

Synchronizacja silnika synchronicznego prądem wzbudzenia

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych rozruchu asynchronicznego jawnobiegunowego silnika synchronicznego dużej mocy ukierunkowane na możliwość implementacji w mikroprocesorowo sterowanym bloku zasilania wzbudzenia procedur łagodzenie przebiegu procesu synchronizacji. Porównano przebieg procesu synchronizacji dla różnych chwil załączenia napięcia zasilania uzwojenia wzbudzenia. Zbadano możliwość wyboru chwili załączenia wzbudzenia na podstawie przebiegu prądu w uzwojeniu wzbudzenia. Przedstawiono wpływ forsovania prądu wzbudzenia na proces synchronizacji dla różnych momentów obciążenia silnika.

Abstract. The article presents the results of simulation of the large-power silent-pole synchronous motor synchronization process during asynchronous start-up. The paper focuses on possibility of synchronization process mitigation implementation into the microprocessor-controlled excitation supply unit. The possibility to choose the time of switching the voltage based on the excitation current waveform has been investigated. Effect of forcing the excitation current to the synchronization process for various load torque of the engine was presented. (**Synchronous motor synchronization by excitation current**)

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

Wolnoobrotowe silniki synchroniczne dużej mocy wykonuje się jako silniki z biegunami jawnymi [1], a ich rozruch przeprowadza się zazwyczaj metodą rozruchu asynchronicznego bezpośredniego lub z wykorzystaniem dławika rozruchowego [2, 3, 4].

Rozruch asynchroniczny realizowany jest poprzez załączenie napięcia zasilania stojana bez zasilania obwodu wzbudzenia. Wirujące pole kołowe powstałe na skutek przepływu prądu w uzwojeniach stojana indukuje prądy wirowe w litych nabiegownikach magnetycznej oraz prądy w uzwojeniach tłumiących działających podobnie jak klatka rozruchowa w silniku asynchronicznym. W celu ograniczenia wartości napięcia indukowanego w obwodzie wzbudzenia, na czas rozruchu do uzwojenia wzbudzenia dołączany jest rezystor rozruchowy umożliwiający przepływ prądu w uzwojeniu. 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. Powstały moment synchronizujący umożliwia wciągnięcie wirnika do pracy z prędkością synchroniczną.

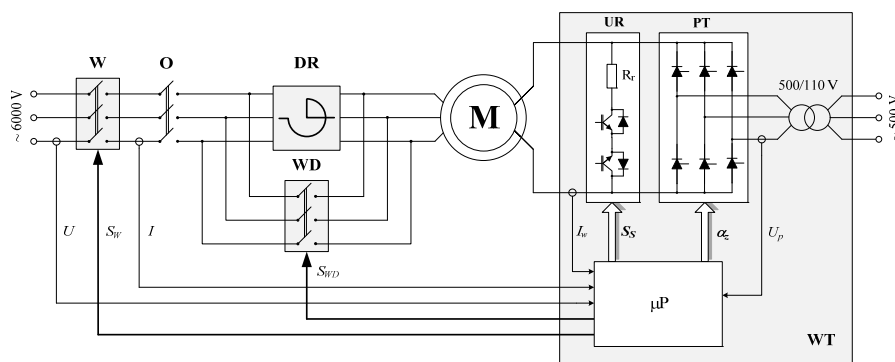
Skuteczny proces synchronizacji wymaga właściwego wyznaczenia chwili załączenia napięcia do obwodu wzbudzenia. Wybór chwili załączenia wzbudzenia ma wpływ na dynamikę procesu synchronizacji oraz przeciążenia mechaniczne powstałe na skutek zmian momentu rozwijanego przez silnik [2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Rozruch silnika z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy silnika synchronicznego z opracowanym przy współudziale autora mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia [16]. Blok zasilania wzbudzenia przeznaczony jest do współpracy z silnikami dużej mocy o znamionowym napięciu stojana 6 kV i prądzie wzbudzenia do 400 A.

Zaimplementowane w systemie mikroprocesorowym algorytmy pozwalają na przeprowadzenie rozruchu asynchronicznego w układzie klasycznym lub z dławikiem rozruchowym, kontrolę pracy synchronicznej z możliwością regulacji mocy biernej lub prądu wzbudzenia oraz technologiczne lub awaryjne wyłączenie napędu z rozładowaniem energii obwodu wzbudzenia poprzez pracę falownikową przekształtnika tyrystorowego [4, 17]. Rezystor rozruchowy zwierany jest poprzez klucze tranzystorowe w konfiguracji umożliwiającej przepływ dwukierunkowego prądu indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia podczas rozruchu asynchronicznego silnika.

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 [4, 16].



Rys.1. Schemat układu sterowania silnika z mikroprocesorowym 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

Możliwe jest także aktywowanie procedury forsowania prądu wzbudzenia przy rozruchu, co pozwala na zwiększenie momentu synchronizującego w końcowym etapie rozruchu gdy jest to wymagane oraz skuteczniejsze przejście silnika do pracy synchronicznej [1, 4].

Celem badań przedstawionych w artykule było określenie strategii wyboru chwili włączenia napięcia zasilania obwodu wzbudzenia podczas rozruchu asynchronicznego realizowanego przez mikroprocesorowy blok zasilania wzbudzenia.

Obiekt badań

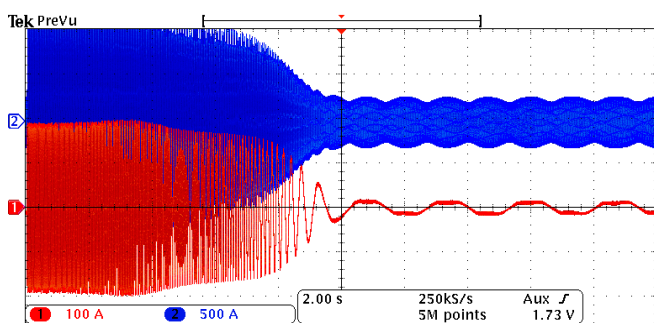
Obiektem badań był silnik synchroniczny jawnobiegunowy typu GAe-1510p/01 o danych znamionowych przedstawionych w Tabeli 1 stosowany do napędu wentylatorów typu WPK 3.3.

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 układach napędowych wentylatorów przewietrzania kopalni, w celu zmniejszenia momentu obciążenia podczas rozruchu, rozruch silnika wykonuje się przy zamkniętych klapach aparatu kierowniczego. Po uzyskaniu stanu pracy synchronicznej klapy są otwierane, a silnik obciążony momentem roboczym. Rozruch silnika odbywa się przy momencie obciążenia znacznie mniejszym od momentu roboczego.

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi pomiarowe końcowego etapu rozruchu asynchronicznego silnika bez załączenia napięcia w obwodzie wzbudzenia. Rozruch przeprowadzono w układzie bez dławika rozruchowego z zamkniętymi klapami układu kierowniczego. Całkowity czas rozruchu od chwili włączenia napięcia zasilania stojana do chwili osiągnięcia prędkości bliskiej prędkości synchronicznej wyniósł około 16 sekund.



Rys.2. Końcowy fragment procesu rozruchu asynchronicznego silnika bez wymuszenia napięcia w obwodzie wzbudzenia: 1 – prąd obwodu wzbudzenia, 2 – prąd stojana

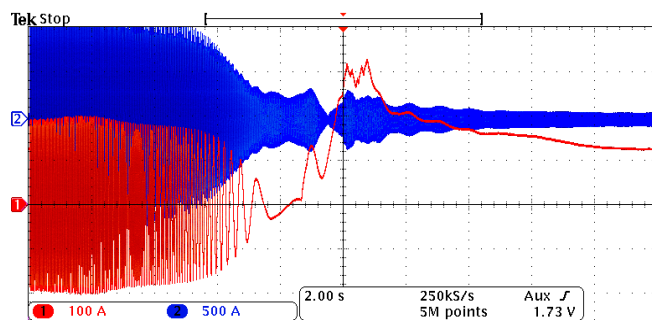
Jak można zauważyć na rysunku 2 po osiągnięciu prędkości podsynchronicznej wirnik silnika nie zostaje wciągnięty do pracy synchronicznej. Różnica prędkości wirowania pola stojana i pola wirnika wytworzonego na skutek przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia zwartym

rezystorem rozruchowym powoduje oscylacje prądu stojana i prądu w uzwojeniu wzbudzenia, zależne od parametrów silnika, momentu obciążenia i wypadkowego momentu bezwładności wirnika i napędzanego wentylatora [L8, L15].

Praca silnika z prędkością podsynchroniczną skutkuje znacznym nagrzewaniem uzwojeń stojana powodowanym prądem większym od wartości znamionowej, oscylacjami prędkości obrotowej, pulsacjami momentu elektromagnetycznego oraz znacznymi przeciążeniami mechanicznymi na wale silnika i przyspieszonym zużyciem łożysk. Konieczne jest więc zsynchronizowanie silnika w możliwie krótkim czasie po osiągnięciu prędkości bliskiej prędkości synchronicznej.

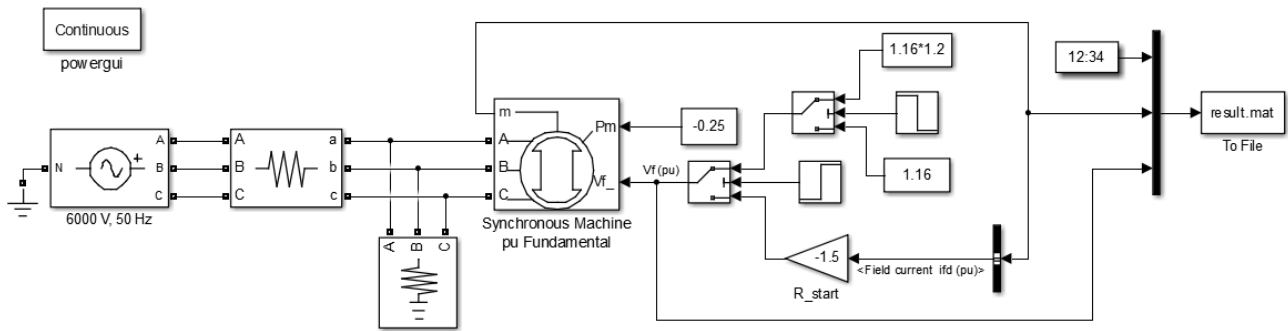
Zmniejszenie wartości prądu stojana poniżej założonej wartości lub zmniejszenie częstotliwości oscylacji prądu w uzwojeniu wzbudzenia poniżej określonej wartości może być informacją o pracy silnika z prędkością podsynchroniczną i konieczności włączenia napięcia zasilania wzbudzenia w celu synchronizacji silnika [4].

Włączenie napięcia do obwodu wzbudzenia w dowolnej chwili po przekroczeniu wartości uznawanych za wskaźnik pracy z prędkością podsynchroniczną może jednak powodować niekorzystne zjawiska. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe przebiegi pomiarowe rozruchu asynchronicznego silnika z wymuszeniem napięcia w obwodzie wzbudzenia podczas pracy z prędkością bliską prędkości synchronicznej. Zastosowano 3-sekundową procedurę forsowania prądu wzbudzenia o wartości $1,2I_{wN}$ po której następuje przejście do pracy ze znamionowym prądem wzbudzenia, a następnie obniżenie prądu wzbudzenia do wartości wynikającej z wartości zadanej mocy biernej. Na rysunku 3 można zauważyć oscylacje prądu stojana i prądu wzbudzenia powstające od chwili włączenia napięcia stałego do obwodu wzbudzenia do chwili ustalenia się pracy synchronicznej silnika.



Rys.3. Końcowy fragment procesu rozruchu asynchronicznego silnika z wymuszeniem napięcia stałego w obwodzie wzbudzenia podczas pracy z prędkością podsynchroniczną: 1 – prąd obwodu wzbudzenia, 2 – prąd stojana

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 [2, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Wzajemne oddziaływanie momentu synchronicznego, momentu mechanicznego oraz momentu bezwładności powodują znaczące oscylacje prędkości wokół wartości ustalonej. Wywołuje to znaczące pulsacje momentu elektromagnetycznego oraz udary mechaniczne na wale silnika [5, 6, 7, 8, 10, 11].



Rys.4. Model symulacyjny programu Matlab-Simulink

Stosowane powszechnie forsowanie prądu wzbudzenia [1] w chwili rozpoczęcia synchronizacji pozwala na przeforsowanie przemiennej napięcia indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia i wymuszenie przepływu prądu wzbudzenia o odpowiednim kierunku i zwiększenie momentu synchronizującego. Niewłaściwa chwila włączenia napięcia wzbudzenia może jednak prowadzić do powstania znacznego momentu hamującego i powiększenia pulsacji momentu elektromechanicznego [7, 8, 9, 10, 11, 13, 14].

Celem badań prezentowanych w artykule było określenie możliwości zaimplementowania w mikroprocesorowo sterowanym bloku zasilania wzbudzenia [16] procedur łagodnej synchronizacji zaproponowanych przez autorów prac [7-15].

Badania symulacyjne

Przebieg procesów dynamicznych w silnikach synchronicznych jest zagadnieniem trudnym, a niestety niemożliwym do analizy za pomocą narzędzi algebraicznych. Z tego względu powszechnie stosuje się symulację komputerową opartą o modele matematyczne bazujące na układach równań różniczkowych. Jednym z powszechnie wykorzystywanych narzędzi jest środowisko Matlab-Simulink umożliwiające m.in. symulację różnorodnych układów napędowych [18, 19].

W celu określenia strategii wyboru chwili włączenia napięcia zasilania obwodu wzbudzenia opracowano model symulacyjny w środowisku Matlab-Simulink przedstawiony na rysunku 4. Przyjęto, że rozruch odbywa się w układzie bez dławika rozruchowego przy zamkniętych kłapach aparatu kierowniczego wentylatora.

Badania symulacyjne przeprowadzono zmieniając chwilę włączenia napięcia zasilania obwodu wzbudzenia przy identycznych warunkach rozruchowych silnika.

Podczas pracy asynchronicznej wzajemne położenie osi pola magnetycznego twornika i osi pola magnetycznego wzbudzenia można opisać zmiennym w czasie kątem δ [14]. Wartość kąta δ w chwili włączenia napięcia stałego do obwodu wzbudzenia ma znaczący wpływ na przebieg procesu synchronizacji.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi symulacyjne końcowej fazy rozruchu asynchronicznego bezpośredniego i włączeniu napięcia zasilania obwodu wzbudzenia o wartości U_{wN} (1,16 pu) przy kącie δ odpowiednio 0° ($t=4,725$ s), 90° ($t=3,15$ s), -90° ($t=4,16$ s) i 180° ($t=3,615$ s).

Jak można zauważyć na rysunku 5, rozpoczęcie procesu synchronizacji przy kącie $\delta=0^\circ$, tzn. w chwili, gdy biegun pola twornika nabiega na odpowiadający mu biegun pola magneśnicy [7, 9], pozwala na zsynchronizowanie silnika przy najmniejszych udarach momentu i najmniejszej wartości momentu hamującego powstającego dla ujemnych wartości kąta δ . Dla tak wybranej chwili rozpoczęcia

procesu synchronizacji prąd wymuszony przez napięcie stałe włączone do uzwojenia wzbudzenia współdziała z prądem przemianym w obwodzie magneśnicy.

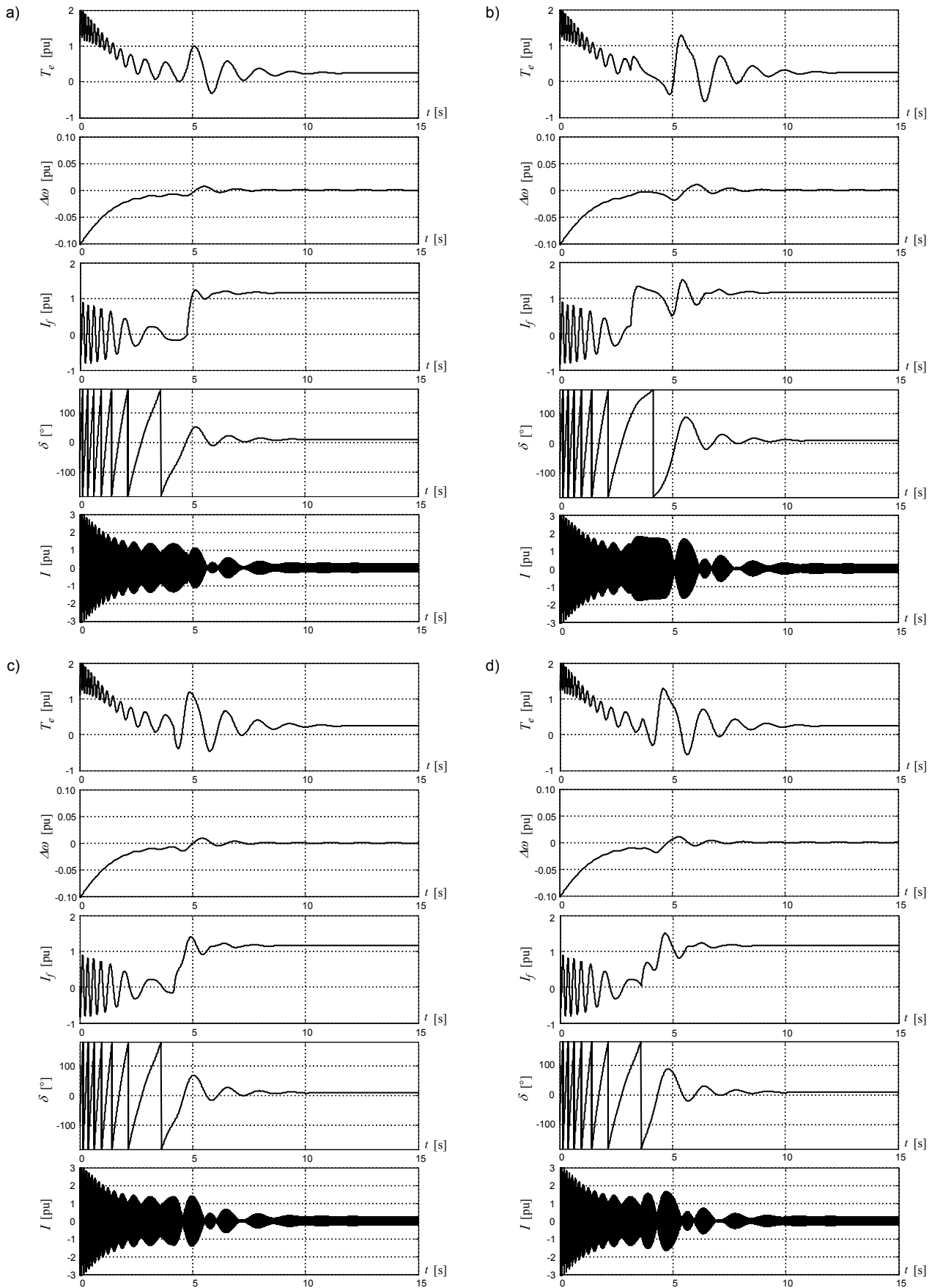
W pozostałych przypadkach prąd ten nie współdziała z prądem przemianym w obwodzie magneśnicy i powoduje powstawanie zwiększonego momentu hamującego który powiększa pulsacje momentu elektromagnetycznego i utrudnia proces synchronizacji.

Łagodzenie procesu synchronizacji może się odbywać tylko w pewnym zakresie kąta δ [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Wyznaczenie kąta δ w rzeczywistym układzie sterowania wzbudzeniem [16] jest utrudnione. Można jednak zauważyć, że w chwili zmiany kierunku przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia z wartości ujemnej na dodatnią podczas pracy z prędkością bliską prędkości synchronicznej, kąt δ jest zbliżony do 0° . Dla przyjętych parametrów symulacji, prąd uzwojenia wzbudzenia dla kąta $\delta=0^\circ$ ($t=4,725$ s) wyniósł 7 A przy ujemnym kierunku przepływu.

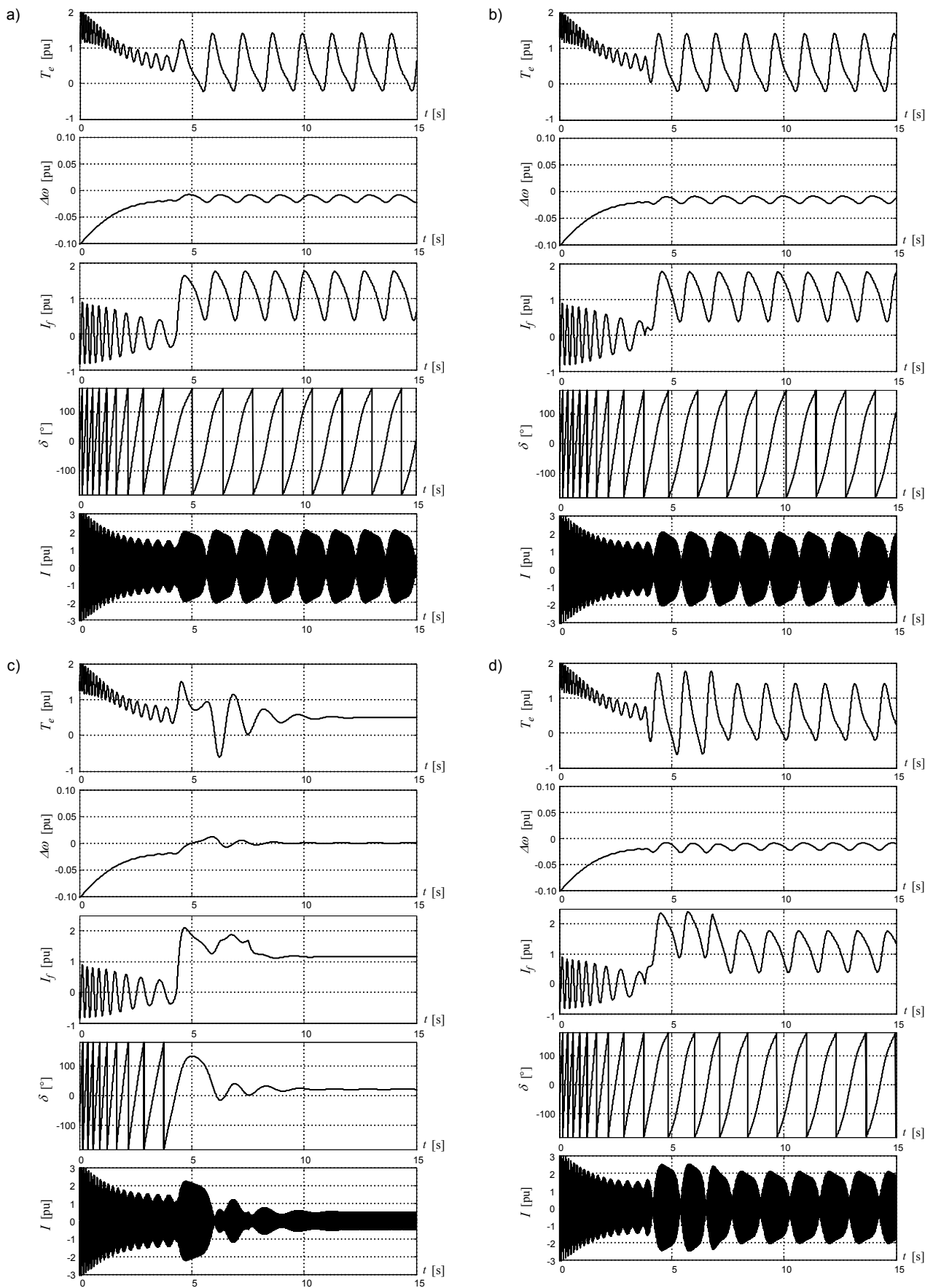
Dla przedstawionego na rysunku 1 układu sterowania silnika z mikroprocesorowy blokiem zasilania wzbudzenia wybór chwili załączenia napięcia do uzwojenia wzbudzenia może być realizowany na podstawie pomiaru wartości prądu w uzwojeniu wzbudzenia. Dla przyjętych parametrów obciążenia załączenie napięcia stałego do obwodu wzbudzenia w chwili zmiany kierunku przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia z wartości ujemnej na dodatnią odbywa się przy kącie $\delta=9,1^\circ$. Wybór takiej chwili załączenia napięcia do obwodu wzbudzenia nie wpływa znacząco na proces synchronizacji w porównaniu z przebiegami przedstawionymi na rysunku 5a).

Kąt δ występujący pomiędzy osią uzwojenia wirnika a osią pola wirującego stojana w chwili zmiany kierunku przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia z wartości ujemnej na dodatnią zależy od parametrów silnika, parametrów obciążenia oraz od wartości rezystancji rezystora rozruchowego. Badania symulacyjne przeprowadzone dla dwukrotnie większej oraz dwukrotnie mniejszej wartości rezystora rozruchowego nie wykazały znaczącej zmiany przebiegu procesu synchronizacji, a zmiana kąta δ w chwili zmiany kierunku przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia z wartości ujemnej na dodatnią wyniosła kilka stopni.

Częstą praktyką podczas rozruchu asynchronicznego silnika synchronicznego jest forsowanie wzbudzenia w końcowym etapie rozruchu. Badania symulacyjne przeprowadzone dla różnych wartości kąta δ w chwili załączenia napięcia o wartościach $1,2U_{wN}$, $1,5U_{wN}$ oraz $1,8U_{wN}$ do obwodu wzbudzenia i przyjętych parametrów układu wykazały kilkunastoprocentowe wydłużenie czasu synchronizacji, powodując jednocześnie zwiększenie udarów momentu na wale silnika.



Rys.5. Przebieg procesu synchronizacji: a) załączenie zasilania wzbudzenia o wartości U_{wN} dla kąta $\delta=0^\circ$, b) załączenie zasilania wzbudzenia o wartości U_{wN} dla kąta $\delta=90^\circ$, c) załączenie zasilania wzbudzenia o wartości U_{wN} dla kąta $\delta=-90^\circ$, d) załączenie zasilania wzbudzenia o wartości U_{wN} dla kąta $\delta=180^\circ$; T_e – moment elektromagnetyczny, $\Delta\omega$ - odchyłka prędkości, I_f – prąd obwodu wzbudzenia, δ - kąt pomiędzy osią pola stojana, a osią pola wirnika, I – prąd stojana



Rys.6. Proces synchronizacji przy dwukrotnie powiększonym momencie obciążenia: a) załączenie zasilania wzbudzenia o wartości U_{wN} w chwili $t=4,325$ s ($\delta=18^\circ$), b) załączenie zasilania wzbudzenia o wartości U_{wN} w chwili $t=3,819$ s ($\delta=-159^\circ$), c) załączenie zasilania wzbudzenia o wartości $1,5U_{wN}$ w chwili $t=4,325$ s ($\delta=18^\circ$), d) załączenie zasilania wzbudzenia o wartości $1,5U_{wN}$ w chwili $t=3,819$ s ($\delta=-159^\circ$); T_e – moment elektromagnetyczny, $\Delta\omega$ - odchyłka prędkości, I_f – prąd obwodu wzbudzenia, δ - kąt pomiędzy osią pola stojana, a osią pola wirnika, I – prąd stojana

Nie należy jednak całkowicie rezygnować z możliwości forsowania prądu wzbudzenia podczas rozruchu silnika. Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi symulacyjne przy dwukrotnie powiększonym momencie obciążenia podczas rozruchu silnika.

Jak można zauważyć na rysunku 6, nie jest możliwe uzyskanie stanu synchronizmu bez forsowania prądu wzbudzenia.

Dodatkowo przyjęte napięcie forsowania o wartości $1,5U_{wN}$ pozwala na zsynchronizowanie silnika przy załączeniu napięcia wzbudzenia w chwili zmiany kierunku przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia z wartości ujemnej na dodatnią ($t=4,325$ s, $\delta=18^\circ$). Nie pozwala jednak na uzyskanie stanu pracy synchronicznej przy załączeniu napięcia do uzwojenia wzbudzenia podczas zmiany kierunku przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia z wartości dodatniej na ujemną ($t=3,819$ s, $\delta=-159^\circ$). Duża wartość poślizgu powoduje, że silnik nie może uzyskać stanu pracy synchronicznej. Ustalony stan asynchroniczny charakteryzuje się dużymi udarami momentu i znacznymi wahaniami prędkości obrotowej.

Aby zapewnić synchronizację silnika dla takich warunków obciążenia należy zwiększyć napięcie i czas forsowania lub zapewnić załączenia napięcia stałego do obwodu wzbudzenia w odpowiednio dobranej, korzystnej chwili czasowej.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono problematykę wyboru chwili załączenia napięcia do obwodu wzbudzenia podczas synchronizacji silników synchronicznych prądem wzbudzenia w trakcie rozruchu asynchronicznego. Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na określenie strategii wyznaczania chwili załączenia napięcia stałego do obwodu wzbudzenia na podstawie pomiaru wartości chwilowej prądu w uzwojeniu wzbudzenia podczas pracy asynchronicznej. Jednokierunkowy pomiar prądu w uzwojeniu wzbudzenia zrealizowany za pomocą przetwornika LEM w mikroprocesorowym bloku zasilania wzbudzenia [16] nie eliminuje możliwości wyznaczenia korzystnej chwili włączenia napięcia zasilania wzbudzenia podczas procesu synchronizacji.

Przyjęta na podstawie badań symulacyjnych chwila załączenia napięcia wzbudzenia odpowiadająca chwili zmiany kierunku przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia z wartości ujemnej na dodatnią pozwala na łagodzenie procesu synchronizacji, ograniczenie udarów momentu na wale silnika oraz niekorzystnego wpływu momentu hamującego powstałego na skutek przepływu prądu w uzwojeniu wzbudzenia przy ujemnych wartościach kąta δ .

Zapewnienie skutecznego rozruchu pozwala na zautomatyzowanie procesu i wykorzystanie silnika w układach automatycznego załączania napędu rezerwowego w przypadku awarii układu podstawowego. Łagodzenie skutków rozruchu dzięki właściwemu wyborowi chwili włączenia napięcia zasilania obwodu wzbudzenia pozwala na zmniejszenie przeciążeń, zużycia łożysk oraz awaryjności napędu.

Opracowane na podstawie przeprowadzonych badań algorytmy wyznaczania chwili załączenia mostka tyrystorowego podczas rozruchu silnika zostaną zaimplementowane w opracowanym przy współudziale autora mikroprocesorowym bloku zasilania wzbudzenia [16] wykorzystywanym w przemysłowych napędach synchronicznych dużej mocy.

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] Kaczmarek T., Zawirski K.: Układy napędowe z silnikiem synchronicznym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Hyla M.: Rozruch silnika synchronicznego z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia. Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2017, s.177-184
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Zalas P., Zawilak J.: Łagodzenie oraz skrócenie czasu procesu synchronizacji silników synchronicznych. Elektrotechnika i Elektronika, Tom 25, z.2, 2006, s.216-220
- [9] Zalas A., Zalas P.: Modyfikacja układu łagodnej synchronizacji silników synchronicznych dużej mocy. Prace Nauk. IMiNE PWr., vol.62, Studia i Materiały nr 28, 2008, s.536-541
- [10] Zalas P., Zawilak J.: Skuteczność procesu synchronizacji silnika synchronicznego z układem zamkniętej regulacji przemiennego prądu wzbudzenia. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2009, nr 81, s.83-86
- [11] Zalas P., Zawilak J.: Synchronizacja silników synchronicznych przez sterowanie prądem wzbudzenia. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2005, nr 73, s.143-148
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] Zalas P., Zawilak J.: Minimalizacja pulsacji prędkości podczas synchronizacji silników synchronicznych. Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. Oficyna Wydaw. PWr., 2006, s.97-111
- [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
- [17] Hyla M.: Wybrane aspekty sterowania tyrystorową wzbudnicą silnika synchronicznego. V Ogólnopolska Konferencja Naukowa Modelowanie i Symulacja MIS-5, Kościelisko 23-27 czerwca 2008, s.345-348
- [18] Mrozek B., Mrozek Z.: Matlab – uniwersalne środowisko do obliczeń naukowo-technicznych, Wyd. PLJ, Warszawa 1996.
- [19] Sajkowski M., Stenzel T., Hetmańczyk J.: Development of parallel manipulator control system for simulation of selected means of transport. 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, 29.08-1.09.2016, ss.245-250