

Tomasz Zawilak, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ŁAGODNY ROZRUCH SILNIKÓW PRĄDU PRZEMIENNEGO DUŻEJ MOCY

GENTLE START OF LARGE POWER AC MOTORS

Abstract: This paper presents opportunities to alleviate process during start-up AC motors. Methods based on stator starter and autotransformer applications are described. A new concept of gentle start based on pole-changing winding is shown. This method enables effective run up current reduction and smooth synchronization of the synchronous motors.

1. Wstęp

Silniki indukcyjne oraz silniki synchroniczne to maszyny prądu przemiennego stanowiące najliczniejszą grupę odbiorników energii. Rozruch takich maszyn jest jednym z ważniejszych zagadnień dotyczących ich eksploatacji. Problem ten jest szczególnie ważny dla silników dużych mocy (rzędu kilkuset kilowatów) [1, 3, 4].

W układach napędowych z silnikami synchronicznymi najczęściej stosuje się rozruch asynchroniczny. Ze względu na podobieństwo zjawisk problem rozruchu silników synchronicznych i indukcyjnych może być analizowany w ten sam sposób. Do podstawowych zagadnień analizowanych podczas rozruchu silników dużej mocy należą wartości prądu pobieranego z sieci, prądu płynącego przez uzwojenia oraz momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez ten silnik. Wartość prądu pobieranego z sieci jest minimalizowana ze względu na spadki napięcia na transformatorze zasilającym, z którego zasilane mogą być inne odbiorniki. Prąd płynący przez uzwojenia silnika minimalizowany jest ze względu na nagrzewanie się uzwojeń oraz niezbędną liczbę załączeń następujących po sobie (wymagania technologiczne) [4]. Podczas rozruchu układu napędowego wymaga się odpowiedniej wartości momentu dynamicznego, który zależy nie tylko od momentu elektromagnetycznego, ale również od momentu oporowego. Dlatego procesy rozruchu powinny być analizowane dla układów napędowych o określonych charakterystykach obciążenia i określonych procesach technologicznych. W wielu z nich wymaga się zmienności momentu dynamicznego w czasie rozruchu np. w przenośnikach taśmowych oczekuje się początkowo niedużego momentu dynamicznego (ok. 40 % momentu znamionowego) napinają-

cego taśmę, a następnie momentu o dużej wartości (większej od znamionowej) uruchamiającego układ. Oddzielną grupę napędów stanowią pompy i wentylatory, w których początkowy moment oporowy wynosi ok. 35% momentu znamionowego, następnie maleje i po osiągnięciu ok. 20 % prędkości obrotowej znamionowej rośnie z kwadratem wzrostu tej prędkości.

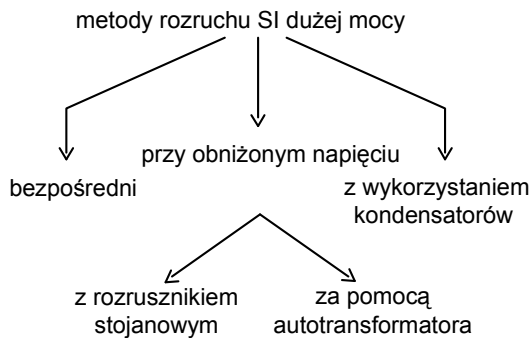
W literaturze technicznej bogato reprezentowane są zagadnienia łagodnego rozruchu układów napędowych z silnikami indukcyjnymi [6, 7]. Zagadnienia te są łatwiejsze do rozwiązania w silnikach pierścieniowych, w których możliwa jest regulacja parametrów uzwojenia wirnika. Jednakże ze względu na większą niezawodność działania oraz niższe koszty eksploatacji większą grupę stanowią napędy z silnikami indukcyjnymi klatkowymi, w których na procesy rozruchu wpływać można tylko od strony zasilania. W tych silnikach prądy rozruchowe są większe i wielokrotnie (5 do 8 razy) przekraczają prądy znamionowe.

W niniejszej pracy dokonano analizy możliwości łagodzenia procesów rozruchu silników prądu przemiennego dużej mocy ze względu na prądy pobierane z sieci, prądy płynące w uzwojeniach stojana oraz momenty elektromagnetyczne wytwarzane podczas rozruchu.

Przedstawiono nowe możliwości łagodzenia procesów rozruchu w silnikach prądu przemiennego dużej mocy przez zastosowanie przełączalnego uzwojenia twornika wytwarzającego pola magnetyczne o różnych liczbach biegunów, zmieniane prostym przełączeniem w skrzynce zaciskowej.

2. Metody rozruchu silników indukcyjnych klatkowych dużej mocy

Na rysunku 1 przedstawiono sposoby rozruchu silników indukcyjnych klatkowych dużej mocy [2, 7].



Rys. 1. Sposoby rozruchu silników indukcyjnych klatkowych dużej mocy

Przy wyborze metody rozruchu silnika indukcyjnego należy uwzględnić:

- charakterystykę mechaniczną maszyny roboczej i silnika, by w całym zakresie poślizgu uzyskać dodatni moment dynamiczny, warunkujący udany rozruch,
- parametry sieci zasilającej (łącznie z transformatorem) tzn. zmienność napięcia oraz moc zwarciovą,
- koszty inwestycyjne układu rozruchowego.

2.1 Rozruch bezpośredni

Rozruch poprzez bezpośrednie włączenie do sieci jest najczęściej stosowanym sposobem uruchomienia silników indukcyjnych klatkowych małej mocy. Jednakże w ten sposób uruchamiane są również silniki średniej, a nawet dużej mocy. Podstawowymi zaletami tej metody jest prostota oraz niski koszt inwestycyjny; wadą zaś duża wartość prądu rozruchowego powodująca spadki napięcia w sieci. Problem ten jest szczególnie istotny w takim przypadku, gdy z jednego transformatora zasilana jest większa liczba odbiorników. Odbiorniki oświetleniowe (szczególnie jarzeniowe) oraz inne silniki indukcyjne są najbardziej wrażliwe na występowanie spadków napięcia zasilającego [2]. Moment elektromagnetyczny silników indukcyjnych jest proporcjonalny do kwadratu napięcia zasilania ($M_e \sim U^2$). Jeżeli napięcie zasilania silnika o niskiej przeciążalności momentem (np. $\lambda=1,6$) zmniejszy się o 20 % ($0,8 \cdot U_n$), wówczas jego moment krytyczny wynosi:

$$M_k = (0,8)^2 \cdot 1,6 \cdot M_n = 1,024 \cdot M_n$$

co w niesprzyjających warunkach (na przykład chwilowe przeciążenie silnika) może spowodować jego utknięcie.

Spadki napięcia zasilającego mają wpływ na proces rozruchu silnika. Moment rozruchowy silnika również zależy od kwadratu napięcia zasilającego. Spadki napięć powodują zmniejszenie momentu rozruchowego, co wydłuża czas rozruchu. W układach napędowych o dużym momencie oporowym rozruch taki może być niemożliwy.

Z tych powodów przy rozruchu bezpośrednim dąży się do ograniczenia spadków napięć w sieci zasilającej, co jednak jest związane z potrzebą zastosowania transformatora zasilającego o odpowiednio dużej mocy. Minimalną moc transformatora, przy której podczas rozruchu spadki napięcia nie przekroczą określonej wartości określić można na podstawie zależności:

$$S_T \geq \frac{\beta}{1-\beta} \cdot \frac{u_z \cdot k_r}{100} \cdot \frac{P_n}{\eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad (1)$$

w której:

$$\beta = \frac{U_1}{U_n} - \text{względna wartość minimalnego na-}$$

pięcia zasilania (uwzględniająca dopuszczalny spadek napięcia),

$$k_r = \frac{I_r}{I_n} - \text{względny początkowy prąd rozru-}$$

chowy silnika,

$\eta_n, \cos \varphi_n$ - znamionowe wartości sprawności i współczynnika mocy silnika,

u_z - procentowe napięcie zwarcia transformatora.

Oznacza to, że moc znamionowa transformatora musi być znacznie większa od mocy znamionowej silnika.

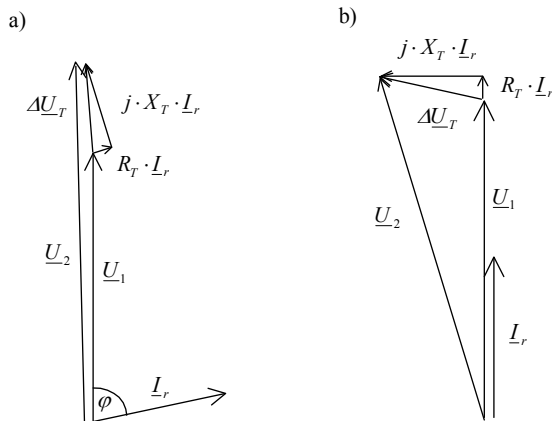
Z zależności 1 wynika, że im mniejszy jest dopuszczalny spadek napięcia podczas rozruchu, tym większa powinna być moc transformatora zasilającego np. dla dopuszczalnego spadku napięcia 10 % ($\beta=0,9$), moc znamionowa transformatora zasilającego powinna być ponad pięciokrotnie większa od mocy silnika zasilanego. W stanie normalnej pracy (po rozruchu) transformator taki jest niedociążony, co pogarsza sprawność całego układu.

Na spadek napięcia w układzie zasilającym duży wpływ ma nie tylko wartość prądu rozru-

chowego, ale również jego przesunięcie kątowe względem wektora napięcia.

Na rysunku 2 przedstawiono wykresy wskazowe transformatora przy przepływie prądu o tej samej wartości (prądu rozruchowego I_r) ale o różnej fazie względem wektora napięcia strony wtórnej \underline{U}_2 .

Dla transformatorów dużej mocy reaktancja rozproszenia jest znacznie większa od rezystancji uzwojenia ($X_T \gg R_T$), wobec czego spadek napięcia na reaktancji jest znacznie większy od spadku napięcia na rezystancji. Jeżeli przez transformator płynie prąd o charakterze biernym to wówczas spadek napięcia na reaktancji rozproszenia dodaje się niemal algebraicznie do napięcia wtórnego \underline{U}_2 (rys. 2 a).



Rys. 2. Wykres wskazowy transformatora przy przepływie prądu rozruchowego: o charakterze biernym (a) oraz o charakterze czynnym (b)

Gdy przez transformator płynie prąd o tej samej wartości, lecz charakterze czynnym (rys. 2 b) to spadek napięcia na transformatorze dodaje się do napięcia wtórnego \underline{U}_2 geometrycznie prawie prostopadle. Powstaje wówczas przesunięcie kątowe pomiędzy wektorami \underline{U}_1 i \underline{U}_2 natomiast ich moduły pozostają w przybliżeniu takie same. Spadki napięcia podczas rozruchu silnika indukcyjnego są przede wszystkim wynikiem przepływu składowej biernej prądu.

2.2 Rozruch z zastosowaniem rozrusznika stojanowego

Zastosowanie rozrusznika stojanowego jest jednym ze sposobów rozruchu silników prądu przemiennego polegającym na zmniejszeniu napięcia zasilającego. Prąd pobierany z sieci maleje wskutek zwiększenia impedancji wypadkowej równej sumie impedancji silnika i rozrusznika.

Schemat układu do rozruchu silnika prądu przemiennego z rozrusznikiem stojanowym przedstawiono na rysunku 3.

W pierwszej fazie rozruchu silnika zamyka się wyłącznik W_1 . Napięcie na silniku SI jest pomniejszone, w stosunku do napięcia zasilania, o spadki napięć na impedancji rozrusznika, przez który przepływa prąd rozruchowy a silnik wytwarza moment rozruchowy opisany zależnością

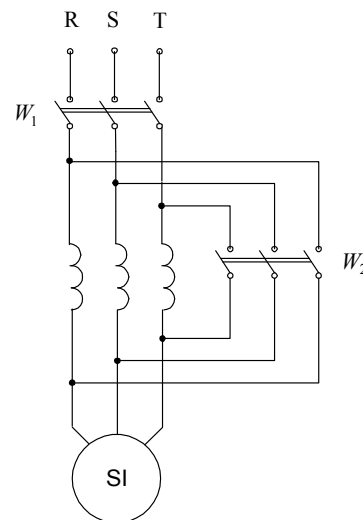
$$I'_r = I_r \cdot \frac{U'}{U_n} \quad (2)$$

$$M'_r = M_r \cdot \left(\frac{U'}{U_n}\right)^2 \quad (3)$$

W zależnościach (2) (3) oznaczono:

I'_r, M'_r - wartości prądu i momentu rozruchowego występujące przy obniżonym napięciu U' ,

I_r, M_r - wartości prądu i momentu rozruchowego dla napięcia znamionowego U_n .



Rys. 3. Schemat połączenia układu do rozruchu silnika indukcyjnego klatkowego z rozrusznikiem stojanowym

Po zakończonym rozruchu, kiedy prędkość silnika jest bliska prędkości znamionowej, boczkuje się rozrusznik przez zamknięcie wyłącznika W_2 .

Jak wynika z zależności 2 wartość prądu rozruchowego jest proporcjonalna do napięcia na silniku natomiast moment rozruchowy jest zależny od kwadratu tego napięcia (3).

Ten sposób rozruchu jest mało przydatny szczególnie w układach o dużym momencie oporowym bowiem zmniejszenie prądu rozru-

chowego o ok. 20 % ($U' = 0,8U_n$) powoduje jednocześnie zmniejszenie momentu rozruchowego o ok. 36 % ($M_r' = 0,64M_n$).

Rozruch z zastosowaniem rozrusznika stojanowego może być stosowany w układach napędowych o wentylatorowej charakterystyce mechanicznej. Właściwy dobór parametrów (rezystancji i reaktancji) rozrusznika elektromagnetycznego do parametrów silnika pozwala na optymalne (algebraiczne) odejmowanie spadku napięcia w całym procesie rozruchu, co w istotny sposób zmniejsza gabaryty, masę i cenę tego rozrusznika.

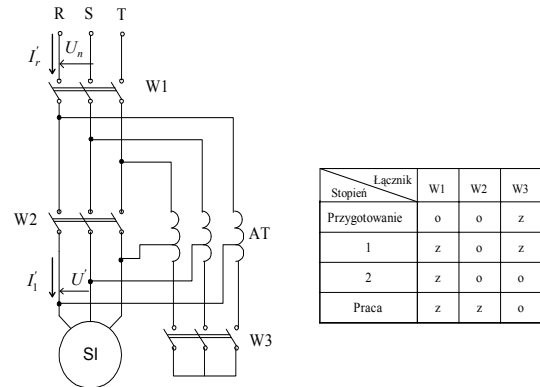
Ponieważ spadek napięcia na rozruszniku jest proporcjonalny do malejącego w miarę przyrostu prędkości obrotowej prądu, to zwiększające się napięcie na silniku powoduje wzrost momentu elektromagnetycznego. Zależność ta jest szczególnie cenna w układach napędowych o wentylatorowej charakterystyce mechanicznej, bo umożliwia utrzymanie w przybliżeniu stałego momentu dynamicznego. Jednym z rozwiązań konstrukcyjnych rozruszników stojanowych jest rozrusznik wiroprowadowy. Prace nad takimi rozrusznikami prowadzone są od wielu lat. Rozruszniki te włączane do obwodu wirnika silnika pierścieniowego znalazły szereg zastosowań przemysłowych. Ich wykorzystanie do rozruchu silników indukcyjnych klatkowych w roli rozruszników stojanowych datuje się od lat dziewięćdziesiątych.

Podstawową zaletą wiroprowadowych rozruszników stojanowych jest możliwość dostosowania ich impedancji do parametrów silnika w chwili rozruchu. Dostosowanie optymalne pozwala zminimalizować wartość spadku napięcia na rozruszniku przy jednoczesnym obniżeniu napięcia na zaciskach silnika do wymaganej wartości. Ma to miejsce wówczas, gdy współczynnik mocy rozrusznika jest równy współczynnikowi mocy silnika, czyli występuje algebraiczne odejmowanie się napięć. Pozytywną cechą rozruszników wiroprowadowych jest samoczynne zmniejszenie się spadku napięcia związane z wartością prądu rozruchowego oraz prędkością obrotową silnika. Do innych zalet rozruszników wiroprowadowych należy ich prosta konstrukcja, niski koszt wytworzenia, możliwość stosowania do silników o dowolnej mocy i napięciu znamionowym, co jest szczególnie istotne dla maszyn wysokonapięciowych.

2.3 Rozruch za pomocą autotransformatora rozruchowego

Zastosowanie autotransformatora jest kolejnym sposobem łagodzenia procesów rozruchu silników prądu przemiennego polegającym na zmniejszeniu napięcia zasilającego [2].

Schemat połączenia układu pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat połączenia układu podczas rozruchu silnika z zastosowaniem autotransformatora (układ Korndorfera)

Podobnie jak przy zastosowaniu rozrusznika stojanowego silnik w wyniku zasilania obniżonym napięciem pobiera prąd proporcjonalny do napięcia oraz wytwarza moment proporcjonalny do kwadratu napięcia. Natomiast prąd rozruchowy pobierany z sieci (po stronie pierwotnej autotransformatora), po uwzględnieniu przekładni \mathcal{G}_e , jest również zależny od kwadratu względnej wartości napięcia na silniku.

$$I_1' = I_r \frac{U'}{U_n} = I_r \cdot \frac{1}{\mathcal{G}_e}$$

$$I_r' = I_1' \frac{U'}{U_n} = I_r \cdot \left(\frac{1}{\mathcal{G}_e} \right)^2 \quad (4)$$

$$M_r' = M_r \cdot \left(\frac{1}{\mathcal{G}_e} \right)^2$$

W zależnościach 4 przyjęto następujące oznaczenia:

I_1' - prąd rozruchowy pobierany przez silnik przy obniżonym napięciu zasilania U' (po stronie wtórnej autotransformatora),

I_r' - prąd rozruchowy pobierany z sieci przy obniżonym napięciu zasilania U' (po stronie pierwotnej autotransformatora),

I_r –prąd rozruchowy pobierany z sieci przy znamionowym napięciu zasilania silnika U_n ,

M'_r –moment rozruchowy silnika występujący przy obniżonym napięciu zasilania U' ,

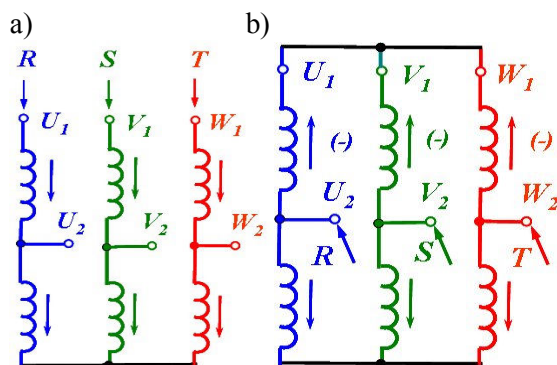
M_r –moment rozruchowy silnika występujący przy znamionowym napięciu zasilania silnika U_n ,

\mathcal{G}_e –przekładnia autotransformatora.

W praktycznych układach dąży się do tego, aby przełączenie na pełną wartość napięcia zasilania odbywało się w jak najkrótszym czasie oraz bez przerw beznapięciowych. Warunki te spełnia układ Korndorfera, w którym rozruch odbywa się dwustopniowo. Na pierwszym stopniu silnik jest zasilany obniżonym napięciem U' (z autotransformatora), natomiast na drugim po rozwarciu gwiazdy autotransformatora część jego uzwojenia połączona jest szeregowo z uzwojeniem silnika spełniając rolę dławika. Kolejność łączeń podczas rozruchu silnika przedstawiono w tabeli na rysunku 4.

Rozruch za pomocą zmiany liczby biegunów pola magnetycznego (dwubiegowy)

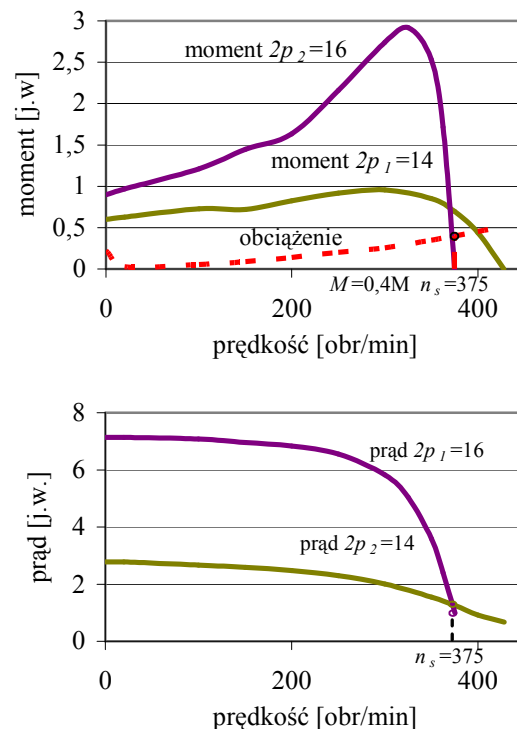
Do łagodzenia rozruchu wykorzystuje się uzwojenie twornika, którego zezwoje na obwodzie rozłożone są w taki sposób, że w zależności od przyłączenia napięcia zasilającego wytwarzają pole magnetyczne o liczbie biegunów równej $2p_1$ lub $2p_2$ (rys. 5) [10].



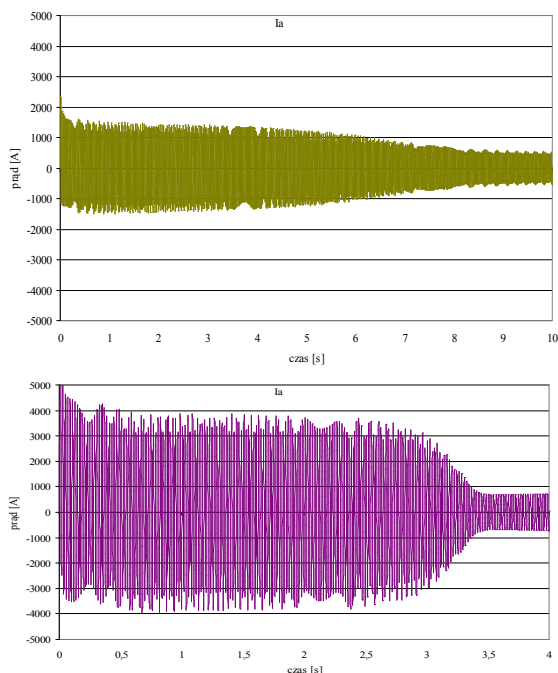
Rys. 5. Schemat połączenia uzwojenia o zmieniarnych liczbach biegunów pola magnetycznego

Wykorzystując szeregowe i równoległe połączenie sekcji w grupach fazowych uzwojenia zmienia się impedancję uzwojenia w stosunku 1:4. Impedancja ta decyduje o wartości prądu rozruchowego stąd istnieje możliwość łagodze-

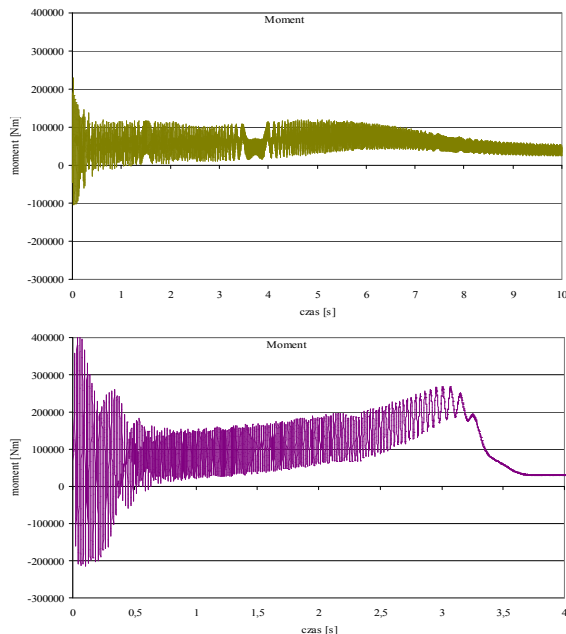
nia procesów rozruchu silnika. O wartości momentu elektromechanicznego decyduje wartość indukcji magnetycznej pola wytworzonego w silniku, która zależy od wartości napięcia zasilającego i liczby zwojów szeregowych pasma fazowego. Rozruch silnika odbywa się z małym prądem w układzie szeregowego połączenia zezwojów dla mniejszej liczby biegunów pola magnetycznego $2p_1$ (np. 14), a następnie po osiągnięciu prędkości obrotowej nieco większej od synchronicznej (np. 390 obr/min) odpowiadającej większej liczbie biegunów $2p_2$ jest przełączany na drugą liczbę biegunów $2p_2 = 16$ warunkującą prędkość obrotową synchroniczną $n = 375$ obr/min. Silnik jest synchronizowany z nadsynchronizmem przy prądzie niewiele większym od znamionowego. Przykład obliczenia prądów i momentów podczas rozruchu dwubiegowego dla badanego silnika pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Obliczone charakterystyki mechaniczne i prądu rozruchowego dla większej $2p_2=16$ oraz mniejszej $2p_1=14$ liczby biegunów pola magnetycznego podczas rozruchu dwubiegowego



Rys. 7. Czasowy wykres prądu podczas rozruchu dwubiegowego i bezpośredniego badanego silnika



Rys. 9. Czasowy wykres momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu dwubiegowego i bezpośredniego badanego silnika

3. Wnioski

Na podstawie przedstawionych rysunków można stwierdzić:

- zastosowanie odpowiedniej konfiguracji uzwojenia stojana umożliwiający dwubiegowy rozruch pozwala znacząco złagodzić procesy rozruchowe a mianowicie zmniejszyć

prąd pobierany z sieci oraz moment dynamiczny podczas rozruchu silnika,

- zmniejszenie prądu rozruchowego i momentu dynamicznego odbywa się bez zastosowania dodatkowych urządzeń co zwiększa niezawodność układu napędowego oraz zmniejsza koszty jego modernizacji,
- synchronizacja silników synchronicznych może być dokonywana z nadsynchronizmu co złagodzi procesy dynamiczne występujące podczas tego procesu.

Literatura

- [1]. Das, J.C.; Casey, J.: *Characteristics and analysis of starting of large synchronous motors* Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, s. 1-10, 1999
- [2]. Gogolewski Z. Kuczewski Z.: *Napęd elektryczny* WNT Warszawa 1972 r.
- [3]. Kazi T.: *Practical requirements for starting very large machines*, IEE Colloquium on Design, Operation and Maintenance of High Voltage (3.3 kV to 11 kV) Electric Motors for Process Plant, s. 1-6, 1999.
- [4]. Nevelsteen, J.; Aragon, H.: *Starting of large motors-methods and economics* IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 25, No. 6, s. 1012 - 1018, 1989
- [5]. Sangha G.S.: *Capacitor-Reactor Start of Large Synchronous Motor on a Limited Capacity Network* IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-19, No. 6, s.1036 – 1045, 1983
- [6]. Zawilak T.: *Rozruch silników dużej mocy prądu przemiennego przy rozdzielonych uzwojeniach stojana* Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel nr 80, s. 233-237, 2008.
- [7]. Zawilak T., Antal L., Zawilak J.: *Prąd rozruchowy silników indukcyjnych z rozdzielonymi uzwojeniami stojana*. XL International Symposium on Electrical Machines, s. 392-399, 2004.
- [8]. Zawilak T., Antal L., Zawilak J.: *Łagodzenie procesów rozruchowych w silnikach prądu przemiennego*. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa nr 7, s. 90-98, 2004.
- [9]. Zawilak T., Antal L., Zawilak J.: *Rozruch silników indukcyjnych z rozdzielonymi uzwojeniami stojana*, Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel nr 68, s. 99-105, 2004.
- [10]. Zawilak J.: *Uzwojenia zmiennobiegowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Prace Naukowe IUElm. PWr. serii M nr 37 Wrocław 1986.

Adres Autorów:

Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn,
Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
e-mail: tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl
jan.zawilak@pwr.wroc.pl