

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów
Krzysztof Warzocha, Yasa Motors Poland, Mielec

ANALIZA WPLYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW NA WŁAŚCIWOŚCI SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI PRZEZNACZONEGO DO NAPĘDU MAŁEJ MOCY

THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF SELECTED PARAMETERS ON THE PERMANENT-MAGNET MOTOR PROPERTIES DEDICATED TO THE LOW POWER DRIVE

Streszczenie: Artykuł dotyczy projektu silnika z magnesami trwałymi małej mocy. W przypadku napędów małej mocy pracujących w sposób ciągły, sprawność ogólna układu napędowego odrywa istotną rolę. Na przykładzie klasycznego rozwiązania 12/8 przeprowadzono analizę wpływu konfiguracji uzwojeń (gwiazda, trójkąt) oraz sposobu sterowania pracą (BLDCM, PMSM) na właściwości maszyny. Wskazano rozwiązanie zapewniające maksymalną sprawność.

Abstract: This article refers to the low power permanent-magnet motor project. In the case of low power drives operating in a continuous mode, overall efficiency of the electric drive system plays an important role. On the example of the classic 12/8 solution, conducted an analysis of influence of winding configurations (star, delta) and drive technics (BLDC, PMSM) on the machine properties. Solution providing maximum efficiency was pointed out.

Słowa kluczowe: silnik z magnesami trwałymi, trójkąt, gwiazda, BLDCM, PMSM
Keywords: brushless motor with permanent magnet, delta, star, BLDCM, PMSM

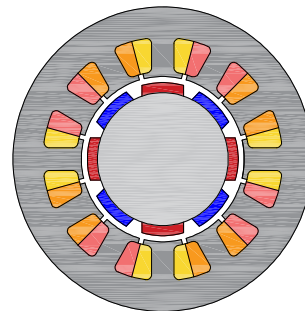
1. Wstęp

Wprowadzenie zastrzonych wymagań w zakresie efektywności energetycznej wymusza stosowanie rozwiązań konstrukcyjnych o podwyższonej sprawności [1-5]. Niewątpliwie silniki z magnesami trwałymi zaliczają się do maszyn elektrycznych o wysokiej sprawności przetwarzania energii [3-5]. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu wysokoenergetycznych magnesów trwałych (najczęściej neodymowych). Ostatnie lata pokazują, że technika wytwarzania magnesów trwałych z pierwiastków ziem rzadkich osiąga powoli pułap swoich możliwości. Obecnie dostępne są już magnesy neodymowe klasy N55. Jednak tylko w najniższej klasie energetycznej (80°C). Nie jest to klasa szczególnie przydatna w maszynach elektrycznych. Zazwyczaj wymagania co do warunków pracy magnesów trwałych są znacznie wyższe. Wraz ze wzrostem klasy temperaturowej magnesów trwałych i ich parametrów rośnie też ich cena. To w konsekwencji wpływa finalnie na koszt produkcji (szczególnie masowej). Z tego też względu na etapie projektowania maszyny trzeba zwracać uwagę nie tylko na parametry elektryczne, ale również na koszt jej produkcji.

W artykule dokonano analizy wpływu konfiguracji uzwojenia oraz sposobu jego zasilania na właściwości bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi. Przy narzuconych wymiarach geometrycznych, parametrach materiałowych, określono rozwiązanie zapewniające największą sprawność ogólną układu napędowego.

2. Analizowana konstrukcja

Analizowana konstrukcja bezszczotkowa z magnesami trwałymi została pokazana na rys. 1. Jest to klasyczne rozwiązanie 12/8.



Rys. 1. Geometria analizowanej konstrukcji 12/8

W Tabeli I podano najistotniejsze wymagania i ograniczenia geometryczne.

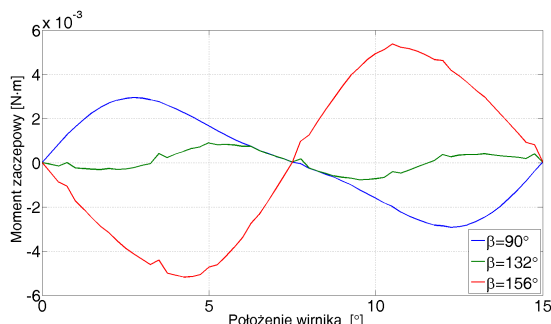
Tabela I. Wymagania i ograniczenia geometryczne projektowanej konstrukcji

Parametr	Wartość
Napięcie zasilające	300 DC/ 230 AC
Prędkość znamionowa	3000 obr/min
Moc znamionowa	100 W
Materiał magnetyczny stojana	Blacha prądnicowa 0.35 mm
Magnesy trwałe	N42 H
Grubość magnesów	2 mm
Srednica zewnętrzna stojana	60 mm
Długość pakietu żelaza	38 mm
Szczelina powietrzna	2.2 mm
Uzwojenia stojana	skupione

Skupione uzwojenia silnika przewidziano do konfiguracji w gwiazdę oraz trójkąt. Przy doborze liczby zwojów N_b przypadających na jeden biegun stojana uwzględniano przekrój drutu nawojowego oraz współczynnik wypełnienia żłobka. Współczynnik wypełnienia żłobka starano się utrzymywać na możliwie jak największym poziomie.

3. Analiza wpływu rozpiętości kątowej magnesów trwałych na moment zaczepowy oraz napięcie indukowane

Rozpiętość kątową magnesów trwałych β zmieniano w zakresie od 90° do 156° ze skokiem, co jeden stopień. Na rysunku 2 pokazano zależność momentu zaczepowego w funkcji kąta położenia wirnika dla trzech wybranych rozpiętości kątowych magnesu trwałego tj. 90° , 132° i 156° .

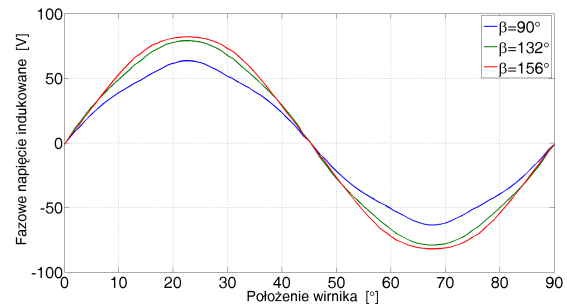


Rys. 2. Zależność momentu zaczepowego w funkcji kąta położenia wirnika dla $\beta=var$

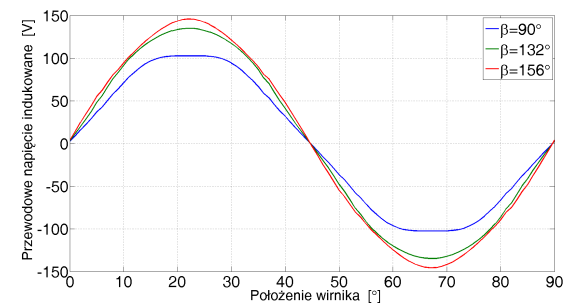
Z uwagi na dużą szczelinę powietrzną (2.2 mm) w analizowanej konstrukcji rozpiętość kątowa nie ma większego wpływu na wartość momentu zaczepowego. Minimalną wartość amplitudy wytwarzanego momentu zaczepowego uzyska-

no przy rozpiętości kątowej magnesów wynoszącej 132° .

Napięcie indukowane wyznaczono na bazie modelu połowo-obwodowego dla przypadku uzwojeń skojarzonych w gwiazdę przy prędkości obrotowej 1000 obr/min. Zależność napięcia indukowanego w funkcji kąta położenia wirnika przy $\beta=var$ pokazano na rysunkach 3-4 (rys.3 – napięcie fazowe, rys.4- przewodowe).



Rys. 3. Zależność fazowego napięcia indukowanego w funkcji położenia wirnika dla $\beta=var$



Rys. 4. Zależność przewodowego napięcia indukowanego w funkcji kąta położenia wirnika dla $\beta=var$

Kształt napięcia fazowego jest bardziej odpowiedni dla zasilania silnika polem wirującym (PMSM) w przypadku konfiguracji uzwojeń w trójkąt. Napięcie przewodowe przy małej rozpiętości kątowej magnesu trwałego jest zbliżone do kształtu trapezoidalnego. Wraz ze wzrostem rozpiętości kątowej kształt napięcia indukowanego zbliża się do sinusoidalnego, co jest preferowane przy pracy synchronicznej z polem wirującym.

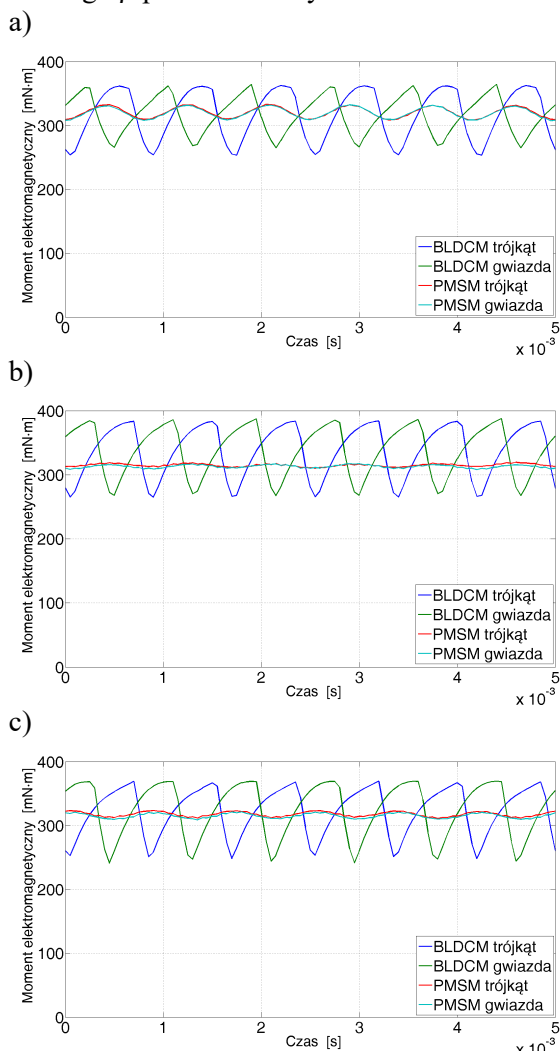
4. Analiza wpływu konfiguracji uzwojeń silnika na jego parametry

Dla każdej z trzech rozpiętości kątowej magnesu trwałego dobierano liczbę zwojów tak, aby uzyskać wymaganą moc silnika przy prędkości 3000 obr/min dla następujących przypadków:

- PMSM oraz konfiguracji uzwojenia stojana w gwiazdę,
- PMSM oraz konfiguracji uzwojenia stojana w trójkąt,
- BLDCM oraz konfiguracji uzwojenia stojana w gwiazdę,
- BLDCM oraz konfiguracji uzwojenia stojana w trójkąt.

Wszystkie obliczenia przeprowadzono przy założeniu stałej prędkości obrotowej wynoszącej 3000 obr/min oraz założeniu, że w obwodzie pośredniczącym układu zasilającego napięcie jest stałe i wynosi 300 V.

Przebieg momentu elektromagnetycznego dla analizowanych rozpiętości kątowych magnesu trwałego β pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Zależność momentu elektromagnetycznego w funkcji czasu dla rozpiętości kątowych a) $\beta=90^\circ$; b) $\beta=132^\circ$; c) $\beta=156^\circ$

5. Zestawienie uzyskanych wyników

W tabelach II-IV umieszczono wybrane wyniki obliczeń numerycznych związanych z poszczególnymi rozpiętościami kątowymi magnesu trwałego oraz sposobem zasilania i konfiguracją uzwojeń stojana.

Tabela II. Wybrane wyniki obliczeń numerycznych dla $\beta=90^\circ$

Parametr	PMSM Δ	PMSM Y	BLDCM Δ	BLDCM Y
Liczba zwojów na biegun	340	197	404	234
Rezystancja fazowa [Ω]	48.6	15.8	73	23.4
Masa całkowita [kg]	0.61	0.61	0.6	0.61
Wartość skuteczna prądu fazowego	0.25	0.43	0.22	0.39
Gęstość prądu [A/mm]	5.6	5.4	6.1	5.9
Sprawność ogólna [%]	80.5	80.8	79.9	80.1
Tętnienia momentu [%]	3.8	3.9	17.2	15.7
Stała momentowa [N·m/A]	0.85	0.85	0.84	0.84
Moc maksymalna [W]	271	275	210	216

Tabela III. Wybrane wyniki obliczeń numerycznych dla $\beta=132^\circ$

Parametr	PMSM Δ	PMSM Y	BLDCM Δ	BLDCM Y
Liczba zwojów na biegun	275	157	340	197
Rezystancja fazowa [Ω]	31.3	9.9	49	15.8
Masa całkowita [kg]	0.63	0.63	0.62	0.63
Wartość skuteczna prądu fazowego	0.24	0.42	0.2	0.35
Gęstość prądu [A/mm]	4.2	4.1	4.5	4.3
Sprawność ogólna [%]	83.3	83.4	83.1	83.2
Tętnienia momentu [%]	1.5	1.5	17.7	17.8
Stała momentowa [N·m/A]	0.87	0.88	0.87	0.87
Moc maksymalna [W]	435	449	323	329

Tabela IV. Wybrane wyniki obliczeń numerycznych dla $\beta=156^\circ$

Parametr	PMSM Δ	PMSM Y	BLDCM Δ	BLDC Y
Liczba zwojów na biegun	263	152	329	190
Rezystancja fazowa [Ω]	29.9	9.6	47.4	15.3
Masa całkowita [kg]	0.63	0.63	0.62	0.63
Wartość skuteczna prądu fazowego	0.24	0.41	0.2	0.34
Gęstość prądu [A/mm]	4.2	4.0	4.5	4.3
Sprawność ogólna [%]	83.3	83.5	83.2	83.4
Tętnienia momentu [%]	1.9	2	18.9	19.8
Stała momentowa [N·m/A]	0.88	0.88	0.87	0.88
Moc maksymalna [W]	475	475	340	348

W przypadku analizowanej konstrukcji z uzwojeniami skupionymi o rozmieszczeniu pokazanym na rysunku 1 wpływ sposobu zasilania uzwojeń stojana oraz rodzaju konfiguracji uzwojeń w analizowanym punkcie pracy nie ma większego wpływu na sprawność przy wymaganej mocy wyjściowej.

6. Podsumowanie

Uzyskane wyniki pokazują, że różnica w sposobie zasilania czy też sposobie połączenia uzwojeń stojana w przypadku analizowanej konstrukcji o dużej szczeliny powietrznej i małej mocy wyjściowej nie ma większego wpływu na maksymalną sprawność układu napędowego. Nieznaczną przewagę zapewnia zasilanie synchroniczne z polem wirującym. Jednak różnice w maksymalnych sprawnościach są praktycznie mało istotne. Istotna różnica występuje w przeciążalności maszyny oraz tętnieniach momentu. Przy zasilaniu synchronicznym z polem wirującym tętnienia momentu są znacznie mniejsze, a przeciążalność większa. Teoretycznie największą sprawność uzyskano dla zasilania synchronicznego z polem wirującym przy połączeniu uzwojenia w gwiazdę oraz

o rozpiętości magnesu trwałego wynoszącego 156° . Należy zauważyć, że wzrost rozpiętości kątowej magnesu trwałego powyżej 132° nie wpływa praktycznie na poprawę sprawności maksymalnej silnika. Istotna przewaga zasilania synchronicznego z polem wirującym będzie się ujawniała przy obniżaniu prędkości obrotowej. Zastosowanie regulacji PWM czy też klasycznego regulatora prądowego wpłynie na pogorszenie sprawności ogólnej silnika pracującego jako BLDC.

7. Literatura

- [1]. K. Dąbała, R. Sulima "Ocena wpływu zastosowania wysokosprawnych silników elektrycznych na oszczędność energii", *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93, Nr 2/2017, str. 26-29, 2017.
- [2]. D. Szczęsny, G. Drabik "Silniki wysokosprawne z klatką miedzianą", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 78, str. 79-87, 207.
- [3]. L. Antal, M. Antal "Właściwości eksploatacyjne silników synchronicznych o rozruchu bezpośrednim wzbudzanych magnesami trwałymi", *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 64, Studia i Materiały*, nr 30, str. 21-30, 2010.
- [4]. Sz. Lipiński, J. Zawilak "Energooszczędne silniki elektryczne w napędach pomp wirowych", *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 70, Studia i Materiały*, nr 34, str. 325-334, 2014.
- [5]. P. Dukalski, S. Gawron, A. Dzikowski "Wysokosprawne silniki z magnesami trwałymi w napędach górniczych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2, str. 77-83, 2014.

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.edu.pl
 dr hab. inż. Mariusz Korkosz
mkosz@prz.edu.pl
 dr hab. inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
 mgr inż. Krzysztof Warzocha,
krzysztof.warzocha@yasa-motors.com,
 YASA Motors Poland, ul. W. Polskiego 20
 Mielec