasilającego może być rozwiązywane przez zastosowanie odpowiednich strategii sterowania opartych o różne kryteria. Takimi kryteriami może być minimum mocy pobieranej przez silnik [4], bądź minimum prądu stojana [2,3]. Strategie oparte na tych kryteriach realizowane są przez specjalne układy optymalizacyjne, nadzorujące pracę przemiennika częstotliwości współpracującego z silnikiem klatkowym. Istotną wadą tego rodzaju strategii jest relatywnie długi okres dochodzenia do optymalnej wartości napięcia zasilającego, jak również duża wrażliwość na przypadkowe zmiany obciążenia bądź napięcia zasilającego [5]. Z tego też względu chętniej korzysta się z metod pozwalających na analityczne wyznaczenie optymalnej wartości napięcia. Metody te bazują najczęściej na tzw. modelu strat [1]. Model ten wykorzystuje równania opisujące poszczególne straty i poprzez ich wzajemne powiązania i przekształcenia pozwala na analityczne wyznaczenie poszukiwanej wartości napięcia zasilającego dla założonego obciążenia na wale silnika. Niestety spotykane w literaturze rozważania obarczone

są dużymi uproszczeniami polegającymi przede wszystkim na:

- linearyzacji charakterystyki magnesowania maszyny,
- posługiwaniem się momentem elektromagnetycznym, a nie momentem na wale maszyny,
- zakładaniem, że stałość momentu elektromagnetycznego warunkuje stałość mocy obciążenia przy jednoczesnych zmianach napięcia zasilającego,
- częste pomijanie w analizach strat dodatkowych, które w przypadku silnika klatkowego stanowią istotny składnik w bilansie strat.

Wyniki obliczeń dla tak poczynionych założeń mogą być dalekie od rzeczywistych i w związku z tym koniecznym stało opracowanie dokładnego modelu strat w silniku indukcyjnym, na bazie którego powstałaby analityczna metoda do wyznaczania optymalnych wartości napięcia zasilającego.

#### 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:

- uwzględnieniu rzeczywistej charakterystyki magnesowania,
- posłużeniu się mocą na wale silnika,
- uwzględnieniu dodatkowych strat obciążeniowych.

Na podstawie zbudowanego modelu strat wprowadzono zależność na występowanie maksymalnej sprawności przy założonej stałej wartości mocy na wale. Wyraża się ona następującym zapisem w postaci równania strat:

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

gdzie:

$3R_k I_r^2$  - straty na rezystancji zwarcia  $R_k$  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 wyrażen w nawiasach są pochodnymi po prądzie magnesującym. Na podstawie zależności (1) opracowano metodę wyznaczania optymalnej wartości napięcia zasilającego. Polega ona na wyznaczeniu z powyższej zależności prądu magnesującego, następnie prądu wirnika i po kilku kolejnych etapach dochodzi się do obliczenia poszukiwanej wartości napięcia. Obliczenia są prowadzone dla założonej wartości mocy na wale.

Ze względu na bardzo obszerne i wymagające wielu przekształceń wyprowadzenia, jak również pewne wymogi redakcyjne, nie pokazano jak dochodzi się do zależności (1), a także nie przedstawiono algorytmu wyznaczania optymalnej wartości napięcia zasilającego, gdyż posługuje się on bardzo skomplikowanymi zależnościami wymagającymi rozwiązywania na drodze numerycznej.

Podstawowym założeniem metody jest stałość częstotliwości napięcia zasilającego. Jej zastosowanie wymaga znajomości następujących parametrów silnika klatkowego:

- strat w żelazie,
- charakterystyki magnesowania silnika,

- rezystancji uzwojenia stojana i sprowadzonej rezystancji uzwojenia wirnika z uwzględnieniem strat dodatkowych,
- reaktancji rozproszenia uzwojenia stojana,
- strat mechanicznych.

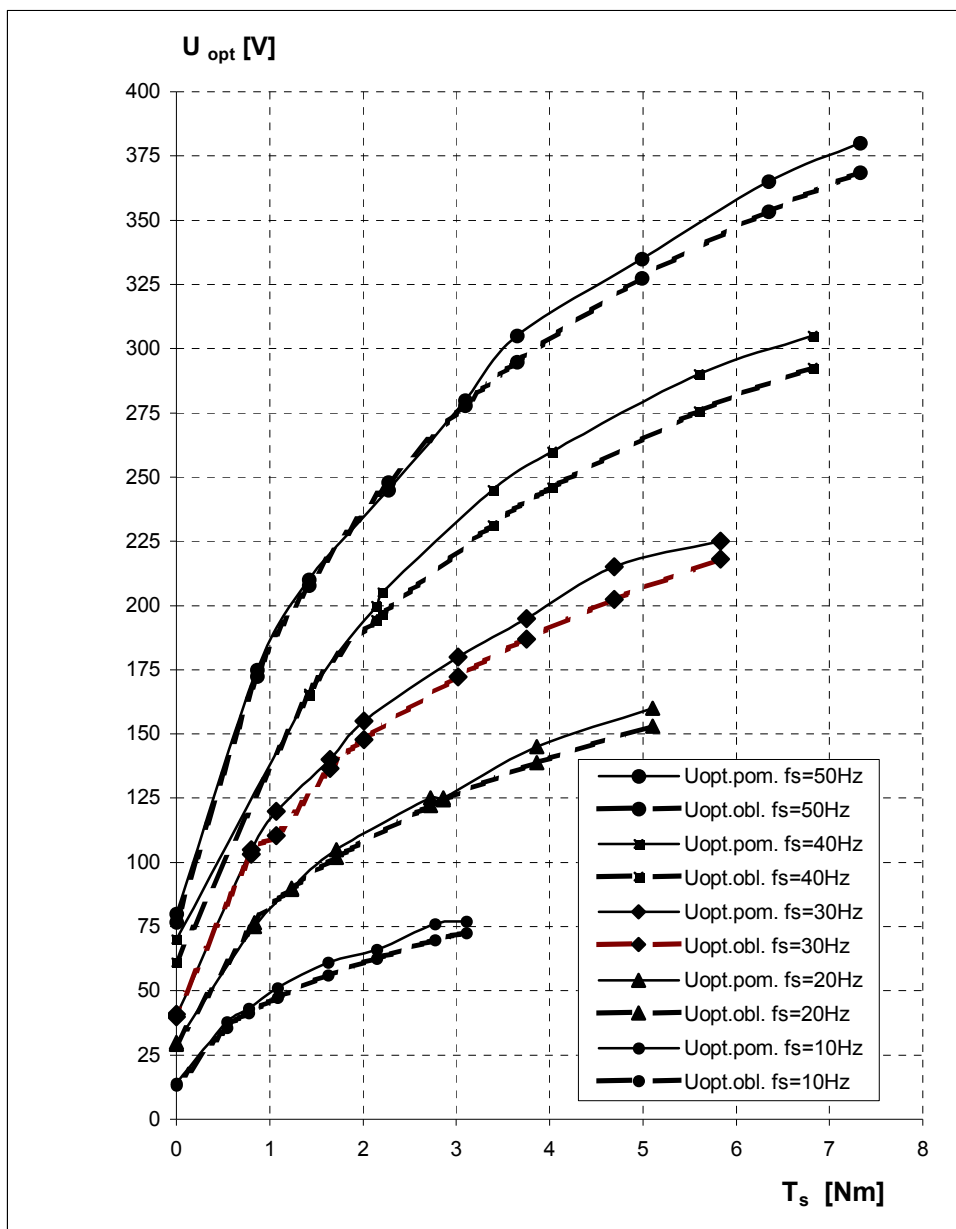
Wynika z tego, że skorzystanie z opracowanej metody wymaga przeprowadzenia całego szeregu badań mających na celu wyznaczenie wymienionych powyżej parametrów. Dokładność wyznaczenia odpowiedniej wartości napięcia będzie zależała istotnie od dokładności określenia rezystancji uzwojeń. Ideałem byłoby aby do obliczeń były brane rzeczywiste wartości rezystancji, właściwe dla danego stanu pracy. Takie rozwiązanie mogłoby być 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.

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”

Dla pięciu 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.

Kolejnym etapem było analityczne wyznaczenie charakterystyk sterowania, a następnie dokonanie porównania dokładności przeprowadzonych obliczeń. Umieszczenie otrzymanych charakterystyk na jednym wykresie pozwalało na ich lepszą weryfikację. W tym przypadku trafniejszym i bardziej czytelnym było zaprezentowanie charakterystyk sterowania w funkcji momentu na wale  $U_{opt} = f(T_s)$ .



Rys. 1. Charakterystyki napięcia optymalnego uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych (krzywa ciągła) i obliczeń (krzywa przerywana) dla badanego silnika klatkowego

Zostały one przedstawione na rys.1. Analiza wykresów wskazuje na stosunkowo niewielką rozbieżność pomiędzy charakterystykami sterowania otrzymanymi na drodze obliczeń i pomiarów. 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 skuteczność chłodzenia stała się coraz mniejsza. Stopniowe zmniejszanie obciążenia chroniło uzwojenia i pozostałe elementy silnika przed przegrzaniem.

### 3. Wnioski

Przedstawione w treści rozważania nad doborem odpowiedniej wartości napięcia w celu zminimalizowania strat mocy w indukcyjnym silniku klatkowym, poparte otrzymanymi

wynikami prowadzą do następujących wniosków:

- opracowana metoda analitycznego wyznaczenia odpowiedniej wartości napięcia zasilającego dla założonego obciążenia wykazała w pełni swoją przydatność do zastosowań technicznych,
- cechą szczególną prezentowanej metody jest jej 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 opisanej metody jest konieczność przeprowadzenia wstępnych badań laboratoryjnych mających na celu pomiary strat w żelazie i strat mechanicznych, pomiary charakterystyki magnesowania oraz rezystancji uzwojeń i reaktancji rozproszenia uzwojenia stojana.

Należy zaznaczyć, że przedstawiona metoda wyznaczenia napięcia optymalnego opracowana została przy założeniu sinusoidalnego kształtu napięć i prądów. Weryfikacji metody dokonano na silniku klatkowym zasilanym napięciem sinusoidalnym z prądnicy synchronicznej.

#### 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.

#### Autor

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