

Marcin Bajek*

Analiza własności jednofazowego silnika z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim

1. Wstęp

Ze względu na powszechność zastosowań urządzeń elektrycznych w przemyśle i gospodarstwach domowych, coraz większą wagę przywiązuje się do zagadnienia sprawności tych urządzeń. Kładzie się nacisk na rozwój nowych technologii, które spowodują mniejsze zużycie energii elektrycznej, takich jak maszyny elektryczne z magnesami trwałymi. Istnieje wiele odmian takich silników, wśród których interesującą pozycją jest trójfazowa maszyna posiadająca zdolność samorozruchu – LSPMSM (*Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor*). Od początku lat 80. ukazało się wiele publikacji, z których wynikają korzystne właściwości maszyny, takie jak rozruch bezpośredni, wysoka sprawność (a co za tym idzie – małe wydzielanie ciepła), czy też współczynnik $\cos\phi$ bliski jedności. Z tych względów LSPMSM znajduje coraz szersze zastosowanie m.in. w pompach, elektrowniach wiatrowych i kopalniach. Wyjście poza strefę przemysłu umożliwia jednofazowa odmiana LSPMSM. Dzięki takiemu zasilaniu jest możliwe użycie maszyny nawet w małych urządzeniach gospodarstwa domowego. Silniki tego typu znajdują obecnie zastosowanie jako kompresory w lodówkach i urządzeniach chłodniczych. Stosując silnik jednofazowy LSPMSM, jest możliwe uzyskanie nawet o 40% mniejszych strat niż w przypadku silnika indukcyjnego o podobnych gabarytach [15].

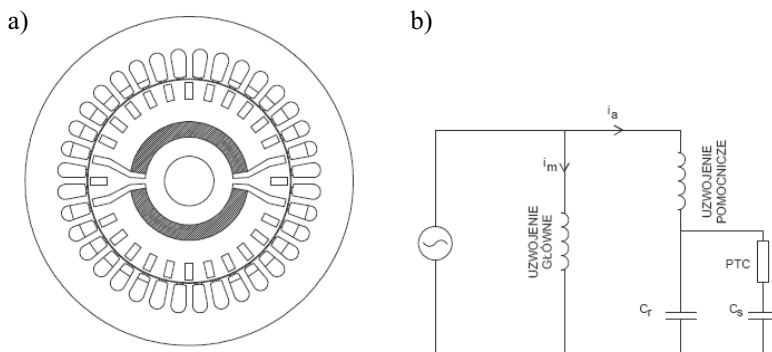
W literaturze specjalistycznej można znaleźć wiele pozycji, w których wykonano analizę własności modelu i porównanie z pomiarami na rzeczywistym jednofazowym silniku LSPMSM. Moce badanych maszyn są niewielkie, rzędu kilkuset watów [10, 19], ze względu na właściwości urządzeń, w których są instalowane.

2. Geometria oraz układ zasilania

Uzwojenie stojana jest rozłożone w żłobkach w taki sposób, aby uzyskać pole w szczelinie jak najbliższe sinusoidalnemu. Dzięki temu ograniczona zostaje liczba wyższych har-

* Doktorant na Wydziale EAIiE Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

monicznych indukcji pola magnetycznego w szczelinie, a co za tym idzie – poprawa osią-
gów maszyny. Sinusoidalny rozkład pola jest możliwy przez nierównomierne rozmieszcze-
nie uzwojenia głównego oraz dodatkowego, podobnie jak na rysunku 1a.



Rys. 1. Sposób rozmieszczenia uzwojenia głównego i bocznego w żłobkach stojana (a)
oraz schemat połączeń obwodu elektrycznego w jednofazowej maszynie LSPMSM
o rozruchu za pomocą kondensatora (b)

Magnesy trwałe w wirniku mogą być umieszczone praktycznie dowolnie. Decyzja o ich kształcie i położeniu zależy od projektanta maszyny. Rysunek 1a przedstawia przykładowe rozmieszczenie magnesów w wirniku, które jest w literaturze spotykane najczęściej [3÷7, 11, 16]. Żłobki klatki rozruchowej są rozmieszczone w wirniku symetrycznie, możliwe jest jednak ich ułożenie nierównomierne na obwodzie wirnika. Przy projektowaniu magnesów oraz żłobków klatki należy pamiętać o takim ich wzajemnym położeniu, aby ograniczyć strumień rozproszenia magnesów i dzięki temu dobrze wykorzystać materiał magnetyczny twardy.

Przesunięcie fazowe pomiędzy prądem uzwojenia głównego i_m oraz bocznego i_a umożliwiające uzyskanie pola wirującego jest realizowane poprzez użycie kondensatora pracy C_r w obwodzie bocznym. Jego prawidłowy dobór jest gwarancją uzyskania sinusoidalnego pola stojana i zrównoważenia źródła zasilania. Oznacza to minimalizację składowej przeciwnej prądu stojana, która jest odpowiedzialna za powstawanie w maszynie dodatkowego, szkodliwego momentu oscylacyjnego. W [18] zostały zawarte wyniki analizy wpływu rozmieszczenia uzwojeń głównego i bocznego w stojanie. Autorzy zastosowali cztery różne stojany dla tego samego wirnika, co umożliwiło określenie wpływu parametrów uzwojenia na własności maszyny.

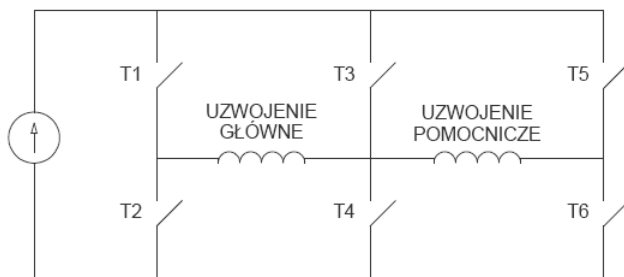
Wartość kondensatora C_r powinna być dobrana do stanu pracy ustalonej, przy której maszyna wiruje z prędkością synchroniczną. T.J.E. Miller zawarł w [14] sposób analizy silników jednofazowych przy użyciu transformacji do składowych symetrycznych, a następnie do współrzędnych dq . Szczegółowy algorytm postępowania umożliwia zrównoważenie układu zasilania za pomocą kondensatora C_r , a w efekcie zminimalizowanie momentu oscylacyjnego od składowej przeciwnej pola stojana. Wzory analityczne zawarte w artykule pozwalają na dobór kąta ζ między uzwojeniem głównym i pomocniczym oraz

kondensatora C_r w sposób dający sinusoidalne pole stojana. Analiza jest słuszna dla wszystkich maszyn zasilanych jednofazowo. Autor zauważył również możliwość użycia drugiego kondensatora, w celu poprawy własności silnika przy dochodzeniu do prędkości synchronicznej.

3. Metody rozruchu

W trakcie rozruchu korzystne jest użycie kondensatora rozruchowego C_s o większej pojemności. Gwarantuje on zwiększenie momentu rozruchowego i dzięki temu szybszy rozruch lub start przy większym obciążeniu. Celowość użycia dodatkowego kondensatora przy dochodzeniu do prędkości synchronicznej zauważył T.J.E. Miller już w 1985 roku [13]. Im większa wartość pojemności C_s , tym większy moment rozruchowy, jednak wzrasta również natężenie prądu. W związku z tym należy pamiętać o takim wyborze C_s , aby nie uszkodzić cieplnie maszyny. Istnienie w obwodzie stosunkowo dużej pojemności C_s w trakcie pracy znamionowej jest niekorzystne ze względu na powstawanie składowej przeciwnej, powodującej zmniejszanie sprawności maszyny. Z tego powodu wykorzystuje się często w obwodzie pomocniczym rezystancję PTC zależną od temperatury, która „wyłącza” kondensator C_s przy około 80÷90% prędkości synchronicznej. Analizę wpływu doboru C_s na charakterystyki silnika przedstawili autorzy [7]. Porównane zostały własności rozruchowe rzeczywistej maszyny przy użyciu trzech wartości kondensatora rozruchowego oraz przy innym możliwym sposobie rozruchu – z zastosowaniem przekształtnika PWM.

Sposób podłączenia uzwojeń głównego oraz pomocniczego w przypadku zasilania falownikowego jest przedstawiony na rysunku 2.



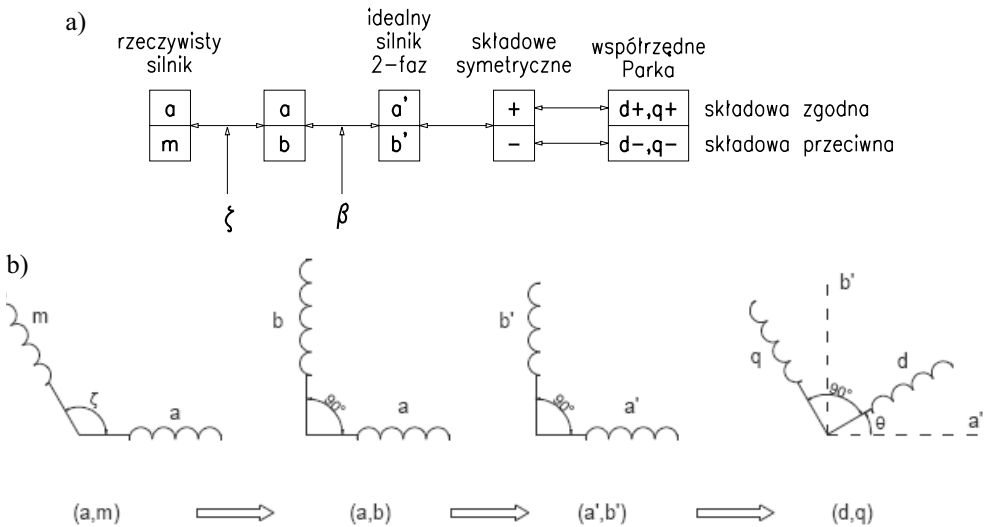
Rys. 2. Schemat połączeń uzwojeń stojana przy zasilaniu falownikowym

Użycie falownika PWM oznacza działanie silnika przy stałe zrównoważonym źródle zasilania. Dzięki temu nie jest konieczne stosowanie kondensatorów C_s i C_r . Rozruch przebiega znacznie łagodniej, przy mniejszym prądzie i momencie elektromagnetycznym niż w przypadku zastosowania wariantu zasilania z kondensatorami. Oznacza to gorszą zdolność do rozruchu przy znacznym obciążeniu. Niewątpliwą zaletą stosowania przekształtnika PWM (*Pulse Width Modification*) jest uzyskanie wyższej sprawności maszyny niż przy rozruchu kondensatorowym [7]. Do wad należy zaliczyć większy stopień skomplikowania oraz większy koszt ze względu na istnienie falownika w obwodzie zasilania.

4. Analiza własności LSPMSM jednofazowego

Silnik jednofazowy synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim to maszyna, która charakteryzuje się asymetrią zarówno w wirniku, jak również w stojanie.

Pole wytwarzane przez magnesy to pole stałe, podobnie jak w konwencjonalnej maszynie synchronicznej. Niesymetria źródła zasilania powoduje, że w prądzie stojana pojawia się składowa przeciwna, niewystępująca przy zasilaniu symetrycznym trójfazowym. Z tych względów do analizy silnika dobrze jest użyć kombinacji transformacji do składowych symetrycznych (z powodu asymetrii zasilania) oraz transformacji Parka (ze względu na stałe pole magnesów wirnika). Schemat przejścia ze współrzędnych rzeczywistych do współrzędnych dq przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Idea przejścia z wartości rzeczywistych do współrzędnych dq (a);
reprezentacja graficzna (b)

Źródło: [13]

Do transformacji z wielkości rzeczywistych do współrzędnych Parka służą następujące przekształcenia:

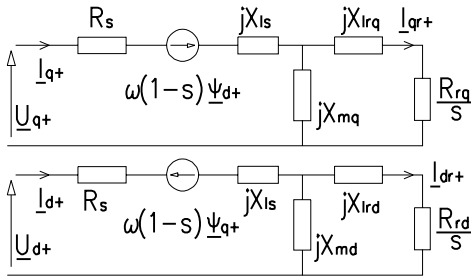
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \zeta \\ 0 & \sin \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_m \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_+ \\ v_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v'_a \\ v'_b \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} v'_a \\ v'_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v'_a \\ v'_b \end{bmatrix}.$$

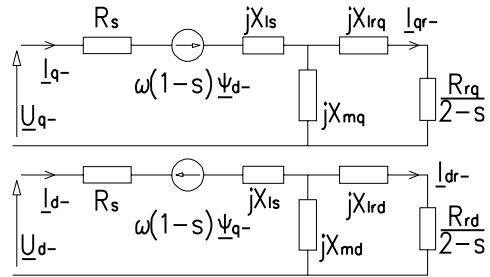
W powyższych zależnościach współczynnik β jest określony jako stosunek liczby zwojów uzwojenia głównego do pomocniczego, ζ to kąt pomiędzy tymi uzwojeniami, natomiast θ to kąt między osiami a' i d .

W pracy [13] T.J.E. Miller użył tej właśnie metody analizy. Dla stanu ustalonego został przedstawiony dokładny algorytm postępowania prowadzący do określenia własności maszyny. Zostały również podane zależności służące do analizy stanu asynchronicznego przy wykorzystaniu transformacji Parka. W efekcie użycia opisanych wyżej transformacji otrzymuje się dwa modele dq (po jednym dla składowej zgodnej i przeciwej), które mogą być rozpatrywane z osobna.

składowa zgodna



składowa przeciwna



Rys. 4. Model omawianej maszyny po transformacjach do składowych symetrycznych oraz Parka

Źródło: [3]

Model taki pozwala na dokładną analizę momentu asynchronicznego silnika 1-fazowego LSPMSM. Na jego kształt mają wpływ zarówno moment od klatki rozruchowej, moment hamujący od magnesów, moment reluktancyjny, jak również składowa oscylacyjna momentu [3].

$$T_e = \frac{mp}{2} \cdot \left[(L_{md} i_{dr} i_q - L_{mq} i_{qr} i_d) + (L_{md} - L_{mq}) i_d i_q + L_{md} i_e i_q \right] = T_{cage} + T_{rel} + T_m,$$

$$T_{cage} = \frac{mp}{2} (L_{md} i_{dr} i_q - L_{mq} i_{qr} i_d),$$

$$T_{rel} = \frac{mp}{2} (L_{md} - L_{mq}) i_d i_q = \frac{mp}{2} (L_d - L_q) i_d i_q,$$

$$T_m = \frac{mp}{2} L_{md} i_e i_q = \frac{mp}{2\omega} E_0 i_q,$$

gdzie:

- m – liczba faz,
- P – liczba biegunów,
- ω – prędkość synchroniczna,
- L_{md}, L_{mq} – indukcyjności wzajemne w osiach d i q ,
- E_0 – siła elektromotoryczna indukowana na otwartych zaciskach stojana,
- i_d, i_q, i_{qr}, i_{dr} – prądy stojana i wirnika w osiach d i q ,
- i_e – prąd odpowiadający strumieniowi od magnesów trwałych.

Moment hamujący T_m jest wynikiem indukowania przez wirujące magnesy trwałe siły elektromotorycznej E_0 w uzwojeniu twornika. W wyniku tej siły powstaje prąd, powodujący wydzielanie się energii na rezystancji stojana. Moment reluktancyjny T_{rel} jest wynikiem niesymetrii wirnika, czyli zróżnicowania indukcyjności L_d oraz L_q w modelu dq maszyny. Moment T_{cage} jest wynikiem współdziałania strumienia uzwojenia stojana ze strumieniem wytwarzanym przez prąd indukowany w klatce, podobnie jak w silniku indukcyjnym.

Na kształt momentu elektromagnetycznego silnika jednofazowego LSPMSM stosunkowo duży wpływ mają składowe oscylacyjne. Były one przedmiotem analizy w artykule [3], gdzie autorzy mieli do dyspozycji cztery różne silniki, na których potwierdzili stosunkowo dobrą zgodność obliczeń analitycznych z pomiarami. Doszli oni do wniosku, że zbyt duże oscylacje mogą spowodować trudności przy synchronizacji, jak również wpływają na zachowanie maszyny przy rozruchu. Oscylacje momentu w LSPMSM jednofazowym są nie tylko wyższe, ale trwają dłużej niż w silniku indukcyjnym ze względu na istnienie pola magnesów, które generuje nie zanikającą składową stałą [3].

Model dq maszyny w połączeniu z transformacją na składowe symetryczne pozwala na dobre analityczne odwzorowanie maszyny. Istnieją jednak parametry, których wyznaczenie analityczne jest skomplikowane, ze względu na zależność od stanu pracy maszyny. Do takich parametrów należą reaktancje synchroniczne X_d oraz X_q . Zależność tych wielkości od prądu twornika najłatwiej jest uzyskać drogą obliczeń połowych, np. za pomocą metody elementów skończonych [11]. Model obwodowo-połowy pozwala na analizę wpływu poszczególnych parametrów maszyny na jej własności, jak również optymalizację konstrukcji i układu zasilania.

5. Metody poprawy własności LSPMSM 1-fazowego

Optymalizacja silnika 1-fazowego LSPMSM powinna zacząć się od zrównoważenia źródła zasilania, w celu eliminacji szkodliwej składowej przeciwnej pola stojana. Gwarantowane jest to przez odpowiedni dobór kąta ζ między uzwojeniem głównym i pomocniczym, oraz kondensatora C_p . Zależności umożliwiające oszacowanie pojemności kondensatora C_p można znaleźć w [13].

Wyznaczenie optymalnych (ze względu na eliminację składowej przeciwnej pola stojana) parametrów obwodu zasilania jest także możliwe przy wykorzystaniu metody wykresów fazowych. Dowiedli tego autorzy pracy [1], gdzie wyniki obliczeń potwierdzili eksperymentalnie na prototypowym silniku.

Podstawowym sposobem na zwiększenie momentu rozruchowego jest, podobnie jak w maszynie indukcyjnej, zwiększenie rezystancji klatki. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie materiału o większej rezystywności, bądź zwiększenie liczby prętów. W pracy [2] zostały wyprowadzone zależności na obliczenie rezystancji pierścieni zwierających oraz prętów przy ich nierównomiernym rozłożeniu. Za pomocą metody elementów skończonych oraz przez pomiary na rzeczywistym silniku potwierdzono, że przy rozmieszczeniu nierów-

nomiernym silnik charakteryzuje się szybszym rozruchem ze względu na większy moment rozruchowy. Mniejsza rezystancja klatki oznacza lepszą synchronizację [9]. Głębsze żłobki, dla których rezystancja jest mniejsza, mogą zostać użyte jako bariera dla strumienia rozproszenia magnesów.

Prawidłowy wybór kształtu oraz rozmieszczenia prętów powinien być wynikiem analizy zarówno własności rozruchowych, jak i zdolności do synchronizacji.

Na zdolność silnika 1-fazowego LSPMSM do synchronizacji mają również wpływ wartość napięcia zasilania i pojemności kondensatora. Wykazali to autorzy [19], gdzie przeprowadzili eksperyment na rzeczywistym silniku o mocy 275 W. Z badań wynikał wniosek, że dla silnika jednofazowego projektowany stosunek siły magnetomotorycznej, pochodzenia od magnesów trwałych, do napięcia zasilania powinien być większy niż dla trójfazowego odpowiednika, ze względu na dodatkową niesymetrię układu zasilania.

Moment asynchroniczny można zwiększyć poprzez zmianę stosunku ilości zwojów głównych do bocznych β – jego zmniejszenie powoduje wzrost momentu asynchronicznego, lecz także hamującego pochodzącego od magnesów [12].

Straty w żelazie można uwzględnić w modelu elektrycznym maszyny jako dodatkową rezystancję R_c włączoną w gałąź równoległą do źródła napięcia [5, 11]. Minimalizację strat w obwodzie stojana, stanowiących największą część strat w małych silnikach, można osiągnąć przez zwiększenie liczby zwojów. Straty w wirniku można zmniejszyć poprzez obniżenie rezystancji klatki (większe żłobki, mniejsza liczba prętów, materiał o mniejszej rezystywności), ma to jednak wpływ na rozruch i synchronizację, o czym była mowa powyżej.

Kształt i położenie magnesów trwałych w wirniku decyduje o własnościach maszyny w stanie pracy z prędkością synchroniczną. W artykule [4] została przedstawiona procedura projektowania rozmiaru i położenia magnesów w wirniku silnika LSPM. Jest ona oparta o model elektryczny drogi strumienia magnetycznego, w którym zadana jest żądana indukcja w szczeliny powietrznej. Za pomocą metody elementów skończonych autorzy wyznaczyli dla różnych wymiarów magnesów trwałych wartości siły elektromotorycznej i indukcyjności L_d i L_q , na podstawie których zostały dobrane najlepsze wymiary oraz położenie magnesów trwałych w wirniku. Przy projektowaniu kształtu i położenia magnesów trwałych należy pamiętać o momencie hamującym T_m , którego wartość jest ujemna w całym zakresie prędkości obrotowej, jak również o możliwości rozmagnesowania magnesów na skutek zbyt wysokiej temperatury [5].

Zmniejszenie wahań momentu elektromagnetycznego można uzyskać poprzez zastosowanie maszyny o żłobkach skośnych. Porównania własności silnika ze żłobkami prostymi i skośnymi dokonał A.M. Knight w pracy [8]. Potwierdzenie poprawności wyników obliczeń modelu analitycznego uzyskał za pomocą metody elementów skończonych. Ten sam autor dokonał w [10] porównania silnika ze żłobkami prostymi i ze skosem jednożłobkowym, wykorzystując metodę elementów skończonych, a następnie potwierdził wyniki obliczeń na rzeczywistym silniku 150 W. Zauważył również, że własności tak małej maszyny zależą silnie od nawet niewielkiej zmiany jej parametrów, m.in. indukcji remanentu magnesów lub momentu bezwładności wirnika.

6. Analiza za pomocą metody elementów skończonych

Metoda elementów skończonych została wykorzystana po raz pierwszy do analizy jednofazowego silnika LSPMSM w pracy [16]. Za pomocą FEM (*Finite Element Method*) oraz wzorów analitycznych autorzy wyznaczyli charakterystyki momentu, prądu oraz prędkości przy dochodzeniu do prędkości synchronicznej. Wyniki zostały zweryfikowane na prototypie z magnesami NdFeB oraz z kondensatorem rozruchowym.

W pracy [17] autorzy przedstawili porównanie dwóch metod analizy za pomocą metody elementów skończonych. Pierwsza z nich opiera się na modelu obwodowym, do którego za pomocą FEM wyliczane są iteracyjnie indukcyjności L_d i L_q . Druga to metoda prądów wirowych, w której jednocześnie rozwiązywane są równania różniczkowe dla pól od uzwojeń stojana, klatki oraz wzbudzenia. Rzeczywisty silnik 150 W z magnesami NdFeB o indukcji remanentu 1,16 T posłużył do weryfikacji obu metod. Nieco dokładniejsza okazała się metoda wykorzystująca model obwodowy, która nie uwzględnia jednak strat od prądów wirowych. Umożliwia ona ponadto analizę silników ze skosem prętów klatki. Drugi sposób analizy jest z kolei znacznie szybszy – w przypadku badanego modelu 18 razy szybszy, przez co lepiej nadaje się do projektowania konstrukcji typu LSPMSM.

7. Wnioski

W artykule zostały omówione podstawowe cechy omawianego typu maszyny oraz porównanie metod analizy, które można znaleźć w stosunkowo obszernej literaturze specjalistycznej. Zaproponowane zostały metody poprawy własności poprzez zmianę geometrii oraz parametrów obwodu elektrycznego. Przedstawionych zostało wiele czynników, których uwzględnienie jest bardzo ważne do prawidłowego zaprojektowania silnika jednofazowego LSPMSM. Konstrukcja ta może w przyszłości wyprzeć silnik indukcyjny w zastosowaniach do urządzeń niewielkich mocy, ze względu na wyższą sprawność. Koszt maszyny może z uwagi na malejącą cenę materiałów magnetycznych trwałych zostać obniżony do poziomu, przy którym jej stosowanie będzie znacznie bardziej opłacalne, niż maszyny asynchronicznej.

Literatura

- [1] Sano T., Nakayama E., Sawa K., *Circuit Parameter Optimization Method of Single-Phase Line-Start Permanent-Magnet Motor*. International Power Electronics Conference IPEC'05, Niigata, Japonia, 2005.
- [2] Kim B.T., Kim Y.K., Kim D.J., *Analysis of Squirrel Cage Effect in Single Phase LSPM*. KIEE International Transactions on EMECS, t. 4-B, nr 4, 2004, 190–195.
- [3] Popescu M., Miller T.J.E., McGilp M., Strappazon G., Trivillin N., Santarossa R., *Asynchronous Performance Analysis of a Single-Phase Capacitor-Start, Capacitor-Run Permanent Magnet Motor*. IEEE Transactions on Energy Conversion, t. 20, nr 1, 2005, 142–150.
- [4] Hong S.H., Ko K.M., Park C.B., *Magnet Design procedure of Single-Phase LSPM Synchronous Motor*. International Conference on Electrical Machines ICEM'04, Kraków, Polska, 2004.

- [5] Miller T.J.E., Popescu M., Cossar C., McGilp M., Strappazzon G., Trivillin N., Santarossa R., *Line-Start Permanent-Magnet Motor Single-Phase Steady-State Performance Analysis*. IEEE Transactions on Industry Applications, t. 40, nr 2, 2004, 516–525.
- [6] Popescu M., Miller T.J.E., Cossar C., McGilp M., Strappazzon G., Trivillin N., Santarossa R., *Comparative Study of Starting Methods for a Single-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor*. The 10th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'03, Toulouse, Francja, t. 15, nr 1, 2003, 48–56.
- [7] Popescu M., Miller T.J.E., McGilp M.I., Strappazzon G., Trivillin N., Santarossa R., *Torque Behaviour of 1-Phase Permanent Magnet AC Motor*. IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC'03, Madison, USA, t. 2, nr 1–4, 2003, 820–825.
- [8] Williamson S., Knight A.M., *Performance of skewed single-phase line-start permanent magnet motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, t. 35, 1999, 577–582.
- [9] Miller T.J.E., *Synchronization of line-start permanent magnet motors*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, t. PAS-103, 1984, 1822–1828.
- [10] Knight A.M., Salmon J.C., *Modeling the dynamic behaviour of single-phase line-start permanent magnet motors*. IEEE 34th Industrial Applications Society Annual Meeting, Phoenix, USA, t. 4, 1999, 2582–2588.
- [11] Kang G.H., Nam H., Hong J.P., Hur J., *Analysis and design methodology for single-phase line-start permanent magnet motor considering parameters variation on d-q axis vector diagram*. IEEE 38th Industrial Applications Society Annual Meeting, Salt Lake City, USA, t. 3, 2003, 1946–1953.
- [12] Popescu M., Miller T.J.E., McGilp M., Kalluf F.J.H., da Silva C., von Dokonal L., *Effect of winding harmonics on the asynchronous torque of a single-phase linestart permanent-magnet motor*. IEEE 40th Industrial Applications Society Annual Meeting, Hong Kong, t. 4, 2005, 2820–2827.
- [13] Miller T.J.E., *Single-phase permanent-magnet motor analysis*. IEEE Transactions on Industry Applications, t. IA-21, nr 4, 1985, 651–658.
- [14] Rahman M.A., Osheiba A.M., *Performance analysis of single-phase permanent magnet motors*. Electric Energy Conference EECON'87, Adelaide, 1987.
- [15] Knight A.M., Williamson S., *Influence of magnet dimensions on the performance of a single-phase line-start permanent magnet motor*. IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC'99, Seattle, USA, 1999, 710–772.
- [16] Carlson R., Sadowski N., Arruda S.R., da Silva C.A., Von Donkal L. 1994: *Singlephase line-started permanent magnet motor analysis using finite element method*. IEEE 29th Industrial Applications Society Annual Conference, Denver, USA, t. 1, 1994, 227–233.
- [17] Knight A.M., Salmon J.C., *A comparison between finite element techniques when modelling single phase line-start permanent magnet motors*. 9th International Conference on Electrical Machines and Drives EMD'99, Canterbury, 1999.
- [18] Miller T.J.E., Popescu M., McGilp M.I., Strappazzon G., Trivillin N., Santarossa R., *Line-start permanent-magnet motor: single-phase starting performance analysis*. IEEE 37th Industrial Applications Society Annual Meeting, t. 4, 2002, 2499–2506.
- [19] Chalmers B.J., Baines G.D., Williamson A.C., *Performance of a line-start single-phase permanent-magnet synchronous motor*. 7th International Conference on Electrical Machines and Drives EMD'99, Canterbury, 1995, 413–417.