

Wiesław ŁYSKAWIŃSKI\*  
Cezary JĘDRYCZKA\*  
Dorota STACHOWIAK\*

## **ANALIZA WPLYWU BARIERY MAGNETYCZNEJ NA ODDZIAŁYWANIE TWORNIKA W 6-BIEGUNOWYM SILNIKU SYNCHRONICZNYM O MAGNESACH CIĘCIWOWYCH**

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych: rozkładów pola magnetycznego w rdzeniu, indukcji w szczelinie powietrznej, przebiegów siły elektromotorycznej, momentu zaczepowego, charakterystyk momentowo-kątowych oraz współczynnika tętnień momentu dla kilku wybranych wariantów bariery magnetycznej występującej w wirniku 6-biegunowego silnika synchronicznego między szczeliną powietrzną a magnesem. Na podstawie analizy tych wyników wytypowano strukturę najlepiej ograniczającą skutki zamykania się linii strumienia magnetycznego w niepożądanym sposób poprzez obwód magnetyczny. Niewątpliwym osiągnięciem zrealizowanych badań jest optymalizacja bariery magnetycznej pomiędzy magnesem a szczeliną powietrzną wykonanej w celu ograniczenia skutków oddziaływania prądu twornika na deformację rozkładu pola magnetycznego w szczelinie, przy zachowaniu możliwie najlepszych parametrów funkcjonalnych rozpatrywanego silnika.

**SŁOWA KLUCZOWE:** silnik synchroniczny o magnesach umieszczonych cięciwowo, bariera magnetyczna, obliczenia symulacyjne, rozkład pola magnetycznego, moment zaczepowy, siła elektromotoryczna

### **1. WSTĘP**

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi coraz częściej wypierają stosowane w układach napędowych silniki indukcyjne i komutatorowe. Wynika to przede wszystkim z rozwoju technologii wytwarzania magnesów trwałych oraz elementów energoelektronicznych wykorzystywanych w układach sterowania, co powoduje obniżanie kosztów napędów z silnikami magnetoelektrycznymi. Tego typu napędy cechują się mniejszymi kosztami eksploatacji, wynikającymi ze zwiększenia sprawności i współczynnika mocy w porównaniu z odpowiadającymi im maszynami indukcyjnymi lub komutatorowymi. Stosowane w tych

---

\* Politechnika Poznańska.

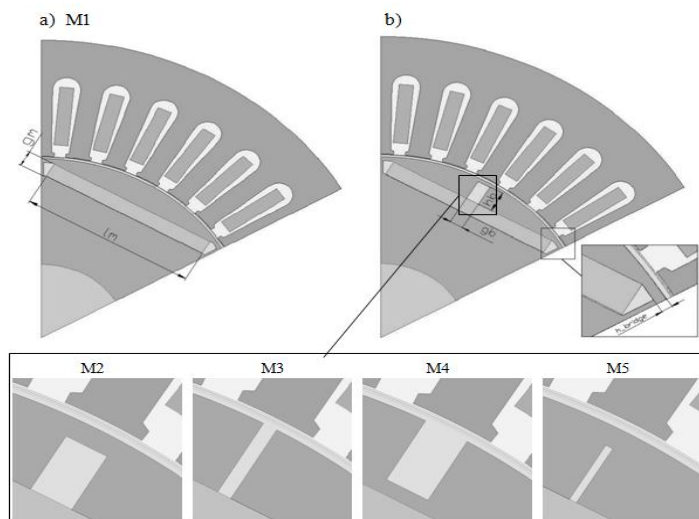
napędach magnetoelektryczne silniki synchroniczne charakteryzują się też większą mocą uzyskiwaną z jednostki masy [1, 2, 8].

W dążeniu do większego wyzyskania parametrów energetycznych tych silników wykorzystuje się różne metody zwiększenia sprawności. Między innymi poszukuje się nowych struktur obwodu magnetycznego o możliwie najmniejszej deformacji rozkładu pola magnetycznego w szczelinie [3]. W ostatnich latach opracowano szereg interesujących konstrukcji tych silników m.in. z dzielonymi magnesami powierzchniowymi [6, 7].

W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu bariery magnetycznej na ograniczenie oddziaływania twornika w wirniku 6-biegunowego silnika synchronicznego. Badania symulacyjne przeprowadzono za pomocą opracowanego w środowisku Maxwell polowego modelu silnika [4], w którym do wyznaczania rozkładu pola magnetycznego wykorzystuje się metodę elementów skończonych. Tematyka prezentowanych badań jest kontynuacją prac realizowanych przez Autorów w ramach projektu „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”.

## 2. MODEL SYMULACYJNY SILNIKA

W środowisku Maxwell opracowano model symulacyjny 6-biegunowego silnika synchronicznego o magnesach ścięciwowo wsuwanych w rdzeń wirnika (rys. 1). Ze względu na symetrię obwodu magnetycznego model symulacyjny utworzono dla 1/6 części obwodu magnetycznego maszyny (rys. 1).



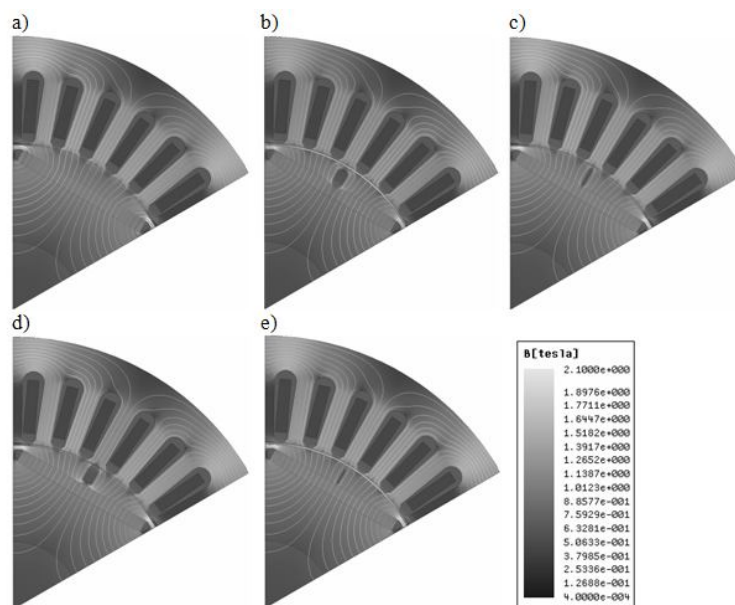
Rys. 1. Struktury rozpatrywanych silników: a) bez bariery magnetycznej M1, b) z barierą magnetyczną M2, M3, M4, M5

Model opracowano w sposób parametryczny umożliwiając modyfikacje podstawowych wymiarów obwodu magnetycznego m.in. kształtu obszarów niemagnetycznych (bariery magnetycznej) pomiędzy magnesami a powierzchnią zewnętrzną wirnika. Optymalizowano umiejscowienie oraz szerokość i wysokość tej bariery (rys. 1b) w celu ograniczenia wpływu oddziaływania twornika na rozkład pola magnetycznego i parametry rozpatrywanej maszyny. Przy tworzeniu modelu symulacyjnego przyjęto wymiary główne takie jak w sześciobiegunowym silniku indukcyjnym o wielkości mechanicznej 100. W celu umożliwienia analizy porównawczej we wszystkich opracowanych wariantach geometrii wirnika założono, że parametry uzwojeń i wymiary stojana oraz magnesów są takie same. Przyjęto długość magnesów  $lm = 40 \text{ mm}$ , grubość magnesu  $gm = 3,5 \text{ mm}$ , wysokość mostka magnetycznego  $h_{\text{bridge}} = 1 \text{ mm}$ . Modyfikowano promieniowe przesunięcie bariery magnetycznej oraz jej wysokość  $hb$  i szerokość  $gb$ . W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych dla struktury silnika bez bariery magnetycznej (rys. 1a) i kilku wybranych struktur z barierą magnetyczną (rys. 1b).

### 3. WYBRANE WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

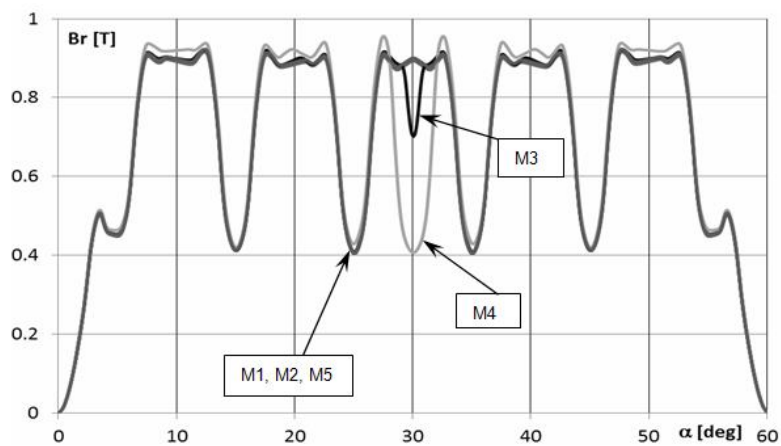
W opracowanym modelu symulacyjnym 6-biegunowego silnika synchronicznego otwory pod magnesy są usytuowane w takiej odległości od powierzchni wirnika, aby długość osadzonych w nich magnesów była możliwie największa, co zapewnia uzyskanie największej wartości SEM [5]. W artykule dokonano analizy porównawczej rozkładów pola magnetycznego w rdzeniu, składowej promieniowej indukcji w szczelinie powietrznej, przebiegów siły elektromotorycznej, charakterystyk momentu zaczepowego, charakterystyk momentowo-kątowych oraz współczynnika tętnień momentu. Przy stałej długości i grubości magnesów zmieniano szerokość, wysokość i umiejscowienie bariery magnetycznej ograniczającej oddziaływanie twornika. Poszukiwano takich rozwiązań konstrukcyjnych, które ograniczą skutki niepożądanego rozkładu pola magnetycznego. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych porównano z wynikami dla wariantu bez bariery magnetycznej.

Na rysunku 2 pokazano rozkład modułu wektora indukcji i linii sił pola magnetycznego dla wybranych wariantów konstrukcyjnych silnika bez obciążenia silnika momentem zewnętrznym. Na ich podstawie można stwierdzić, że w obszarze bariery magnetycznej następuje deformacja linii sił pola magnetycznego - tym większa im szersza jest ta bariera, maksymalna wartość indukcji magnetycznej we wszystkich wariantach jest na poziomie 2,25 T. Obwód stojana jest dość równomiernie nasycony, szczególnie w obszarze zębów (poza wariantem M3 - mniejsze nasycenie zęba nad barierą magnetyczną), a maksymalna indukcja nie przekracza 1,7 T.



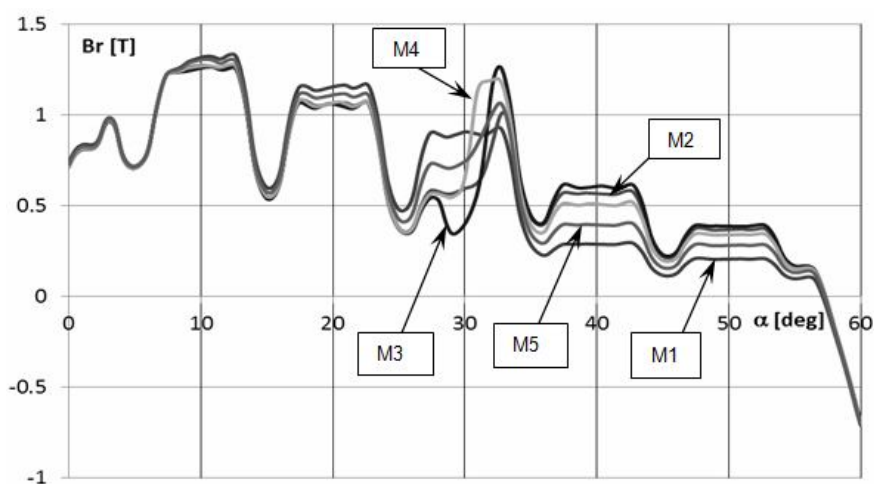
Rys. 2. Rozkłady modułu indukcji i linii sił pola magnetycznego na biegu jałowym dla wariantów: a) M1, b) M2, c) M3, d) M4, e) M5

Rozkład składowej radialnej indukcji w szczelinie powietrznej (rys. 3) wyznaczony na biegu jałowym jest identyczny we wszystkich wariantach, w których bariera magnetyczna nie łączy się ze szczeliną powietrzną (warianty M1, M2 i M5). W wariantach M3 i M4 w rozkładzie indukcji uwidacznia się siodło tym większe im szersza jest bariera magnetyczna (większa wartość  $gb$ ).



Rys. 3. Rozkład modułu indukcji w szczelinie powietrznej dla  $i = 0$  A

W rozkładach modułu indukcji w szczelinie powietrznej otrzymanych na biegu jałowym przedstawionych na rys. 3 widać ponad 50% spadek wartości indukcji w miejscach występowania zębów. Natomiast najmniejsze odkształcenie rozkładu indukcji w szczelinie wywołane oddziaływaniem twornika zaobserwowano w wariancie M3 (rys. 4), w którym bariera magnetyczna łączy się z magnesem i szczeliną powietrzną. Jednak w tym wariancie w pobliżu bariery magnetycznej występuje największa zmiana wartości modułu indukcji (rys. 4).



Rys. 4. Rozkład modułu indukcji w szczelinie powietrznej dla  $i = 8$  A

W celu oceny ilościowej, pokazane na rys. 3 rozkłady interpolowano wielomianem trygonometrycznym, wyodrębniono poszczególne harmoniczne, a następnie obliczono współczynnik zawartości wyższych harmonicznych  $THD$ . Wyniki zestawiono w tabeli 1. W tabeli podano także wartości skuteczne i średnie składowej radialnej gęstości strumienia magnetycznego ( $B_{RMS}$  i  $B_{avg}$ ) oraz wartości amplitud pierwszych harmonicznych gęstości strumienia ( $B_{r1}$ ) w szczelinie powietrznej dla rozpatrywanych struktur silników synchronicznych.

Wyznaczone na biegu jałowym przebiegi sił elektromotorycznych ( $E$ ) dla wybranych pięciu wariantów silnika pokazano na rysunku 5, a wartości  $E_{RMS}$  zestawiono w tabeli 2. Na ich podstawie można stwierdzić, że wartości skuteczne sił elektromotorycznych  $E_{RMS}$  w przedstawionych wariantach różnią się maksymalnie o ok. 3 V. Przebiegi sił elektromotorycznych są bardzo podobne dla wariantów, w których bariera magnetyczna nie łączy się ze szczeliną powietrzną. Natomiast najmniejsze pulsacje siły elektromotorycznej występują w wariancie M3. Świadczy o tym również najmniejsza zawartość wyższych harmonicznych wyznaczona dla przebiegów SEM (tabela 2).

Tabela 1. Zestawienie wyznaczonych wartości  $B_{r1}$ ,  $THD$ ,  $B_{avg}$ ,  $B_{RMS}$  dla rozkładów składowej radialnej wektora indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej

Struktura wirnika	$B_{r1}$	$THD_B$	$B_{RMS}$	$B_{avg}^1$
	[T]	[%]	[T]	[T]
M1	0.964	40.58	0.736	0.692
M2	0.960	40.96	0.735	0.691
M3	0.944	45.39	0.734	0.687
M4	0.956	40.55	0.730	0.687
M5	0.963	40.58	0.736	0.692

Tabela 2. Zestawienie wyznaczonych wartości  $E_1$ ,  $THD$ ,  $E_{RMS}$  i  $E_{avg}$  dla przebiegów SEM

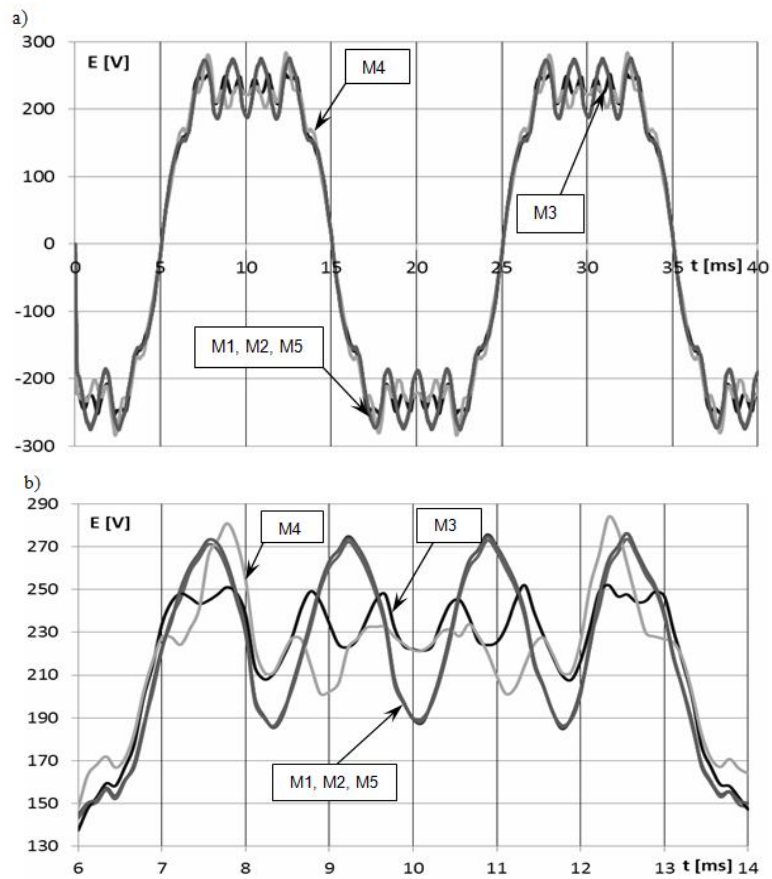
Struktura wirnika	$E_1$	$THD$	$E_{RMS}$	$E_{avg}^1$
	[V]	[%]	[V]	[V]
M1	281.80	24.92	205,93	193.9
M2	279.78	24.87	204,39	192.6
M3	281.03	22.55	204,28	193.8
M4	277.35	25.52	202,97	192.3
M5	281.73	24.90	205,87	193.9

Na rysunku 6 przedstawiono moment zaczepowy w funkcji kąta obrotu wirnika dla pięciu wybranych struktur silników. Największą wartość maksymalną tego momentu dochodzącą do 5 Nm otrzymano dla wariantu M4, w którym bariera magnetyczna o szerokości  $gh = 3 \text{ mm}$  łączy się ze szczeliną powietrzną. W pozostałych wariantach ekstremum momentu zaczepowego jest podobne i nie przekracza 3 Nm. Przebiegi dla wariantów M1, M2, M5 są bardzo zbliżone i na rys. 6 pokrywają się.

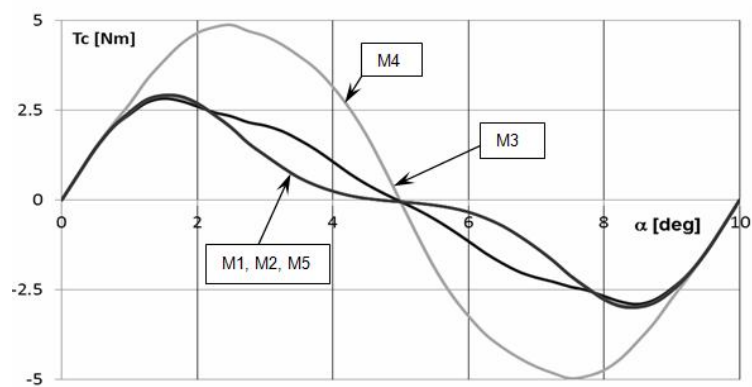
Na rysunkach 7 pokazano charakterystyki momentowo-kątowe wybranych struktur silnika dla wartości skutecznej prądu w uzwojeniach stojana  $I = 8 \text{ A}$ . Na ich podstawie można zauważyć, że oddziaływanie twornika najlepiej ogranicza bariera magnetyczna w wariantcie M3. W tym przypadku wartość maksymalna momentu nieznacznie zmalała, a poszerzył się zakres pracy stabilnej.

Rozkłady indukcji i linii sił pola magnetycznego wyznaczone przy wartości skutecznej prądu w uzwojeniu stojana  $I = 8 \text{ A}$  oraz kącie obciążenia wewnętrznego odpowiadającym maksymalnemu momentowi (z rys. 7) przedstawiono na rys. 8.

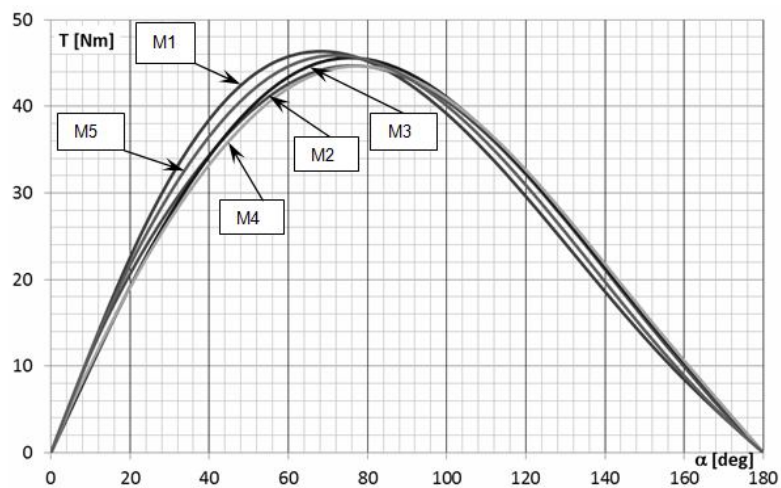
<sup>1</sup> Wartość wyznaczona dla podziałki biegunowej



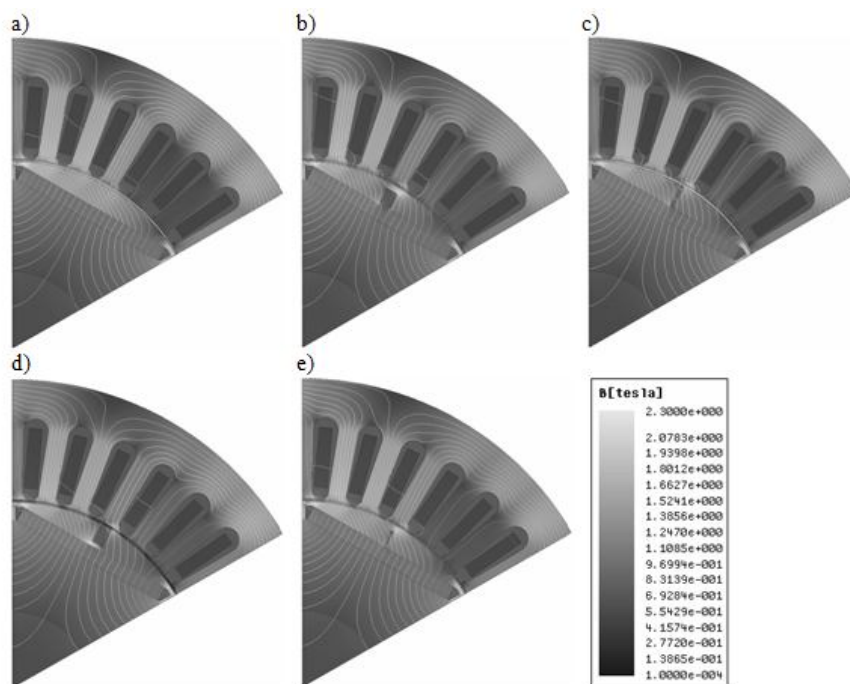
Rys. 5. Przebiegi sił elektromotorycznych dla pięciu wybranych wariantów (a) i powiększone fragmenty tych przebiegów (b)



Rys. 6. Moment zaczepowy w funkcji kąta obrotu wirnika



Rys. 7. Moment średni w funkcji kąta rozchyłu osi pola stojana i wirnika dla wybranych wariantów i prądu w uzwojeniach stojana  $I = 8$  A



Rys. 8. Rozkład modułu indukcji i linii sił pola magnetycznego przy prądzie  $I = 8$  A dla wariantów: a) M1, b) M2, c) M3, d) M4, e) M5



Za pomocą opracowanego modelu 6-biegunowego silnika synchronicznego wyznaczano również przebieg momentu elektromagnetycznego na wale maszyny dla wybranej wartości prądu fazowego  $I$  oraz wartości kąta  $\alpha$  pomiędzy osiami pola stojana i wirnika. Wartość średnia  $T_{av}$  tego przebiegu jest traktowana jako wartość użyteczna momentu elektromagnetycznego i stanowi pojedynczy punkt charakterystyki momentowo-kątowej pokazanej na rys. 7.

Na podstawie przebiegu czasowego momentu elektromagnetycznego określany jest także współczynnik tętnień momentu (tabela 3) definiowany jako:

$$\Delta T_{el} = \frac{T_{el\max} - T_{el\min}}{T_{av}} 100\% \quad (1)$$

gdzie:  $T_{el\max}$ ,  $T_{el\min}$ ,  $T_{av}$  – odpowiednio wartość maksymalna, minimalna i średnia momentu, jakie wystąpiły w jednym okresie.

Zestawione w tabeli 3 procentowe wartości współczynnika tętnień momentu ( $\Delta T_{el}$ ) wyznaczono przy prądzie w uzwojeniach stojana równym 8A i kącie obciążenia wewnętrznego odpowiadającym ekstremum charakterystyki momentowo-kątowej (rys. 7). Najmniejszą wartość tego współczynnika uzyskano dla struktury silnika M3.

Tabela 3. Obliczone średnie wartości momentu elektromagnetycznego  $T_{av}$ , maksymalne wartości momentu zaczepowego  $T_{c\max}$ , współczynnik tętnień momentu  $\Delta T_{el}$  przy  $\alpha = \alpha_{\max}$ ,  $I = 8$  A dla wybranych struktur wirnika

struktura wirnika	M1	M2	M3	M4	M5
$T_{av}$ [Nm]	46,34	44,71	45,61	44,62	45,87
$T_{c\max}$ [Nm]	2,988	2,963	2,901	4,969	2,993
$\Delta T_{el}$ [%]	23,83	30,65	20,51	30,92	22,82

#### 4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki badań związane z poszukiwaniem rozwiązań ograniczających skutki zamykania się linii strumienia magnetycznego w niepożądany sposób poprzez obwód magnetyczny wirnika. W opracowanym modelu symulacyjnym silnika zmieniano szerokość ( $gb$ ), wysokość ( $hb$ ) i umiejscowienie bariery magnetycznej występującej pomiędzy szczeliną powietrzną i magnesem. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych porównano z wynikami dla wariantu bez bariery magnetycznej o tej samej długości magnesów ( $lm$ ). Otrzymane przebiegi sił elektromotorycznych i indukcji w szczelinie powietrznej dla wariantu bez bariery magnetycznej i z barierą magnetyczną nie łączącą się ze szczeliną powietrzną są identyczne. Pewne różnice w tych prze-

biegach pojawiają się dla wariantów, w których bariera magnetyczna łączy się ze szczeliną powietrzną. Następuje wówczas także nieznaczne zmniejszenie wartości skutecznej siły elektromotorycznej. Wzrost szerokości bariery magnetycznej łączącej się ze szczeliną powietrzną powoduje wzrost wartości maksymalnej momentu zaczepowego. Z drugiej jednak strony szeroka bariera magnetyczna dobrze ogranicza wpływ niekorzystnego oddziaływania twornika na rozkład pola magnetycznego i deformację charakterystyki momentowo-kątowej silnika. Jednak duża szerokość bariery magnetycznej powoduje wzrost pulsacji momentu. Uwzględniając wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych wskazujące, że najkorzystniejszy pod względem uzyskanych parametrów funkcjonalnych i najlepiej ograniczającym skutki bocznikowania magnesów oraz oddziaływania twornika jest wariant M3, w którym bariera magnetyczna łączy się z magnesem i szczeliną powietrzną w znacznym stopniu zmniejsza niekorzystne oddziaływanie twornika przy minimalnych pulsacjach momentu. Należy stwierdzić, że przy projektowaniu obwodów magnetycznych wirników maszyn PMSM celowe jest tworzenie barier magnetycznych, które połączone są ze szczeliną powietrzną maszyny. Przy czym, do określenia optymalnych wymiarów barier konieczne wydaje się stosowanie modeli numerycznych.

## LITERATURA

- [1] Barański M., Idziak P., Łyskawiński W., Szelaż W.: *Analysis of power parameters of the squirrel cage motor and LSPMS motor with U-shaped magnets*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 4/2015, s. 135-13.
- [2] Idziak P., Barański M., Łyskawiński W., Kowalski K.: *Ocena wybranych parametrów energetycznych modelowych silników prądu przemiennego małej mocy o różnych konstrukcjach wirnika*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 100, 2013, wyd. BOBRME Komel, s. 53-57.
- [3] Jędrzycka C., Łyskawiński W., Stachowiak D.: *Analiza nasycenia strefy przyszczelinowej w silniku synchronicznym z magnesami ułożonymi w kształcie litery „V”*, Pomiar Automatyka i Kontrola, 10-2013, VOL. 59 s. 1089-1092.
- [4] Łyskawiński W., Jędrzycka C., Stachowiak D.: *Analiza wpływu umiejscowienia magnesów cięciwowych na parametry 6-biegunowego silnika synchronicznego-modelowanie*, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, Issue 83, 2015, pp. 63-70.
- [5] Łyskawiński W., Jędrzycka C., Stachowiak D.: *Analiza wpływu umiejscowienia magnesów cięciwowych na parametry 6-biegunowego silnika synchronicznego-obliczenia*, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, Issue 83, 2015, pp. 71-79.
- [6] May H., Palka R., Paplicki P., Szkolny S., Candors W.-R.: *Modified concept of permanent magnet excite synchronous machines with improved high-speed features*, Archives of Electrical Engineering, Vol. 60, 2011, No. 4, 531-540.

- [7] Młot A., Korkosz M., Łukaniszyn M., *Iron loss and eddy-current loss analysis in a low-power BLDC motor with magnet segmentation*, Archives of Electrical Engineering, Vol. 61, 2012, No. 1, 33-46.
- [8] Zawilak T., Antal L.: *Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim - badania eksperymentalne*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 77, 2007, wyd. BOBRME Komel, s. 277-282.

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF MAGNETIC BARRIERS ON ARMATURE  
REACTION IN 6-POLE IPM SYNCHRONOUS MOTOR  
WITH TANGENTIAL MAGNETS**

The paper deals with the analysis of the radial placement and shape of magnetic barriers in rotor of the 6 pole interior permanent magnet (IPM) synchronous motor. Studies are focused on the comparative analysis of the magnetic field distribution and several functional parameters of the motors with different geometries of the magnetic barriers in the rotor. Among others the back emf waveforms, torque vs. power angle and current characteristics, cogging torque and space distribution of radial component of the magnetic flux density in the air-gap of the machines are studied. Selected results of simulations have been presented and discussed. On the basis of performed analysis the structure of the rotor that minimizes the armature reaction while keeping the performance factors has been pointed out for studied case problem.

*(Received: 10. 02. 2016, revised: 7. 03. 2016)*