

Sergiej GERMAN-GALKIN¹
Jarosław HRYNKIEWICZ²

BADANIA PRĄDÓW ROZRUCHOWYCH PRZY PRZEŁĄCZENIU GWIAZDA / TRÓJKĄT SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH ZWARTYCH

Sieci okrętowe zasilane prądnicami samowzbudnymi AC są przygotowane do rozruchów dużych silników asynchronicznych zwartych. Rozruch jest realizowany przez bezpośrednie włączenie do sieci lub przez układ gwiazda/trójkąt. Silnik obciążony momentem od maszyny napędzanej tj. pompy, sprężarki, wentylatora itp. przy włączeniu na trójkąt pobiera z sieci prądy zależne od momentu na wale i czasu przełączenia. W stanach dynamicznych prądy trójkąta mogą znacznie przekraczać wartości znamionowe.

1. WSTĘP

Silniki asynchroniczne zwarte (SAz) są szeroko stosowane w napędach urządzeń okrętowych takich jak:

- kompresory w systemach klimatyzacji,
- wentylatory pomieszczeń mieszkalnych i roboczych,
- pompy w systemach chłodzenia urządzeń maszynowni,
- pompy wysokociśnieniowe w systemach pożarowych,
- kompresory w systemach stabilizacji kołysań itp.

Moce SAz w takich systemach mieszczą się w przedziale 150 kW do 350 kW. Dla ograniczenia prądów rozruchowych silniki te posiadają przełączniki gwiazda/trójkąt (Y/D). Może taki układ wymuszać konieczność zasilania silnika z sieci awaryjnej, gdzie agregat awaryjny posiada ograniczoną moc.

Moment przełączenia uzwojeń stojana należy analizować pod kątem:

^{1,2} Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, Wały Chrobrego 1-2 70-500 Szczecin, tel. +4891 4809386, faks +4891 4809575, e-mail: sggg@am.szczecin.pl

- ograniczenia prądów przy przełączeniu w trójkąt,
- ustalenie czasu zwłoki przełączenia Y/D.

Teoretyczne opracowanie zagadnienia jest możliwe za pomocą modelowania w pakiecie MATLAB – Simulink.

2. OPIS MATEMATYCZNY SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO ZWARTEGO

Dla analizy matematycznej SAz należy przyjąć opis w układzie współrzędnych wirujących [2]

$$\begin{aligned}
 \bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_1 \bar{\psi}_s, \\
 0 &= R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + js\omega_1 \bar{\psi}_r, \\
 \bar{\psi}_s &= L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r, \\
 \bar{\psi}_r &= L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r, \\
 M &= k \text{Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k),.
 \end{aligned} \tag{1}$$

W równaniach (1) przyjęto następujące oznaczenia: $\bar{i}_s, \bar{\psi}_s, \bar{i}_r, \bar{\psi}_r$ - wektory składowych wielkości elektromagnetycznych silnika (zmienne stanu), $R_s, L_s, R_r, L_r, L_m, J$ - parametry silnika zwartego, s, ω, M - poślizg, prędkość kątowna i moment elektromagnetyczny, \bar{u}_s, M_H - wypadkowy wektor napięcia stojana i moment obciążenia na wale silnika.

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_H$$

W rozpatrywanym modelu dla badań przyjęto silnik asynchroniczny o mocy 215 HP istniejący w bibliotece Powerlib ostatniej wersji pakietu MATLAB. Podobny silnik pracuje w kompresorze chłodniczym promu POLONIA.

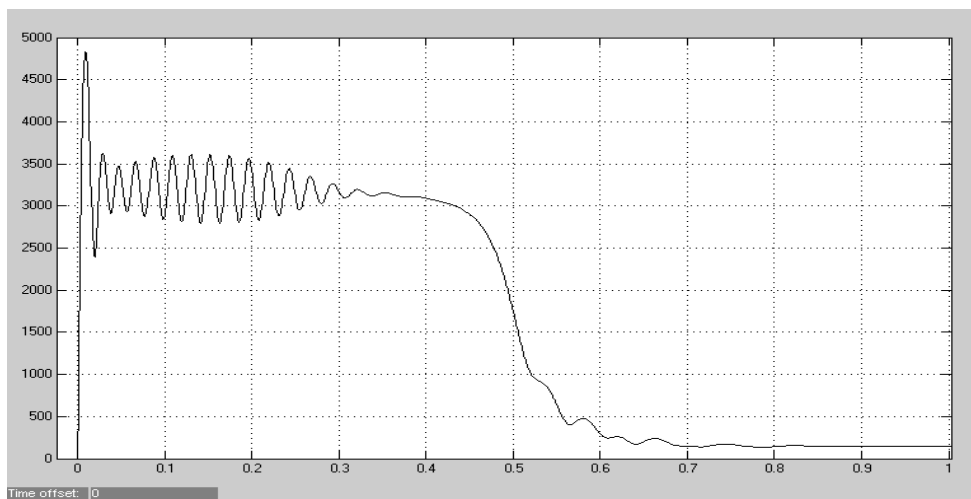
Proces rozruchu SAz z przełącznikiem Y/D można podzielić na trzy przedziały:

1. Rozruch przy obniżonym o $\sqrt{3}$ napięciu na fazie,
2. Odłączenie silnika od sieci,
3. Załączenie silnika na pełne napięcie przewodowe na fazie.

3. ROZRUCH SILNIKA PRZY POŁĄCZENIU UZWOJEŃ W GWIAZDĘ (Y)

W połączeniu w gwiazdę stojan silnika jest zasilany napięciem $U/\sqrt{3}$ – gdzie U jest napięciem przewodowym.

Dla analizy procesów przejściowych elektromagnetycznych i elektromechanicznych w pierwszej kolejności należy rozwiązać równania nieliniowe (1). Analiza ta jest oparta na opracowaniach Kovaca i Raca [2].



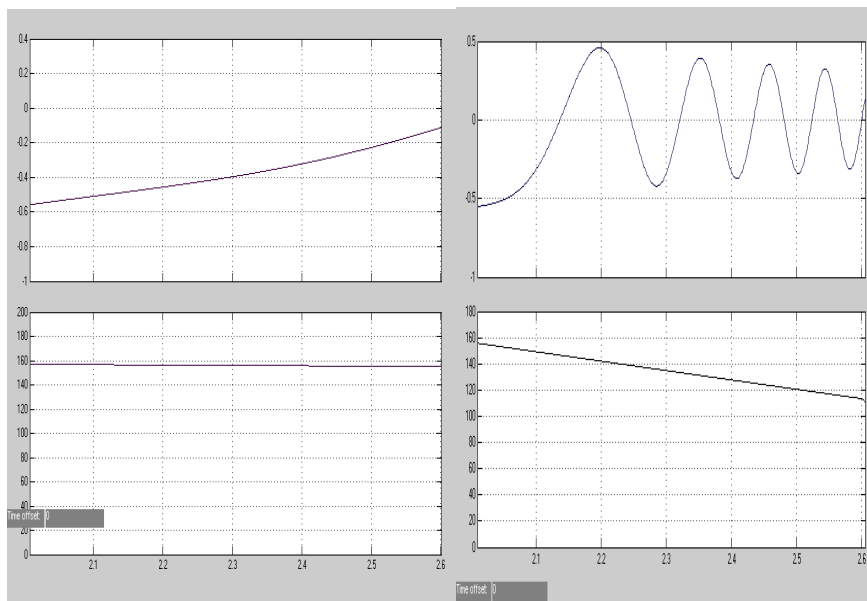
Rys.1. Rozruch SAz przy połączeniu gwiazdą.

Wielostronne badania rozruchu SAz na modelu w pakiecie MATLAB przedstawiono w [1]. Proces rozruchowy przy momencie hamowania $M_H = 200$ Nm przedstawia rysunek 1.

4. WYŁĄCZENIE URUCHOMIONEGO SILNIKA Z SIECI

Przy odłączeniu stojana od sieci prąd stojana jest zerowy. W tym przypadku z równań (1) uzyskamy równania dla wirnika

$$\frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + \frac{\bar{\psi}_r}{T_r} + js\omega_1\bar{\psi}_r = 0, \text{ gdzie } T_r = \frac{L_r}{R_r}. \quad (2)$$



a)

b)

Rys.2. Przebiegi czasowe zmian strumienia i obrotów wirnika SAz po odłączeniu od sieci zasilającej: a) bez momentu obciążenia; b) przy $M_H=200\text{Nm}$.

Rozkładając wektor pola elektromagnetycznego wirnika w osiach x i y wirujących synchronicznie otrzymamy:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{rx}}{dt} + \frac{\psi_{rx}}{T_r} - s\omega_1\psi_{ry} &= 0, \\ \frac{d\psi_{ry}}{dt} + \frac{\psi_{ry}}{T_r} + s\omega_1\psi_{rx} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{d^2\psi_{rx}}{dt^2} + \left[\frac{2}{T_r} - \frac{\dot{s}}{s} \right] \frac{d\psi_{rx}}{dt} + \left[\frac{1}{T_r^2} - \frac{\dot{s}}{T_r s} + s^2\omega_1^2 \right] \psi_{rx} = 0 \quad (4)$$

gdzie: $\dot{s} = \frac{ds}{dt}$.

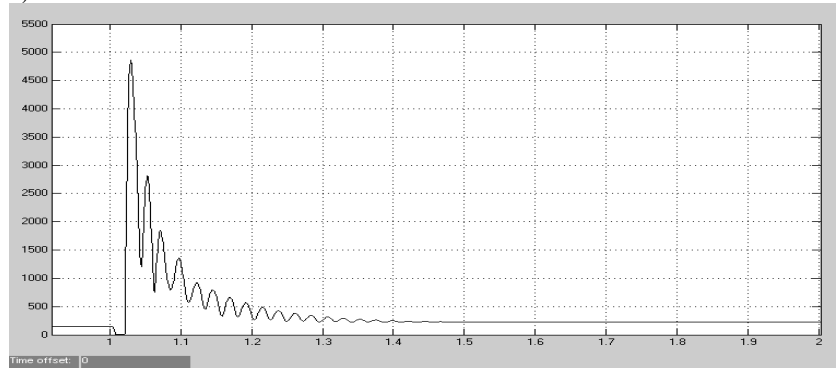
Pierwiastki równania (4) są równe:
$$p_{1,2} = -\left[\frac{1}{T_r} - \frac{\dot{s}}{2s} \right] \pm \sqrt{\left[\frac{\dot{s}}{2s} \right]^2 - s^2\omega_1^2} \quad (5)$$

Z równania tego wynika, że przy małych poślizgach pierwiastki równania (5) są rzeczywiste, ujemne i różne. Strumień wirnika Ψ_r opada przy tym bez oscylacji. Kiedy pierwiastki są zespolone, zmniejszanie strumienia ma charakter kołysań, przy czym częstotliwość kołysań rośnie ze wzrostem poślizgu. Rysunek 2 przedstawia rezultaty odłączenia SAz od sieci. Górne oscylogramy przedstawiają strumień wirnika, dolne – prędkość obrotową wirnika.

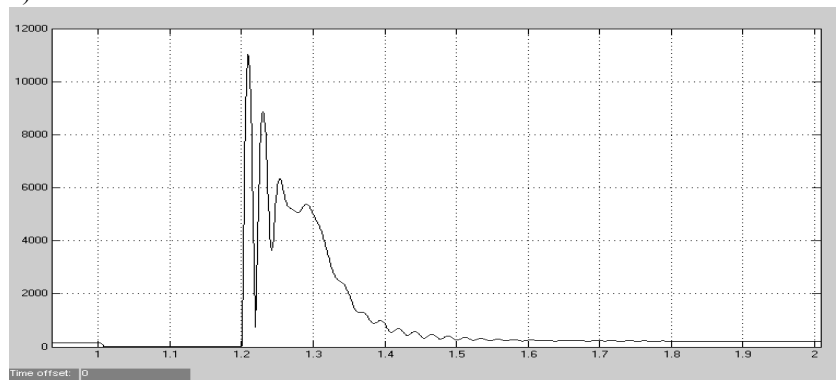
5. ZAŁĄCZENIE SILNIKA NA PEŁNE NAPIĘCIE PRZY POŁĄCZENIU UZWOJEŃ W TRÓJKĄT

Stan nieustalony prądu w uzwojeniach stojana otrzymany na modelu przedstawia rysunek 3.

a)

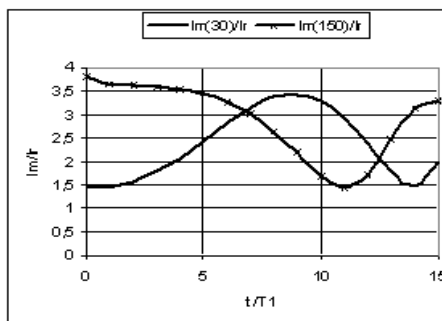


b)



Rys. 3. Przebieg zmian prądu rozruchowego SAz dla połączenia Y/D w zależności od czasu przerwy przełączenia i sposobu połączenia uzwojeń silnika

Na rysunku 4 są przedstawione zależności maksymalnego prądu przy załączeniu silnika asynchronicznego zwartego na pełne napięcie w zależności od czasu przerwy pomiędzy załączeniem uzwojeń w gwiazdę i trójkąt i sposobu połączenia uzwojeń silnika przy momencie obciążenia $MH = 200Nm$.



Rys.4. Przebieg zmian prądu rozruchowego I_{mz} dla połączenia Y/D w zależności od czasu przerwy przełączenia i sposobu połączenia uzwojeń silnika.

Z rys. 4 widać, że wydłużenie czasu przerwy w przełączeniu, może powodować podczas załączenia uzwojeń w trójkąt albo zwiększenie, albo zmniejszenie prądu w zależności od sposobu połączenia uzwojeń silnika.

Badania symulacyjne pokazały, że zanik zmian występuje po 40 okresach ($t = 0,8$ s.) przy $I_m/I_r=2.5$.

6. WNIOSKI

1. Rozpatrzenie stanów dynamicznych I_{mz} podczas rozruchu gwiazda/trójkąt pozwala na określenie prądów rozruchowych przy włączeniu trójkąta z uwzględn. momentów na wale.
2. Przy eksploatacji silników asynchronicznych zwartych zabezpieczanych elektromagnetycznymi zabezpieczeniami zwarciovymi należy uwzględnić wartość prądu przy załączeniu w trójkąt, który może 4-krotnie wzrosnąć w stosunku do prądu rozruchowego przy połączeniu w gwiazdę.
3. Dla ograniczenia prądu I_{mz} podczas przełączenia z gwiazdy na trójkąt czas zadziałania urządzenia komutacyjnego należy skrócić do 2-3 okresów napięcia zasilającego przy sposobie połączenia uzwojeń stojana (+30) i do 10-12 okresów przy połączeniu (150).

7. LITERATURA

1. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем.- MATLAB-6. «Корона- Принт». Санкт-Петербург, 2001. с 320 с ил.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер. с нем. М.Л.: Госэнергоиздат, 1963. с.735 с.: ил.