

Tadeusz Glinka, Emil Król, Andrzej Białas, Tomasz Wolnik
BOBRME KOMEL, Katowice

SILNIKI TARCZOWE Z MAGNESAMI TRWAŁYMI JAKO NAPĘD POJAZDÓW WOLNOBIEŻNYCH - PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH

PERMANENT MAGNET DISK MOTORS AS SLOW SPEED DRIVE - REVIEW

Abstract: Electrical motors are increasingly being used as a drive motor vehicles and aircraft such as gliders, powered gliders and unmanned aircraft. Looking for a solution of the electrical machine characterized as the biggest moment of the unit weight were taken into account disc motors with permanent magnets. The article present selected construction of axial flux motors which could be used as drive motor vehicles or aircraft.

1. Wstęp

Poszukując rozwiązania maszyny elektrycznej o minimalnej masie przy założonych parametrach należy wziąć pod uwagę silniki tarczowe. Istotną zaletą tego typu maszyn jest ograniczona długość osiowa, która decyduje o możliwości stosowania tych silników w pojazdach samochodowych oraz statkach powietrznych. Silniki elektryczne stanowiące napęd pojazdów drogowych lub szynowych powinny charakteryzować się jak największym momentem z jednostki masy lub jak największą mocą z jednostki objętości. Minimalizacja masy silnika elektrycznego jest istotna, gdyż wpływa to na masę pojazdu i na energię zużywaną na ruch pojazdu. Problem masy silnika jest jeszcze bardziej istotny w statkach powietrznych, takich jak: parolotnie, samoloty bezzałogowe, motolotnie. Pojazdy drogowo wymagają dużego momentu chwilowego np. przy ruszaniu na miękkim podłożu lub wjeżdżaniu na krawężniki podczas parkowania. Przy pokonywaniu przeszkód konieczny jest moment kilkakrotnie większy od tego rozwijanego przez napęd w czasie jazdy ustalonej pojazdu po płaskim i utwardzonym terenie. Pojazdy wolnobieżne wykorzystujące wysokoobrotowe silniki walcowe wymagają stosowania dodatkowych przekładni mechanicznych oraz sprzęgieł. Komplikuje to układ napędowy, zmniejsza sprawność, podwyższa cenę i obniża niezawodność pracy. To sprawia, że coraz częściej stosuje się wolnoobrotowe silniki tarczowe zabudowane bezpośrednio w kołach jezdnych.

Obecnie na rynku dominującymi są maszyny o strumieniu promieniowym, których proces projektowania i produkcji został poznany w przeciągu kilku ostatnich dziesięcioleci. Dla

niektórych zastosowań, gdzie czynnikiem ograniczającym jest na przykład długość osiowa maszyny, trafniejszym wyborem mogą być silniki o strumieniu osiowym.

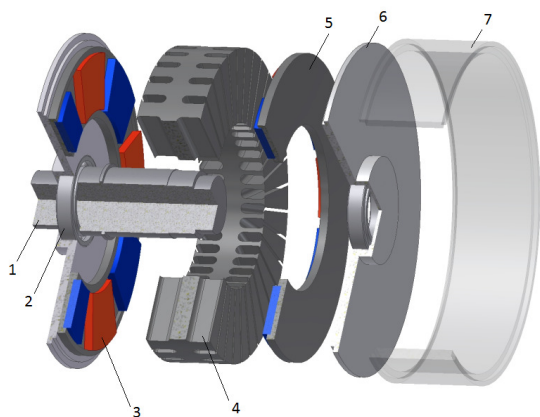
Silniki tarczowe mogą być wykonane w wielu różnych konfiguracjach różniących się geometrią maszyny, jak również sposobem wykonania poszczególnych jej elementów. Wyróżnia się maszyny, w których wirnik w postaci stalowej tarczy z magnesami jest elementem zewnętrznym, bądź też wewnętrznym. Rdzeń stojana może być uźłobkowany, bezźłobkowy lub też silnik może być wykonany jako bezrdzeniowy. Struktura maszyny zależy przede wszystkim od rodzaju zastosowania i pożądaných właściwości. W niniejszym artykule przedstawiono charakterystykę wybranych typów silników tarczowych z magnesami trwałymi. Omówiono silnik typu Torus S -NS, silnik typu Torus S -NN, bezźłobkowy silnik typu Torus NS, silnik z wirnikiem wewnętrznym, silnik bezrdzeniowy oraz silnik z biegunami wydrotnymi w stojanie.

2. Torus S

Obwód elektromagnetyczny tego typu silnika składa się z dwóch tarcz wirnika i umieszczonego pomiędzy nimi stojana. Rdzeń stojana wykonany jest z warstwowo nawiniętego paska blachy, w którym wykonane są żłobki. Wirnik natomiast składa się z dwóch stalowych tarcz, do których przymocowane są magnesy trwałe. Model silnika tarczowego Torus S przedstawiono na rysunku 1.

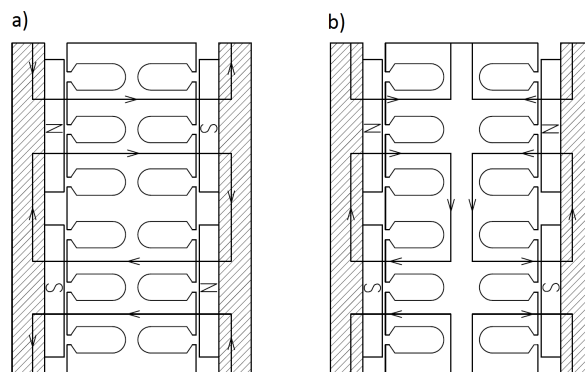
W tego typu silniku dopuszcza się dwa sposoby rozmieszczenia magnesów na tarczach wirnika. Pierwszy to magnesy różnej biegunowości umieszczone naprzeciw siebie i wówczas silnik

określamy jako Torus S – NS, natomiast drugi to umieszczenie naprzeciw siebie magnesów tej samej biegunowości i wtedy silnik określamy jako Torus S – NN. Różne warianty umieszczenia magnesów wiążą się z różnym rozplywem strumienia magnetycznego. W silniku Torus S – NS strumień magnetyczny wytworzony przez magnes N przynależny do jednej tarczy wirnika płynie w kierunku osiowym przez całą długość maszyny do magnesu polaryzacji S na drugiej tarczy wirnika, natomiast w maszynie typu Torus S – NN strumień od magnesu N przechodzi poprzecznie przez jarzmo stojana i wraca do magnesu S (Rys.2). Różny rozplyw strumienia wiąże się też z różnicami w wymiarach gabarytowych poszczególnych elementów maszyny oraz z różnym możliwym sposobem uzwojania.



Rys. 1. Model silnika tarczowego typu Torus S: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 - magnes trwały, 4 - rdzeń stojana, 5 - tarcza wirnika, 6 - tarcza łożyskowa, 7 - kadłub

W przypadku silnika Torus S – NS przez jarzmo stojana nie przepływa strumień główny (w kierunku poprzecznym), więc może być ono cieńsze niż w przypadku silnika Torus S – NN. Ta różnica powoduje, że maszyny typu Torus S – NS charakteryzują się mniejszymi stratami w żelazie oraz lepszym stosunkiem mocy do masy. Jak wspomniano wcześniej pomiędzy maszynami Torus S – NS, a Torus S – NN istnieje też różnica w rodzaju uzwojenia. O ile w maszynach Torus S – NN można stosować zarówno cewki nawijane wokół rdzenia, jak i cewki nawijane z poskokiem w sąsiadujących żłobkach tej samej tarczy wirnika, to w silnikach typu Torus S – NS możliwe jest tylko zastosowanie tych drugich.



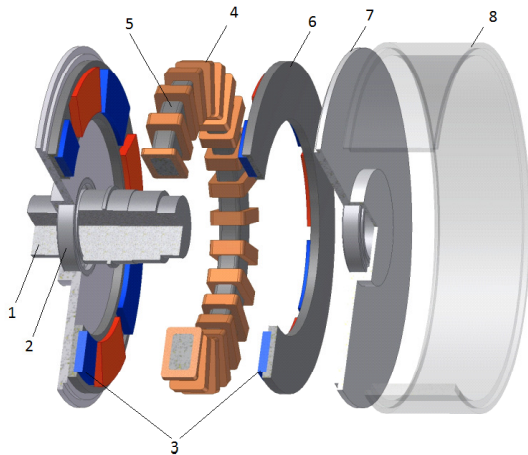
Rys. 2. Rozplyw strumienia magnetycznego w silniku tarczowym typu: a) Torus S – NS, b) Torus S - NN

3. Torus NS

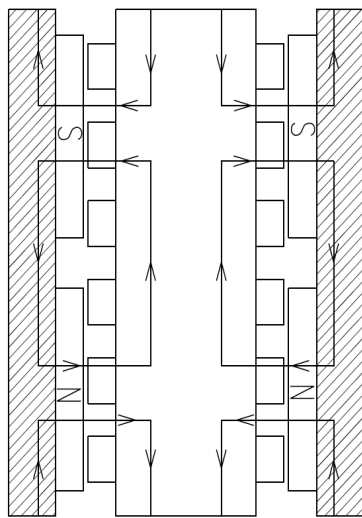
Silnik tarczowy typu Torus NS (rys.3) jest jedną z podstawowych, a zarazem najprostszych konstrukcji silników o strumieniu osiowym. Silnik typu Torus NS ma budowę podobną do omawianego wcześniej silnika typu Torus S. Jediną różnicą jest rdzeń stojana, który w przypadku silnika Torus NS wykonywany jest jako bezżłobkowy (człon NS w nazwie oznacza „Non Slotted”). Cechą charakterystyczną tego typu maszyn jest uzwojenie zbudowane z oddzielnych cewek, nawiniętych wokół toroidalnego rdzenia. Cewki mogą być ze sobą łączone w różny sposób tworząc wielofazowe uzwojenie. Tarcze wirnika wykonane są z litej stali. Na ich wewnętrznej powierzchni zamocowane są magnesy trwałe, które wytwarzają strumień w kierunku osiowym. Krótkie połączenia czołowe uzwojenia w tego typu silniku ograniczają straty w miedzi, co przyczynia się do poprawy sprawności. Dzięki wyeliminowaniu żłobków pozbyto się negatywnych zjawisk takich, jak pulsacje w rozkładzie przestrzennym indukcji magnetycznej w szczelinie oraz nasycanie się zębów.

Ze względu na zastosowany rodzaj uzwojenia, magnesy umieszczone muszą być w ten sposób, że naprzeciw magnesu jednej tarczy polaryzacji N leży magnes drugiej tarczy również polaryzacji N. Taki sposób ułożenia magnesów powoduje, że strumienie magnetyczne wytworzone przez magnesy o polaryzacji N z obu tarcz po przejściu przez szczeliny powietrzne sumują się w rdzeniu stojana i następnie po ponownym przejściu przez szczeliny wracają do tarcz wirnika poprzez magnesy o polaryzacji S. Ze względu na sumowanie się strumieni w rdzeniu stojana, grubość tarczy rdzenia stojana powinna

być około dwa razy większa od grubości każdej z tarcz wirnika. Rozpływ strumienia magnetycznego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Model silnika tarczowego typu Torus NS: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 - magnesy jednokierunkowej biegunowości, 4 - cewka uzwojenia, 5 - rdzeń stojana, 6 - tarcza wirnika, 7 - tarcza łożyskowa, 8 - kadłub



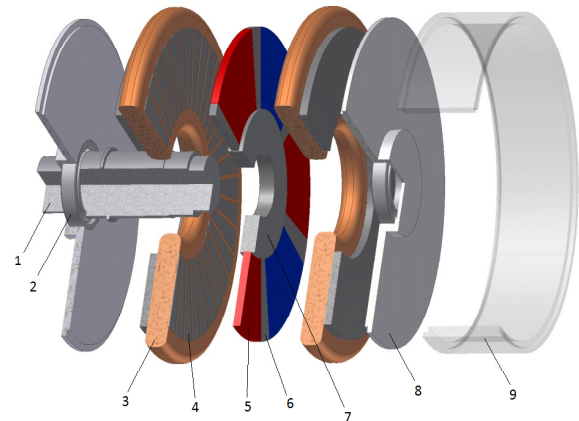
Rys. 4. Rozpływ strumienia magnetycznego w silniku tarczowym typu Torus NS

4. Silnik z wewnętrznym wirnikiem

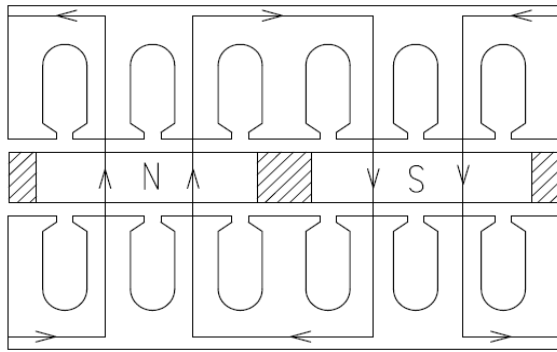
Analizując różne rozwiązania silników tarczowych należy rozpatrzyć także silnik z wirnikiem wewnętrznym (rys.5). Wirnik z magnesami trwałymi połączony mechanicznie z wałem umieszczony jest w środku między dwoma stojanami. "Tarcza wirnika" maszyny składa się jedynie z magnesów magnesowanych w kierunku osiowym. Przestrzeń pomiędzy magnesami różnoimiennych biegunów magnetycznych wypełniona jest materiałem niemagne-

tycznym, który jednocześnie powinien tworzyć sztywną strukturę wytrzymałą mechanicznie. Materiałem tym może być stal niemagnetyczna, aluminium, bądź materiał z włókna szklanego nasyczonego (utwardzonego) żywicą. Brak rdzenia magnetycznego wirnika sprawia, że maszyny te charakteryzują się niewielkim momentem bezwładności oraz wysokim współczynnikiem moment / masa.

W silnikach z wirnikiem wewnętrznym istnieje kilka wariantów wykonania uzwojenia twornika. Każdy z dwóch rdzeni stojana może mieć strukturę pierścieniową ze żłobkami otwartymi po jednej stronie. Wielofazowe, symetryczne uzwojenie umieszczone jest wtedy w żłobkach stojanów zabudowanych w jednej obudowie. Innym wariantem jest bezżłobkowe wykonanie rdzenia stojana z owiniętymi wokół cewkami, podobnie jak w silniku typu Torus NS. Brak żłobków stojana eliminuje wówczas występowanie momentu zaczepowego i przyczynia się do cichej pracy napędu, jednakże należy mieć na uwadze fakt, że wykorzystywane są wtedy tylko jedne boki cewki. Dodatkowo możliwy jest również różny sposób łączenia uzwojeń stojanów. Mogą one być połączone szeregowo lub równoległe.



Rys. 5. Model silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 - uzwojenie stojana, 4 - rdzeń stojana, 5 - magnesy trwałe, 6 - przekładka między magnesami, 7 - pierścień pod wał, 8 - tarcza łożyskowa, 9 - kadłub

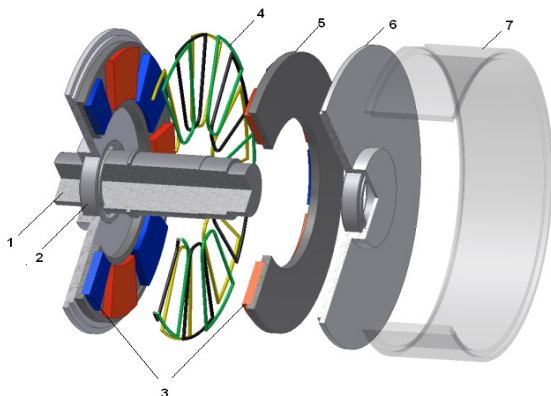


Rys. 6. Rozpływ strumienia magnetycznego w silniku tarczowym z wirnikiem wewnętrznym oraz uzłobkowanym rdzeniem stojana

5. Bezrdzeniowy silnik tarczowy

Ciekawą konstrukcją silników tarczowych, z uwagi na właściwości jakimi się cechuje, jest silnik bezrdzeniowy (rys.7). Zbudowany jest on z dwóch tarcz wirnika z zamontowanymi magnesami trwałymi oraz z bezrdzeniowego uzwojenia umieszczonego pomiędzy nimi.

Brak rdzenia stojana powoduje, że silnik ten nie wytwarza momentu zaczepowego, co może być również korzystne w zastosowaniach takich jak precyzyjne serwonapędy, urządzenia pozycjonujące, czy różnego rodzaju obrabiarki. Poza tym, wyeliminowane zostały straty w żelazie, straty histerezy oraz straty od prądów wirowych, co znacznie wpływa na poprawę sprawności silnika. Wadą silnika bezrdzeniowego jest duża grubość efektywnej szczeliny powietrznej, co utrudnia osiągnięcie wysokich wartości indukcji magnetycznej w szczelinie. Model bezrdzeniowego silnika tarczowego przedstawiono na rysunku 7.

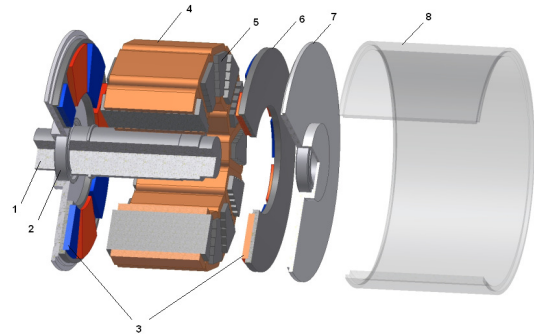


Rys. 7. Model bezrdzeniowego silnika tarczowego: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 - magnesy różnej biegunowości, 4 - bezrdzeniowe uzwojenie, 5 - tarcza wirnika, 6 - tarcza łożyskowa, 7 - kadłub

6. Silnik z biegunami wydawnymi

Kolejnym rodzajem silnika tarczowego jest silnik z biegunami wydawnymi (rys.8). Składa się on z dwóch zewnętrznych tarcz wirnika z magnesami trwałymi oraz wewnętrznego stojana. Stojan zbudowany jest z rdzeni ferromagnetycznych o kształcie trapezowym i nawiniętych na nich cewek. Cewki stojana mogą łączone być w różne układy tworząc tym samym uzwojenie jednopasmowe lub wielopasmowe.

Silniki z uzwojeniem jednopasmowym posiadają liczbę wydawnych biegunów stojana równą liczbie biegunów wirnika, natomiast dla silnika z uzwojeniem trójpasmowym liczba biegunów wirnika różni się od liczby biegunów stojana, z uwagi na potrzebę wytworzenia momentu rozruchowego [1]. Istotnym zagadnieniem dla tego typu maszyn jest prawidłowy dobór szerokości magnesów na podziałce biegunowej. Poszukując optymalnego przekroju bieguna i wymiarów uzwojenia należy przeprowadzić wielowariantowe obliczenia modelu matematycznego, a następnie obliczenia z wykorzystaniem trójwymiarowej metody elementów skończonych.



Rys. 8. Model silnika tarczowego z biegunami wydawnymi: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 - magnesy trwałe różnej biegunowości, 4 - cewka uzwojenia, 5 - rdzeń stojana, 6 - tarcza wirnika, 7 - tarcza łożyskowa, 8 - kadłub

7. Silnik tarczowy o konstrukcji wielostopniowej

W przypadku konieczności uzyskania bardzo dużej wartości momentu, dobrym rozwiązaniem jest wielostopniowa konfiguracja maszyny tarczowej. W konstrukcji tego typu występuje kilka segmentów złożonych z tarcz wirnika oraz rdzeni stojana. Wartość wytwarzanego momentu elektromagnetycznego dla tego rodzaju silników tarczowych ograniczona jest przez osiowe siły przenoszone przez łożyska, integralność połączeń pomiędzy wałem a tarczą i sztywnością dysku.

8. Podsumowanie

Silniki o strumieniu osiowym stanowią alternatywne rozwiązanie do powszechnie stosowanych dziś silników cylindrycznych. Dla niektórych zastosowań wykorzystanie silników tarczowych wydaje się być rozwiązaniem niosącym szereg korzyści między innymi takich, jak ograniczenie długości osiowej maszyny. Jednakże należy pamiętać, że w tego typu silnikach pojawiają się dodatkowe trudności związane na przykład z tym, że są to konstrukcje o dużym promieniu, a więc szczególnie ważnym zagadnieniem jest utrzymanie stałej grubości szczeliny powietrznej. Realizuje się to przez odpowiednią konstrukcję mechaniczną wirnika i stojana. Wykonanie ułożebkowanego rdzenia stojana również jest czynnością bardziej kłopotliwą, niż w przypadku klasycznych silników cylindrycznych. Kolejnym problemem w silnikach tarczowych jest odprowadzanie ciepła, jak również sposób chłodzenia maszyny.

Przedstawione w artykule wybrane rodzaje rozwiązań silników tarczowych stanowią część zbioru możliwych do wykonania konstrukcji. Każdy z omówionych silników cechuje się wysoką sprawnością, wysokim współczynnikiem moc / masa oraz moment / masa.

Moment elektromagnetyczny silnika tarczowego o strukturze „double - side” ogólnie opisuje zależność [2]:

$$M_{em} = 2 \cdot \pi \cdot B_m A_w r_z^3 k_D \cdot (1 - k_D^2) \quad (1)$$

$$A_w = \frac{m \cdot N_l \cdot I}{\pi \cdot r_w} \quad (2)$$

gdzie: k_D - stosunek promienia wewnętrznego do promienia zewnętrznego, r_w - promień wewnętrzny stojana, r_z - promień zewnętrzny stojana, B_m - maksymalna wartość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej, A_w - okład prądowy na promieniu wewnętrznym stojana, m - liczba faz uzwojenia, N_l - liczba zwojów fazowych, I - prąd znamionowy.

W celu jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, która z konstrukcji cechuje się najwyższym stosunkiem uzyskiwanej mocy (momentu) do masy silnika należy przeprowadzić wielowariantowe obliczenia z wykorzystaniem trójwymiarowych modeli polowych oraz wykonać badania laboratoryjne omawianych rodzajów silników.

9. Literatura

- [1]. Mendrela E., Łukaniszyn M., Macek-Kamińska K., Tarczowe silniki prądu stałego z komutacją elektroniczną, *Wydawnictwo Gnome PAN 2002*.
- [2]. Parviainen A., Design of Axial-Flux Permanent Magnet low-speed machines and performance comparison between radial flux and axial - flux machines, *Lappeenranta teknillinen yliopisto, Digi-paino 2005*.
- [3]. Cierzniewski P., Bezrdzeniowy silnik tarczowy z magnesami trwałymi, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, 77 (2007), 161-166.
- [4]. Glinka T., Tomaszewicz W., Silniki tarczowe, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, 80 (2008), 232-237.
- [5]. Gieras J., Wang R., Kamper M., TAxial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/ Boston/ London 2004*.
- [6]. Wolnik T., Modelowanie polowe silnika bezszczotkowego tarczowego do napędu pojazdów samochodowych, *Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Zakład Maszyn i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, Gliwice 2009*.
- [7]. Wiak S., Welfe H., Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych, *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2001*.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy.

**PRZEDRUK ARTYKUŁU
Z CZASOPISMA PRZEGLĄD
ELEKTROTECHNICZNY 3/2011**

**PIERWSZY Z CYKLU ARTYKUŁÓW
WYRÓŻNIONYCH II NAGRODĄ
W KONKURSIE IM. PROFESORA
MIECZYŚŁAWA POŻARYSKIEGO 2011**