

*silnik synchroniczny, magnesy trwałe, rozruch,
falownik, symulacje polowo-obwodowe*

Ludwik ANTAL*
Paweł ZALAS*

ROZRUCH MAGNETOELEKTRYCZNEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO ZASILANEGO Z FALOWNIKA

Przedstawiono wyniki symulacyjnych badań rozruchu silnika synchronicznego zasilanego z falownika i wzbudzanego zewnętrznymi (umieszczonymi na powierzchni zewnętrznej wirnika) magnesami trwałymi. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych przy pomocy polowo-obwodowego modelu maszyny. Założono rozruch synchroniczny przy stałym stosunku U/f i liniowej zmianie częstotliwości w czasie rozruchu. Zbadano wpływ momentu bezwładności i początkowego położenia wirnika na rozruchowe przebiegi podstawowych wielkości elektromechanicznych.

1. WSTĘP

Zwiększenie sprawności i współczynnika mocy silnika prądu przemiennego umożliwia silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi (PMSM). Jednakże silniki z magnesami trwałymi mają mały moment początkowy i zdolność synchronizacji malejącą ze wzrostem obciążenia. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest wyposażony w klatkę rozruchową silnik synchroniczny o bezpośrednim rozruchu wzbudzany magnesami trwałymi (LSPMSM), a drugim podobny silnik synchroniczny bez klatki zasilany z falownika.

Zarówno polowo-obwodowe obliczenia rozruchów silników LSPMSM [1] jak i wykonane badania eksperymentalne [2] wykazały, że silnik synchroniczny małej mocy o bezpośrednim rozruchu może osiągnąć moment rozruchowy nieco przekraczający moment znamionowy. Silnik indukcyjny o tej samej geometrii pozwala osiągnąć moment rozruchowy $2,5M_n$. Wynika stąd, że zastosowanie silnika LSPMSM to przede wszystkim napędy pomp i wentylatorów.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, ludwik.antal@pwr.wroc.pl, pawel.zalas@pwr.wroc.pl

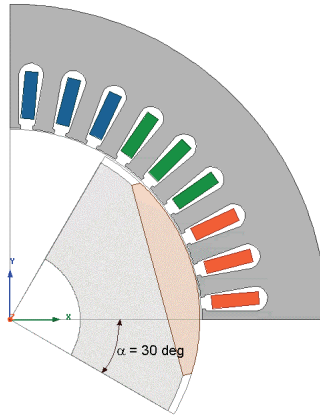
Druga koncepcja poprawienia właściwości rozruchowych silników PMSM dotyczy rozruchu synchronicznego przy pomocy różnych systemów sterowania przekształtnikowego [4–11]. Rozruch taki jest możliwy przy wykorzystaniu do zasilania silnika przekształtnika, pozwalającego na płynną regulację częstotliwości napięcia zasilającego. Dodatkową korzyścią wynikającą z takiego sposobu zasilania silnika jest możliwość częstotliwościowej regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie.

Badania właściwości rozruchowych silnika z magnesami trwałymi zasilanego z przekształtnika wykonano przy pomocy dwuwymiarowego modelu polowo-obwodowego takiego silnika [3]. Ze względu na symetrię maszyny zamodelowano 1/4 przekroju poprzecznego. Założono, że rdzeń wirnika wykonany jest z litej stali. Wirnik nie posiada klatki rozruchowej a magnesy w kształcie wycinków koła naklejone są na jego zewnętrzną powierzchnię.

2. BADANIA SYMULACYJNE ROZRUCHÓW SILNIKÓW PMSM ZASILANYCH Z FALOWNIKA

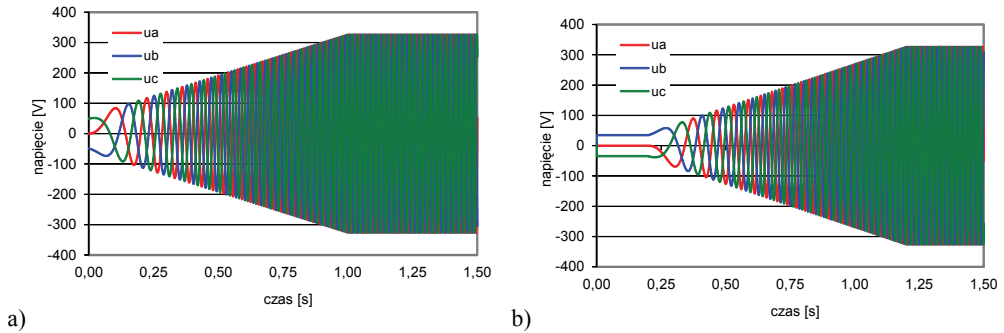
Wykonano obliczenia symulacyjne rozruchu silników obciążonych wentylatorowym momentem znamionowym (równym 13 N·m przy prędkości 1500 obr/min) dla różnych wartości momentu bezwładności układu napędowego. Rozpatrywane układy mają moment bezwładności $I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$ (I_w - momentu bezwładności wirnika silnika). We wszystkich badanych przypadkach rozruchów zmieniano również początkowe położenie kątowe wirnika w zakresie α_0 od 0 do -90 deg, co $7,5$ deg. Sposób określania geometrycznego położenia wirnika, specyficzny dla zastosowanej aplikacji FEM (Maxwell Ansoft), pokazuje rysunek 1.

Silnik zasilany był z falownika PWM i uruchamiany synchronicznie przez zmianę częstotliwości i wartości skutecznej napięcia, przy zachowaniu warunku $U/f = \text{const}$. Po ustaleniu, że zastąpienie w obliczeniach sygnału napięciowego PWM sygnałem sinusoidalnym jest dopuszczalne [3], rozważono dwa różne algorytmy narastania napięcia podczas rozruchu silnika. Pierwszy z tych algorytmów (rys. 2a) zakłada narastanie napięcia trójfazowego od zadanej wartości początkowej U_0 i częstotliwości $f=0$. Przyjęto początkową fazę napięć trójfazowych równą zero, co oznacza, że w pierwszej chwili rozruchu (dla $t = 0$) wartość chwilowa napięcia jednej z faz jest zerowa, a wartości chwilowe napięć dwóch pozostałych faz $\pm U_0$. Drugim sposobem zasilania podczas rozruchu silnika był algorytm podobny do wyżej omówionego, ale z opóźnionym wzrostem napięcia i częstotliwości (rys. 2b). W początkowej fazie rozruchu o długości $t_0 = 0,2$ s podawane są na poszczególne fazy niewielkie napięcia stałe ($f = 0$), których wartości odpowiadają początkowym wartościom chwilowym napięć trójfazowych algorytmu pierwszego. W tej początkowej fazie rozruchu wirnik ustawiany jest polem stałym w kierunku osi tego pola. Dla założonej chwili i fazy początkowej oś pola stałego leży w płaszczyźnie uzwojenia fazowego o zerowym prądzie.



Rys. 1. Model połowy silnika zasilanego z przekształtnika z zewnętrznymi magnesami trwałymi w kształcie wycinka koła. Wirnik w położeniu początkowym $\alpha_0 = -30$ deg

Fig. 1. The field part of the model of the SMPMSM motor designed for supply from inverter. Initial position of the rotor $\alpha_0 = -30$ deg



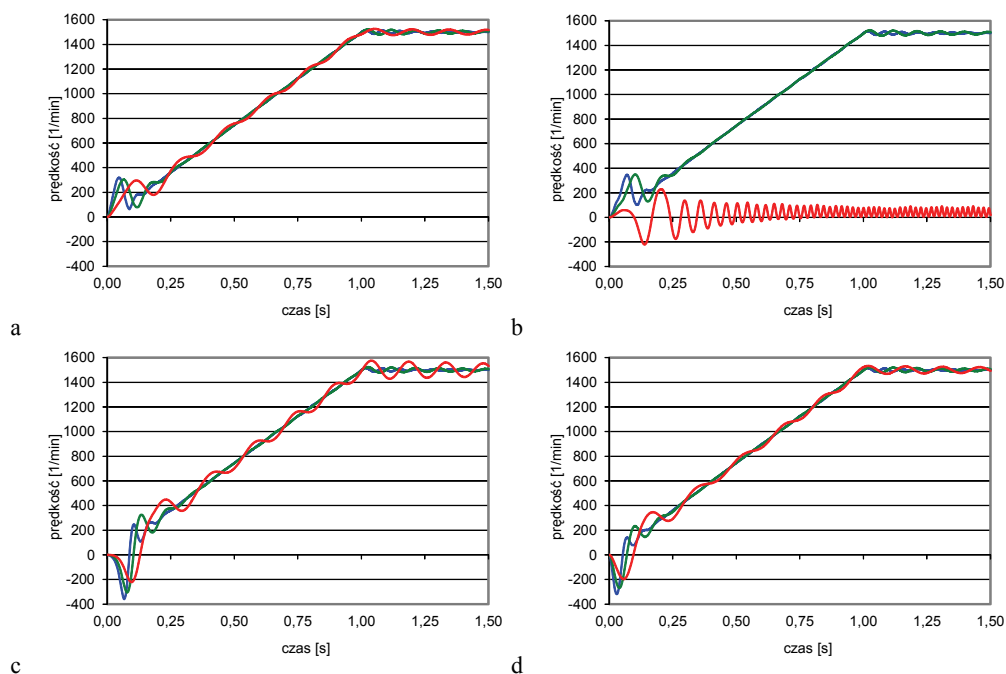
Rys. 2. Przebiegi napięć sinusoidalnych odwzorowujących zasilanie z falownika przy opóźnieniu : a) $t_0 = 0$; b) $t_0 = 0,2$ s

Fig. 2. Sinusoidal waveforms of the stator phases voltage for delay : a) $t_0 = 0$; b) $t_0 = 0,2$ s

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wyniki obliczeń rozruchów silnika bez ustawiania polem stałym położenia wirnika zasilanego wg algorytmu przedstawionego na rysunku 2a, dla wybranych początkowych położenia wirnika i różnych momentów bezwładności, przedstawiono na rysunkach 3–5. Na rysunkach przedstawiono przebiegi prędkości obrotowej, momentu i prądu fazowego stojana. Pokazano również zmianę położenia kąтового wirnika w pierwszej fazie rozruchu silnika (rys. 6) przy różnych wartościach początkowego położenia kąтового wirnika ($\alpha_0 = 0 \div -90$ deg co 7,5 deg).

Do porównania wybrano przykładowe początkowe położenie wirnika $\alpha_0 = -15; -22,5; -30; -60$ deg. Porównanie przebiegów prędkości obrotowej układów napędowych z wentylatorem o trzech różnych wartościach momentów bezwładności ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) pokazano na rysunku 3.



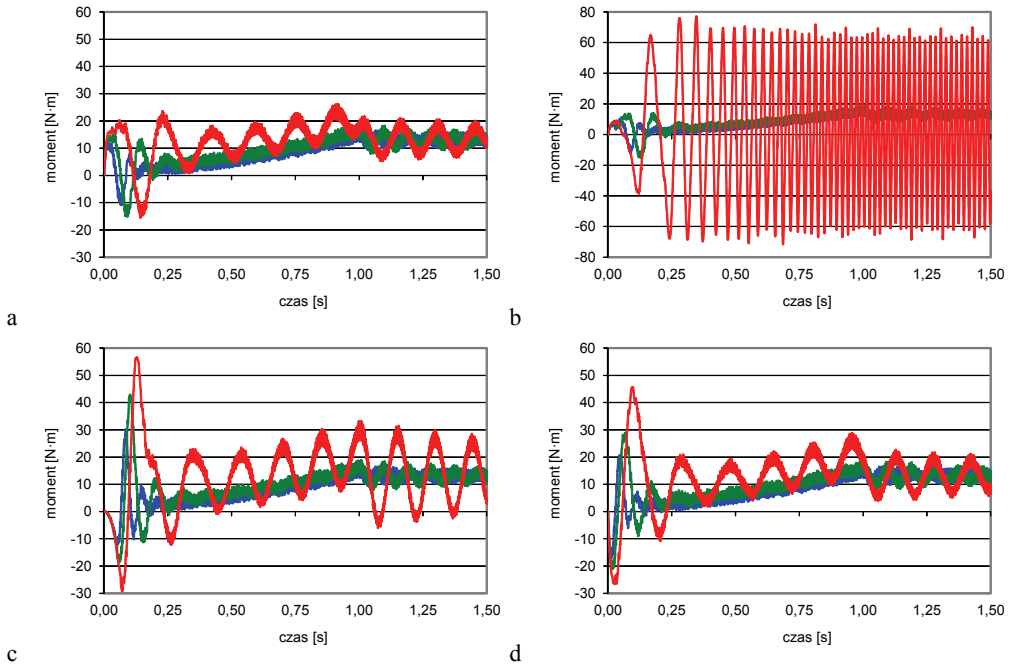
Rys. 3. Porównanie przebiegów prędkości obrotowej podczas rozruchu układów napędowych z wentylatorem o trzech różnych wartościach momentów bezwładności ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) i początkowym położeniu wirnika α_0 : a) -15 deg; b) $-22,5$ deg; c) -30 deg; d) -60 deg

Fig. 3. Comparison of the rotational speed waveforms during fan drive starting for different value of moment of inertia ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) and initial position of the rotor α_0 :

a) -15 deg; b) $-22,5$ deg; c) -30 deg; d) -60 deg

Wzrost momentu bezwładności układu we wszystkich porównywanych przypadkach prowadzi do zwiększenia pulsacji prędkości zarówno w czasie rozruchu jak i podczas synchronizacji po osiągnięciu prędkości synchronicznej. Jednakże dla momentu bezwładności $I = 7 \cdot I_w$, stanowiącego typową wartość dla układów wentylatorowych małej mocy pulsacje te nie są znaczące. W porównaniu widoczny jest również wpływ początkowego położenia wirnika. Niektóre położenia początkowe nie sprzyjają rozruchowi synchronicznemu. Przy dużym momencie bezwładności $I = 17,5 \cdot I_w$ takie krytyczne położenie ($\alpha_0 = -22,5$ deg – rys. 3b) uniemożliwia rozruch. Podobnie jak dla prędkości ze wzrostem bezwładności układu rosną pulsacje momentu (rys. 4). Dla

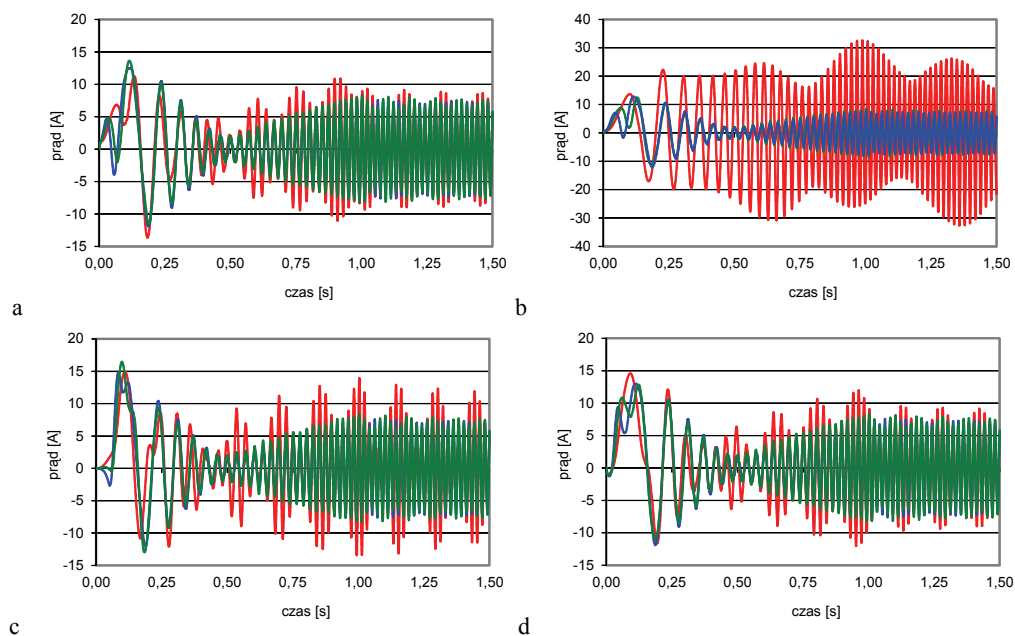
kąta początkowego $-22,5$ deg są katastrofalnie duże gdyż maszyna nie uruchamia się. Podobne zjawiska zachodzą w przebiegach prądów fazowych (rys. 5).



Rys. 4. Porównanie przebiegów momentów podczas rozruchu układów napędowych z wentylatorem o trzech różnych wartościach momentów bezwładności ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) i początkowym położeniu wirnika α_0 : a) -15 deg; b) $-22,5$ deg; c) -30 deg; d) -60 deg

Fig. 4. Comparison of the electromagnetic torque waveforms during fan drive starting for different value of moment of inertia ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) and initial position of the rotor α_0 : a) -15 deg; b) $-22,5$ deg; c) -30 deg; d) -60 deg

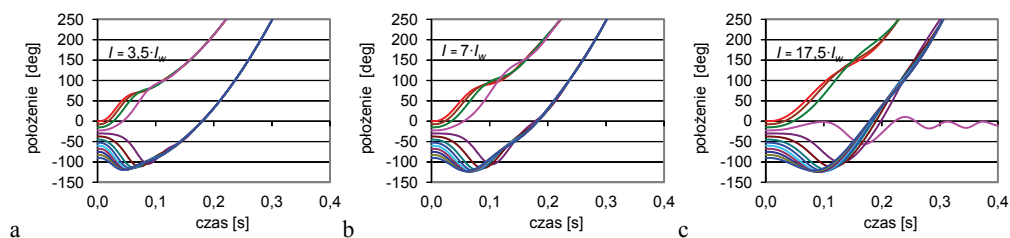
Użycie algorytmu zasilania z ustawianiem położenia początkowego wirnika polem stałym prowadzi do łagodnego rozruchu synchronicznego. Położenie początkowe wirnika w tym przypadku nie ma znaczenia gdyż pole stałe w pierwszej fazie rozruchu zdąży ustawić wirnik w najkorzystniejszej dla dalszego rozruchu pozycji. Tą najkorzystniejszą pozycją dla przyjętych początkowych wartości napięć fazowych jest kąt geometryczny -30 deg. Takie położenie wirnik przyjmuje w każdej sytuacji niezależnie od położenia początkowego i momentu bezwładności układu napędowego (rys. 6). W tej sytuacji do porównania przebiegów rozruchowych układów napędowych o różnych momentach bezwładności wybrano przykładowe początkowe położenie wirnika $\alpha_0 = -30$ deg pokazane na rysunku 1.

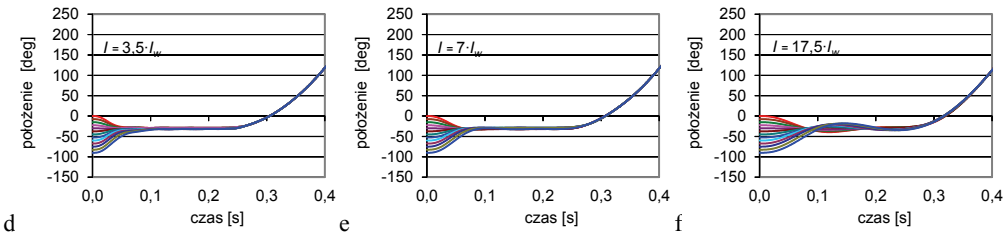


Rys. 5. Porównanie przebiegów prądu stojana podczas rozruchu układów napędowych z wentylatorem o trzech różnych wartościach momentów bezwładności ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) i początkowym położeniu wirnika $\alpha_0 =$ a) -15 deg; b) $-22,5$ deg; c) -30 deg; d) -60 deg

Fig. 5. Comparison of the armature phase current waveforms during fan drive starting for different value of moment of inertia ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) and initial position of the rotor α_0 : a) -15 deg; b) $-22,5$ deg; c) -30 deg; d) -60 deg

Porównanie przebiegów prędkości obrotowej układów napędowych z wentylatorem o trzech różnych wartościach momentów bezwładności ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) i początkowym położeniu wirnika $\alpha_0 = -30$ deg pokazano na rysunku 7. Wzrost momentu bezwładności układu we wszystkich porównywanych przypadkach prowadzi do zwiększenia pulsacji prędkości podczas synchronizacji po osiągnięciu prędkości synchronicznej. Są one jednak znacznie mniejsze niż dla rozruchu bez ustawiania wirnika (rys. 7b).



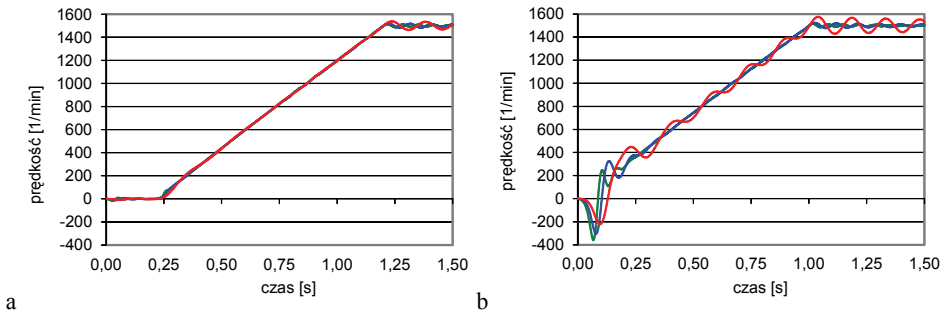


Rys. 6. Porównanie zmian położenia wirnika w początkowej fazie rozruchu dla dwóch algorytmów zasilania i trzech wartości momentu bezwładności: a, b, c – bez ustawiania wirnika w osi pola;

d, e, f – z ustawianiem wirnika

Fig. 6. Comparison of the rotor change position in the initial stage of fan drive starting for different supply algorithms and different value of moment of inertia:

a, b, c – without the pre-positioning; d, e, f – with the pre-positioning



Rys. 7. Porównanie przebiegów prędkości obrotowej podczas rozruchu układów napędowych z wentylatorem o trzech różnych wartościach momentów bezwładności ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$)

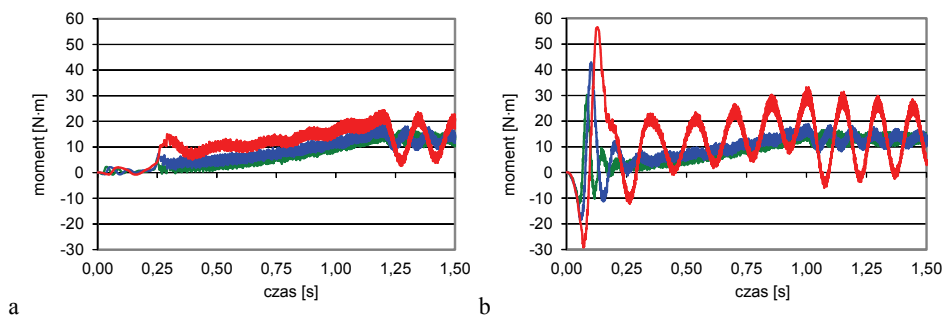
i początkowym położeniu wirnika $\alpha_0 = -30$ deg; a – z ustawianiem wirnika, b – bez ustawiania wirnika

Fig. 7. Comparison of the rotational speed waveforms during fan drive starting for different value of moment of inertia ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) and initial position of the rotor $\alpha_0 = -30$ deg;

a – with the pre-positioning, b – without the pre-positioning

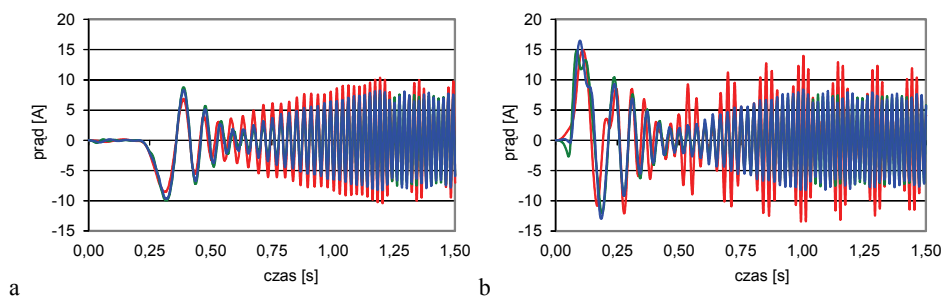
Porównanie przebiegów momentu i prądu dla różnych momentów bezwładności po ustawieniu wirnika prowadzi do zmniejszenia wartości tych wielkości i ich pulsacji w trakcie synchronizacji (rys. 8a i 9a).

Porównanie ich z przebiegami rozruchowymi dla algorytmu bez ustawiania wirnika (rys. 8b i 9b) pokazuje, że zarówno podczas rozruchu jak i synchronizacji wartości momentu i prądu są w tym drugim przypadku zdecydowanie większe, co oznacza korzyści płynące ze wstępnego ustawienia położenia wirnika do początkowego kierunku pola stojana.



Rys. 8. Porównanie przebiegów momentów podczas rozruchu układów napędowych z wentylatorem o trzech różnych wartościach momentów bezwładności ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) i początkowym położeniu wirnika $\alpha_0 = -30$ deg; a – z ustawianiem wirnika, b – bez ustawiania wirnika

Fig. 8. Comparison of the electromagnetic torque waveforms during fan drive starting for different value of moment of inertia ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) and initial position of the rotor $\alpha_0 = -30$ deg; a – with the pre-positioning, b – without the pre-positioning



Rys. 9. Porównanie przebiegów prądu stojana podczas rozruchu układów napędowych z wentylatorem o trzech różnych wartościach momentów bezwładności ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) i początkowym położeniu wirnika $\alpha_0 = -30$ deg; a – z ustawianiem wirnika, b – bez ustawiania wirnika

Fig. 9. Comparison of the armature phase current waveforms during fan drive starting for different value of moment of inertia ($I = 3,5; 7; 17,5 \cdot I_w$) and initial position of the rotor $\alpha_0 = -30$ deg; a – with the pre-positioning, b – without the pre-positioning

3. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki obliczeń przebiegów rozruchowych pokazują, że synchroniczny rozruch układów napędowych o charakterystyce wentylatorowej przy stałym stosunku U/f jest możliwy. Jego jakość i skuteczność zależy jednak od bezwładności układu i położenia początkowego wirnika z magnesami względem osi pola uzwojenia stojana w pierwszej chwili po załączeniu napięcia. Oś tego pola określona jest zarówno położeniem uzwojeń fazowych jak i wartościami chwilowych napięć w chwili włą-

czenia zasilania. O wartości pola stojana decyduje początkowa wartość napięcia. Zerowe wartości chwilowe napięcia początkowego powodują, że w pierwszych chwilach rozruchu wartość momentu może pięciokrotnie przekraczać jego wartość znamionową. Prędkość obrotowa silnie pulsuje co oznacza, że silnik nie synchronizuje się z polem wirującym o wzrastającej prędkości kątowej. Prądy stojana osiągają wartości chwilowe trzykrotnie większe od maksymalnej wartości znamionowej. Brak synchronizacji w czasie rozruchu objawia się silnymi pulsacjami prądu, korespondującymi z pulsacjami prędkości wirnika nieustannie przyspieszanego i następnie hamowanego. Rozruch trwa dłużej niż przy większych wartościach napięcia początkowego.

Przypadkowe położenie wirnika i przypadkowa faza początkowa napięć trójfazowych może skutkować dużymi wartościami prądów i momentu w pierwszych chwilach rozruchu, oraz pulsacjami tych wielkości i prędkości obrotowej w dalszym przebiegu rozruchu. Zjawiska te wzmagają się ze wzrostem momentu bezwładności układu napędowego.

Dla momentu bezwładności układu siedmiokrotnie większego od momentu bezwładności wirnika silnika ($I = 7 \cdot I_w$), stanowiącego typową wartość dla układów wentylatorowych małej mocy, pulsacje wielkości elektrycznych i mechanicznych nie są zbyt znaczące. Przy dużym momencie bezwładności układu przekraczającym znacznie wartości standardowe (np. $I = 17,5 \cdot I_w$), niektóre położenia wirnika (np. $\alpha_0 = -22,5$ deg) uniemożliwiają rozruch. W takich położeniach wirnika, w których silnik się uruchamia, podczas rozruchu widoczne są pulsacje prędkości i momentu a synchronizacja do prędkości synchronicznej trwa długo przy słabo tłumionych drganiach.

Znacznie lepsze warunki rozruchowe można uzyskać realizując specyficzny algorytm zasilania, umożliwiający w pierwszej fazie rozruchu przemieszczenie wirnika do położenia, w którym jego oś magnetyczna pokrywa się z osią magnetyczną trójfazowego uzwojenia stojana. Użycie algorytmu zasilania z ustawianiem położenia początkowego wirnika polem stałym prowadzi do łagodnego rozruchu synchronicznego. Położenie początkowe wirnika w tym przypadku nie ma znaczenia gdyż pole stałe w pierwszej fazie rozruchu zdąży ustawić wirnik w najkorzystniejszej dla dalszego rozruchu pozycji. Przebiegi rozruchowe dla algorytmu z ustawianiem wirnika pokazują, że zarówno podczas rozruchu jak i synchronizacji wartości momentu i prądu są w tym przypadku zdecydowanie mniejsze niż bez ustawiania wirnika.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy POIG.01.01.02-00-113/09.

LITERATURA

- [1] ANTAL L., ANTAL M., *Rozruch silników synchronicznych z magnesami trwałymi*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, 2010, Nr 30, 31–39.

- [2] ANTAL L., GWOŹDZIEWICZ M., *Badania eksperymentalne rozruchu silnika synchronicznego wzbudzonego magnesami trwałymi*, Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe, 2011, Nr 93, 131–136.
- [3] ANTAL L., ZALAS P., *Rozruch silnika synchronicznego z magnesami trwałymi zasilanego z falownika PWM*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, 2011, Nr 31, 141–149.
- [4] BHANGU B.S., SNARY P., BINGHAM C.M., STONE D.A., *Sensorless control of deep-sea ROVs PMSMs excited by matrix converters*, 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 2005, 8 pp. – P.8.
- [5] BUJACZ S., CICHOWSKI A., SZCZEPANKOWSKI P., NIEZNANSKI J., *Sensorless control of high speed permanent-magnet synchronous motor*, 2009, EPE '09. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, 1–10.
- [6] CHEN NING, WANG ZHIHONG, YU SHOUYI, GUI WEIHUA, GUO YUQIAN, *A new starting method of sensorless PMSM motors based on STM32F103B*, Control Conference (CCC), 2010 29th Chinese, 2010, 4964–4968.
- [7] GHASEMI H., VAEZ-ZADEH S., *A very fast direct torque control for permanent magnet synchronous motors start up*, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2004, Vol. 3, 1673–1677.
- [8] JUN ZHANG, XU WANG, *PMSM Vector Control and Initial Magnetic Pole Position Detect Method Based on DSP*, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, Vol. 2, Publication Year 2006, 8265–8269.
- [9] JUNYOU YANG, JINGMING ZHAO, CHENGZHI QIN, JIEFAN CUI, *Model reference adaptive sensorless control for surface permanent magnet synchronous machine under severe starting conditions*, 2004, IPEMC 2004. The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2004, Vol. 2, 1018–1022.
- [10] JUNYOU YANG, ZHENGQIANG SONG, JINMING ZHAO, *Sensorless control for cylindrical permanent magnet synchronous machine*, ICEMS 2003, Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003, Vol. 1, 134–136.
- [11] KIUCHI M., OHNISHI T., HAGIWARA H., YASUDA Y., *V/f control of permanent magnet synchronous motors suitable for home appliances by DC-link peak current control method*, 2010 International Power Electronics Conference (IPEC), 2010, 567–573.

STARTING OF PM SYNCHRONOUS MOTOR SUPPLIED FROM INVERTER

The paper presents the results of starting calculations for a selected model of the surface mount permanent magnet synchronous motor (SMPMSM) supplied from inverter. The calculations were performed using the finite-element method in a field-circuit model of the motor. The calculations of synchronous starting were performed for $U/f = \text{constant}$ and linear change of frequency during starting. The influence of change value of moment of inertia and initial position of the rotor on waveforms of the basic quantities during starting has been investigated.