

# Wpływ grubości szczeliny powietrznej na charakterystyki statyczne silnika SRM

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop

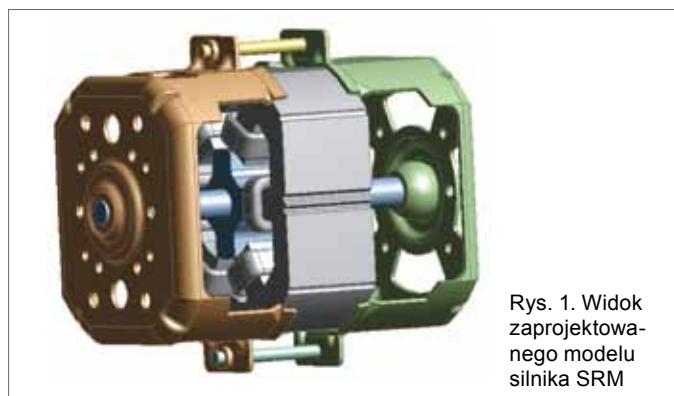
Współczesne układy napędowe przeznaczone do sprzętu AGD wymagają stosowania silników elektrycznych umożliwiających regulację prędkości obrotowej w szerokim zakresie i pracujących jednocześnie z jak największą sprawnością. Dodatkowym kryterium jest minimalizacja kosztów takiego układu napędowego. Wiele obecnie produkowanych układów napędowych spełnia częściowo te wymagania. Klasyczne silniki komutatorowe powszechnie stosowane w sprzęcie AGD umożliwiają regulację prędkości obrotowej w szerokim zakresie, są relatywnie w miarę tanie w produkcji masowej, ale są stosunkowo zawodne i sprawność takich napędów jest niezadowalająca. Silniki z magnesami trwałymi (BLDC) oferują znacznie większą sprawność przetwarzania energii w szerokim zakresie zmian prędkości. Trwałość takiego rozwiązania znacznie przewyższa maszynę komutatorową, w której zawsze po pewnym czasie następuje zużycie szczotek lub uszkodzenie zestyku szczotka-komutator. Natomiast wadą układów napędowych z silnikami z magnesami trwałymi jest zmiana właściwości silnika związana z procesem tzw. starzenia się magnesu trwałego oraz stosunkowo duża cena z uwagi na konieczność zastosowania magnesów stałych. Rozwiązaniem pośrednim pomiędzy silnikiem z komutatorem mechanicznym a silnikiem z magnesami trwałymi jest silnik reluktancyjny przełączalny (ang. *Switched Reluctance Motor* – SRM) [1, 2, 3, 4]. Umożliwia on regulację prędkości obrotowej w bardzo szerokim zakresie z jednocześnie wysoką sprawnością, która jednak w sposób istotny zależy od konstrukcji samego silnika, jego wykonania i układu sterującego. Koszt wykonania maszyny SRM jest zdecydowanie mniejszy niż klasycznego silnika komutatorowego, a także silnika BLDC. Właściwości silnika SRM zależą od typu konstrukcji silnika (4/2, 6/4, 12/8), danych nawojowych oraz sposobu sterowania.

Podstawowym układem zasilającym tego typu maszyn jest klasyczny układ półmostka, w którym na jedno pasmo przypadają dwa tranzystory i dwie diody [2]. Taki układ zasilania umożliwia sterowanie prądowe lub napięciowe (PWM) oraz jednopulsowe (przez zmianę kątów załączenia i wyłączenia). Jednym z istotniejszych parametrów silników SRM z uwagi na charakter wytwarzanego momentu elektromagnetycznego jest grubość szczeliny powietrznej.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań, zarówno symulacyjnych, jak i laboratoryjnych dotyczących wpływu grubości szczeliny powietrznej na charakterystyki statyczne silnika SRM zaprojektowanego pod kątem zastosowania w sprzęcie gospodarstwa domowego. Omawiany silnik charakteryzuje się budową obwodu magnetycznego wykazującą cechy niesymetrii zarówno magnetycznej, jak i elektrycznej. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń elektromagnetycznych obwodu magnetycznego silnika dla określonego zakresu zmian grubości szczeliny powietrznej, dla dwóch różnych, ze względu na niesymetrię budowy, pasm silnika. Przedstawiono zależności wartości średniej momentu elektromagnetycznego silnika w funk-

## INFLUENCE OF AIR-GAP THICKNESS ON STATIC SRM CHARACTERISTICS

**Abstract:** In the article we discuss the influence of an air-gap thickness on the switched reluctance motor with 6/4 configuration static characteristics. This motor has been projected for household equipment purpose and it is characterized by non-symmetrical construction of magnetic circuit. In the work we present field computation results of motor magnetic circuit for particular changes of air-gap thickness range for two different (because of non-symmetrical construction) motor phases. There is also presented dependences of mean value of motor torque versus current on air-gap thickness changes for two different phases. We present laboratory research results of self-inductances windings profile estimation versus rotor angle for few cases of motor air-gap thickness.



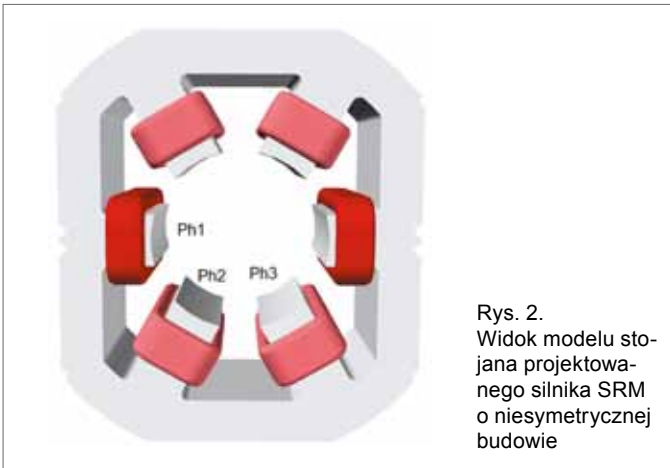
Rys. 1. Widok zaprojektowanego modelu silnika SRM

cji prądu przy zmieniającej się grubości szczeliny powietrznej, odpowiednio dla dwóch różnych pasm. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych pomiaru kształtu indukcyjności własnych uzwojeń w funkcji kąta obrotu wirnika dla kilku grubości szczeliny powietrznej silnika. Zamieszczono wnioski dotyczące możliwości zastosowania rozwiązania konstrukcyjnego silnika SRM z obwodem magnetycznym charakteryzującym się niesymetrią magnetyczną, jak i elektryczną.

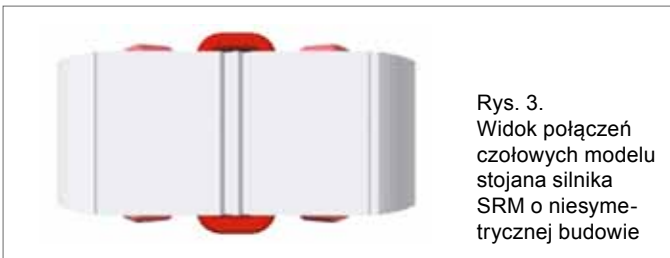
## Projektowany silnik SRM

Na rys. 1 przedstawiono kompletny model złożeniowy zaprojektowanego przez autorów na potrzeby napędu robota kuchennego silnika SRM o konstrukcji 6/4 z widocznymi uzwojeniami oraz tarczami łożyskowymi.

Widok modelu samego stojana omawianego silnika przedstawiono na rys. 2. Nietypowy niesymetryczny kształt stojana został wymuszony koniecznością dostosowania wymiarów zewnętrznych silnika do istniejącego mocowania tarcz łożyskowych oraz innych uwarunkowań technologicznych klasycznego



Rys. 2. Widok modelu stojana projektowanego silnika SRM o niesymetrycznej budowie



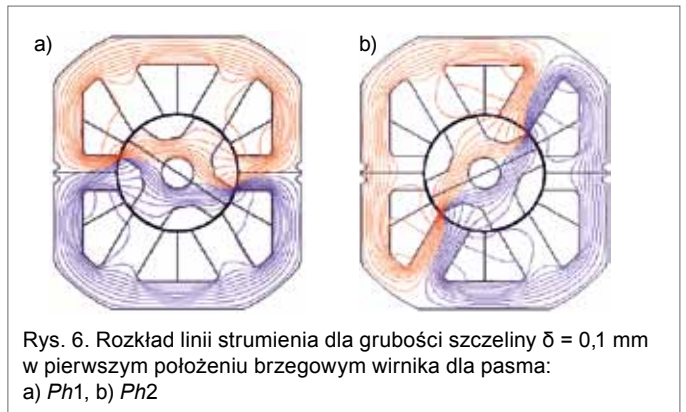
Rys. 3. Widok połączeń czołowych modelu stojana silnika SRM o niesymetrycznej budowie



Rys. 4. Widok geometrii stojana po imporcie z programu CAD do programu FEM



Rys. 5. Widok geometrii silnika SRM po uzupełnieniu jej o wirnik w programie FEM



Rys. 6. Rozkład linii strumienia dla grubości szczeliny  $\delta = 0,1$  mm w pierwszym położeniu brzegowym wirnika dla pasma: a)  $Ph1$ , b)  $Ph2$

układu napędowego robota kuchennego. Podyktowane to zostało względami ekonomicznymi. Ze względu na narzucone zewnętrzne wymiary silnika jedna para biegunów stojana posiada zmienione wymiary geometryczne. Tym samym umieszczone na tych biegunach uzwojenia różnią się od uzwojeń na pozostałych biegunach. Pasma o zmienionych wymiarach geometrycznych będzie w dalszej części pracy umownie oznaczane symbolem  $Ph1$  (rys. 2). Wszystkie pasma silnika posiadają jednakowe dane nawojowe, ale z uwagi na niesymetryczną budowę stojana uzwojenie oznaczone jako  $Ph1$  posiada dłuższe połączenia czołowe, co przedstawiono w widoku na rys. 3. Uzwojenie  $Ph1$  przy takiej samej liczbie zwojów jak w pozostałych pasmach ma zwiększoną rezystancję pasma.

Na bazie wstępnej konstrukcji projektowanego silnika SRM prowadzono badania symulacyjne mające na celu analizę wypadkowych właściwości silnika, już na etapie projektowania.

### Metodyka obliczeń połowych

Autorzy do obliczeń połowych metodą elementów skończonych (FEM) zastosowali komercyjny pakiet FLUX [5]. Do obliczania charakterystyk statycznych maszyny SRM zastosowano analizę stałoprądową w przestrzeni 2D. Geometrię projektowanego modelu obwodu elektromagnetycznego silnika można utworzyć, stosując jedną z trzech metod:

- metodę bezpośrednią tworzenia geometrii w środowisku programu FEM;
- metodę pośrednią polegającą na imporcie do programu FEM geometrii z programu typu CAD;
- metodę mieszaną związaną z importem części geometrii z programu typu CAD i realizację pozostałej części w środowisku programu FEM.

Autorzy wybrali metodę mieszaną polegającą na imporcie geometrii obwodu magnetycznego stojana zamodelowanej w programie CAD (rys. 2), geometria wirnika została utworzona w programie FEM. Takie rozwiązanie umożliwiało łatwiej-

szcze uwzględnienie niesymetrycznej konstrukcji stojana oraz pozwoliło na sparametryzowanie modelu wirnika, tak aby można było uwzględniać obrót wirnika i różną grubość szczeliny powietrznej. Obliczenia ze względu na symetrię osiową silnika ograniczono do połowy geometrii obwodu magnetycznego. Na rys. 4 przedstawiono widok połowy geometrii stojana po imporcie do programu FEM z programu CAD.

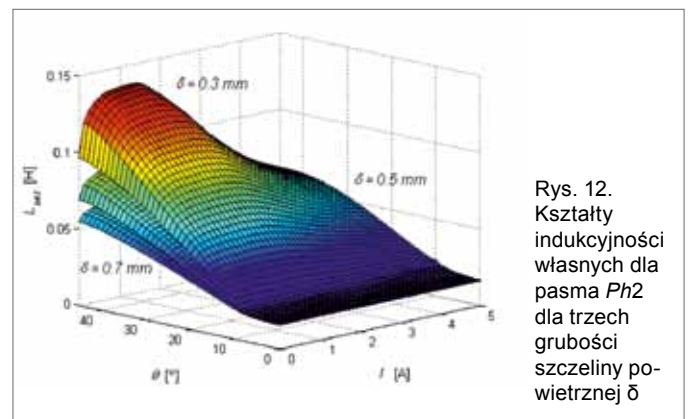
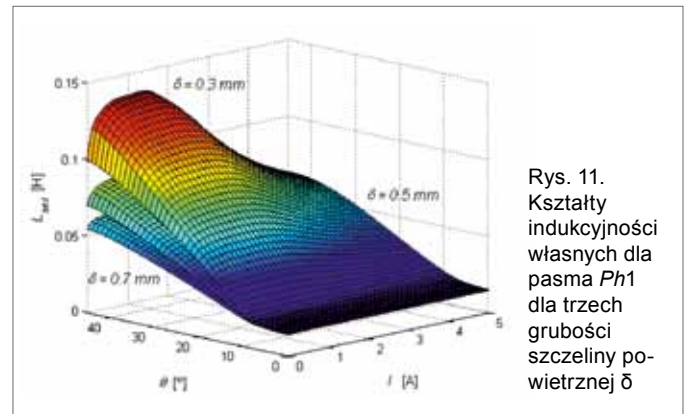
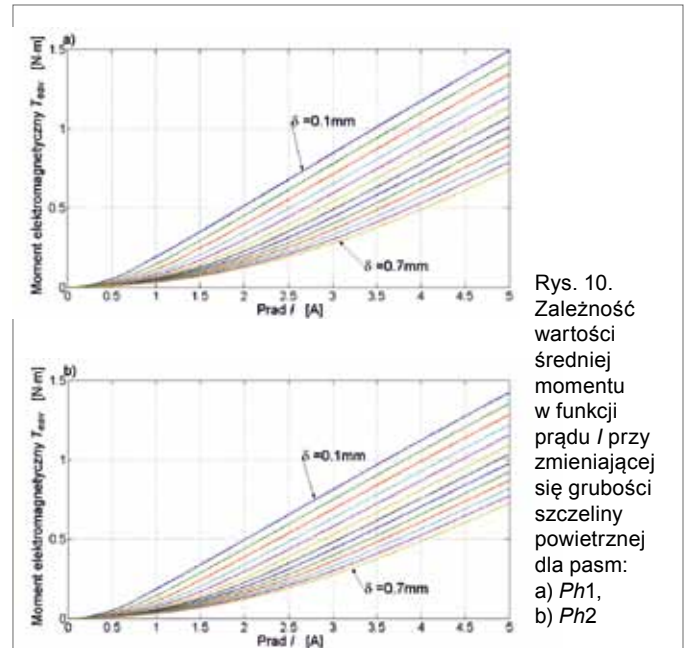
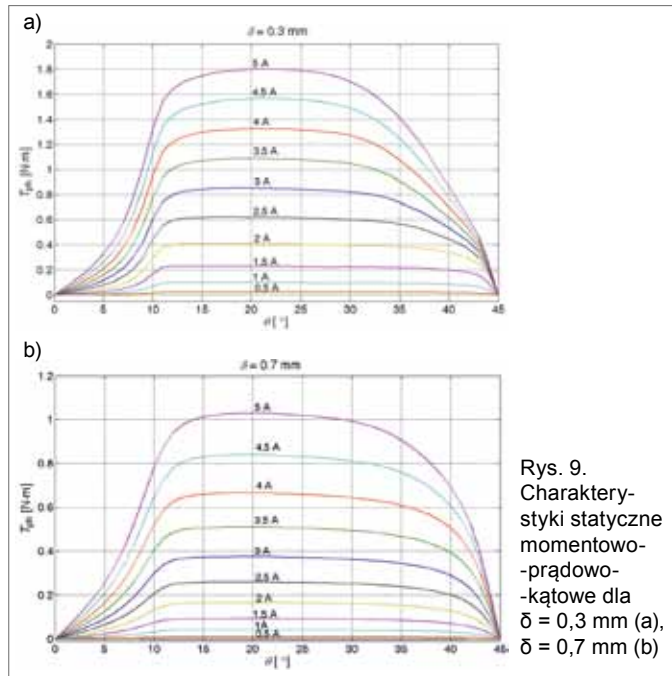
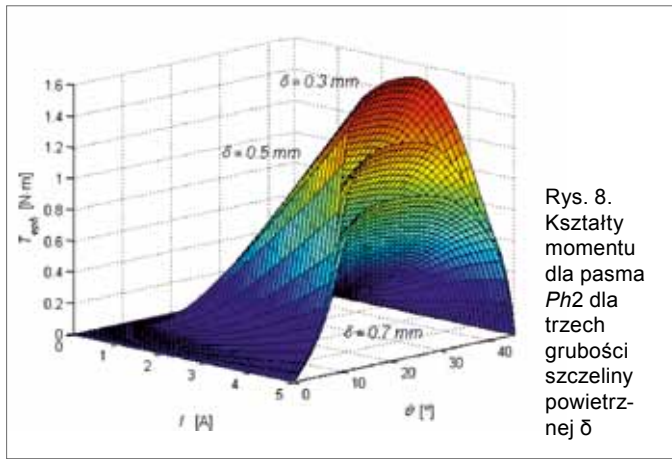
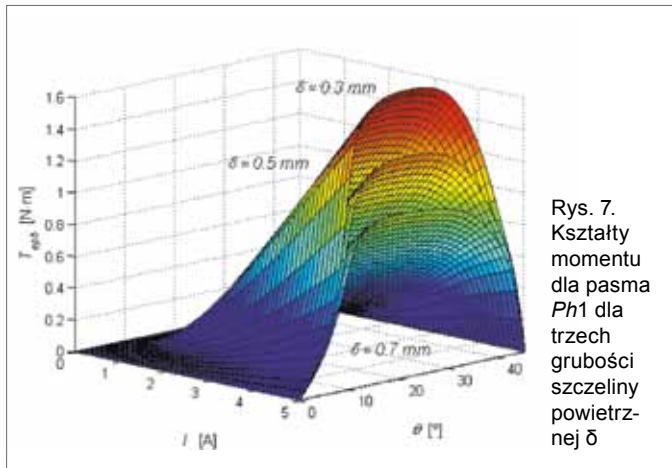
Widok geometrii modelu silnika SRM po dodaniu geometrii wirnika zrealizowanego w programie FEM przedstawiony został na rys. 5.

Kolejnym krokiem do realizacji zamierzonego celu było opracowanie metody obliczeń rozkładu pola magnetycznego dla różnych położenia wirnika i dla różnych grubości szczeliny powietrznej. W tym celu zastosowano język programowania parametrycznego Python pozwalający na napisanie tzw. makra do obliczeń realizujących obliczenia połowe w pętli [5] w zależności od zmieniającego się parametru, np. grubości szczeliny powietrznej. W trakcie obliczeń wymiary obwodu magnetycznego stojana silnika pozostawały stałe, zmianie uległa tylko średnica zewnętrzna wirnika  $d_r$ . Pozostałe wymiary obwodu wirnika nie były zmieniane. Do obliczania strumienia i współczynników indukcyjności zastosowano wbudowane makra dostępne w programie FEM. Na rys. 6 przedstawiono rozkład linii strumienia dla grubości szczeliny powietrznej  $\delta = 0,1$  mm umownych pasm  $Ph1$  (rys. 6a) i  $Ph2$  (rys. 6b) dla pierwszego położenia brzegowego wirnika ( $\theta_1$ ). Położenie to określają kąty szerokości biegunów stojana ( $\beta_s = 34^\circ$ ) i wirnika ( $\beta_r = 35^\circ$ ). Dla podanych wartości kątów stojana i wirnika kąt położenia brzegowego wynosi  $\theta_1 = 10,5^\circ$  (w odniesieniu do położenia niewspółosiowego  $\theta_u$  danego pasma).

### Wyniki obliczeń symulacyjnych

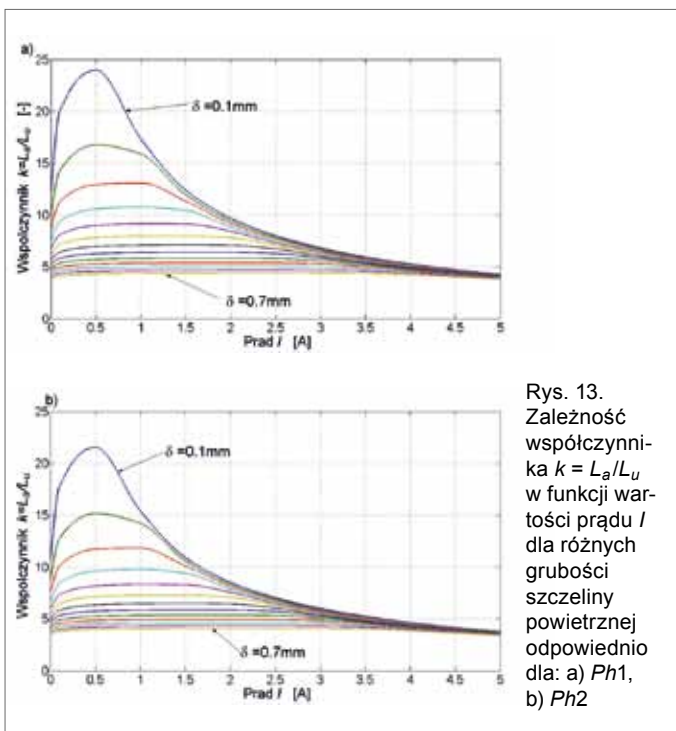
Moment elektromagnetyczny wytwarzany przez silnik SRM znacząco zależy od grubości szczeliny powietrznej przy małych prędkościach wirowania wirnika, zaś w niewielkim stop-





niu przy dużych prędkościach. Ponieważ projektowany silnik musi zapewniać szeroki zakres regulacji prędkości, powstaje problem optymalnego doboru grubości szczeliny powietrznej silnika. Wykorzystując symetrię budowy wirnika, zakres zmian kąta ograniczono do 45 stopni mechanicznych ze skokiem co jeden stopień mechaniczny. Zakres zmian wymuszenia prądowego określono od wartości 0,001 A do 5 A z krokiem

0,5 A. Obliczenia przeprowadzono oddzielnie dla pasma Ph1 oraz pasma Ph2 z uwagi na niesymetrię modelu. Zakres zmian szczeliny powietrznej  $\delta$  określono od 0,1 mm do 0,7 mm z krokiem 0,05 mm. Na rys. 7–8 przedstawiono zależności momentu w funkcji prądu  $I$  oraz kąta obrotu  $\theta$ , odpowiednio dla pasm Ph1 (rys. 7) i Ph2 (rys. 8) dla trzech wybranych grubości szczeliny powietrznej  $\delta = 0,3$  mm, 0,5 mm, 0,7 mm. Ponadto przykładowe charakterystyki momentowo-prądowo-kątowe dla projektowanego silnika SRM o grubości szczeliny powietrznej  $\delta = 0,3$  mm i  $\delta = 0,7$  mm pokazano na rys. 9. Z przedstawionych na rys. 9



charakterystyk statycznych wynika, że moment wytwarzany przy prądzie  $i_{ph} = 5 \text{ A}$  jest ok. 70% większy w silniku ze szczeliną  $\delta = 0,3 \text{ mm}$  w porównaniu z silnikiem o  $\delta = 0,7 \text{ mm}$ .

Na rys. 10 przedstawiono zależności wartości średniej momentu elektromagnetycznego silnika  $T_{eav}$  w funkcji wartości prądu  $I$  przy zmieniającej się grubości szczeliny powietrznej  $\delta$ , odpowiednio dla pasma Ph1 (rys. 10 a) oraz pasma Ph2 (rys. 10 b). Porównując wartości momentów na rys. 10 a i 10 b, można stwierdzić, że pasmo Ph1 wytwarza większą wartość średnią momentu elektromagnetycznego niż pozostałe pasma. Wzrost grubości szczeliny powietrznej wyraźnie zmniejsza tę różnicę.

Na rys. 11–12 przedstawiono zależności indukcyjności własnych odpowiednio pasma Ph1 i Ph2 dla trzech grubości szczeliny powietrznej  $\delta = 0,3 \text{ mm}$ ,  $0,5 \text{ mm}$ ,  $0,7 \text{ mm}$ .

Innym parametrem określanym dla silników SRM jest stosunek wartości indukcyjności położenia współosiowego  $L_a$  do wartości indukcyjności położenia niewspółosiowego  $L_u$  określany jako  $k = L_a/L_u$ . Na rys. 13 przedstawiono zależność współczynnika  $k$  w funkcji wartości płynącego prądu  $I$  dla różnych wartości grubości szczeliny powietrznej  $\delta$ , odpowiednio dla pasma Ph1 (rys. 13 a) oraz pasma Ph2 (rys. 13 b). Uzyskane wartości współczynnika  $k$  dla pasma Ph1 są większe niż w pozostałych pasmach. Indukcyjność położenia niewspółosiowego  $L_u$

Tabela 1. Podstawowe dane zaprojektowanego silnika SRM

Liczba pasm	$m = 3$
Liczba biegunów stojana	$N_s = 6$
Liczba biegunów wirnika	$N_r = 4$
Kąt bieguna stojana	$\beta_s = 34^\circ$
Kąt bieguna wirnika	$\beta_r = 35^\circ$
Długość pakietu żelaza	$L_{Fe} = 35 \text{ mm}$
Średnica wałka wirnika	$d_{sh} = 10 \text{ mm}$
Liczba zwojów pasma	$N_{ph} = 400$
Rezystancja pasma	$R_{ph} = 4,2 \Omega$

Tabela 2. Zależność współczynnika  $k = L_a/L_u$  w funkcji grubości szczeliny powietrznej dla wszystkich pasm silnika

	$\delta = 0,3 \text{ mm}$	$\delta = 0,4 \text{ mm}$	$\delta = 0,5 \text{ mm}$
Ph1	4,59	4,22	3,54
Ph2	3,77	3,46	3,01
Ph3	3,7	3,44	3,01

pasma Ph1 jest mniejsza w porównaniu z pozostałymi pasmami. Uzyskane wartości indukcyjności położenia współosiowego  $L_a$  dla pasma Ph1 były o kilka procent większe. Pasma Ph1 z uwagi na nieco inny kształt obwodu magnetycznego jest bardziej podatne na nasycenie się obwodu magnetycznego.

### Wyniki badań laboratoryjnych

Obiektem badań laboratoryjnych był silnik SRM, którego podstawowe parametry zamieszczono w tabeli 1.

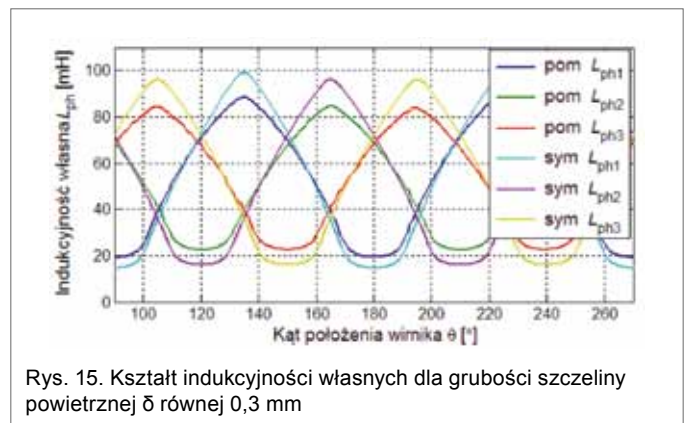
W warunkach laboratoryjnych dokonano pomiaru indukcyjności własnej poszczególnych pasm w funkcji położenia wirnika dla trzech grubości szczeliny powietrznej: 0,3 mm, 0,4 mm oraz 0,5 mm. Wirniki silnika SRM użyte w badaniach przedstawiono na rys. 14.

Dla usprawnienia pomiarów przygotowano stanowisko pomiarowe pozwalające na obrót wirnika o określony kąt za pomocą silnika skokowego z możliwością jednoczesnego zapisu wartości indukcyjności do pliku. Pomiary wykonywano w określonych odstępach czasowych determinowanych parametrami miernika służącego do pomiaru indukcyjności własnej. Pomiar indukcyjności był wykonywany przy wymuszeniu niskonapięciowym o częstotliwości 1 kHz. Na rysunkach 15–17 przedstawiono zmierzone kształty indukcyjności uzwojeń poszczególnych pasm dla wybranych grubości szczelin.

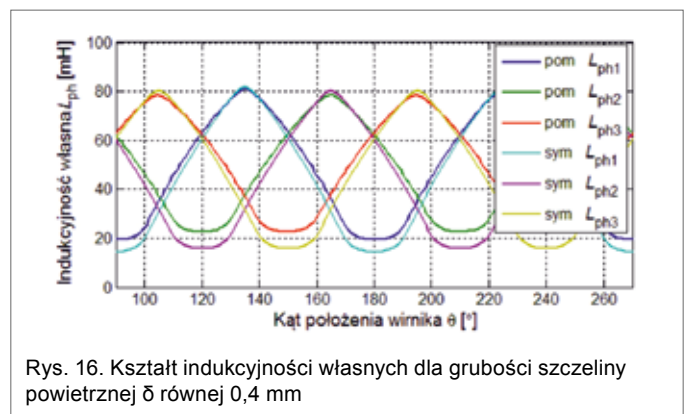
Badania laboratoryjne potwierdziły, że grubość szczeliny powietrznej w istotny sposób wpływa na zmianę kształtu indukcyjności własnych poszczególnych uzwojeń. Ogólnie uzyskane kształty indukcyjności własnych są zbliżone do tych wyznaczonych na bazie obliczeń połowych. Uzyskano nieco mniejsze wartości indukcyjności w położeniach współosiowych. Duży wpływ na to ma sam sposób łączenia blach. W badanym przypadku blachy stojana były łączone metodą spawania (rys. 18).

Indukcyjność własna położenia niewspółosiowego pasma Ph1 jest zauważalnie mniejsza niż w pasmach Ph2 i Ph3, co jednocześnie jest zgodne z wynikami uzyskanymi z obliczeń. Indukcyjność własna położenia współosiowego pasma Ph1 jest jednak nieco większa niż w pozostałych pasmach. Różnica ta zwiększa się w przypadku zmniejszania się grubości szczeliny powietrznej.

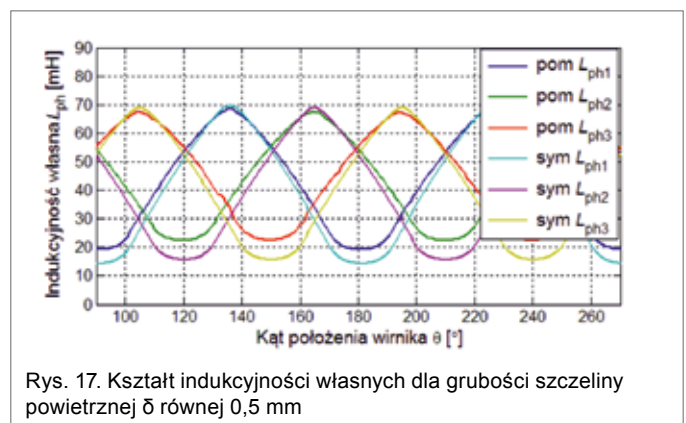
Wyznaczone na podstawie pomiarów współczynniki stosunku indukcyjności położenia charakterystycznych  $k = L_a/L_u$  zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 15. Kształt indukcyjności własnych dla grubości szczeliny powietrznej  $\delta$  równej 0,3 mm



Rys. 16. Kształt indukcyjności własnych dla grubości szczeliny powietrznej  $\delta$  równej 0,4 mm



Rys. 17. Kształt indukcyjności własnych dla grubości szczeliny powietrznej  $\delta$  równej 0,5 mm

Zauważalny spadek wartości współczynnika  $k$  dla szczeliny powietrznej  $\delta = 0,5 \text{ mm}$  spowodowany był przesunięciem się pakietu blach wirnika o kilka milimetrów w porównaniu do pozostałych wirników.

### Wnioski

Grubość szczeliny powietrznej jest w przypadku maszyn SRM jednym z istotniejszych parametrów projektowych. Jeszcze większego znaczenia nabiera ona w przypadku zastosowania konstrukcji o niesymetrii magnetycznej i elektrycznej. W przypadku stosowania relatywnie dużych grubości szczelin niesymetria magnetyczna jest do zaakceptowania. Jednak w przypadku zastosowania małej wartości szczeliny powietrznej dysproporcje w charakterystykach statycznych stają się już znaczące. To oczywiście wpływa na przebiegi czasowe prądów i wytwarzanego momentu elektromagnetycznego. Wykonane pomiary indukcyjności własnej potwierdziły wyniki obliczeń





Rys. 18.  
Widok  
stojana  
z widocznym  
sposobem  
łączenia  
blach

symulacyjnych, że zmniejszanie grubości szczeliny powietrznej  $\delta$  silnika zwiększa dysproporcje pomiędzy poszczególnymi pasmami.

### Literatura

- [1] ANAWAR M.N., HUSAIN I., RADUN A.V.: *A comprehensive desing methodology for switched reluctance machines*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November/December 2001, pp. 1684–1692.
- [2] KRISHNAN R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.
- [3] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Stanowisko do badań silników reluktancyjnych przelączalnych z zastosowaniem procesora sygnałowego*, Maszyny elektryczne, Branżowy Ośrodek Ba-

dawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, nr 69, 2004, s. 7–12.

- [4] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Badanie wpływu grubości szczeliny powietrznej na właściwości silników reluktancyjnych przelączalnych w oparciu o badania polowe*. Maszyny elektryczne, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, nr 75, 2006, s. 195–200.
- [5] FLUX 10: User's guide, Groupe Cedrat.

Praca naukowa wykonana w ramach projektu badawczego własnego NN511 312440.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania: FLUX, AUTODESK INVENTOR zakupionych w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 „Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.

dr inż. Piotr Bogusz, dr inż. Mariusz Korkosz,  
dr inż. Jan Prokop – Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Politechnika Rzeszowska w Rzeszowie;  
e-mail: pbogu@prz.edu.pl, mkosz@prz.edu.pl,  
jprokop@prz.edu.pl

artykuł recenzowany