

Tomasz Zawilak
Politechnika Wroclawska

WPŁYW KSZTAŁTU SZCZELINY POWIETRZNEJ NA WŁAŚCIWOŚCI SILNIKA SYNCHRONICZNEGO WZBUDZANEGO MAGNESAMI TRWAŁYMI

THE INFLUENCE OF AIR GAP SHAPE ON PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR PERFORMANCE

Abstract: The paper presents a comparison between silent pole and cylindrical construction of medium power LSPMSM. On the basis of computational results investigations of higher harmonics of flux density, back emf and armature current in a Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor have been conducted. They show that salient pole construction is characterized by much lower amplitudes of magnetic field zonal harmonics. It contributes to minimization of additional losses in magnetic core and squirrel cage. Full load characteristics for both constructions have been obtained. Calculated curves of: current, power factor and efficiency versus output power are shown.

1. Wstęp

Maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi przystosowane do rozruchu bezpośredniego (z ang LSPMSM - Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor) ze względu na dużą sprawność oraz współczynnik mocy stanowią ciekawą alternatywę dla silników indukcyjnych. Dotychczasowe zainteresowania dotyczyły maszyn małej mocy, rzadko przekraczających kilkanaście kW. Ze względu na technologię klatek odlewanych większość z nich to konstrukcje cylindryczne. Do wad maszyn tego typu należy zaliczyć znacznie większą, w porównaniu z silnikami indukcyjnymi, zawartość wyższych harmoniczných indukcji, prądu oraz momentu elektromagnetycznego [1, 2, 3, 4]. Prostokątny rozkład siły magneto-motorycznej magnesów generuje wyższe harmoniczne strefowe (głównie 5. i 7.). W pracach [3, 5, 6] opisano możliwości i wyniki symulacji zmniejszenia harmoniczných strefowych oraz żłobkowych w silnikach typu LSPMSM małej mocy. W zakresie większych mocy, przy technologii klatek spawanych, kształtowanie pola magnetycznego może się odbywać przez stosowanie nierównomiernej szczeliny powietrznej, podobnie jak w silnikach synchronicznych ze wzbudzeniem elektromagnetycznym.

Celem artykułu jest porównanie właściwości maszyny typu LSPMSM średniej mocy z wirnikiem jawnobiegunowym oraz cylindrycznym.

2. Wyniki badań symulacyjnych

Silnik typu LSPMSM w obu wersjach (jawnobiegunowej oraz cylindrycznej) zaprojektowano na bazie silnika indukcyjnego typu Sg315M8Bz. Parametry oryginalnego silnika indukcyjnego przedstawiono w tabeli 1.

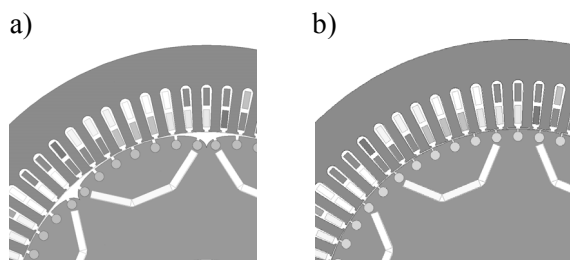
Tabela 1. Dane znamionowe silnika Sg315M8Bz

P_n	110 kW
n_n	737 obr/min
M_n	1425 N·m
U_n	500 V
I_n	177 A
$\cos \varphi_n$	0,77
η_n	93,0%

Przy projektowaniu silników LSPMSM zachowano wymiary stojana silnika indukcyjnego. Zmieniono wymiary żłobków wirnika oraz zwiększono o 30% grubość szczeliny powietrznej w stosunku do oryginalnego silnika indukcyjnego. Dla obliczanego silnika jawnobiegunowego kształt nabiegunnika wpisano w elipsę, przesuniętą odpowiednio w stosunku do osi maszyny (rys. 1a). Parametry elipsy dobrano tak, by grubość szczeliny przy 2/3 bieguna była dwukrotnie większa od grubości szczeliny w jego osi.

Modele silników zbudowano za pomocą oprogramowania Maxwell 2D (v.14). W symulacjach wybrano typ rozwiązania „transient”, pozwalający na modelowanie pracy maszyny przy wymuszeniu napięciowym z jednoczesnym uwzględnieniem ruchu, najbliżej odzwierciedlający rozpatrywane

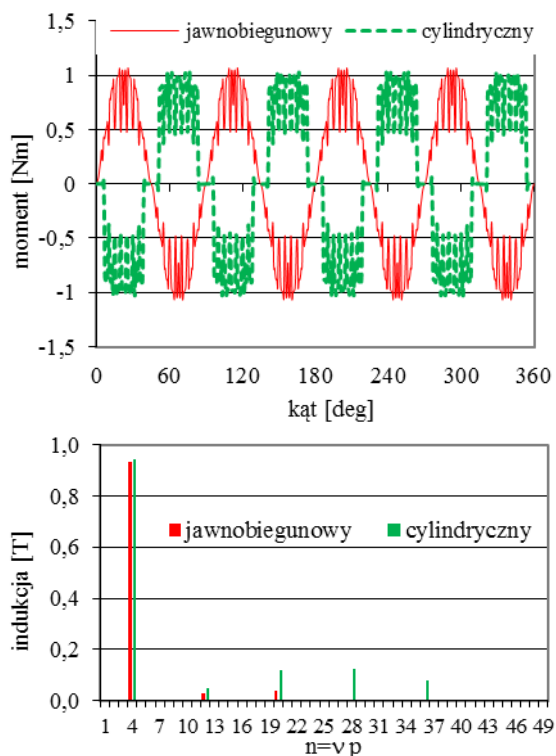
zjawiska. Widok geometrii modelu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Geometria badanych modeli: jawnobiegunowego (a) oraz cylindrycznego (b)

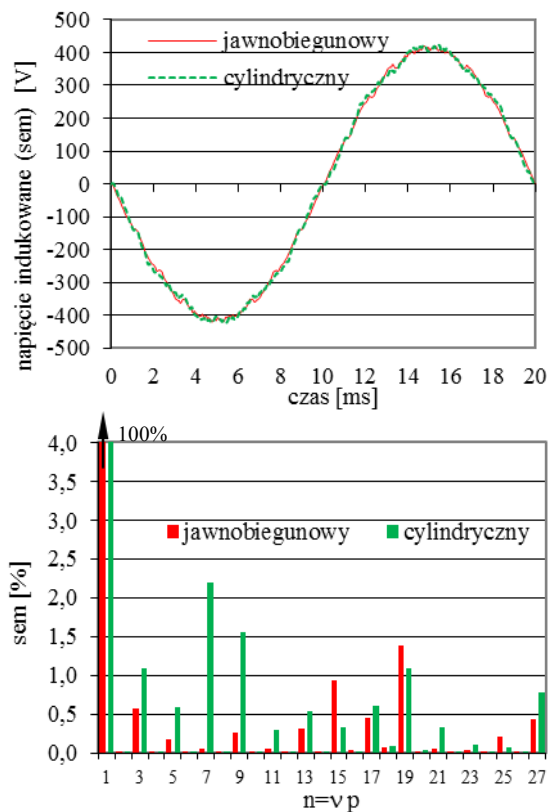
2.1. Analiza w stanie bezprądowym

Wykorzystując opracowane modele polowo-obwodowe wykonano obliczenia pola magnetycznego w stanie bezprądowym obu maszyn LSPMSM. Na rysunku 2 przedstawiono obwodowy rozkład składowej normalnej indukcji w szczelinie powietrznej oraz jego analizę harmoniczną. Wyniki potwierdzają, że zastosowanie nierównomiernej szczeliny ogranicza w znacznym stopniu zawartość wyższych harmonicznych pola, głównie strefowych rzędu 5 oraz 7.

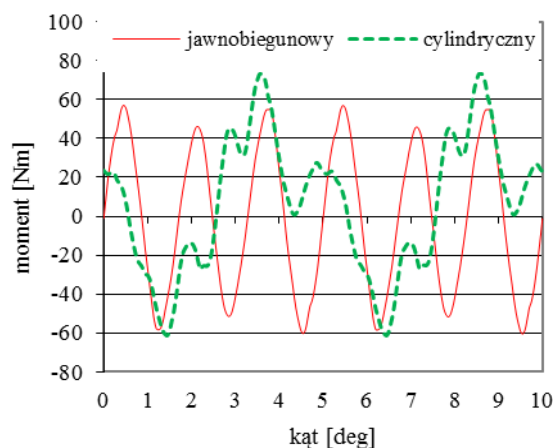


Rys. 2. Obwodowy rozkład składowej normalnej indukcji w szczelinie powietrznej oraz jego harmoniczne dla badanych konstrukcji silnika LSPMSM

Przeprowadzono obliczenia przebiegu napięcia indukowanego dla porównywanych konstrukcji LSPMSM. Wyniki badań w postaci przebiegu obliczonych *sem* oraz ich analizy harmonicznego pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przebieg napięcia indukowanego oraz jego analiza harmoniczna (odniesione do harmonicznej podstawowej) dla porównywanych konstrukcji silnika LSPMSM



Rys. 4. Obliczony przebieg momentu zaczepowego w funkcji położenia wirnika (zakres kątowy dwóch podziałek żłobkowych stojana)

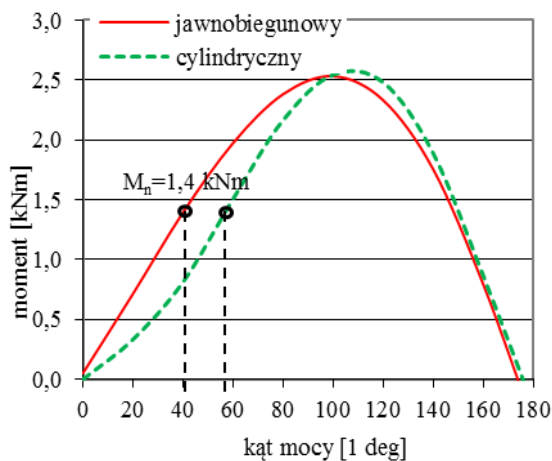
Konstrukcja jawnobiegunowa charakteryzuje się mniejszymi amplitudami wyższych harmonicznych napięcia indukowanego. Należy jednak podkreślić, że udział wyższych harmonicznych w napięciu indukowanym jest znacznie mniejszy niż w obwodowym rozkładzie indukcji. Jest to wynikiem zastosowanego skrótu uzwojenia, wynoszącego w tym wypadku 7/9.

Obliczono przebieg momentu zaczepowego w funkcji położenia wirnika dla badanych konstrukcji silnika LSPMSM. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4. Wynika z nich, że maksymalne wartości momentu zaczepowego obu modeli są porównywalne.

2.2. Analiza parametrów w stanie obciążenia

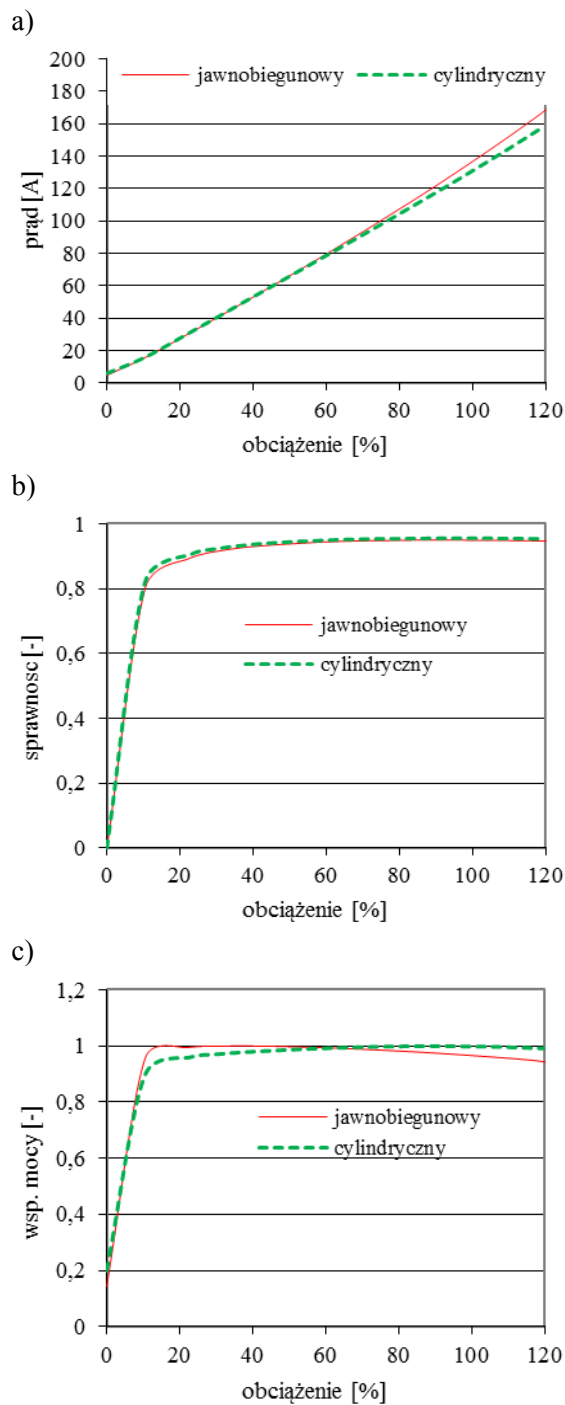
Wyznaczono charakterystyki obciążenia dla rozpatrywanych konstrukcji silnika LSPMSM. Wyniki obliczeń w postaci skutecznej wartości prądu twornika, współczynnika mocy oraz sprawności w funkcji względnego obciążenia na wale przedstawiono na rysunku 6.

Nieco większy prąd pobierany z sieci oraz mniejszy współczynnik mocy maszyny jawnobiegunowej jest związany ze zwiększonym oporem magnetycznym dla strumienia głównego w stanie obciążenia obciążeniu.



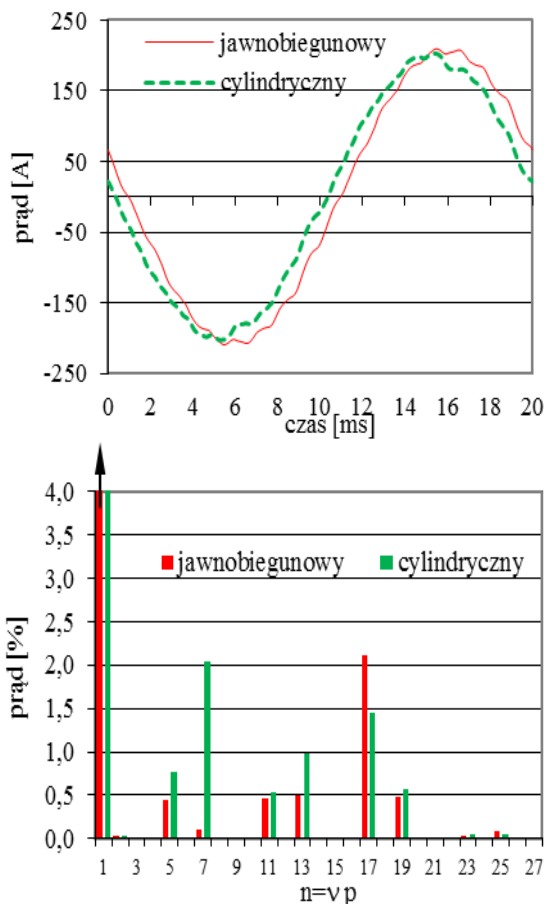
Rys. 5. Charakterystyka kątowna $M=f(\alpha)$ badanych konstrukcji silnika LSPMSM

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki kątowne rozpatrywanych maszyn. Ze względu na mniejszą indukcyjność w osi q maszyny jawnobiegunowej, ograniczone jest oddziaływanie twornika, dzięki czemu moment znamionowy przypada dla mniejszego kąta mocy w porównaniu do silnika z wirnikiem cylindrycznym.

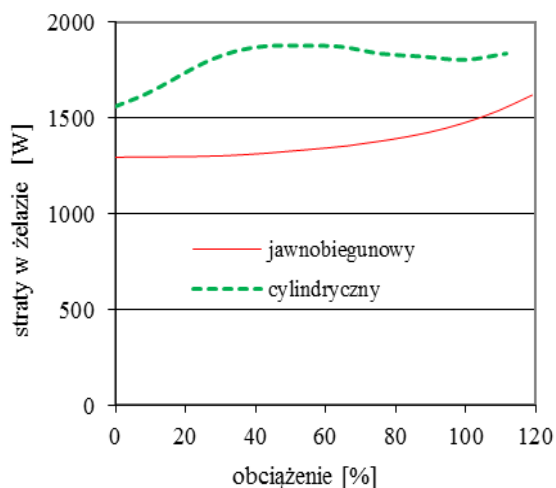


Rys. 6. Charakterystyki elektromechaniczne (prąd – (a), sprawność – (b), wsp. mocy – (c)) badanych konstrukcji silnika LSPMSM

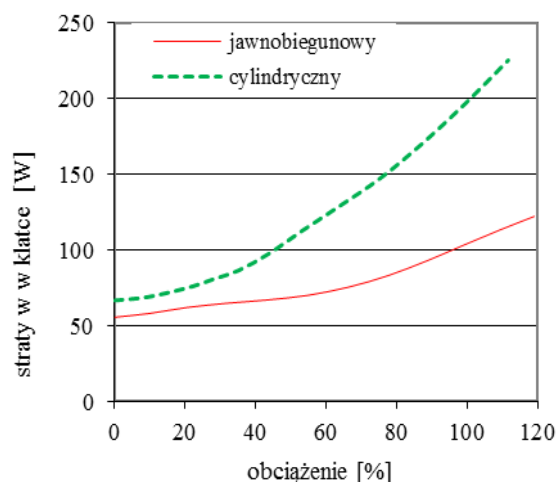
Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi czasowe oraz analizę harmoniczną prądu pobieranego z sieci przy obciążeniu znamionowym. Konstrukcja jawnobiegunowa charakteryzuje się mniejszymi harmonicznymi strefowymi (rzędu 5 oraz 7). Większa amplituda 17. harmonicznej (żółtkowej) jest wynikiem nieco innego poskoku klatki rozruchowej



Rys. 7. Przebieg prądu stojana oraz jego analiza harmoniczna badanych konstrukcji silnika LSPMSM w stanie obciążenia znamionowego



Rys. 8. Zależność strat w żelazie w funkcji względnego obciążenia na wale dla badanych konstrukcji silnika LSPMSM



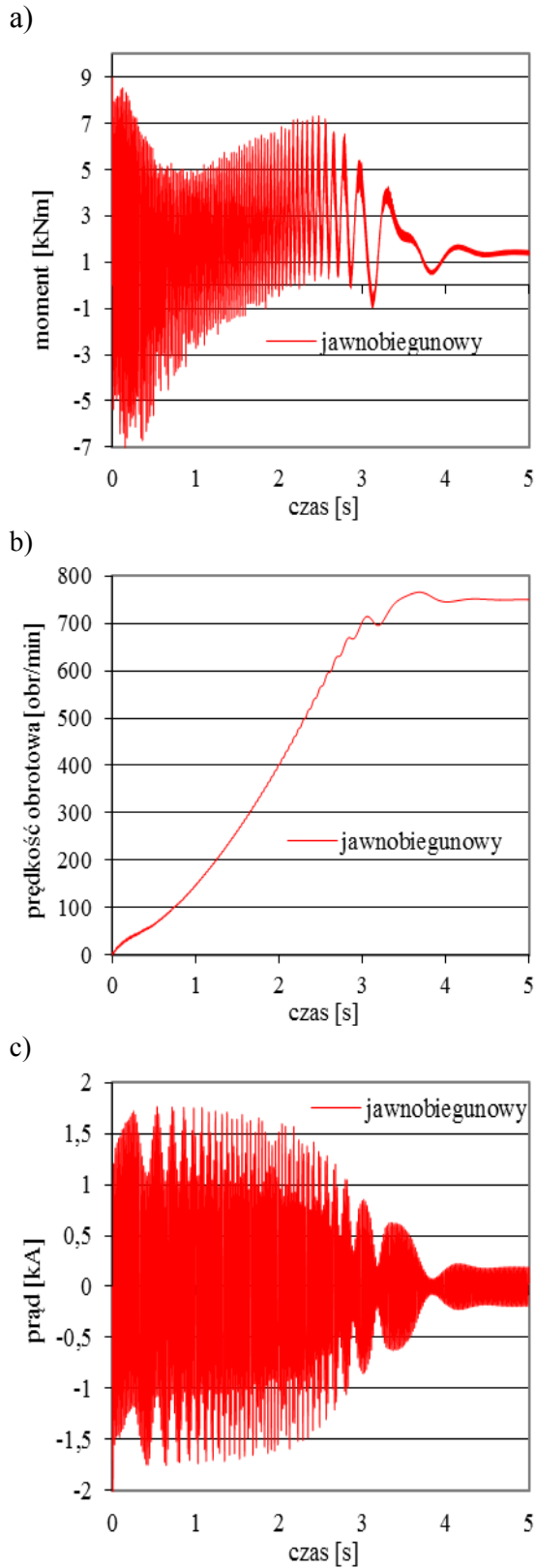
Rys. 9. Zależność strat w klatce w funkcji względnego obciążenia na wale dla badanych konstrukcji silnika LSPMSM

Wyznaczono zależność strat w żelazie oraz strat od wyższych harmonicznych w klatce rozruchowej dla badanych konstrukcji. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 8 oraz 9. Zmniejszenie strat w żelazie oraz strat w klatce rozruchowej dla konstrukcji jawnobiegunowej jest związane ze zmniejszeniem amplitud wyższych harmonicznych indukcji.

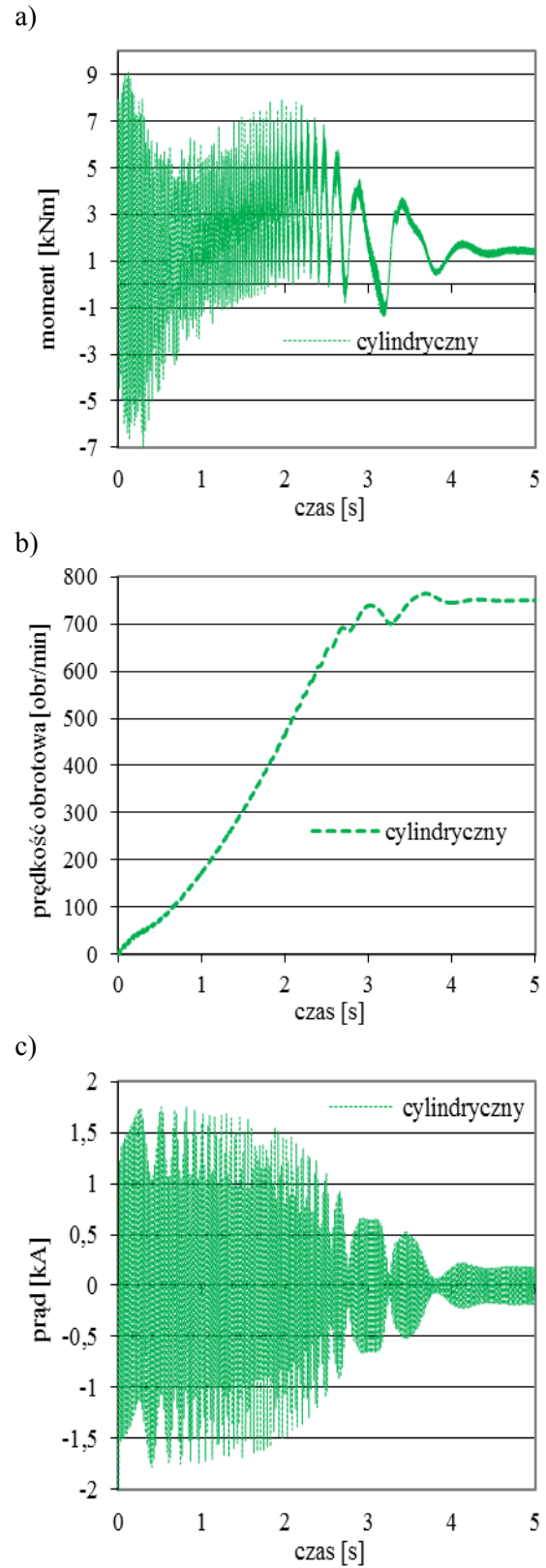
Na podstawie wykonanych obliczeń określono parametry znamionowe, które zestawiono w tabeli 2. Pomimo mniejszych strat w żelazie oraz w klatce wirnika sprawność konstrukcji jawnobiegunowej jest mniejsza. Przyczyną tego jest nieznacznie większy prąd znamionowy, wywołujący większe straty obciążeniowe.

Tabela 2. Dane znamionowe badanych maszyn

Parametr	jawnobiegunowy	cylindryczny
P_n	110 kW	110 kW
n_n	750 obr/min	750 obr/min
M_n	1400 N·m	1400 N·m
U_n	500 V	500 V
I_n	139 A	133 A
$\cos\varphi_n$	0,96	1,0
η_n	95,0%	95,5%



Rys. 10. Czasowe wykresy momentu (a), prędkości obrotowej (b) oraz prądu stojana (c) w czasie rozruchu silnika jawnobiegunowego sprzęgniętego z wentylatorem.



Rys. 11. Czasowe wykresy momentu (a), prędkości obrotowej (b) oraz prądu stojana (c) w czasie rozruchu silnika cylindrycznego sprzęgniętego z wentylatorem.

2.3. Analiza silnika w stanie rozruchu

W konstrukcji jawnobiegunowej, odmiennie niż w konstrukcji cylindrycznej, pręty nie są równomiernie rozłożone na obwodzie; skrajne leżą w innych warunkach magnetycznych w porównaniu do leżących w osi bieguna. Celowym wydaje się zbadanie, czy nie ma to istotnego wpływu na rozruch maszyn.

W tym celu przeprowadzono symulację rozruchu maszyn sprzęgniętych z wentylatorem typu WOO 200B. Wyniki symulacji w postaci czasowych przebiegów: momentu elektromagnetycznego, prędkości obrotowej oraz prądu stojana podczas rozruchu pokazano na rysunkach 10 i 11. Na prezentowanych wykresach można zaobserwować, że czas rozruchu, amplituda pulsacji momentu oraz wartość prądu rozruchowego są dla obu konstrukcji zbliżone.

3. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdzają, że zastosowanie jawnobiegunowej konstrukcji w silniku LSPMSM pozwala zmniejszyć wyższe harmoniczne *sem* oraz prądu twornika. Związane z tym zmniejszenie strat dodatkowych okazało się niewystarczające do uzyskania większej sprawności z powodu pogorszenia współczynnika mocy. Uzyskanie wyższej sprawności przy konstrukcji jawnobiegunowej jest możliwe, wymaga to jednak zastosowania magnesów o większej objętości.

4. Literatura

[1] Kurihara K., Wakui G., *Steady state performance analysis Permanent Magnet Synchronous Motors Including Space Harmonics*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, No. 3, 1994, pp. 1306-1315

[2] Libert F., Soulard J., Engstrom J., *Design of a 4-pole line start permanent magnet synchronous motor*, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, ICEM 2002, August 2002

[3] Zawilak T., Antal L., *Pulsacje momentu elektromagnetycznego w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim*, Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines SME'2005, 14 - 17 June 2005, pp. 149-156

[4] Zawilak T., Antal L., Zawilak J., *Wpływ obciążenia na odkształcenie prądu w silniku prądu przemiennego z magnesami trwałymi*, Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, BOBRME Komel, 2006, s. 1-4

[5] Sasaki K., Tamura T., Yoshida M., Takimoto T., Taniguchi H., Uesaka H., *Permanent Magnet Synchronous Motor*, International Patent No. WO/0106624 A1

[6] Zawilak J., Zawilak T., *Minimization of higher harmonics in line-start permanent magnet synchronous motor*, Micromachines and servosystems. MiS '06, International XV Symposium, 17-21 September 2006, pp. 201-207

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

Autor

dr inż. Tomasz Zawilak
Politechnika Wroclawska
Inst. Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektr.
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl
tel. (71) 320 33 42

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Jan Rusek