

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

Ludwik ANTAL*

Paweł ZALAS*

ROZRUCH SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI ZASILANEGO Z FALOWNIKA PWM

Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych rozruchu silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi zewnętrznymi zasilanego z falownika PWM. 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 początkowej wartości napięcia (o częstotliwości zerowej) na rozruchowe przebiegi podstawowych wielkości elektromechanicznych.

1. WSTĘP

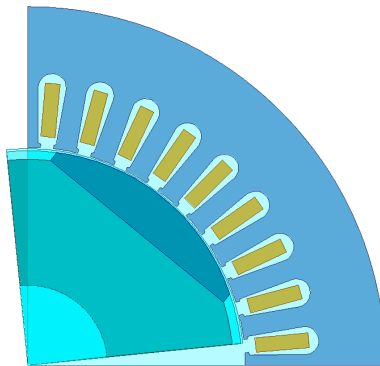
Silnik synchroniczny o bezpośrednim rozruchu wzbudzany magnesami trwałymi (LSPMSM) umożliwia zwiększenie sprawności i współczynnika mocy w stosunku do silników indukcyjnych. Jednakże silniki z magnesami trwałymi mają mały moment początkowy i zdolność synchronizacji malejącą ze wzrostem obciążenia. Zwiększenie momentu początkowego i zdolności synchronizacji oraz jednoczesne osiągnięcie dobrych właściwości eksploatacyjnych stanu ustalonego jest bardzo trudne. Poprawa właściwości eksploatacyjnych (sprawności, współczynnika mocy i momentu synchronicznego) przez powiększanie natężenia koercji magnesu powiększa moment hamujący i tym samym zmniejsza wartość momentu rozruchowego. Również zwiększając moment indukcyjny (moment klatki rozruchowej) dla prędkości bliskich prędkości synchronicznej (w celu powiększenia zdolności synchronizacji) przez zmniejszenie rezystancji klatki, zmniejsza się moment rozruchowy. Wynika stąd, że właściwości rozruchowe silników LSPM nie są zbyt dobre i ograniczają ich zastosowanie do napę-

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

du maszyn o charakterystyce wentylatorowej nie wymagających dużego momentu rozruchowego w początkowej fazie rozruchu. Literaturowe koncepcje poprawienia właściwości rozruchowych LSPMSM dotyczą optymalizacji konstrukcji silnika [1, 7, 9, 14] i rozruchu synchronicznego przy pomocy różnych systemów sterowania przekształtnikowego [2–6, 8, 10–13, 15, 16].

Jednym z możliwych rozwiązań problemu rozruchu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi jest zastosowanie rozruchu synchronicznego. Rozruch taki jest możliwy przy wykorzystaniu do zasilania silnika przekształtnika pozwalającego na płynną regulację częstotliwości napięcia zasilającego.

Badania właściwości rozruchowych silnika z magnesami trwałymi zasilanego z przekształtnika wykonano przy pomocy dwuwymiarowego modelu połowo-obwodowego takiego silnika (rys. 1). Ze względu na symetrię maszyn 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.

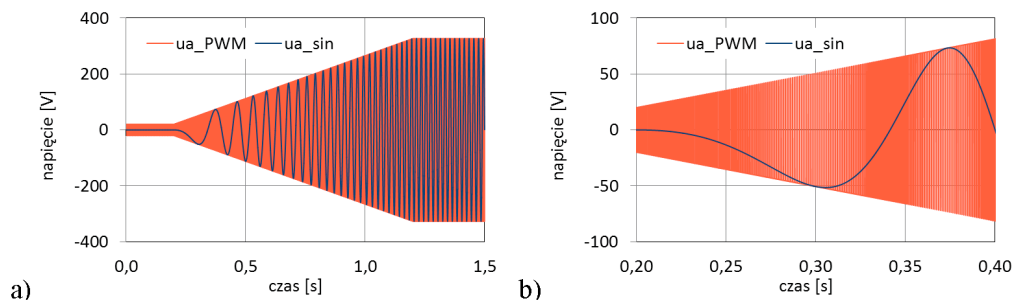


Rys. 1. Model połowy silnika z magnesami zewnętrznymi do zasilania z przekształtnika
Fig. 1. The field part of the model of the SMPMSM motor designed for supply from inverter

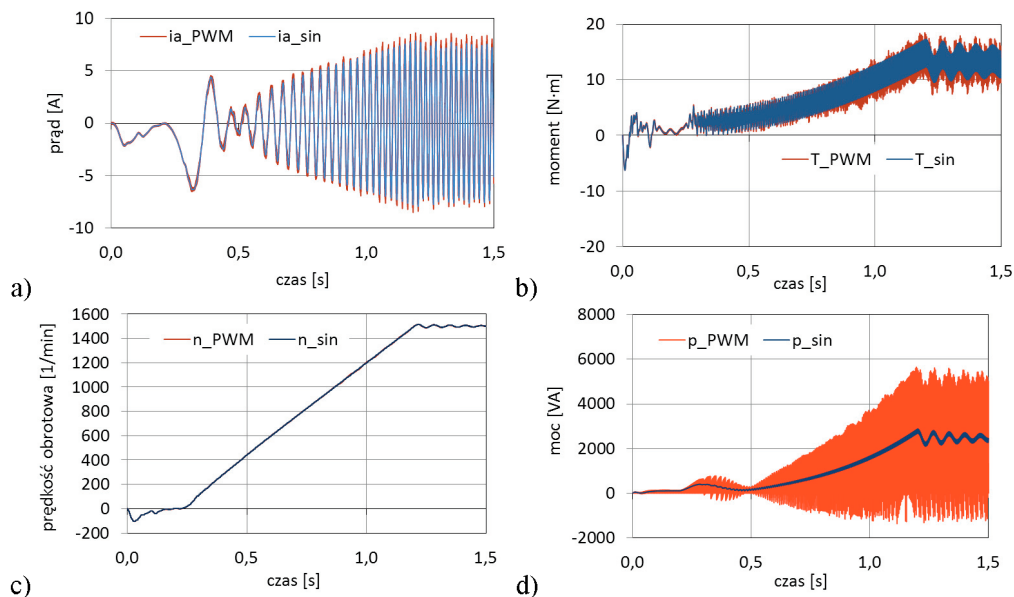
2. OBLICZENIA NUMERYCZNE

W celu oceny właściwości eksploatacyjnych rozpatrywanych silników wykonano obliczenia symulacyjne rozruchu silników obciążonych wentylatorowym momentem znamionowym (równym 13 N·m przy prędkości 1500 obr/min). Przyjęto również, że moment bezwładności układu napędowego jest dwukrotnie większy od momentu bezwładności wirnika silnika. Początkowo zrealizowano obliczenia z użyciem sygnału PWM opracowanego na podstawie zmierzonego sygnału falownika użytego w laboratoryjnych badaniach. W badaniach rozruchów użyto sygnałów napięciowych o liniowej zmianie amplitudy napięcia i częstotliwości w funkcji czasu i sta-

łym stosunku U/f . Ze względu na długi czas obliczeń spowodowany koniecznością stosowania w obliczeniach z sygnałem PWM bardzo małego kroku czasowego ($1 \cdot 10^{-6}$ s) podjęto próbę zastąpienia sygnału zasilającego PWM sygnałem sinusoidalnym spełniającym warunek $U/f = \text{const}$ (rys. 2).



Rys. 2. Porównanie przyjętych do obliczeń przebiegów rozruchowych napięć fazowych z falownika PWM i sinusoidalnego (a); fragment (b)
Fig. 2. Comparison of waveforms of the stator starting phases voltage supplied from pulse-width modulation inverter and sine-wave (a); fragment (b)



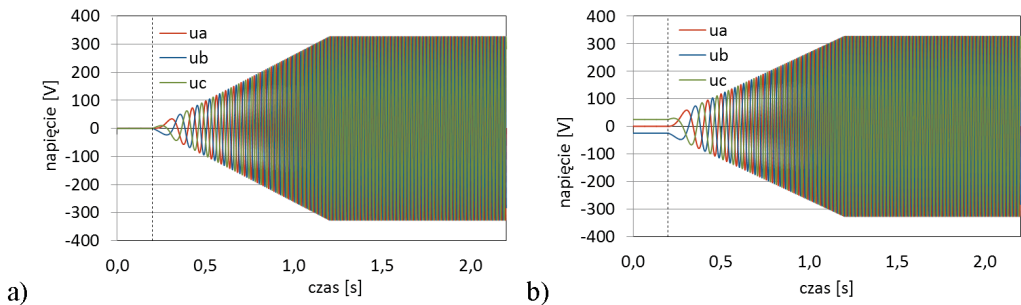
Rys. 3. Porównanie obliczonych dla wzbudzenia sygnałem PWM i sinusoidalnym przebiegów wielkości elektrycznych i mechanicznych:

a) prądu, b) momentu, c) prędkości obrotowej, d) mocy chwilowej

Fig. 3. Comparison of the starting calculation results of the motor supplied from pulse-width modulation inverter and sine-wave: a) current, b) electromagnetic torque, c) rotational speed, d) momentary power

Wyniki tych prób obliczeniowych dały dobrą zgodność wielkości globalnych takich jak moment, prędkość, prąd stojana i moc pobierana podczas rozruchu (rys. 3). Rozbieżności w przebiegach rozruchowych dotyczą wielkości pulsacji, jednakże wartości średnie są takie same. Widać to szczególnie wyraźnie w przebiegach momentu elektromagnetycznego i mocy chwilowej pobieranej.

Po ustaleniu, że zastąpienie sygnału napięciowego PWM sygnałem sinusoidalnym jest dopuszczalne, opracowano szereg przebiegów napięciowych trójfazowych o takich samych czasach narastania napięcia i częstotliwości, takich samych wartościach amplitud końcowych (po zakończeniu rozruchu) lecz różnych wartościach napięcia początkowego U_0 . Założono, że w początkowej fazie rozruchu o długości 0,2 s podawane są na poszczególne fazy niewielkie napięcia stałe ($f = 0$), których wartości wynikają z przesunięć kątowych napięć trójfazowych. Przykładowe przebiegi napięcia fazowego podczas rozruchu silnika dla $U_0 = 0$ i $U_0 = 20$ V pokazano na rysunku 4.



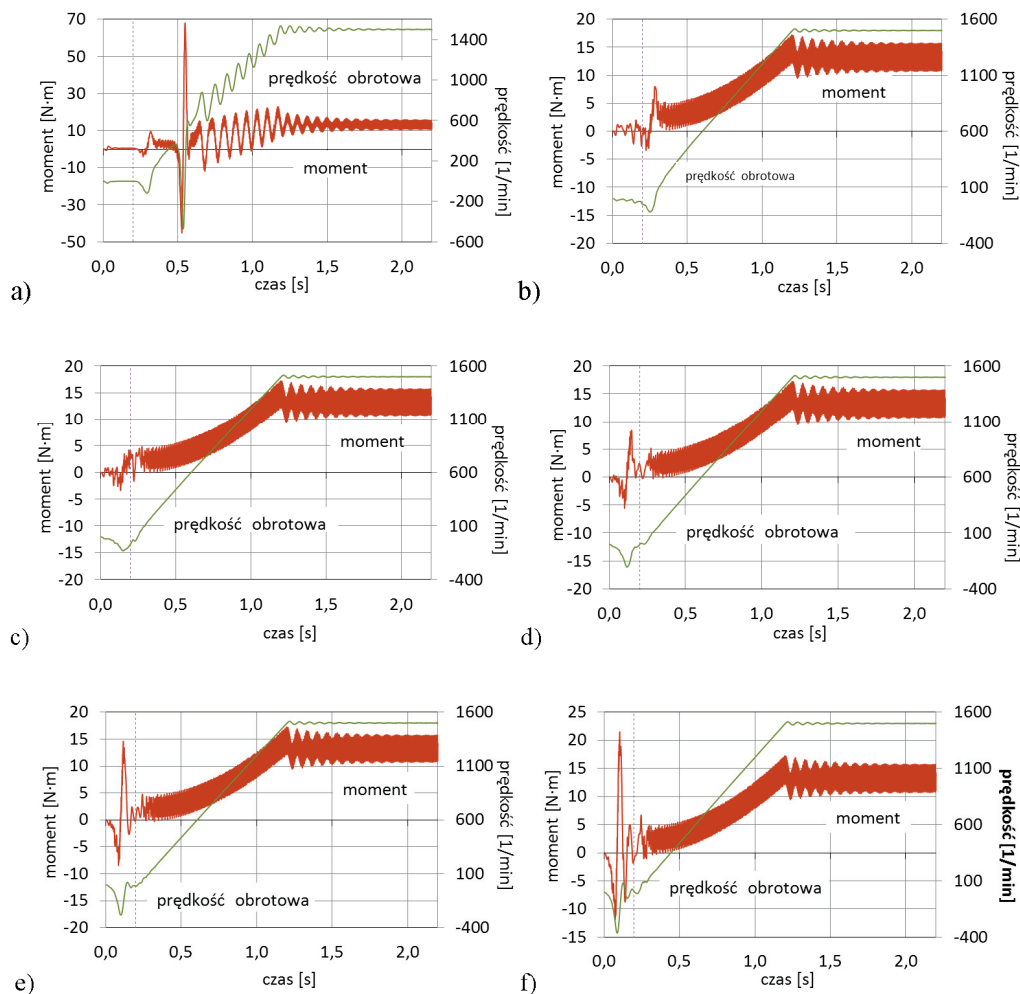
Rys. 4. Przebiegi sinusoidalnych napięć fazowych o wartości początkowej:
a) $U_0 = 0$; b) $U_0 = 20$ V

Fig. 4. Sinusoidal waveforms of the stator phases voltage, initial value:
a) $U_0 = 0$; b) $U_0 = 20$ V

3. WYNIKI OBLICZEŃ

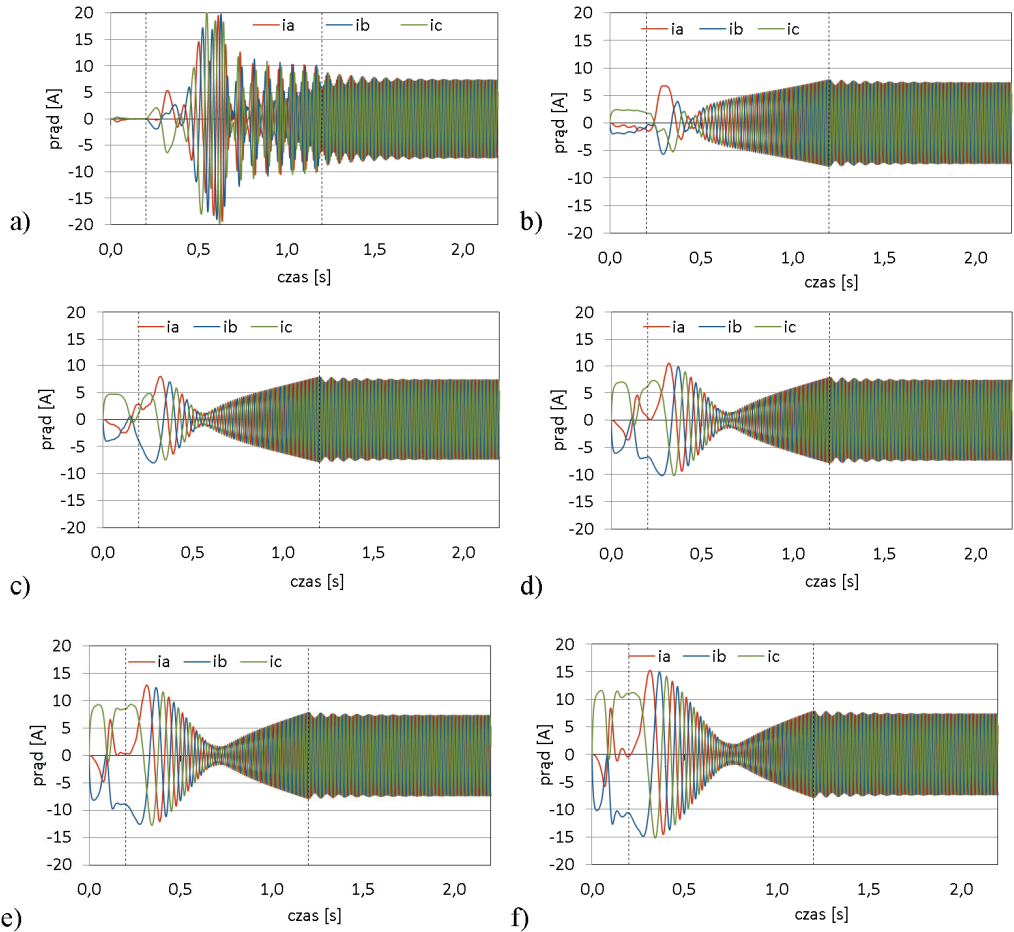
Obliczenia symulacyjne wykonano przy użyciu modelu połowo-obwodowego silnika z zewnętrznymi magnesami trwałymi w kształcie wycinka koła, przedstawionego na rysunku 1. W obliczeniach przyjęto trójfazowe sygnały o liniowej zmianie amplitudy napięcia i częstotliwości w funkcji czasu. Dla ustalenia najkorzystniejszej wartości napięcia początkowego wykonano obliczenia dla $U_0 = 0; 10; 20; 30; 40; 50$ V. We wszystkich badanych przypadkach rozruchu przyjęto takie samo początkowe położenie kątowe wirnika.

Przebiegi wielkości elektromechanicznych (momentu, prędkości obrotowej i prądów fazowych twornika) podczas rozruchu silnika obciążonego momentem wentylatorowym o wartości 13 N·m przy prędkości znamionowej, przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Przebiegi momentu i prędkości obrotowej podczas rozruchu silnika zasilanego napięciem z falownika o różnych wartościach początkowych, $U_0 = 0$ V (a); 10 V (b); 20 V (c); 30 V (d); 40 V (e); 50 V (f)

Fig. 5. Waveforms of electromagnetic torque and rotational speed during motor starting for different initial values of the stator voltage supplied from inverter, $U_0 = 0$ V (a); 10 V (b); 20 V (c); 30 V (d); 40 V (e); 50 V (f)



Rys. 6. Przebiegi prądów stojana podczas rozruchu silnika zasilanego napięciem z falownika o różnych wartościach początkowych, $U_0 = 0$ V (a); 10 V (b); 20 V (c); 30 V (d); 40 V (e); 50 V (f)

Fig. 6. Waveforms of the stator currents during starting for different initial values of the stator voltage supplied from inverter, $U_0 = 0$ V (a); 10 V (b); 20 V (c); 30 V (d); 40 V (e); 50 V (f)

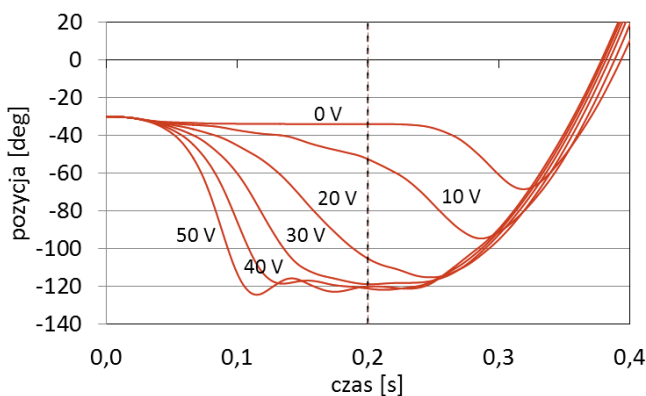
Przebiegi momentu, prędkości obrotowej, prądu stojana i mocy chwilowych przy braku napięcia początkowego przedstawione na rysunkach 5a i 6a pokazują, że jest to najgorszy z rozpatrywanych scenariuszy rozruchu. W pierwszych chwilach rozruchu wartość momentu ponad pięciokrotnie przekracza jego wartość znamionową. Prędkość obrotowa silnie pulsuje, co oznacza, że silnik nie synchronizuje się z polem wirującym o rosnącej prędkości kątowej. Prądy stojana osiągają wartości chwilowe 20 A, co stanowi wartość trzykrotnie większą od maksymalnej wartości zna-

mionowej. Brak synchronizacji objawia się silnymi pulsacjami prądu, korespondującymi z pulsacjami prędkości wirnika nieustannie przyspieszanego i następnie hamowanego. Rozruch trwa dłużej niż w innych rozpatrywanych przypadkach. Moc pobierana podczas takiego rozruchu przekracza moc pobieraną przy pracy znamionowej.

Zwiększenie napięcia początkowego do wartości 10 lub 20 V wyraźnie poprawia warunki rozruchu. Moment i prąd nie przekraczają wartości znamionowych. Niższa wartość momentu w początkowej fazie rozruchu osiągana jest dla napięcia początkowego 20 V, a niższa wartość prądu i mocy pobieranej dla napięcia początkowego 10 V. Prędkość narasta liniowo, bez pulsacji. Silnik pracuje synchronicznie więc podczas rozruchu nie ma również pulsacji prądów.

Dalszy wzrost napięcia początkowego powoduje wzrost wartości momentu, prądów i mocy pobieranej w pierwszej fazie rozruchu. Duże wartości momentu pojawiają się już w okresie ustawiania wirnika siłami wytworzonymi prądami stałymi. Towarzyszą im duże wartości prądów i większe zużycie mocy. Rozruch przebiega synchronicznie więc nie występują pulsacje prędkości i prądu.

Z przyjętej wartości napięcia początkowego wynika sposób ustawiania się wirnika silnika przed rozpoczęciem rozruchu. Zmiany pozycji kątowej wirnika w początkowym okresie rozruchu pokazuje rysunek 7.



Rys. 7. Pozycja kątowa wirnika przed rozruchem silnika dla różnych wartości początkowych napięcia
 Fig. 7. Initial position of the rotor before starting for different initial values of the stator voltage

Przedstawione wyniki obliczeń dotyczą jednego położenia początkowego wirnika i stosunkowo niewielkiego momentu bezwładności układu napędowego. Dla innych położenia początkowych i innych wartości momentu bezwładności będą niewątpliwie odmienne.

3. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki pokazują, że synchroniczny rozruch silnika synchronicznego z magnesami trwałymi przy stałym stosunku U/f jest możliwy nawet przy zerowym napięciu początkowym. Jednakże napięcie początkowe większe od zera ustawia wirnik tak, że rozruch jest bardziej płynny i przebiega przy mniejszych wartościach pulsacji momentu, prędkości obrotowej i prądu. Najlepsze przebiegi wielkości elektromechanicznych uzyskuje się dla trójfazowych napięć początkowych o wartościach około 7% napięcia znamionowego. Taki rozruch synchroniczny jest znacznie łagodniejszy niż rozruch asynchroniczny w silnikach LSPMSM (o bezpośrednim rozruchu).

Wykonane badania symulacyjne miały za zadanie wykazać, że możliwy jest rozruch synchroniczny a tym samym, że możliwe jest zastosowanie wirnika z litej stali. Mimo ich fragmentaryczności taką możliwość pokazują.

W praktycznych zastosowaniach będą zapewne używane bardziej złożone systemy sterowania wykorzystywane zarówno do rozruchu jak i regulacji prędkości obrotowej.

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

LITERATURA

- [1] ALIABAD A.D., MIRSALEM M., ERSHAD N.F., *Line-Start Permanent-Magnet Motors: Significant Improvements in Starting Torque, Synchronization, and Steady-State Performance*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, Iss. 12, 2010, pp. 4066–4072.
- [2] ANCUTI R., BOLDEA I., ANDREESCU G.-D., *Sensorless V/f control of high-speed surface permanent magnet synchronous motor drives with two novel stabilising loops for fast dynamics and robustness*, Electric Power Applications, IET, Vol. 4, Iss. 3, 2010, pp. 149–157.
- [3] 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, pp. 8.
- [4] 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, pp. 1–10.
- [5] 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, pp. 4964–4968.
- [6] FATU M., TEODORESCU R., BOLDEA I., ANDREESCU G.-D., BLAABJERG F., *I-F starting method with smooth transition to EMF based motion-sensorless vector control of PM synchronous motor/generator*, Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE, Publication, 2008, pp. 1481–1487.
- [7] FENG X., LIU L., KANG J., ZHANG Y., *Super premium efficient line start-up permanent magnet synchronous motor*, (ICEM), 2010 XIX International Conference on Electrical Machines, 2010, pp. 1–6.

- [8] 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, pp. 1673–1677.
- [9] ISFAHANI A.H., VAEZ-ZADEH S., *Effects of Magnetizing Inductance on Start-Up and Synchronization of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motors*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, Iss. 4, 2011, pp. 823–829.
- [10] 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, 2006, pp. 8265–8269.
- [11] 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, Vol. 2, 2004, pp. 1018–1022.
- [12] 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, pp. 134–136.
- [13] 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, pp. 567–573.
- [14] KWANGSOO KIM, SEUNG JOO KIM, WON HO KIM, JONG BIN IM, SUYEON CHO, JU LEE, *The optimal design of the rotor bar for LSPMSM considering the starting torque and magnetic saturation*, 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2010, pp. 1.
- [15] VAEZ-ZADEH S., KHAYAMY M., *Efficiency-optimizing direct torque control of interior permanent magnet synchronous machines with fastest start up*, PEMD 2008. 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008, pp. 218–224.
- [16] ZEDONG ZHENG, YONGDONG LI, FADEL M., *Sensorless control of PMSM based on extended Kalman filter*, European Conference on Power Electronics and Applications, 2007, pp. 1–8.

STARTING OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR SUPPLIED FROM PWM INVERTER

The paper presents the results of starting calculations for a selected model of the surface mount permanent magnet synchronous motor (SMPMSM) supplied from PWM 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 initial value of the stator voltage ($f = 0$ Hz) on waveforms of the basic quantities during starting has been investigated.