

*silnik synchroniczny, magnesy trwałe,  
rozruch bezpośredni  
modelowanie polowo-obwodowe*

Tomasz ZAWILAK\*

## **WYKORZYSTANIE EFEKTU WYPIERANIA PRĄDU W ROZRUCHU BEZPOŚREDNIM MASZYN WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI**

W pracy przedstawiono symulacyjne wyniki badań wpływu efektu wypierania prądu na właściwości rozruchowe dwuklatkowego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi. Przy pomocy modelu polowo-obwodowego wyznaczono zależność momentu oraz prądu w stanie asynchronicznym dla różnych właściwości materiałów klatek. Obliczono charakterystykę momentu hamującego od magnesów oraz określono całkowity moment asynchroniczny w funkcji prędkości obrotowej silnika. Wykazano, że rozwiązanie z dwoma kłatkami rozruchowymi pozwala na uzyskanie momentu rozruchowego większego od momentu znamionowego w pełnym przedziale prędkości obrotowej. Zbadano także wpływ szczyrbiny między kłatkami na wartość strumienia rozproszenia magnesów trwałych.

### 1. WSTĘP

Ciągły trend do zwiększania energooszczędności maszyn elektrycznych skutkuje powstawaniem kolejnych norm określających minimalne sprawności produkowanych maszyn. Spodziewane wymagania (IE4) mogą być bardzo trudne do zrealizowania dla tradycyjnych maszyn indukcyjnych [1–3]. Alternatywę stanowią silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi przystosowane do rozruchu przez bezpośrednie przyłączenie do sieci (ang. *Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*). Dotychczas powszechne stosowanie tego typu konstrukcji było ograniczone przez podstawową wadę takich maszyn – znacznie gorsze właściwości rozruchowe od maszyn indukcyjnych [4]. W czasie rozruchu magnesy trwałe wytwarzają

---

\* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl

moment hamujący zmniejszający wypadkowy moment rozruchowy, szczególnie w dolnym zakresie prędkości obrotowych. Dodatkowo rozruch musi zakończyć się skuteczną synchronizacją, co jest trudne do zrealizowania przy dużych momentach bezwładności napędu (np. wentylatora) [5, 6].

Dlatego moment wytwarzany przez klatkę rozruchową powinien mieć duże wartości w dolnym zakresie prędkości obrotowych, aby skompensować moment hamujący od magnesów, a także duże wartości przy prędkościach bliskich synchronicznej umożliwiającą uzyskanie dużych wartości momentu wpadu. Dla silników indukcyjnych zwiększenie momentu w dolnym zakresie prędkości obrotowych uzyskuje się przez zastosowanie rozwiązań wykorzystujących zjawisko wypierania prądu.

Celem niniejszej pracy jest sprawdzenie możliwości wykorzystania zjawiska wypierania prądu do polepszenia właściwości rozruchowych silników typu LSPMSM.

## 2. OPIS MODELU

Silnik typu LSPMSM zaprojektowano wykorzystując konstrukcję silnika indukcyjnego typu 2Sg315M8B. Parametry oryginalnego silnika indukcyjnego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe silnika 2Sg315M8B  
Table 1. Rating of based induction motor type 2Sg315M8B

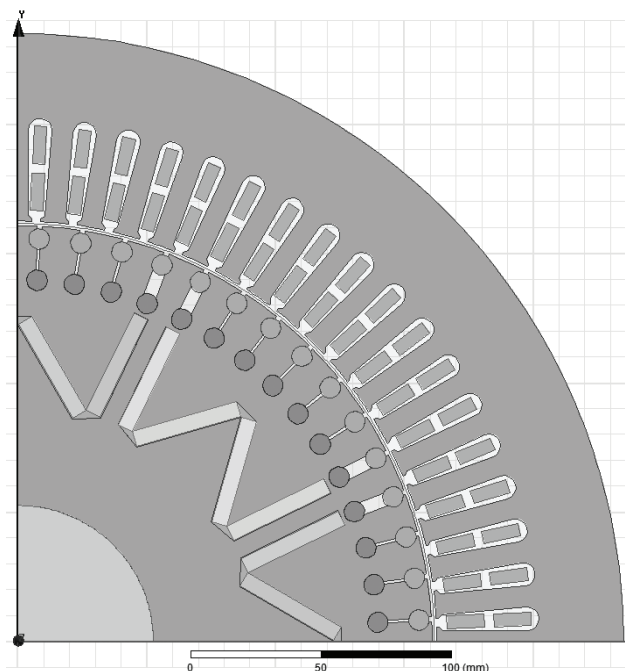
$P_n$	kW	90
$n_n$	obr/min	737
$M_n$	kNm	1,17
$U_n$	V	500
$I_n$	A	136
$\cos\varphi_n$	–	0,82
$I_r/I_n$	–	6,5
$M_r/M_n$	–	2,4

Oryginalny silnik indukcyjny ma klatkę podwójną odlewaną z aluminium. W zaprojektowanym silniku LSPMSM zastosowano podwójną klatkę z prętów okrągłych (rys. 1).

Model silnika 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. Geometrię modelu pokazuje rysunek 1.

Rys. 1. Geometria części połowej rozpatrywanego modelu silnika LSPMSM:  
Fig. 1. Geometry of studied LSPMSM construction

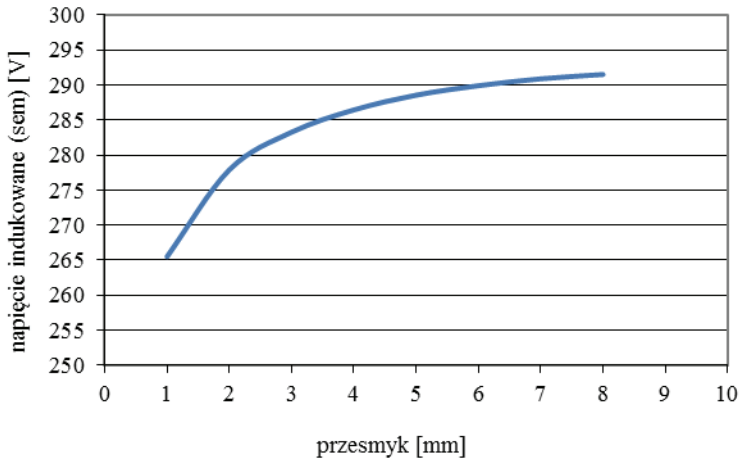


### 3. WYNIKI BADAŃ

#### 3.1. WPŁYW SZEROKOŚCI PRZESMYKU MIĘDZY PRĘTAMI KLATEK NA WARTOŚĆ $SEM$ OD MAGNESÓW TRWAŁYCH

Ze względu na występowanie zjawiska rozproszenia strumienia magnesów nie jest wskazane stosowanie jednakowego przesmyku pomiędzy klatkami. Zbadano wpływ szerokości przesmyku między prętami na krańcach biegunów magnesów na wartość napięcia indukowanego w stanie bezprądowym. Zależność skutecznej wartości pierwszej harmonicznej od szerokości przesmyku pokazano na rysunku 2.

Z wykresu wynika, że strumień rozproszenia magnesów zamykający się przez przesmyk między prętami klatek zmienia się od około 10% przy szerokości przesmyku 1 mm (wartość taka jak dla pozostałych żłobków) do około 1% przy przesmyku 8 mm. Do dalszych badań wybrano rozwiązanie o szerokości przesmyku równej 4 mm.



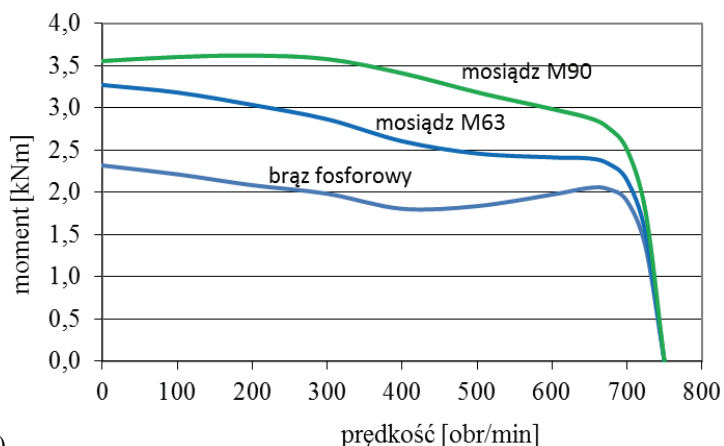
Rys. 2. Skuteczna wartość napięcia indukowanego w zależności od szerokości przesmyku między prętami klatek na krańcach bieguna

Fig. 2. RMS of Back emf in variation of contraction width in the magnet pole area

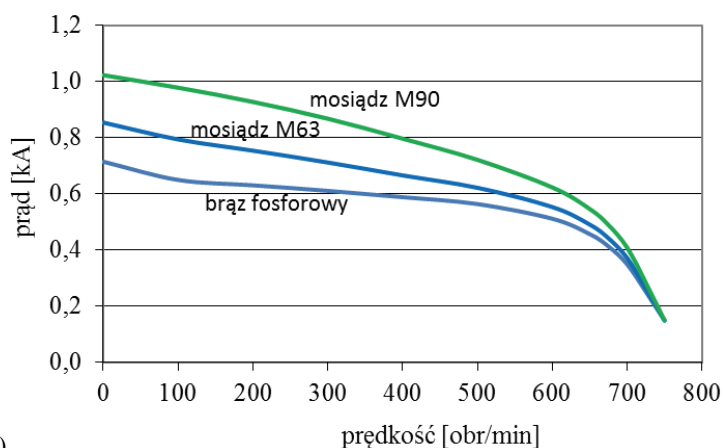
### 3.2. MOMENT ASYNCHRONICZNY OD UZWOJENIA KLATKOWEGO

Wypadkowy moment w czasie rozruchu silnika jest sumą dwóch składowych: momentu wytworzonego przez uzwojenie klatkowe oraz momentu hamującego od magnesów trwałych. Przebiegu oraz wartości momentu hamującego od magnesów trwałych nie można zmienić gdyż wynika on z parametrów i właściwości maszyny roboczej. Dlatego właściwości rozruchowe najlepiej poprawiać przez kształtowanie momentu asynchronicznego od klatki rozruchowej. W silnikach dwuklatkowych wykonanych w technologii spawania odpowiednie właściwości można uzyskać przez właściwy dobór materiałów klatki. Przebadano wpływ rodzaju materiału zastosowanego w prętach klatki górnej na przebieg momentu asynchronicznego. Obliczenia wykonano dla przykładów wykonania prętów klatki górnej z mosiądzu M 90, mosiądzu M 63 oraz brązu fosforowego. We wszystkich przypadkach przyjęto, że klatka dolna wykonana jest z miedzi.

Wykorzystując opisany wcześniej model obliczono moment asynchroniczny wytworzony od klatki rozruchowej. W obliczeniach założono, że w miejscu magnesów trwałych znajduje się powietrze oraz zmieniano parametrycznie prędkość obrotową wirnika. Wykresy zależności średniej wartości momentu w funkcji prędkości obrotowej dla różnych materiałów klatki górnej przedstawiono na rysunku 3a natomiast przebiegi prądów pokazano na rysunku 3b. Na podstawie porównania wykresów można stwierdzić, że najlepsze parametry (ze względu na moment i prąd rozruchowy) uzyskuje się, gdy górna klatka wykonana jest z mosiądzu M 63 a dolna z miedzi.



a)



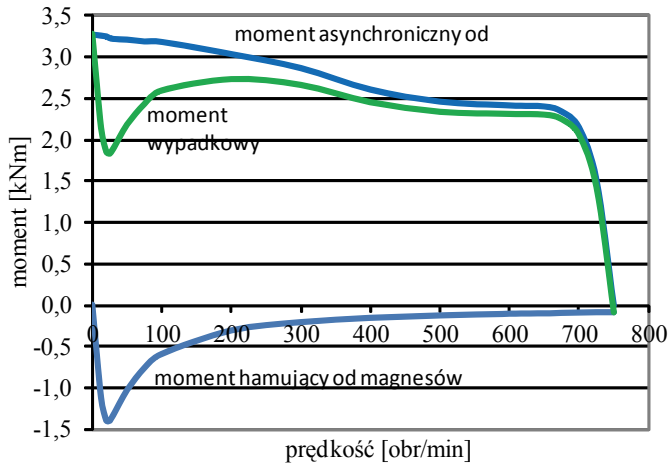
b)

Rys. 3. Charakterystyka momentu asynchronicznego (a) oraz prądu (b) dla różnych materiałów klatki rozruchowej

Fig. 3. Asynchronous torque vs. speed (a) and current vs. speed (b) for various materials of starting cage

### 3.3. WYPADKOWY MOMENT ROZRUCHOWY

Na rysunku 4 pokazano wykres wypadkowego momentu silnika, który jest sumą momentu asynchronicznego od uzwojenia klatkowego oraz momentu hamującego od magnesów trwałych. Można zauważyć, że wartość momentu rozruchowego jest w całym zakresie rozruchu (od zera do prędkości synchronicznej) większa od momentu znamionowego. Dzięki temu możliwy jest rozruch silnika obciążonego stałym momentem np. znamionowym.



Rys. 4. Wypadkowy moment asynchroniczny oraz jego składowe dla badanego silnika LSPMSM  
 Fig. 4. Total asynchronous torque and its components for studied LSPMSM motor

#### 4. WNIOSKI

Zastosowanie efektu wypierania prądu w maszynach synchronicznych z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim pozwala na znaczne poprawienie ich właściwości rozruchowych. Odpowiednie ukształtowanie momentu asynchronicznego i kompensacja momentu hamującego od magnesów trwałych są możliwe przez właściwy dobór materiału prętów uzwojenia klatki rozruchowej. Charakterystyka rozruchowa momentu może być ukształtowana w taki sposób, że jego minimalna wartość jest większa od momentu znamionowego.

#### LITERATURA

- [1] BAO Y., LIU L., ZHANG Y., FENG X., *Performance investigation and comparison of line start-up permanent magnet synchronous motor with super premium efficiency*, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011, 1–6.
- [2] DE ALMEIDA A.T., FERREIRA F.J.T.E., FONG J.A.C., *Standards for Efficiency of Electric Motors*, IEEE Industry Applications Magazine, 2011, Vol. 17, No. 1, 12–19.
- [3] KNIGHT A.M., MCCLAY I.C., *The design of high efficiency line start motors*, IEEE Transactions on Ind. Applications, 2000, Vol. 36, No. 6, 1555–1562.
- [4] LIBERT F., SOULARD J., ENGSTROM J., *Design of a 4-pole line start permanent magnet synchronous motor*, ICEM 2002, Brugge, Belgium, Aug. 25–28 2002, paper no. 153.
- [5] MILLER T.J.E., *Synchronization of Line-Start Permanent Magnet ac Motors*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, Vol. 103, No. 7, 1822–1828.
- [6] RAHMAN M.A., OSHEIBA A.M., RADWAN T.S., *Synchronization process of line-start permanent magnet synchronous motor*, Electric Power Components and Systems, Vol. 25, 6, 577–592.

## THE USAGE OF DEEP BAR EFFECT IN LINE STARTING PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

This paper concerns the influence of deep bar effect on start up performances of line start permanent magnet synchronous motor. On the basis of FEM model there were carried out static characteristics of torque and current versus speed for different materials of rotor bars. The results show that proper design of rotor winding enables reaching total asynchronous torque higher than nominal torque.