

Cezary JĘDRYCZKA*
Wiesław ŁYSKAWIŃSKI*

ANALIZA STANÓW PRACY HYBRYDOWEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO O ROZRUCHU BEZPOŚREDNIM

W artykule rozpatrzono silnik synchroniczny z magnesami łukowymi umieszczonymi w wirniku i obwodem magnetycznym wykonanym z materiału proszkowego Somaloy 500. Model symulacyjny silnika utworzono w środowisku Maxwell v. 13. W celu zapewnienia rozruchu własnego w wirniku umieszczono pręty klatki rozruchowej. W opracowanym modelu dokonano parametryzacji geometrii zarówno prętów klatki, jaki i magnesów trwałych. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych. Przeprowadzono wstępną optymalizację kształtu magnesów i prętów w wirniku. Szczególną uwagę zwrócono na te wymiary magnesu, które mają największy wpływ na parametry funkcjonalne rozpatrywanego silnika.

1. WSTĘP

Wzrost zainteresowania silnikami synchronicznymi wynika z rozwoju przemysłu i ciągle rosnących wymagań związanych z wykorzystaniem najnowszych technologii. Poszukiwane są coraz doskonalsze, a zarazem tańsze rozwiązania tych silników. Do głównych zalet tych silników należy zaliczyć: pracę ze stałą prędkością obrotową niezależnie od momentu obciążenia oraz możliwość uzyskania lepszych (od klasycznych silników indukcyjnych) parametrów funkcjonalnych, sprawności i współczynnika mocy. W silnikach synchronicznych obecnie coraz częściej stosuje się magnesy trwałe w obwodzie wzbudzenia. Pozwala to na dalsze zmniejszenie zużycia energii i kosztów eksploatacji oraz zwiększenie współczynnika mocy przy jednoczesnym zmniejszeniu gabarytów. Podstawową wadą silników synchronicznych jest brak zdolności do synchronizacji. Do ich rozruchu niezbędne jest wykorzystanie energoelektronicznych układów przekształtnikowych. Powoduje to wzrost kosztów układu napędowego. W celu uniknięcia tej niedogodności w wielu ośrodkach naukowo-badawczych [2, 3, 7, 8, 9, 11] oraz zakładach produkujących maszyny elektryczne [17, 18] prowadzone są intensywne prace nad silnikami synchronicznymi o rozruchu własnym. Silniki te, od angielskiej nazwy Line Start Synchronous Motor, przyjęto oznaczać skrótem LSSM. W przypadku silników

* Politechnika Poznańska.

wzbudzanych magnesami trwałymi stosuje się także oznaczenie LSPMSM (ang. Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor). W silnikach tych moment rozruchowy uzyskuje się zazwyczaj poprzez umieszczenie w wirniku klatki rozruchowej. Duże możliwości w zakresie opracowania nowych struktur tych silników stwarza zastosowanie na magnesy i obwód magnetyczny wirnika materiałów proszkowych.

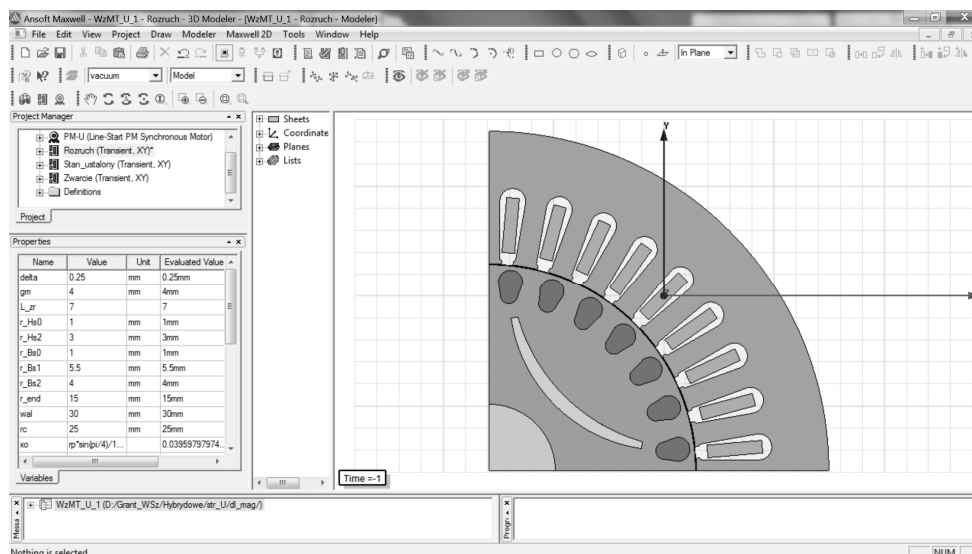
W badaniach nad silnikami o rozruchu własnym poszukuje się konstrukcji o jak najlepszych parametrach eksploatacyjnych (współczynnik mocy, sprawność) charakteryzujących się jednocześnie dużym momentem rozruchowym i łatwością synchronizacji. Właściwy dobór geometrii magnesów oraz parametrów klatki rozruchowej jest bardzo złożony i związany z koniecznością osiągnięcia kompromisu pomiędzy dobrymi właściwościami rozruchowymi, a parametrami eksploatacyjnymi maszyny w stanie ustalonym. Zastosowanie do analizy silników LSPMSM modeli obwodowych jest utrudnione, głównie ze względu na złożoną strukturę i nasycanie się obwodu magnetycznego. Przy poszukiwaniu optymalnej konstrukcji silników LSPMSM z wykorzystaniem modeli polowych należy rozpatrywać zarówno przejściowe jak i ustalone stany pracy silnika [4, 5, 6, 10, 14]. Zdaniem autorów, ze względu na wspomniany wpływ nieliniowości, opracowanie modeli polowych i przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych pozwala uniknąć budowy wielu kosztownych prototypów.

2. MODEL SYMULACYJNY SILNIKA SYNCHRONICZNEGO O ROZRUCHU BEZPOŚREDNIM

Polowo-obwodowy model hybrydowego silnika synchronicznego o rozruchu własnym z magnesami łukowymi opracowano w środowisku Maxwell v. 13 (rys. 1) firmy Ansys. W stworzonym modelu maszyny dokonano parametryzacji: kształtu, liczby i rozmieszczenia żłobków w wirniku oraz wielkości, rozmieszczenia i kształtu magnesów. Umożliwiono także zmianę parametrów materiałowych poszczególnych części badanego silnika. Model dostosowano do przeprowadzenia kompleksowych obliczeń optymalizacyjnych połączonych z polową analizą rozpatrywanej konstrukcji. W celu uproszczenia konstrukcji i technologii wytwarzania założono, że obwód magnetyczny maszyny zostanie wykonany z materiałów proszkowych: magnetycznie twardych wykorzystanych na magnesy (NdFeB) oraz dielektromagnetyku miękkiego pełniącego rolę ferromagnetycznego rdzenia (Somaloy 500).

Przyjęto, że właściwości materiałów magnetycznych są zadane oraz znana jest liczba prętów uzwojenia klatkowego i wynika ona z wytycznych wykorzystywanych przy projektowaniu silników indukcyjnych i synchronicznych o rozruchu własnym [1, 12, 15, 16]. Ze względu na przewidywane wykorzystanie

silników LSPMSM do napędu pomp i wentylatorów w górnictwie muszą one spełniać wymagania norm dotyczących właściwości ruchowych stosowanych tam obecnie silników indukcyjnych [13]. Z uwagi na przewidywane zastosowanie rozważanego silnika przyjęto, że napięcie zasilania wynosi 500 V.

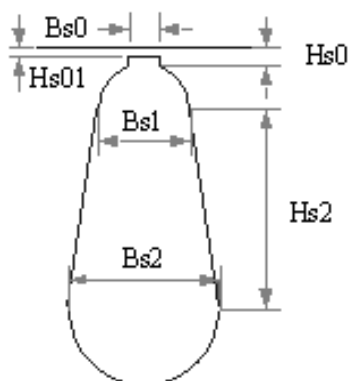


Rys. 1. Widok modelu symulacyjnego silnika LSPMSM opracowanego w programie Maxwell v. 13

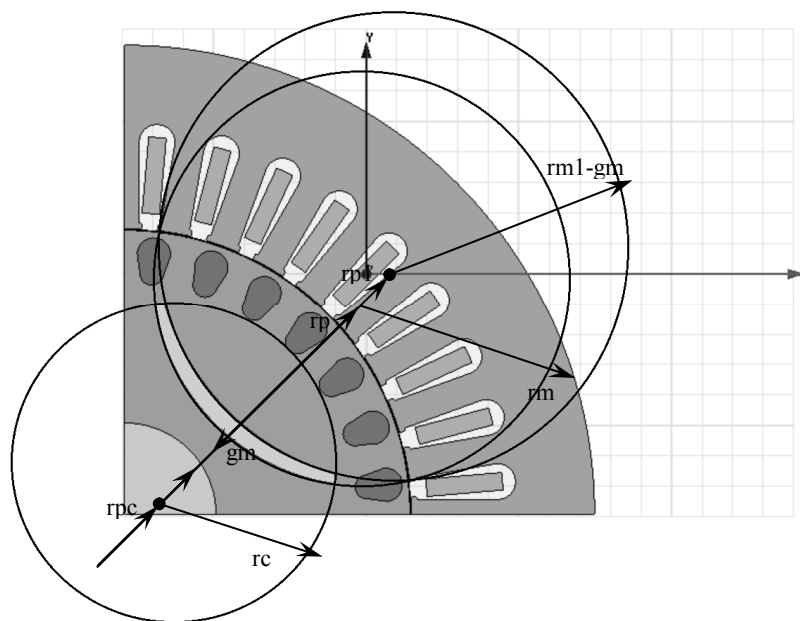
W celu zapewnienia zgodności z obecnie stosowanymi napędami indukcyjnymi przy tworzeniu modelu symulacyjnego silnika przyjęto wymiary główne oraz kształt i liczbę żłobków w stojanie taką, jak w silniku indukcyjnym typu Sg100L-4. W stojanie tym umieszczono wirnik z odpowiednio rozłożonymi magnesami i klatką rozruchową. Przy czym zarówno wymiary jak i rozmieszczenie magnesów oraz klatki rozruchowej można niezależnie modyfikować w zakładce Właściwości (Properties na rys. 1). Poniżej zamieszczono listę oraz opis wykorzystanych parametrów:

- r_{Hs0} , r_{Hs1} , r_{Hs2} , r_{Bs0} , r_{Bs1} , r_{Bs2} zgodnie z rys. 2 powodują zmianę kształtu żłobków wirnika (indeks $r_{_}$),
- delta - długość szczeliny powietrznej,
- gm - grubość magnesu mierzona w połowie jego rozpiętości,
- L_{zr} - liczba żłobków wirnika,
- wal - średnica wału,
- rc, rp, rm, rpc, rml, rp1 promienie okręgów i przesunięcie ich środków względem początku układu współrzędnych zgodnie z rys. 3,
- pos - przesunięcie żłobków od zadany kąt,

- R_{pr} , L_{pr} – rezystancja i indukcyjność pierścienia zawierającego pręty klatki rozruchowej.



Rys. 2. Predefiniowany kształt żłobka (oznaczenia w zakładce *Properties* z literą r)



Rys. 3. Sposób kształtowania magnesów w modelu symulacyjnym wirnika

Duża liczba parametrów wykorzystywanych przy tworzeniu żłobków i magnesów umożliwia uzyskanie różnorodnych kształtów magnesów i prętów klatki rozruchowej oraz zapewnia ich dowolne rozmieszczenie w wirniku. W opracowanym modelu, wykorzystując przedstawione powyżej dane wejściowe,

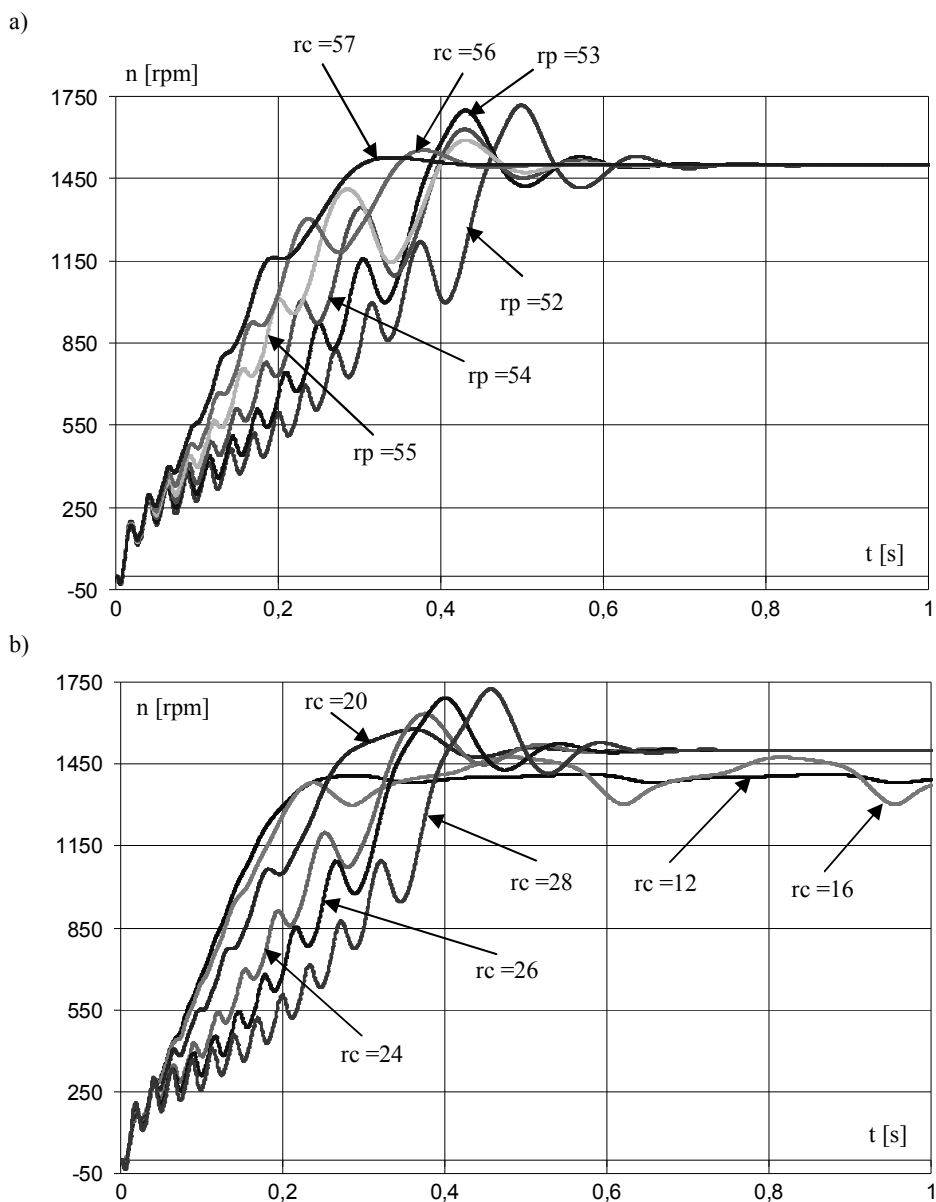
można dokonywać obliczeń parametrycznych. Umożliwia to w prosty sposób badanie wpływu wymiarów obwodu magnetycznego i właściwości materiałów na parametry funkcjonalne silnika.

3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

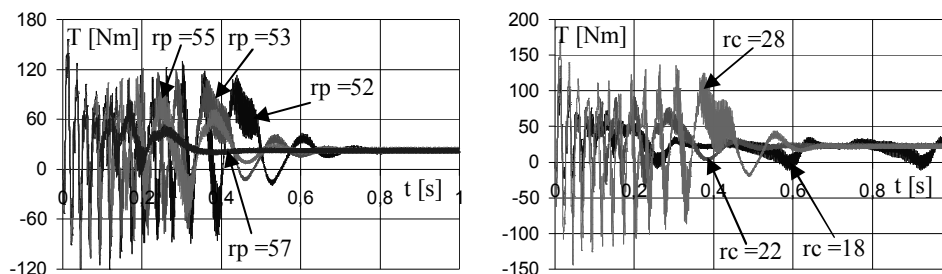
W ramach wstępnej optymalizacji struktury silnika synchronicznego o rozruchu własnym pokazanej na rys. 3 przeprowadzono analizę przebiegów momentu i prędkości obrotowej w czasie rozruchu. Wykonano również symulacje dla ustalonego stanu pracy oraz stanu zwarcia. Na podstawie wyników obliczeń można wyznaczyć parametry funkcjonalne rozpatrywanego silnika takie jak prąd i moment rozruchowy, sprawność oraz współczynnik mocy. Obliczenia dla rozruchu silnika wykonano przy momencie bezwładności 7-krotnie większym od wartości momentu bezwładności wirnika i wentylatorowej charakterystyce obciążenia.

Na rysunku 4 zamieszczono przebiegi prędkości obrotowej podczas rozruchu silnika przy zmieniającej się grubości i rozpiętości magnesów wynikających odpowiednio z modyfikacji wymiaru r_p i r_c (rys. 3). Można zauważyć, że przy wzrastającej grubości magnesu (r_p maleje) oraz wzrastającej rozpiętości czas rozruchu się wydłuża i zwiększają się oscylacje w pobliżu prędkości synchronicznej. Również w przebiegach momentu (rys. 5) i prądu (rys. 6) widać wzrastające oscylacje i wydłużający się czas stabilizacji ze wzrostem grubości i rozpiętości magnesów.

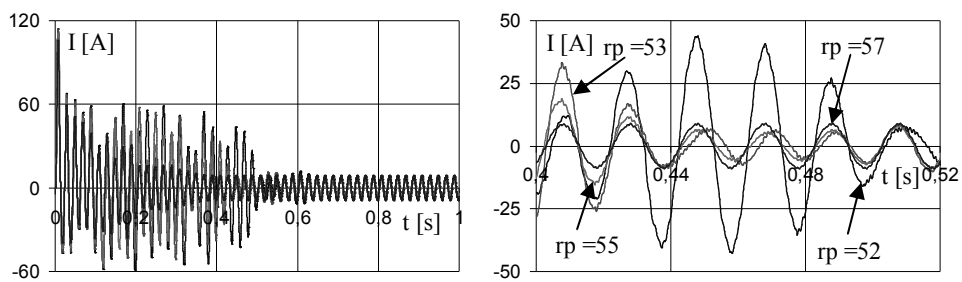
Na podstawie przedstawionych powyżej charakterystyk rozpatrywanego silnika można stwierdzić, że najkorzystniejsza jest grubość magnesów ok. 4 mm (w środkowej części), co odpowiada wartości $r_p = 54$ mm. Uzyskuje się wówczas dla rozpatrywanego silnika najwyższą sprawność i współczynnik mocy (rys. 8a). Prąd rozruchowy jest nieco większy niż przy mniejszej grubości magnesów, ale w stanie ustalonym wartość prądu jest jednakowa. Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić znaczny wpływ rozpiętości magnesu na sprawność, współczynnik mocy i prąd rozruchowy silnika. Przy małej rozpiętości ($r_c < 18$ mm) silnik nie wpada w synchronizm (rys. 4b). Prąd rozruchowy i współczynnik mocy prawie się nie zmieniają, a sprawność nawet maleje. Dla większych rozpiętości ($r_c > 18$ mm) zarówno sprawność, współczynnik mocy jak i prąd rozruchowy wzrastają, a w stanie ustalonym prąd nawet nieznacznie maleje.



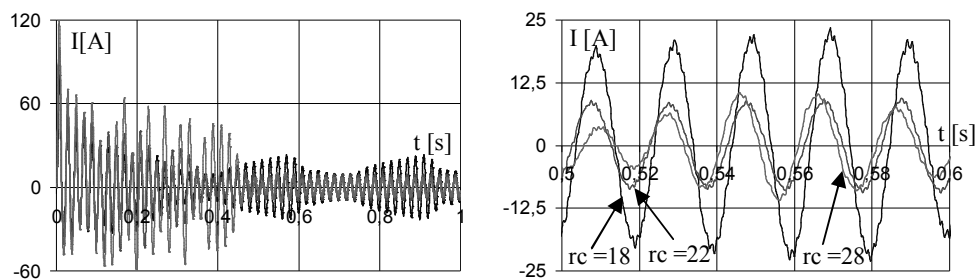
Rys. 4. Przebiegi prędkości obrotowej podczas rozruchu dla: a) kilku grubości magnesów (zmiana r_p [mm]), b) kilku rozpiętości magnesów (zmiana r_c [mm])



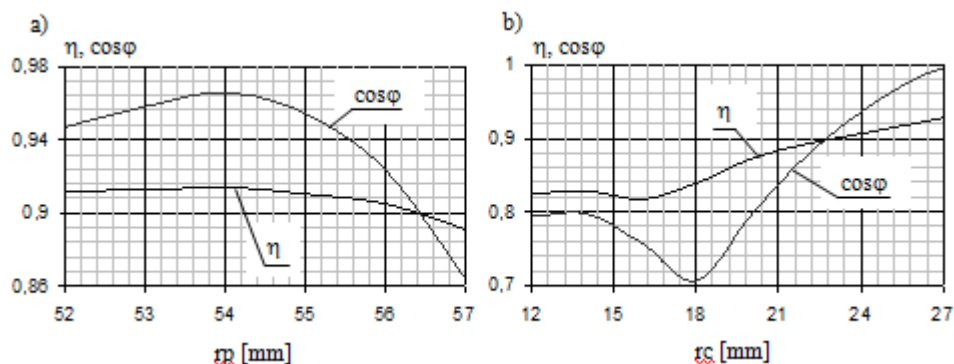
Rys. 5. Przebiegi momentu podczas rozruchu dla kilku: a) grubości magnesów (zmiana r_p [mm]), b) rozpiętości magnesów (zmiana r_c [mm])



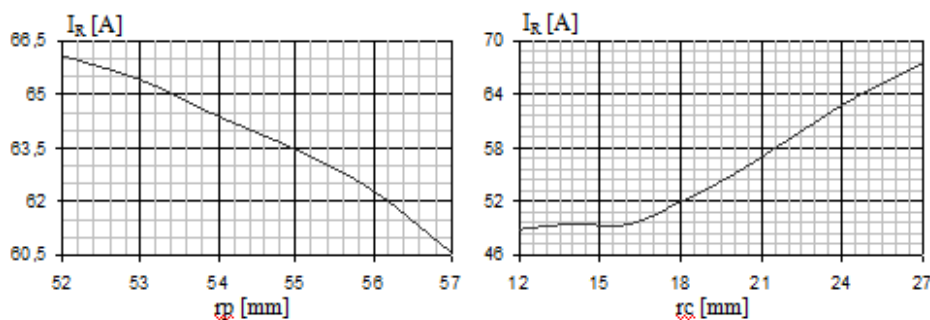
Rys. 6. Przebiegi prądu w jednej fazie uzwojenia stojana podczas rozruchu dla kilku grubości magnesów (zmiana r_p [mm])



Rys. 7. Przebiegi prądu w jednej fazie uzwojenia stojana podczas rozruchu dla kilku rozpiętości magnesów (zmiana r_c [mm])



Rys. 8. Sprawność i współczynnik mocy w funkcji: a) grubości (zmiana r_p) i b) rozpiętości (zmiana r_c) magnesu



Rys. 9. Prąd rozruchowy w funkcji: a) grubości (zmiana r_p) i b) rozpiętości (zmiana r_c) magnesu

4. WNIOSKI

Rozpatrywany w artykule silnik synchroniczny z magnesami łukowymi przystosowany do rozruchu bezpośredniego został zamodelowany w programie Maxwell v.13. Model symulacyjny opracowano na bazie silnika indukcyjnego typu Sg100L-4. Umożliwia on wstępną optymalizację parametrów funkcjonalnych rozpatrywanego silnika. Analiza uzyskanych wyników badań symulacyjnych i przeprowadzona parametryzacja danych wejściowych pozwala w efektywny sposób dobrać właściwą konstrukcję obwodu magnetycznego. Zastosowanie materiałów proszkowych umożliwia dowolne kształtowanie magnesów i obwodu magnetycznego. Przeprowadzone badania pokazują między innymi, że znaczący wpływ na parametry funkcjonalne silnika mają rozpiętość i grubość magnesów. W celu polepszenia sprawności oraz współczynnika mocy, przy projektowaniu silników LSPMSM powinno się zapewnić możliwie jak największą rozpiętość magnesów. Niestety pogarszają się przez to warunki rozruchu silnika. Z tego

względem konstrukcja wirnika musi być dobrana na podstawie kompromisu pomiędzy dobrymi parametrami w stanie ustalonym, a zadowalającymi właściwościami rozruchowymi. Opracowana konstrukcja z magnesami łukowymi i prętami klatki rozruchowej zapewnia znaczącą poprawę współczynnika mocy i sprawności w stosunku do silnika indukcyjnego oraz umożliwia rozruch silnika przy bezpośrednim podłączeniu do sieci zasilającej.

LITERATURA

- [1] Dąbrowski M., Projektowanie maszyn elektrycznych prądu zmiennego, WNT, Warszawa 1994.
- [2] Ding T., Takorabet N., Sargos F.M., Design and analysis of different line-start PM synchronous motors for oil-pump applications, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp.1816-1819, Mar.2009.
- [3] Fei W., Luk K.P.C., Ma J., Shen J.X., Yang G., A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial three-phase induction motor, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 10, pp. 4724-4727, Oct.2009.
- [2] Ferreti G. Magnani C., Rocco P., Modelling, identification and compensation of pulsating torque in permanent magnet AC motors, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 6, s. 912-920, 1998.
- [3] Hafner M., Schoning M., Hameyer K., Automated sizing of permanent magnet synchronous machines with respect to electromagnetic and thermal aspects, *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol.29, no 5, pp.1205-1217, 2010.
- [4] Hendershot J.R., Miller T.J.E., Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [7] 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, no. 4, pp. 823-829, April 2011.
- [8] Knight A.M., McClay C.I.: The design of high-efficiency line-start motors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 6, pp. 1555 -1562, Nov.-Dec.2000.
- [9] Kurihara K., Rahman A., High-efficiency line-start interior permanent-magnet synchronous motors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 3, pp. 789-796, May/Jun. 2004.
- [10] Michalski R., Rotter S., Dotychczasowe doświadczenia przy doborze wirników silników synchronicznych, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, z.130, 1984.
- [11] Miller T.J.E., Popescu M., Cossar C., McGilp M.I., Strappazon G., Trivillin N., Santarossa R., Line Start permanent magnet motor: single-phase steady-state performance analysis, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 2, pp. 516-525, March/April 2004.
- [12] Pawluk K., Bednarek S., Rozruch i stany asynchroniczne silników synchronicznych, WNT, Warszawa 1968.
- [13] PN G-38010:1997 Ochrona pracy w górnictwie. Silniki indukcyjne trójfazowe klatkowe do maszyn górniczych. Wymagania i badania.

- [14] Szelaż W., Analiza stanów pracy i synteza silników synchronicznych magnetoelektrycznych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy nr 331, Poznań 1998.
- [15] Śliwiński T., Metody obliczania silników indukcyjnych, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [16] Zembrzuski J., Atlas uzwojeń silników indukcyjnych, WNT, Warszawa, 2009.
- [17] http://www.leroy-somer.com/en/solutions_and_services/drive_systems/energy_saving/permanent_magnets.php
- [18] <http://www.cantonigroup.com/pl/motors/besel/news/235/nowo%C5%9B%C4%87>

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego "Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa", realizowanego w ramach badań naukowych dla budowy gospodarki opartej na wiedzy, Podzadanie P.O.I 1.1.2. Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej, 2010 – 2013.

ANALYSIS OF OPERATING MODES OF LINE START SYNCHRONOUS HYBRID MOTOR

The article deal with analysis of the line start synchronous motor with the arc magnets placed inside the rotor and the magnetic circuit made of a material powder Somaloy 500. The field-circuit model of the considered motor has been elaborated in the Maxwell v. 13 environment. In order obtain line start abilities in the rotor the squirrel-cage was placed. To perform analysis in the elaborated model the geometries of the squirrel-cage bars and magnets have been parameterized. The selected simulation results of starting up and steady state operation have been presented. A preliminary optimization of magnets and bars shape has been carried out. Particular attention was paid to the dimensions of the magnet, which have the greatest impact on functional parameters of the motor in the steady state operation.