

**Wojciech Grzegorz Zieliński**  
Politechnika Lubelska, Lublin

## **RACJONALNA PRACA SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH KLATKOWYCH PRZY ZMIANIE SKOJARZENIA UZWOJEŃ Z TRÓJKĄTĄ W GWIAZDĘ**

### **EFFICIENT OPERATION OF ASYNCHRONOUS SQUIRREL-CAGE MOTORS AT THE CHANGE FROM DELTA TO STAR WINDING CONNECTION**

**Abstrakt:** Three-phase asynchronous motor with a squirrel-cage rotor that is the most often applied in the industry has its disadvantages, which get revealed at a low-load motor operation or at its idling. High current input and low power factor at idling are among the disadvantages. Electrical energy saving is possible owing to the increased energy indices such as efficiency or power factor. The power factor value to a considerable degree depends on the load. Hence, in cases when the load varies within a wide range an adequate voltage reduction causes its increase. When voltage is reduced such quantities as: torque overload capacity, slip, rotor current and total power losses increase. The motor supply voltage can be varied in a continuous or a step mode. In some cases in order to considerably enhance energy indices and obtain significant energy savings it is enough to apply a two-step voltage regulation. It is mostly when the time-load run of the motor approaches intermittent running with idling breaks. The paper presents a solution that makes possible to enhance energy indices that is to make the motor operation more efficient with the application of a delta-to-star change of the winding connection. The method consists in that at the startup and full-load phase the motor operates at the delta connection of the windings, while at lower load values a switch to the star connection is performed.

Additionally, runs of quantities that are characteristic for an efficient motor operation (power factor, efficiency, slip, current input) and have been obtained based on laboratory measurements performed at the delta-to-star switch of the stator winding connection have been determined.

#### **1. Wstęp**

**Stosowany najczęściej w przemyśle trójfazowy** silnik asynchroniczny z wirnikiem klatkowym posiada pewne wady, które ujawniają się podczas pracy silnika przy niewielkim obciążeniu lub przy biegu jałowym. Do tych wad należą: duży prąd pobierany przez silnik oraz mały współczynnik mocy przy biegu jałowym. Oszczędność energii elektrycznej możliwa jest dzięki wzrostowi wskaźników energetycznych takich jak sprawność czy współczynnik mocy. Wartość współczynnika mocy w znacznym stopniu zależy od obciążenia. Dlatego też w przypadkach w których obciążenie zmienia się w szerokich granicach, odpowiednie obniżanie napięcia powoduje jego wzrost. Przy obniżaniu napięcia wzrastają wielkości takie jak: przeciążalność momentem, poślizg, prąd wirnika i całkowite straty mocy. Napięcie zasilające silnik można zmieniać w sposób ciągły lub skokowy [2], [4], [5]. W niektórych przypadkach w celu wyraźnego poprawienia wskaźników energetycznych i znacznej oszczędności energii elektrycznej, wystarczy stosowanie dwustopniowej regulacji napięcia. Odnosi się to do przypadków gdy

przebieg czasowy obciążenia silnika jest zbliżony do pracy przerywanej z przerwami w postaci pracy jałowej. W artykule przedstawiono rozwiązanie umożliwiające polepszenie wskaźników energetycznych czyli racjonalną pracę silnika przy zastosowaniu przełączenia uzwojeń silnika z trójkątą na gwiazdę. Metoda ta polega na tym, że przy rozruchu i pełnym obciążeniu silnik pracuje przy skojarzeniu uzwojeń w trójkąt, natomiast przy niższych obciążeniach następuje przełączenie uzwojeń w gwiazdę.

Ponadto wyznaczono przebiegi wielkości charakteryzujących pracę racjonalną (współczynnik mocy, sprawność, poślizg, prąd pobierany z sieci przez silnik) otrzymane w oparciu o przeprowadzone pomiary laboratoryjne przy zmianie skojarzenia uzwojenia stojana z trójkątą na gwiazdę.

#### **2. Warunki pracy silnika przy zmianie skojarzenia uzwojeń**

Przy rozruchu i pełnym obciążeniu silnik pracuje przy skojarzeniu uzwojeń w trójkąt [2], [3].

Jeżeli obciążenie silnika zmaleje do wartości  $k_0 = \frac{1}{3}$  powinna nastąpić zmiana skojarzenia uzwojeń w gwiazdę a wówczas napięcie fazowe zostanie obniżone do wartości  $k_u = \frac{1}{\sqrt{3}}$ . Jest to sposób od dawna stosowany głównie w celu poprawy współczynnika mocy.

Obniżenie napięcia fazowego powoduje zmianę przeciążalności, wzrost poślizgu, prądu wirnika, strat w uzwojeniach oraz mocy biernej. Wszystkie te wielkości zależą od obciążenia silnika.

Przeciążalność momentem  $t_b$  w ogólnym przypadku jest określona zależnością 1:

$$t_b = \frac{t_{bN} k_u^2}{k_0} \quad (1)$$

gdzie  $t_{bN}$  jest znamionową przeciążalnością silnika.

Ponieważ przy obciążeniu  $k_0 = \frac{1}{3}$  przeciążalność momentem po przełączeniu uzwojenia wyniesie  $t_b = t_{bN}$ , dlatego też przełączenie uzwojeń powinno nastąpić właśnie przy tym obciążeniu.

Przełączenie uzwojeń przy większych obciążeniach powoduje zmniejszenie przeciążalności.

Wzrost poślizgu przy obniżaniu napięcia zależy od wartości tego napięcia oraz od obciążenia silnika. Poślizg można określić na podstawie wyrażenia 2:

$$s = s_N \frac{t_{bN} + \sqrt{t_{bN}^2 - 1}}{\frac{t_{bN} k_u^2}{k_0} + \sqrt{\left(\frac{t_{bN} k_u^2}{k_0}\right) - 1}} \quad (2)$$

Ze wzoru 2 wynika że jeżeli przełączenie uzwojeń odbywać się będzie przy obciążeniu równym 30% obciążenia znamionowego to poślizg zwiększy się do wartości  $s = s_N$ .

W tabelicy 1 przedstawiono obliczone wartości przeciążalności momentem silnika  $t_b$  oraz poślizgu  $s$  odniesione do poślizgu znamionowego  $s_N$  dla różnych obciążeń przy skojarzeniu uzwojeń w trójkąt i w gwiazdę.

Tabela 1.

$k_u$	$k_0$	0,1	0,3	0,5	0,7
1	$t_b$	39,00	13,00	7,80	5,57
$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$t_b$	13,00	4,33	2,60	1,86
1	$\frac{s}{s_N}$	0,10	0,90	1,53	2,24
$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{s}{s_N}$	0,30	0,90	1,53	2,24

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że przy skojarzeniu uzwojeń silnika w trójkąt, kiedy  $k_u = 1$  wzrost obciążenia powoduje zmniejszenie przeciążalności.

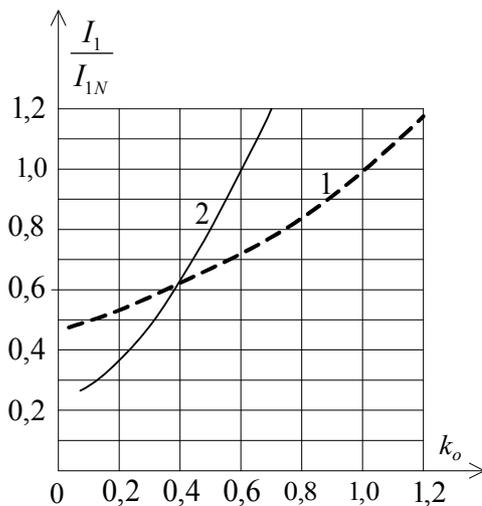
Przy napięciu obniżonym przeciążalność maleje około trzy razy w porównaniu do wartości przy napięciu znamionowym w całym zakresie zmian obciążenia.

### 3. Określenie wskaźników energetycznych

Badaniom laboratoryjnym poddany został silnik indukcyjny klatkowy typu SZUe 44a o następujących danych znamionowych:

- moc znamionowa  $P_N = 3kW$ ,
- napięcie znamionowe  $U_N = 380V$ ,
- częstotliwość znamionowa  $f_N = 50Hz$ ,
- prąd znamionowy  $I_N = 6,6A$ ,
- prędkość obrotowa  $n_N = 1420 \frac{obr}{min}$ ,
- współczynnik mocy  $\cos \varphi_N = 0,81$ ,
- sprawność  $\eta_N = 85\%$ .

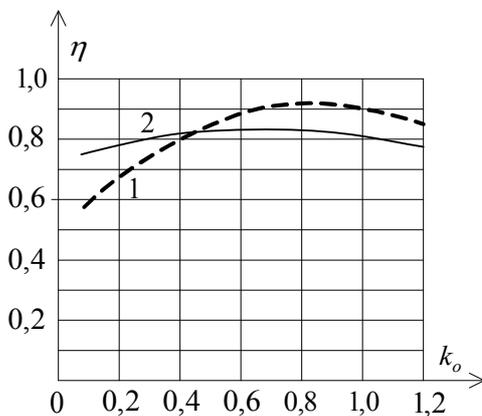
Na rysunku 1 przedstawiono przebiegi prądu pobieranego przez silnik przy skojarzeniu uzwojeń w trójkąt i w gwiazdę.



Rys 1. Prąd pobierany przez silnik w funkcji obciążenia przy skojarzeniu uzwojenia stojana w trójkąt (1) i w gwiazdę (2)

Wykresy prądu pobieranego przez silnik dla różnych skojarzeń uzwojenia stojana przecinają się przy obciążeniu  $k_0 = 0,4$  co świadczy o tym, że przełączanie dla tej wartości obciążenia jest właściwe.

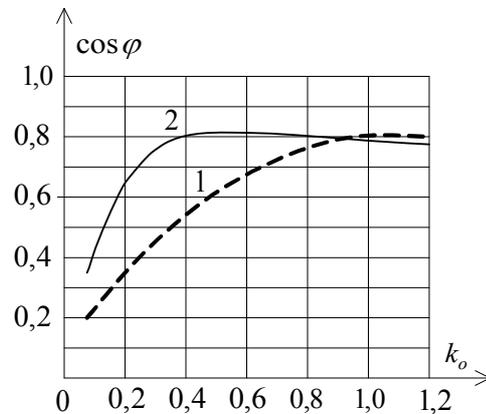
Rysunek 2 obrazuje zmianę sprawności dla obu skojarzeń uzwojeń w funkcji obciążenia.



Rys 2. Przebieg sprawności silnika w zależności od obciążenia przy skojarzeniu uzwojeń w trójkąt(1) i w gwiazdę (2)

Z uwagi na wartość sprawności należy przełączyć uzwojenie z trójkąta w gwiazdę przy obciążeniu równym około  $k_0 = 0,5$  kiedy wartości te są sobie równe.

Odpowiednie przebiegi współczynnika mocy w zależności od obciążenia przedstawiono na rysunku 3.



Rys 3. Współczynnik mocy w zależności od obciążenia przy skojarzeniu uzwojeń w trójkąt (1) i w gwiazdę (2)

Współczynnik mocy przy skojarzeniu w gwiazdę w całym zakresie obciążenia jest większy niż dla skojarzenia w trójkąt. Przełączenie uzwojeń powinno następować przy około 30% obciążenia znamionowego aby praca silnika była energooszczędna.

#### 4. Zakres pracy racjonalnej

Przy przełączeniu uzwojeń stojana z trójkąta w gwiazdę napięcie zostaje obniżone do wartości  $k_u = \frac{1}{\sqrt{3}}$  [2], [4].

Oszczędność mocy pobranej przez silnik oblicza się wówczas według zależności (3):

$$S_p = \frac{\frac{2}{3}k_{Fe} - 2k_r k_0^2}{k_0 + k_{Fe} + k_r k_0^2 + k_m} \quad (3)$$

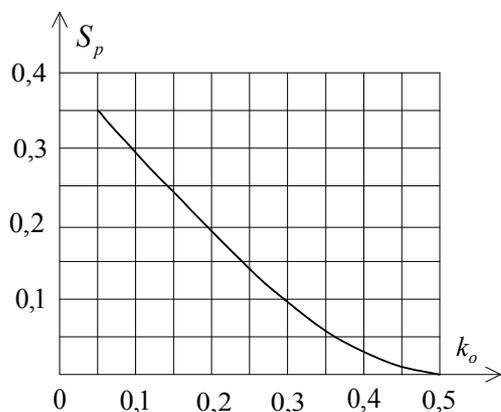
We wzorze (3) współczynniki:  $k_{Fe} = \frac{P_{FeN}}{P_N}$ ,

$k_r = \frac{P_{UN}}{P_N}$ ,  $k_m = \frac{P_m}{P_N}$  wyrażają odpowiednio

straty mocy w rdzeniu przy napięciu znamionowym  $P_{FeN}$ , znamionowe straty w uzwojeniach  $P_{UN}$  oraz straty mechaniczne  $P_m$  odniesione do mocy znamionowej  $P_N$ .

W tym przypadku oszczędność mocy zależy wyłącznie od obciążenia silnika.

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg oszczędności mocy pobranej przez silnik po przełączeniu uzwojeń silnika z trójkąta w gwiazdę.



Rys.4. Zmiana oszczędności mocy pobranej przez silnik po przełączeniu uzwojeń z trójkąta w gwiazdę w funkcji obciążenia silnika

Praca racjonalna rozpoczyna się w chwili obniżenia napięcia. W miarę obniżania obciążenia oszczędność mocy rośnie osiągając największą wartość przy biegu jałowym.

## 5. Wnioski

W omawianym silniku przełączanie uzwojeń w gwiazdę powinno odbywać się przy obciążeniu ok.  $k_o = 0,3 \div 0,4$ . Przedziałowi temu odpowiada zakres zmian przeciążalności  $t_b = 4,33 \div 3,25$  oraz zmiana poślizgu

$$\frac{s}{s_N} = 0,9 \div 1,21.$$

W przedziale tym przeciążalność silnika jest zbliżona do przeciążalności znamionowej, która w omawianym silniku wynosi  $t_{bN} = 3,9$  natomiast poślizg niewiele różni się od znamionowego.

Przełączenie uzwojeń przy większych obciążeniach  $k_o > 0,4$  powoduje szybki wzrost poślizgu a również wzrost strat mocy w wirniku.

Obniżenie napięcia czyli przełączenie uzwojenia z trójkąta w gwiazdę powinno odbywać się przy takim obciążeniu, aby odpowiadająca temu obciążeniu przeciążalność niewiele różniła się od znamionowej.

Przy skojarzeniu uzwojeń silnika w trójkąt, kiedy  $k_u = 1$  wzrost obciążenia powoduje

zmniejszenie przeciążalności. Przy napięciu obniżonym przeciążalność maleje około trzy razy w porównaniu do wartości przy napięciu znamionowym w całym zakresie zmian obciążenia.

Stosowanie przełączenia uzwojeń stojana przy niedociążonym silniku zwiększa jego wskaźniki energetyczne oraz umożliwia oszczędność energii. Przełączanie to jest efektywne, gdy zmiana skojarzenia uzwojeń następuje przy właściwym obciążeniu, przy którym nie wzrastają całkowite straty silnika.

## 6. Literatura

- [1]. Dubicki B.: *Maszyny Elektryczne, Tom III: Silniki indukcyjne*, PWN, Warszawa 1964r.
- [2]. Krygier J.: *Zagadnienia energooszczędnej pracy trójfazowych silników asynchronicznych klatkowych*, Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 494, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1992r.
- [3]. Latek W.: *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*, WNT, Warszawa 1987r.
- [4]. Zielińska M.J., Szewc M., Zieliński W., Jahołkowski K.: *Wybrane zagadnienia pracy energooszczędnej silników indukcyjnych*, IV Sympozjum Naukowe: Sterowanie i Monitorowanie Układów Przemysłowych SM 2001 r., Lublin 9-10 maja 2001 r., s. 59-64.
- [5]. Zielińska M.J., Zieliński W.G.: *Wybrane algorytmy regulacji napięcia zastosowane przy energooszczędnej pracy silników indukcyjnych*. XIII Seminarium Techniczne BOBRME Komel, Ustroń 2004, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Katowice 69/2004.

