

doi:10.15199/48.2017.11.42

## Wpływ forsowania wzbudzenia na proces synchronizacji silnika synchronicznego o ciężkim rozruchu

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych procesu synchronizacji silnika synchronicznego jawnobiegunowego w warunkach ciężkiego rozruchu asynchronicznego. Rozpatrzono konieczność oraz wpływ forsowania prądu wzbudzenia na przebieg procesu synchronizacji. Przeanalizowano możliwość skrócenia czasu forsowania wzbudzenia na podstawie pomiaru prędkości wału silnika. Porównano przebiegi procesu synchronizacji dla długiego oraz skróconego czasu forsowania prądu wzbudzenia.

**Abstract.** The article presents results of simulation researches of the silent-pole synchronous motor synchronization process under heavy start-up conditions. The need and the impact of forcing excitation current on the process of synchronization has been considered. The possibility of the excitation force time reduction, based on the measuring of the speed of the motor shaft has been analysed. Waveforms of the synchronization process for long and short-time of the excitation current forcing has been compared. (Impact of the excitation forcing for synchronization process of synchronous motor under heavy start-up)

**Słowa kluczowe:** silnik synchroniczny, rozruch asynchroniczny, synchronizacja, sterowanie prądem wzbudzenia, symulacja komputerowa  
**Keywords:** synchronous motor, asynchronous start-up, synchronization, excitation current control, computer simulation

### Wstęp

Rozruch silników synchronicznych dużej mocy przeprowadza się zazwyczaj metodą rozruchu asynchronicznego bezpośredniego lub z wykorzystaniem dławika rozruchowego [1, 2, 3]. W przypadku znacznego momentu obciążenia i momentu bezwładności układu napędowego rozruch tego typu można uznać za rozruch w ciężkich warunkach.

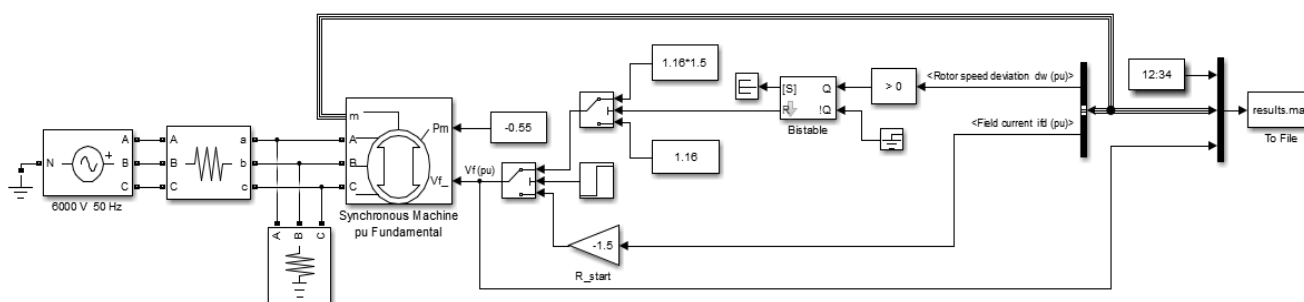
Łagodzenie oraz skrócenie czasu procesu synchronizacji można uzyskać rozpoczynając proces synchronizacji w korzystnych warunkach, określonych wzajemnym położeniem osi pól magnetycznych stojana i wirnika [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Jednak w przypadku rozruchów w ciężkich warunkach, wybór korzystnej chwili włączenia napięcia do uzwojenia wzbudzenia może być niewystarczający do skutecznej synchronizacji silnika. W takich przypadkach stosuje się forsowanie prądu wzbudzenia [12] w chwili rozpoczęcia procesu synchronizacji. Pozwala to na przeforsowanie przemiennej napięcia indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia i wymuszenie przepływu prądu wzbudzenia o odpowiednim kierunku oraz zwiększenie momentu synchronizującego i przyspieszenia wirnika do prędkości synchronicznej.

Możliwość forsowania prądu wzbudzenia wymaga odpowiedniego układu zasilania obwodu wzbudzenia, przewymiarowanego w stosunku do parametrów wymaganych dla prądu o wartości znamionowej. Pomimo tego, że w pełni wykorzystywany jest tylko przez bardzo krótki czas, w napędach o ciężkim rozruchu odpowiednie przewymiarowanie układu zasilania wzbudzenia, ze

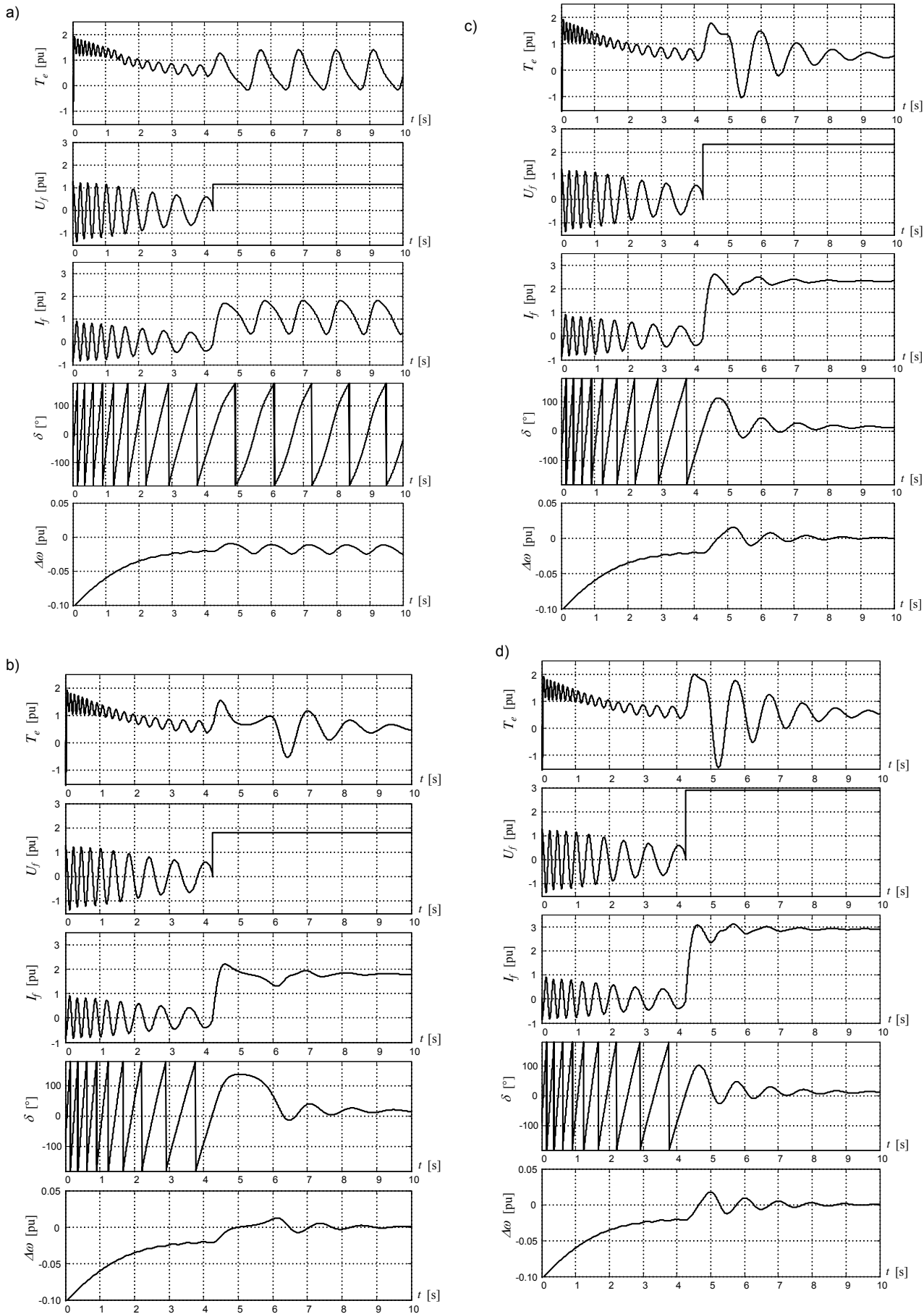
względu na możliwość forsowania prądu, może okazać się niezbędne.

Rozruch asynchroniczny silnika synchronicznego realizowany jest poprzez włączenie napięcia zasilania stojana bez zasilania obwodu wzbudzenia przy zwartym przez rezystancję uzwojeniu wzbudzenia. Wirujące pole kołowe powstałe na skutek przyływu prądu w uzwojeniach stojana indukuje prądy wirowe w litych nabiegunkach magnetycznych oraz prądy w uzwojeniach tłumiących i uzwojeniu wzbudzenia, działających podobnie jak klatka rozruchowa w silniku asynchronicznym. Po osiągnięciu przez wirnik maszyny prędkości bliskiej prędkości synchronicznej, w uzwojeniu wzbudzenia indukowane są niewielkie prądy o małej częstotliwości, rezystor rozruchowy jest rozwierany, a uzwojenie wirnika zasilane jest napięciem stałym. Moment synchronizujący powstały na skutek przyłożonego do uzwojenia wzbudzenia napięcia zależy od wartości tego napięcia.

Przy dużej wartości momentu bezwładności, przepływ prądu w uzwojeniu powoduje, że proces synchronizacji nie kończy się z chwilą osiągnięcia przez silnik prędkości synchronicznej. Wzajemne oddziaływanie momentu synchronicznego, momentu asynchronicznego, momentu mechanicznego oraz momentu bezwładności wywołuje oscylacje prędkości wokół wartości ustalonej, co skutkuje znaczącymi pulsacjami momentu elektromagnetycznego i wydłużeniem czasu procesu synchronizacji [5, 11, 13, 14, 15]. Wzrost prądu wzbudzenia prowadzi do zwiększenia wartości momentu synchronizującego, ale wywołuje również duże zmiany wartości chwilowej momentu na wale silnika.



Rys.1. Model symulacyjny programu Matlab-Simulink



Rys.2. Przebieg procesu synchronizacji przy włączeniu napięcia stałego do obwodu wzbudzenia w chwili  $t=4,25$  s: a)  $U_w=U_{wN}$ , b)  $U_w=1,5U_{wN}$ , c)  $U_w=2,0U_{wN}$ , d)  $U_w=2,5U_{wN}$ ;  $T_e$  – moment elektromagnetyczny,  $U_f$  – napięcie obwodu wzbudzenia,  $I_f$  – prąd obwodu wzbudzenia,  $\delta$  – kąt pomiędzy osią pola stojana, a osią pola wirnika,  $\Delta\omega$  - odchyłka prędkości względem prędkości synchronicznej

## Badania symulacyjne

Obiektem badań był silnik synchroniczny jawnobiegunowy typu GAe-1510p/01 o danych znamionowych przedstawionych w Tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe silnika synchronicznego GAe1510p/01

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Moc znamionowa	$P_N$	1250 kW
Napięcie stojana	$U_{N(Y)}$	6000 V
Prąd stojana	$I_N$	140 A
Napięcie wzbudzenia	$U_{wN}$	79 V
Prąd wzbudzenia	$I_{wN}$	220 A
Częstotliwość	$f_N$	50 Hz
Prędkość obrotowa	$n_N$	600 obr/min
Współczynnik mocy	$\cos\phi_N$	0,9 poj.

W celu określenia strategii sterowania napięciem obwodu wzbudzenia podczas procesu synchronizacji silnika opracowano model symulacyjny w środowisku Matlab-Simulink przedstawiony na rysunku 1. Warunki ciężkiego rozruchu zasymulowano poprzez dobór momentu obciążenia i momentu bezwładności układu napędowego.

Na przebiegi dynamiczne podczas procesu synchronizacji, poza momentem obciążenia, momentem bezwładności układu napędowego oraz stałą czasową obwodu wzbudzenia, istotny wpływ ma wzajemne położenie osi pól stojana i wirnika w chwili włączenia napięcia stałego do obwodu wzbudzenia [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Badania symulacyjne przeprowadzono włączając napięcie do obwodu wzbudzenia w chwili, gdy prąd indukowany w uzwojeniu wzbudzenia zmienia kierunek przepływu z wartości ujemnej na dodatnią, co odpowiada kątowi pomiędzy osiami pola magnetycznego stojana i wirnika zbliżonemu do  $0^\circ$ . Takie położenie wirnika względem pola stojana podczas inicjalizacji procesu synchronizacji stwarza korzystne warunki dla przebiegów dynamicznych podczas procesu synchronizacji i może być w prosty sposób wykryte przez układ sterowania.

Jak można zauważyć na rysunku 2a), dla przyjętych parametrów obciążenia, prąd wzbudzenia wymuszany przez przyłożenie do uzwojenia wzbudzenia napięcia o wartości znamionowej (1,16 pu) jest zbyt mały, aby wytworzyć niezbędny moment synchronizujący. Po osiągnięciu prędkości podsynchronicznej wirnik silnika nie zostaje wciągnięty do pracy synchronicznej. Duża wartość poślizgu powoduje, że silnik nie może uzyskać stanu pracy synchronicznej. Ustalony stan asynchroniczny, na skutek różnicy prędkości wirowania pola stojana i pola wirnika wytworzonego na skutek przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia, powoduje oscylacje prądu stojana i prądu wzbudzenia oraz znaczne udary momentu i wahania prędkości obrotowej.

Dla układów napędowych o ciężkim rozruchu niezbędne może okazać się forsowanie prądu wzbudzenia podczas procesu synchronizacji silnika. Na rysunku 2b) przedstawiono przebieg procesu synchronizacji przy forsowaniu prądu wzbudzenia napięciem o wartości  $1,5U_{wN}$  (1,74 pu). Dla przyjętych parametrów obciążenia jest to graniczna wartość napięcia pozwalająca na zsynchronizowanie silnika. Nie należy jednak zakładać, że tak dobrana wartość napięcia forsowania wzbudzenia zapewni skuteczny rozruch silnika w warunkach przemysłowych. W przypadku wahań napięcia w sieci zasilającej spowodowanych np. oddziaływaniem innych odbiorników energii, możliwe jest zmniejszenie momentu rozwijanego przez silnik wskutek obniżenia napięcia zasilania stojana [3]. Konieczne jest więc ustalenie parametrów forsowania z odpowiednim współczynnikiem

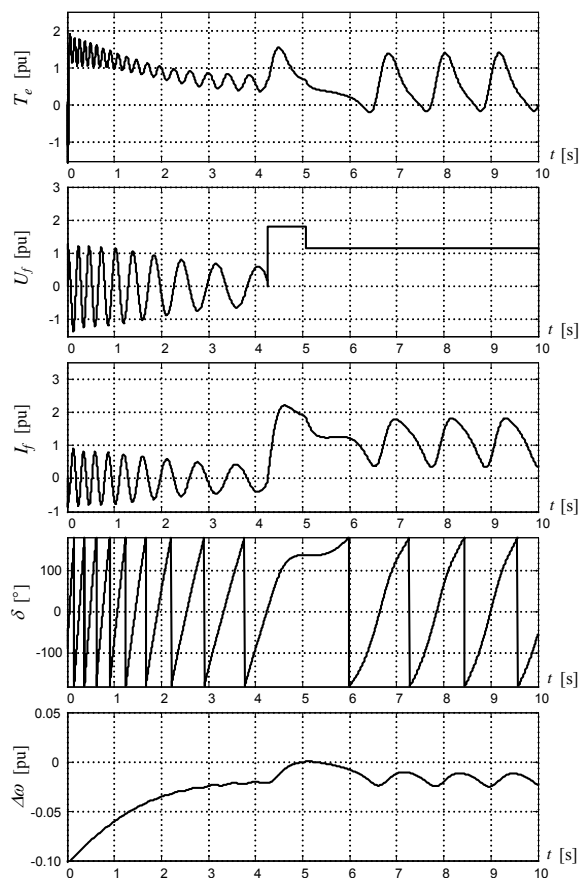
bezpieczeństwa uwzględniającym możliwość zmiany warunków zasilania silnika.

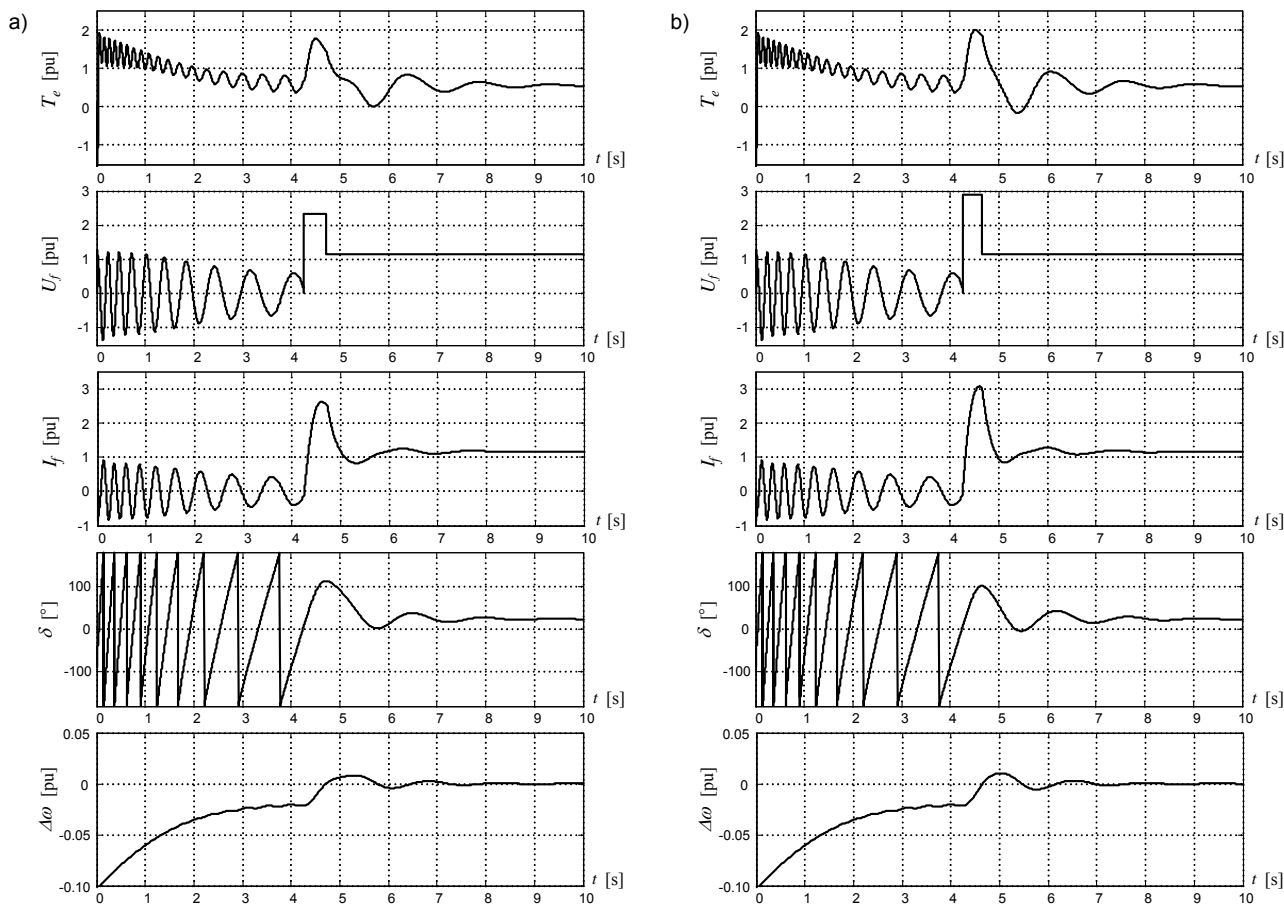
Na rysunku 2c) i 2d) przedstawiono przebieg procesu synchronizacji przy forsowaniu prądu wzbudzenia napięciem odpowiednio  $2,0U_{wN}$  (2,32 pu) oraz  $2,5U_{wN}$  (2,9 pu).

Jak można zauważyć z przebiegów przedstawionych na rysunku 2 wymuszenie forsowania prądu jest konieczne do wytworzenia momentu synchronizującego pozwalającego na osiągnięcie prędkości synchronicznej. Jednak w dalszej części procesu powiększony prąd wzbudzenia wpływa niekorzystnie na dynamikę procesu. Oddziaływanie momentu bezwładności powoduje powstanie momentu hamującego po okresie nadwyżki momentu rozwijanego przez silnik nad momentem obciążenia (kołysanie wirnika).

W układach przemysłowych czas forsowania prądu wzbudzenia ustalany jest zazwyczaj parametrem czasowym. Po upływie zadanego czasu napięcie w obwodzie wzbudzenia jest obniżane do wartości znamionowej lub wartości wynikającej z realizacji innych procesów, np. kompensacji mocy biernej [16].

Na podstawie przedstawionych badań symulacyjnych można wyciągnąć wniosek, że czas forsowania prądu wzbudzenia można ograniczyć do chwili, gdy powiększony moment synchronizujący spowoduje przyspieszenie wirnika do prędkości synchronicznej.





Rys.4. Przebieg procesu synchronizacji przy włączeniu napięcia stałego do obwodu wzbudzenia w chwili  $t=4,25$  s i zmianie do wartości znamionowej po osiągnięciu prędkości synchronicznej: a)  $U_w=2,0U_{wN}$ , b)  $U_w=2,5U_{wN}$ ;  $T_e$  – moment elektromagnetyczny,  $U_f$  – napięcie obwodu wzbudzenia,  $I_f$  – prąd obwodu wzbudzenia,  $\delta$  – kąt pomiędzy osią pola stojana, a osią pola wirnika,  $\Delta\omega$  - odchyłka prędkości

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg procesu synchronizacji przy forsowaniu prądu wzbudzenia napięciem o wartości  $1,5U_{wN}$  (1,74 pu) do chwili osiągnięcia przez silnik po raz pierwszy prędkości synchronicznej. Jak można zauważyć skrócenie czasu forsowania spowodowało spadek prędkości i ustalenie się pracy asynchronicznej. Dla przyjętych parametrów obciążenia forsowanie prądu wzbudzenia napięciem  $1,5U_{wN}$  jest przypadkiem granicznym i nie powinno być stosowane w układzie rzeczywistym.

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg procesu synchronizacji przy forsowaniu prądu wzbudzenia napięciem odpowiednio  $2,0U_{wN}$  (2,32 pu) oraz  $2,5U_{wN}$  (2,9 pu) i obniżeniem napięcia wzbudzenia do wartości znamionowej w chwili osiągnięcia przez silnik po raz pierwszy prędkości synchronicznej. Jak można zauważyć silnik synchronizuje się, a proces przebiega z mniejszymi udarami momentu niż w przypadkach przedstawionych na rysunku 2c) i 2d).

Dla przyjętych parametrów obciążenia forsowanie prądu wzbudzenia napięciem  $2,0U_{wN}$  (2,32 pu) jest wystarczające z uwzględnieniem niezbędnego zapasu i nie powoduje tak dużych udarów momentu jak dla  $2,5U_{wN}$  (2,9 pu). Obniżenie napięcia wzbudzenia do wartości znamionowej w chwili osiągnięcia po raz pierwszy prędkości synchronicznej pozwala na zredukowanie niekorzystnego oddziaływania momentu hamującego.

Na podstawie przebiegów przedstawionych na rysunku 2b) oraz 4a) można uznać, że dla przyjętych warunków symulacji korzystniejsze jest synchronizowanie silnika przy napięciu  $2,0U_{wN}$  (2,32 pu) włączonym do uzwojenia

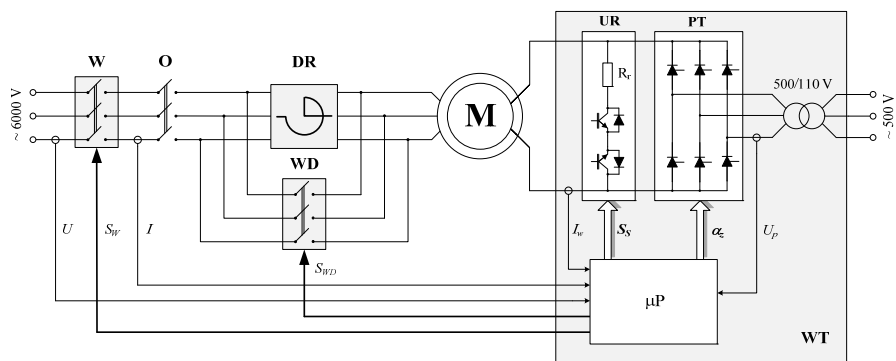
wzbudzenia z ograniczonym czasem działania niż ciągłe wymuszanie prądu napięciem o wartości  $1,5U_{wN}$  (1,74 pu). Dalsze zwiększenie napięcia forsowania nie wpływa znacząco na proces synchronizacji.

#### Mikroprocesorowo sterowany blok zasilania wzbudzenia silnika synchronicznego

Na rysunku 5 przedstawiono schemat blokowy, opracowanego przy współudziale autora, bloku zasilania wzbudzenia silnika synchronicznego ze sterowaniem mikroprocesorowym [16].

Urządzenie przeznaczone jest do współpracy z silnikami dużej mocy o znamionowym napięciu stojana 6 kV i prądzie wzbudzenia do 400 A. Oprogramowanie systemu mikroprocesorowego pozwala m.in. na przeprowadzenie rozruchu asynchronicznego silnika w układzie klasycznym lub z dławikiem rozruchowym. Sterowanie prądem wzbudzenia realizowane jest przez system mikroprocesorowy za pomocą zmian kąta opóźnienia załączenia tyrystorów mostka zasilającego uzwojenie wzbudzenia.

System mikroprocesorowy przeprowadza rozruch silnika poprzez sterowanie łącznikami w polu 6 kV zasilającym silnik oraz odpowiednie sterowanie prądem wzbudzenia. Procedura rozruchu asynchronicznego wykonywana przez mikroprocesorowy blok zasilania wzbudzenia może być realizowana według różnych, parametryzowanych algorytmów, m.in. algorytmów czasowych, prądowych, prędkościowych i częstotliwościowych [3, 16] z możliwością forsowania prądu wzbudzenia podczas synchronizacji.



Rys.5. Schemat układu sterowania silnika z mikroprocesorowy blokiem zasilania wzbudzenia i dławikiem rozruchowym: M – silnik synchroniczny, WT – blok zasilania wzbudzenia, µP - system mikroprocesorowy, PT – prostownik tyrystorowy, UR – układ rozruchowy, W – wyłącznik, O – odłącznik, WD – wyłącznik dławika, DR – dławik rozruchowy

W dotychczasowych wdrożeniach, w przypadku konieczności forsowania prądu wzbudzenia podczas procesu synchronizacji, czas forsowania zależy od wartości ustawialnej parametrem i dobieranej podczas uruchamiania układu. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że możliwe jest uzależnienie czasu forsowania prądu wzbudzenia od wartości prędkości uzyskiwanej przez silnik podczas początkowej fazy procesu synchronizacji. Pozwoli to na ograniczenie czasu przepływu prądu o wartości większej od znamionowej w uzwojeniu wzbudzenia oraz umożliwi zredukowanie niekorzystnego oddziaływania momentu hamującego, powstającego po chwilowych okresach nadwyżki momentu rozwijanego przez silnik, w stosunku do momentu obciążenia ze względu na „sprężyste”, wzajemne oddziaływanie momentu synchronicznego, momentu mechanicznego i momentu bezwładności układu napędowego [5, 11, 15].

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę wpływu forsowania prądu wzbudzenia na przebieg procesu synchronizacji silników synchronicznych o ciężkim rozruchu asynchronicznym.

Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na określenie możliwości skrócenia czasu forsowania prądu wzbudzenia podczas synchronizacji silnika. Ograniczenie czasu forsowania prądu wzbudzenia, przy odpowiedniej wartości napięcia zasilającego uzwojenie wzbudzenia, pozwala na skuteczne zsynchronizowanie silnika, a jednocześnie umożliwia znaczące ograniczenie niekorzystnych zjawisk, spowodowanych na skutek oddziaływania momentu bezwładności układu napędowego, na przebiegi dynamiczne podczas procesu synchronizacji.

Uzyskane wyniki pozwolą na modyfikację algorytmu rozruchowego mikroprocesorowego bloku zasilania wzbudzenia silników synchronicznych [16] wykorzystywanego w przemysłowych napędach dużej mocy.

Zapewnienie skutecznego rozruchu jest jednym z najważniejszych zagadnień eksploatacyjnych napędów synchronicznych. Łagodzenie i skrócenie czasu procesu synchronizacji podczas rozruchu pozwala na zmniejszenie przeciążeń na wale silnika, zużycia łożysk oraz awaryjności napędu.

**Autor:** dr inż. Marian Hyla, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: marian.hyla@polsl.pl

### LITERATURA

[1] Das J. C.; Casey J.: Characteristics and analysis of starting of large synchronous motors. IEEE Industrial and Commercial

Power Systems Technical Conference, Sparks, NV, 1999, s.1-10

[2] Kay J. A., Paes R. H., Seggewiss J. G., Ellis R. G.: Methods for the control of large medium-voltage motors: application considerations and guidelines. IEEE Transactions on Industry Applications, vol.36, no.6, pp.1688-1696, Nov/Dec 2000

[3] Hyla M.: Rozruch silnika synchronicznego z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia. Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2017, s.177-184

[4] Zalas P., Zawilak J.: Wybór chwili załączenia napięcia wzbudzenia podczas synchronizacji silników synchronicznych. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2005, Nr 71, s.59-64

[5] Zalas P., Zawilak J.: Łagodzenie oraz skrócenie czasu procesu synchronizacji silników synchronicznych. Elektrotechnika i Elektronika, Tom 25, z.2, 2006, s.216-220

[6] Zalas P., Zawilak J.: Skuteczność procesu synchronizacji silnika synchronicznego z układem zamkniętej regulacji prądu wzbudzenia. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2009, nr 81, s.83-86

[7] Zalas P., Zawilak J.: Synchronizacja silników synchronicznych przez sterowanie prądem wzbudzenia. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2005, nr 73, s.143-148

[8] Zalas P., Zawilak J.: Wpływ stałej czasowej obwodu wzbudzenia na przebieg procesu synchronizacji silnika synchronicznego. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2007, nr 77, s.233-236

[9] Zalas P., Zawilak J.: Wpływ układu sterowania prądem wzbudzenia na proces synchronizacji silnika synchronicznego. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2006, nr 75, s.83-88

[10] Zalas P., Zawilak J.: Synchronizacja silników synchronicznych. Wybór chwili załączenia prądu wzbudzenia, Prace Nauk. IMiNE PWr., vol.54, Studia i Materiały nr 23, 2003, s.139-147

[11] Zalas P., Zawilak J.: Minimalizacja pulsacji prędkości podczas synchronizacji silników synchronicznych. Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. Oficyna Wydaw. PWr., 2006, s.97-111

[12] Kaczmarek T., Zawirski K.: Układy napędowe z silnikiem synchronicznym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000

[13] Campeanu A., Enache S., Vlad I., Liuba G., Augustinov L., Cautil I.: Simulation of asynchronous operation in high power salient pole synchronous machines, XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), Marseille, 2012, s.1823-1828

[14] Dordea T., Munteanu R., Campeanu A.: Simulation of dynamic operation in salient pole synchronous machines. International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Istanbul, 2011, s.380-385

[15] Zalas P., Zawilak J.: Synchronizacja silników dwubiegowych z zamkniętym układem regulacji prądu wzbudzenia. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2008, nr 79, s.53-56

[16] Hyla M.: Power supply unit for the excitation of a synchronous motor with a reactive power regulator. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2015, nr 1(521), s.57-61