

Janusz Hetmańczyk¹, Krzysztof Krykowski¹,
Roman Miksiewicz², Zbigniew Gałuszkiewicz³, Dawid Makiela¹

^{1,2} Politechnika Śląska, Gliwice

³ Megatech, Kalety

PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI WYSOKOOBROTOWEGO SILNIKA PM BLDC ZE STOJANEM BEZŻŁOBKOWYM I UŻŁOBKOWANYM

PROPERTIES COMPARISON OF HIGH-SPEED PM BLDC MOTOR WITH SLOT AND SLOTLESS STATOR

Abstract: In the paper the authors compare properties of high-speed brushless DC motor with slots and slotless stator. The authors take in consideration open-slots, half-open slots, closed slots and slotless construction of stator. Depending on type of slots motor have different parameters like electromotive force EMF, ripple and cogging torque. As a result of analyse the authors show waveforms of electromotive force EMF end distribution of induction diagram. Maxwell software is used for simulation.

1. Wprowadzenie

Przy projektowaniu wysokoobrotowego bezszczotkowego silnika prądu stałego pojawia się szereg niekorzystnych zjawisk, które znacznie komplikują konstrukcję silnika, a mianowicie: następuje wzrost strat w obwodach magnetycznych i elektrycznych, spowodowanych wyższą częstotliwością prądów niż w typowych konstrukcjach. Występują momenty zaczepowe o charakterze reluktancyjnym, pojawia się wpływ histerezy czujników położenia wirnika a na wirnik silnika działają duże siły odśrodkowe [5,6,7]. W pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu kształt żłobków stojana na właściwości wysokoobrotowego bezszczotkowego silnika prądu stałego.

2. Wpływ żłobkowania na właściwości wysokoobrotowego silnika PM BLDC

Stosując metodę elementów skończonych (FEM) porównano 4 sposoby uzwojenia silnika, a mianowicie uzwojenia o żłobkach otwartych, półotwartych, zamkniętych i bezżłobkowych. Modele obliczeniowe oraz przebiegi napięć fazowych zarejestrowanych dla pracy generatorowej przedstawiono na rysunkach 1 - 4. Wszystkie wyniki podano dla tej samej długości maszyny, tej samej liczby zwojów oraz prędkości obrotowej. Badania symulacyjne oraz wyniki badań laboratoryjnych wykazały, że najkorzystniejsze właściwości ma silnik z uzwojeniem o żłobkach półotwartych (rys. 2). Negatywnie zostało ocenione rozwiązanie ze

żłobkami otwartymi (rys. 1b), które charakteryzowało się zbyt dużymi momentami zaczepowymi reluktancyjnymi oraz rozwiązanie ze żłobkami zamkniętymi (rys. 3), które ze względu na duże wartości indukcyjności fazowych nie nadaje się do zastosowania w silnikach wysokoobrotowych pracujących z dużą częstotliwością łączeń [1].

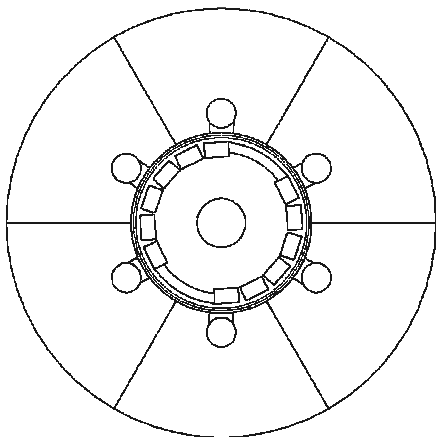
Silnik z uzwojeniem bezżłobkowym charakteryzował się natomiast brakiem momentów reluktancyjnych i bardzo małymi wartościami indukcyjności fazowych. Wadą jego jest jednak mała wartość współczynnika wzbudzenia, orientacyjnie dwa razy mniejsza niż w silniku ze żłobkami półotwartymi. Ta niekorzystna właściwość spowodowała, że w pierwszej opracowanej konstrukcji prototypowego modelu silnika zrezygnowano z takiego rozwiązania (Tab.1) [4].

Tabela 1. Parametry wysokoobrotowego silnika PM BLDC wyznaczone w programie Maxwell

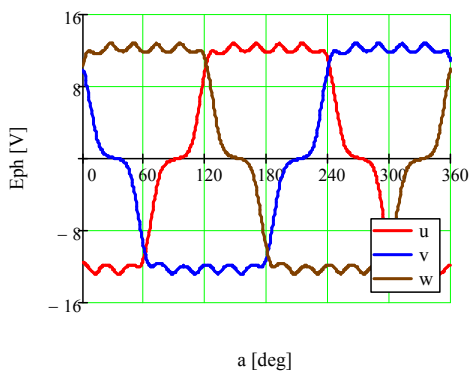
Rodzaj uzwojenia	E_p	$2E_{s\Delta}$	K_{fp}	T_{cogm}	L_s	R_s
	V	V	$\frac{mNm}{A}$	mNm	μH	m Ω
Z żłobkami otwartymi	11,7	1,0	2,2	0,07	7.6	10
Z żłobkami półotwartymi	11,9	3,4	2,3	0,016	9.0	10

Z żłobkami zamkniętymi	10,5	3,0	2,0	0,001	48.4	10
Bez-żłobkowe	4,8	2,2	0,9	0,0017	4.0	10

a)

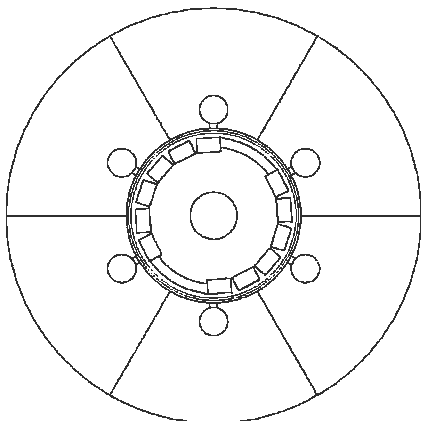


b)

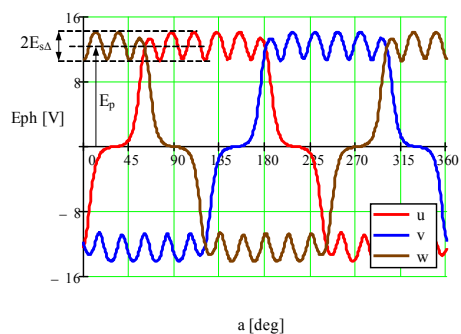


Rys. 1. Model silnika ze żłobkami otwartymi: a) budowa; b) przebiegi napięć fazowych

a)

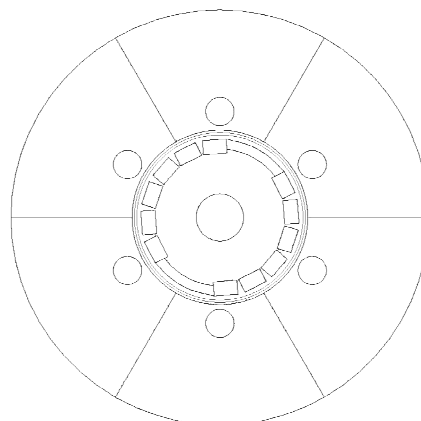


b)

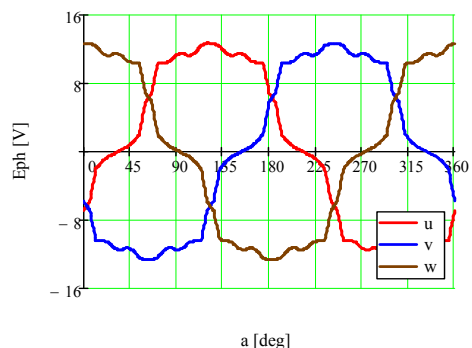


Rys. 2. Model silnika ze żłobkami półotwartymi: a) budowa; b) przebiegi napięć fazowych

a)

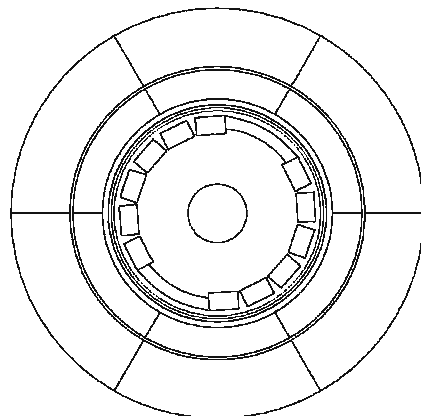


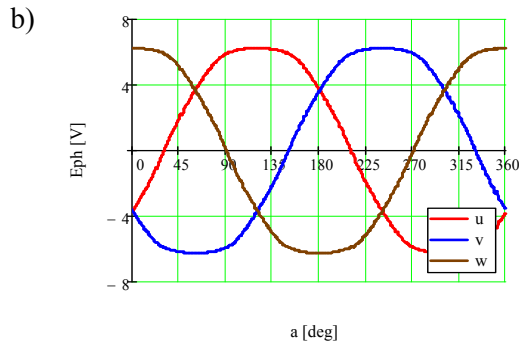
b)



Rys. 3. Model silnika ze żłobkami zamkniętymi: a) budowa; b) przebiegi napięć fazowych

a)

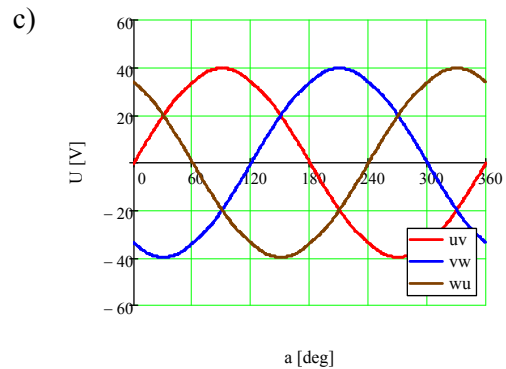
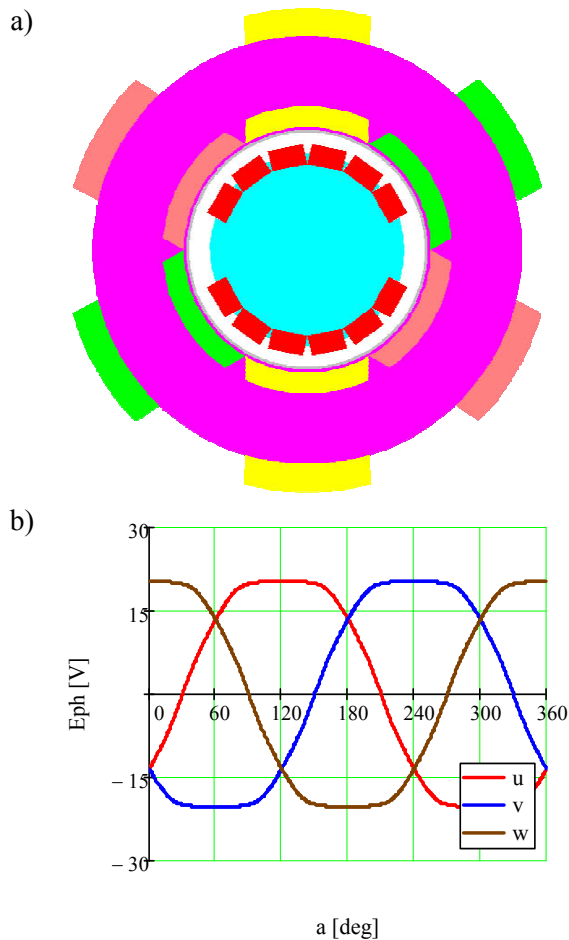




Rys. 4. Model silnika bezzłobkowego: a) budowa; b) przebiegi napięć fazowych

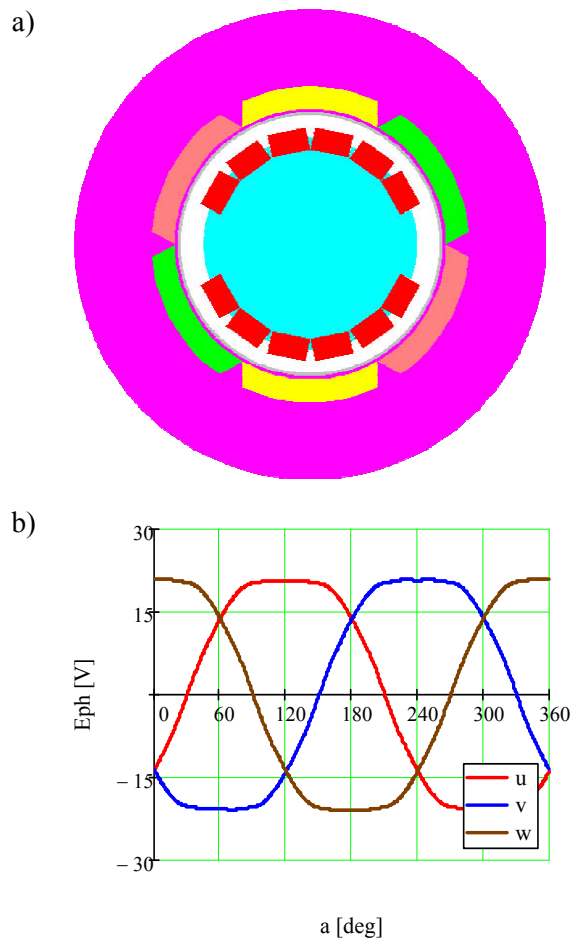
3. Silnik bezzłobkowy

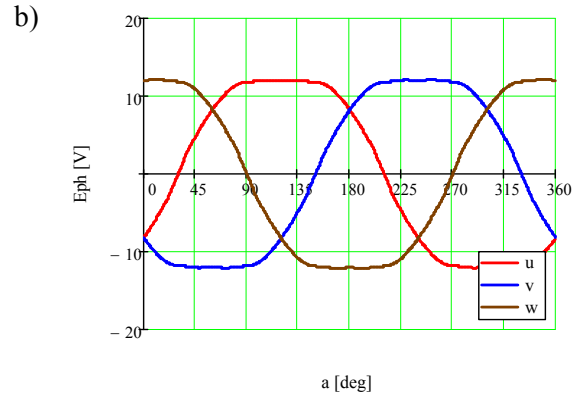
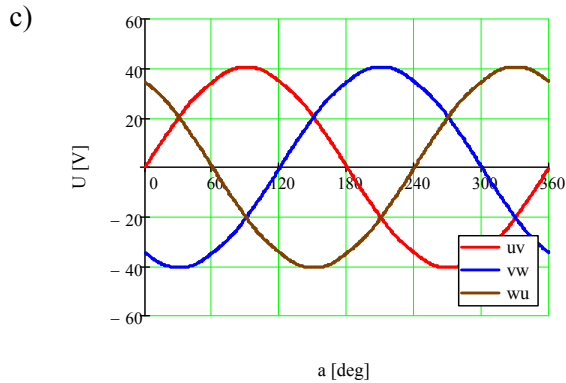
W trakcie prac nad budową modeli silnika o złołkach półotwartych pojawiły się jednak istotne trudności technologiczne. Polegały one na tym, że w rdzeniu silnika zastosowano materiały amorficzne twarde i kruche [3].



Rys. 5. Silnik bezzłobkowy z uzwojeniem toroidalnym o liczbie zwojów $N = 6$: a) model komputerowy; b) napięcia fazowe; c) napięcia międzyfazowe

Powoduje to istotne utrudnienia przy konstrukcji magnetowodu i może uniemożliwić seryjną produkcję silników o złołkach półotwartych. W tej sytuacji zdecydowano się powtórnie rozważyć koncepcję silnika bezzłobkowego.



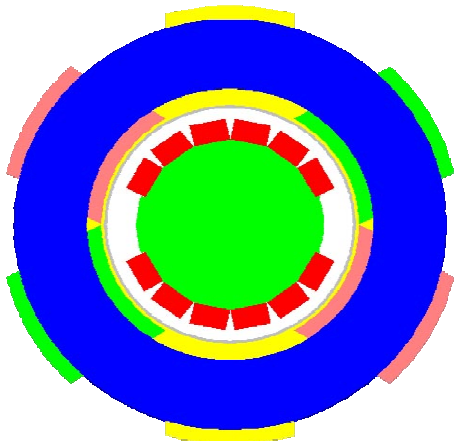


Rys. 6. Silnik bezszczotkowy z uzwojeniem w postaci cylindra o liczbie zwojów $N = 6$: a) model komputerowy; b) napięcia fazowe; c) napięcia międzyfazowe

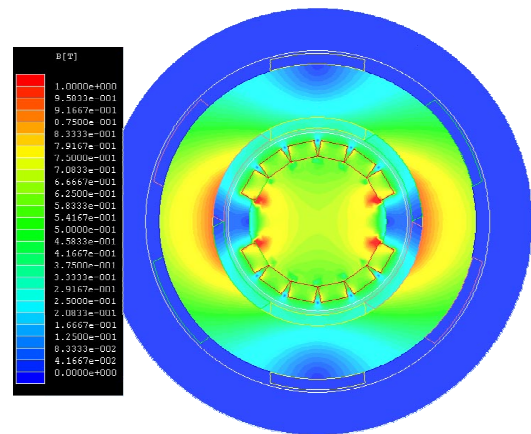
Zaproponowano przy tym, by liczbę zwojów zwiększyć dwukrotnie i w ten sposób uzyskać wymaganą wartość strumienia skojarzonego, a przez to również siły elektromotorycznej. W analizie przyjęto długość silnika $L = 30$ mm; liczba zwojów $N = 6$ oraz zastosowano 6 magnesów płaskich (segmentowych) o grubości 3 mm. Rozważano dwa rodzaje uzwojeń bezszczotkowych. Uzwojenie o postaci pierścienia wewnętrznego (rys. 5) oraz uzwojenie toroidalne (rys. 6).

Z obliczeń wynika, że oba rozwiązania bezszczotkowe z uzwojeniem toroidalnym i bezszczotkowe z uzwojeniem o kształcie wewnętrznego stojana charakteryzują się podobnym kształtem i podobnymi wartościami siły elektromotorycznej, przy czym rozwiązanie z uzwojeniem toroidalnym wydaje się łatwiejsze do realizacji, dlatego zdecydowano się dodatkowo przeanalizować wybrane przypadki rozwiązania z uzwojeniem toroidalnym. Obliczenia wykonano dla pracy prądnicowej przy prędkości obrotowej $n = 100\,000$ obr/min. Moment zaczepowy, w tym rozwiązaniu praktycznie nie występuje.

a)



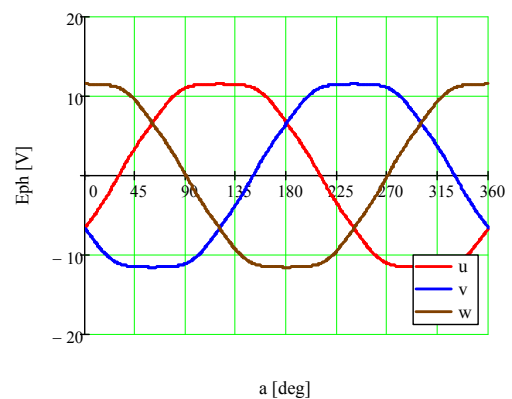
c)

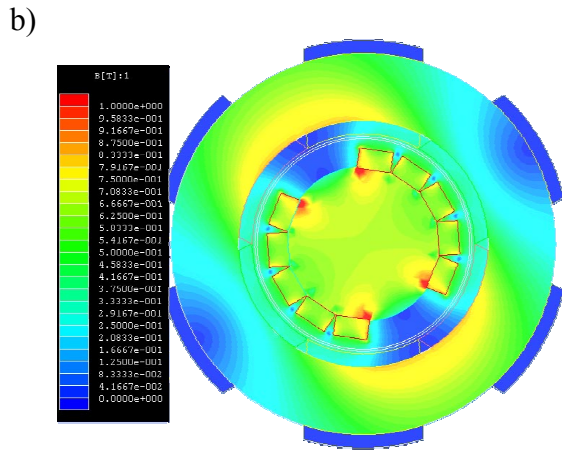


Rys. 7. Silnik bezszczotkowy z uzwojeniem toroidalnym o liczbie zwojów $N = 3$: a) model komputerowy; b) napięcia fazowe; c) rozkład indukcji w uzwojeniu

Na rysunku 7a przedstawiono model obliczeniowy silnika o zredukowanej liczbie zwojów $N = 3$ i niezmiennych pozostałych parametrach.

a)

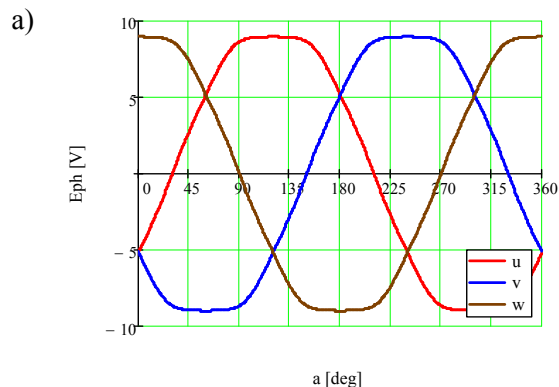




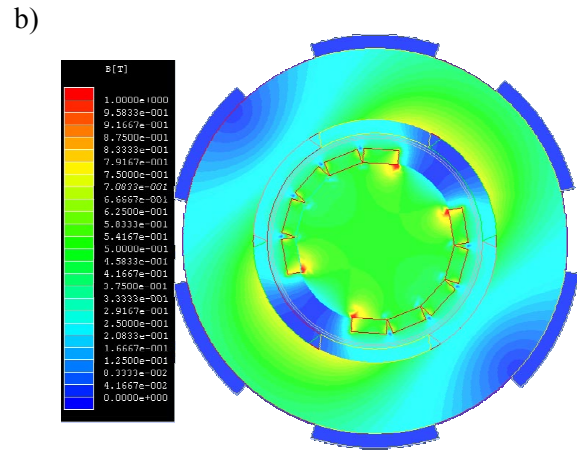
Rys. 8. Silnik bezszczotkowy z uzwojeniem toroidalnym o liczbie zwojów $N = 3$ oraz 5 magnesów: a) napięcia fazowe; b) rozkład indukcji w uzwojeniu

W kolejnym przypadku symulacje wykonano dla modelu silnika o liczbie zwojów $N = 3$ i zmniejszonej ilości magnesów do 5 (rys. 8). Magnesy umieszczono na wałku o średnicy wewnętrznej 22 mm, odpowiednio zmieniono grubości uzwojeń oraz rdzenia stojana.

Następnie sprawdzono wpływ grubości magnesów na właściwości konstrukcji. Symulacje wykonano dla modelu silnika o liczbie zwojów $N = 3$ oraz 5 magnesach o grubości 2 mm. Jak widać dla tego przypadku (rys. 9) wartości napięcia fazowego są teraz mniejsze. W celu zwiększenia wartości napięcia należałoby zwiększyć liczbę zwojów do 4 lub zwiększyć długość pakietu blach stojana. W przypadku tym obwód magnetyczny jest również mniej wykorzystany (rys. 9b).

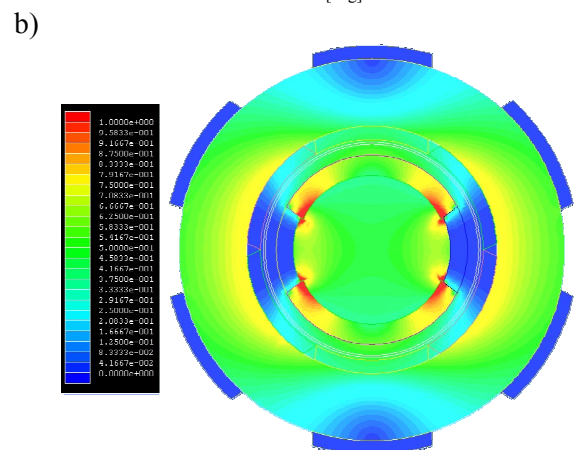
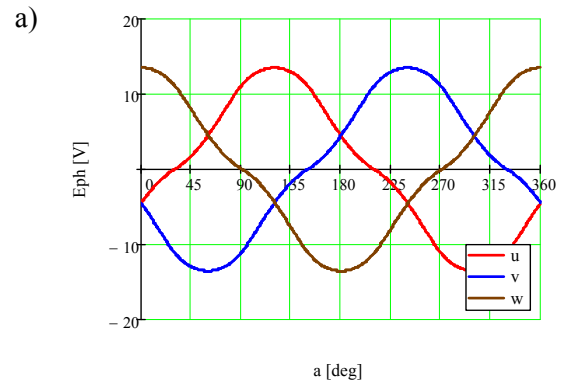


Analizowano również stosowanie magnesów płaskich oraz magnesów w kształcie łuku magnesowanego równoległe. Na ostatnim rysunku przedstawiono wyniki symulacji w przypadku zastosowania magnesów w postaci pierścienia, magnesowanego równoległe.



Rys. 9. Silnik bezszczotkowy z uzwojeniem toroidalnym o liczbie zwojów $N = 3$ oraz 5 magnesów o grubości 2 mm: a) napięcia fazowe; b) rozkład indukcji w uzwojeniu

Z przebiegów fazowych siły elektromotorycznych widać, że nie są one przedziałami stałe (jak dla magnesów płaskich). Spowoduje to zwiększenie pulsacji momentu zaczepowego [2].



Rys. 10. Silnik bezszczotkowy z uzwojeniem toroidalnym z magnesem w postaci pierścienia: a) napięcia fazowe; b) rozkład indukcji w uzwojeniu

4. Podsumowanie. Wnioski końcowe

Z przeprowadzonej analizy wynika:

- w konstrukcji wysokoobrotowego silnika PM BLDC należy stosować rozwiązanie z żłobkami półotwartymi lub beżłobkowe.
- rozwiązanie z żłobkami otwartymi i zamkniętymi nie nadają się do zastosowań w wysokoobrotowych silnikach PM BLDC.
- z elektrycznego punktu widzenia oba rozwiązania, a mianowicie rozwiązanie z uzwojeniem toroidalnym (rys. 5) i uzwojeniem z uzwojeniem w kształcie cylindra wewnątrz stojana (rys. 6) są równorzędne.
- rozwiązanie z uzwojeniem toroidalnym jest nieco łatwiejsze w realizacji.
- stosowanie magnesów łukowych magnesowanych równolegle (rys. 10) jest znacznie mniej korzystne, niż rozwiązanie z magnesami sztabkowymi tak rozmieszczonymi na obwodzie, by mogły zastępować magnesowany radialnie.
- do dalszych prac projektowych i laboratoryjnych zaleca się stosowanie uzwojenia beżłobkowego najlepiej z uzwojeniem toroidalnym.

Praca została wykonana w ramach projektu MNiSW - Fundusze Strukturalne nr POIG.01.03.01-00-058/08

5. Literatura

- [1]. Gałuszkiewicz Z, Krykowski K, Miksiewicz R., Hetmańczyk J.: *Budowa i realizacja wysokoobrotowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86 NR 2/2010.
- [2]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2002.
- [3]. Krykowski K., Miksiewicz R., Gałuszkiewicz Z., Hetmańczyk J., Makiela D.: *Projekt i badania wysokoobrotowego silnika BLDC z rdzeniem amorficznym*. Zeszyty Problemowe - BOBRME Komel - Maszyny Elektryczne Nr 87, Katowice 2010.
- [4]. Krykowski K., Hetmańczyk J., Gałuszkiewicz Z., Miksiewicz R.: *Computer analysis of high-speed PM BLDC motor properties*. XXI Symposium Elec-

tronic Phenomena in Nonlinear Circuits - EPNC 2010 Dortmund and Essen 2010

- [5]. Noguchi T., Kano M.: *Development of 150000 obr/min, 1.5 kW Permanent Magnet Motor for Automotive Supercharger*. PEDS2007-Bangkok, 2A-03 (2007)
- [6]. Rahman M.A., Chiba A., Fukao T., *Super high speed electrical machines – summary*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 6-10, 2004, vol. 2, 1272-1275
- [7]. Zwysig C., Duerr M., Hassler D., Kolar J.W.: *An Ultra-High-Speed, 500000 rpm, 1 kW Electrical Drive System*. Power Conversion Conference - PCC'07, Nagoya 2007, 1577 – 1583

Autorzy

dr inż. Janusz Hetmańczyk,
Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki,
Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice,
E-mail: Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl

mgr inż. Zbigniew Gałuszkiewicz,
Megatech, ul.ks. P. Drozdka 25, 42-660 Kalety,
E-mail: megatech@megatech.org.pl

dr hab. inż. Krzysztof Krykowski, prof. Pol. Śl,
Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki,
Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice,
E-mail: Krzysztof.Krykowski@polsl.pl

dr inż. Roman Miksiewicz,
Politechnika Śląska, Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych, ul. Akademicka 10a,
44-100 Gliwice,
E-mail: Roman.Miksiewicz@polsl.pl

mgr inż. Dawid Makiela,
Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki,
Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice,
E-mail: Dawid.Makiela@polsl.pl