

Tadeusz Glinka, Wiesław Tomaszewicz
BOBRME Komel, Katowice

SILNIKI TARCZOWE

DISC MOTORS

Abstract: Two types of disc motors are investigated in the paper:

- with salient poles, where armature core is made of ferromagnetic steel, as shown in Fig. 1,
- with coreless armature and two-layer winding as shown in Fig. 4.

Dependence of rotating torque on number of pole pairs p and ratio of inner diameter d to outer diameter D ($\beta=d/D$) has been determined for salient-pole motors (Fig. 3). Basing on these characteristics, the motor's rated power has been calculated depending on motor's dimensions. The results are set out in Table 1. In case of coreless armature motor the basic dependencies between motor dimensions and electromechanical parameters have been given. Using these relations, armature dimensions have been calculated for 3 kW, 180 V, 2000 rpm motor. The described methodology of calculating armature magnetic circuit dimension and winding data constitutes first design phase of disc motor. During second design phase the motor should be optimised and its magnetic circuit calculated e.g. by some field method.

1. Wstęp

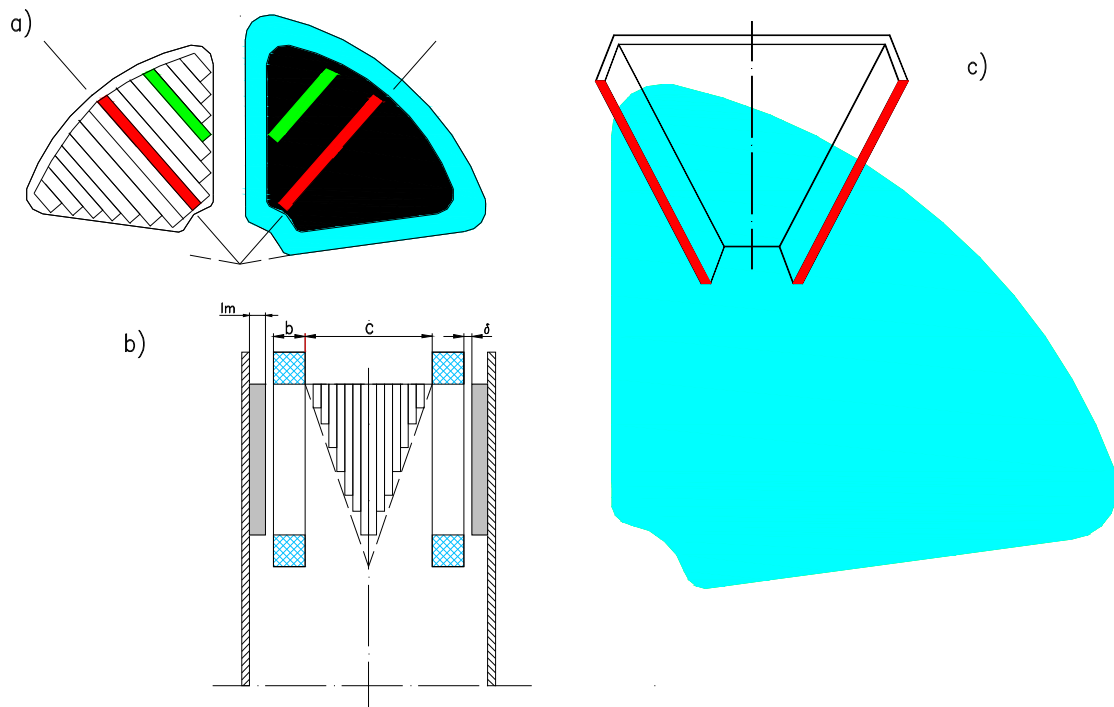
Maszyny elektryczne instalowane w pojazdach drogowych z napędem elektrycznym lub napędem hybrydowym powinny charakteryzować się jak największym momentem z jednostki masy. Minimalizacja masy silnika elektrycznego jest tu istotna, gdyż wpływa to na masę całego pojazdu i na energię zużywaną przez pojazd. Problem masy silnika jest jeszcze bardziej istotny w statkach powietrznych: helikoptery, szybowce, motolotnie. Poszukując rozwiązania maszyny elektrycznej o minimalnej masie przy założonych parametrach należy wziąć pod uwagę także silniki tarczowe. Drugim kryterium, które decyduje o stosowaniu silników tarczowych w pojazdach i statkach powietrznych jest ograniczenie długości osiowej silnika. Wymagania stawiane napędem przez pojazd drogowy można zilustrować na przykładzie wózka inwalidzkiego. Moment obrotowy wymagany przy pokonywaniu przeszkód np. krawężnika jest około 10 razy większy od momentu rozwijanego przez napęd w czasie jazdy ustalonej wózka po jezdni płaskiej o twardym podłożu. Wymaganie dużego momentu obrotowego dotyczy krótkich przedziałów czasu. Rozwiązanie tego problemu przy pomocy wysokoobrotowych silników walcowych wymaga stosowania przekładni mechanicznych i sprzęgieł. Komplikuje to układ napędowy, zmniejsza sprawność, podwyższa cenę i obniża niezawodność pracy. Dlatego, w tego typu pojazdach, coraz częściej stosuje się wolnoobrotowe silniki

elektryczne zabudowane w kołach jezdnych. Napędy te są bezprzekładniowe. Poza wózkami inwalidzkimi, można tu wymienić także rowery ze wspomaganie elektrycznym, skutery elektryczne i napęd maszyn czyszczących lub wózków samojezdnych stosowanych, np. w supermarketach. Silniki tarczowe dotychczas, oprócz wymienionych przykładów są stosowane głównie w serwonapędach o dużej dynamice działania, gdyż są to silniki o małym momencie bezwładności i dopuszczalnym dużym przeciążeniu.

Przedmiotem artykułu są silniki tarczowe. Przedstawione zostaną dwa rozwiązania silnika tarczowego: silnik z wydatnymi biegunami i silnik bezrdzeniowy. Zdaniem autorów (bez dowodu) te dwa typy silników tarczowych mają największy stosunek momentu do masy i są technologicznie stosunkowo proste do wykonania.

2. Silnik tarczowy z wydatnymi biegunami

Obwód elektromagnetyczny silnika tarczowego z wydatnymi biegunami przedstawiono na rys. 1. Objętość silnika należy optymalnie wykorzystać, to znaczy tak wypełnić przestrzeń wewnętrzną silnika miedzią i ferromagnetykiem, aby uzyskać maksymalny moment obrotowy.



Rys. 1. Silnik tarczowy z wydatnymi biegunami: a – widok bieguna twornika od strony szczeliny powietrznej, b – przekrój w płaszczyźnie osiowej, c – kształt jednej blachy

Powstają zatem pytania:

- ile silnik powinien mieć par biegunów $p=?$,
- jak podzielić powierzchnię przyszczelinową bieguna na uzwojenie i rdzeń.

Odpowiedź na te pytania dadzą obliczenia w oparciu o model matematyczny silnika. Aby moment elektromagnetyczny silnika w każdym położeniu wirnika był różny od zera silnik musi składać się przynajmniej z dwóch pasm uzwojeń. Zakłada się, że silnik składa się z dwóch plastrów: lewego i prawego, jak to pokazano na rys.1. Uzwojenie biegunów lewego plastra tworzą jedno pasmo uzwojenia, a uzwojenia biegunów prawego plastra tworzą drugie pasmo uzwojenia. Wartość średnia momentu elektromagnetycznego T generowana przez jedno pasmo uzwojenia:

$$T = \frac{P}{\omega_m} = p \frac{P}{\omega} \quad (1)$$

gdzie: P - moc średnia, ω_m , ω - prędkość kątowa wirnika i pulsacja napięcia twornika, p - liczba par biegunów uzwojenia.

Założmy, że strumień magnetyczny $\phi(t)$ sprzęgający się z uzwojeniem i prąd w uzwojeniu zmieniają się sinusoidalnie

$$\phi(t) = \phi \sin \omega t$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

Przy czym $\varphi = \frac{\pi}{2}$, gdyż to determinuje wartość maksymalną momentu i taką wartość kąta φ układ komutatora elektronicznego może realizować. Napięcie rotacji indukowane w jednej cewce bieguna o liczbie zwojów z

$$e = z \frac{d\phi}{dt} = z \omega \phi \cos \omega t = \sqrt{2} E \cos \omega t \quad (3)$$

Wartość średnia mocy elektromagnetycznej jednego pasma uzwojenia

$$P = 2 p E I = \sqrt{2} p z \omega \phi I \quad (4)$$

Przy czym:

$$\phi = B S_{Fe}; \quad I = j S_{Cu},$$

gdzie: B - indukcja magnetyczna w szczelinie pod rdzeniem bieguna,

j - gęstość prądu,

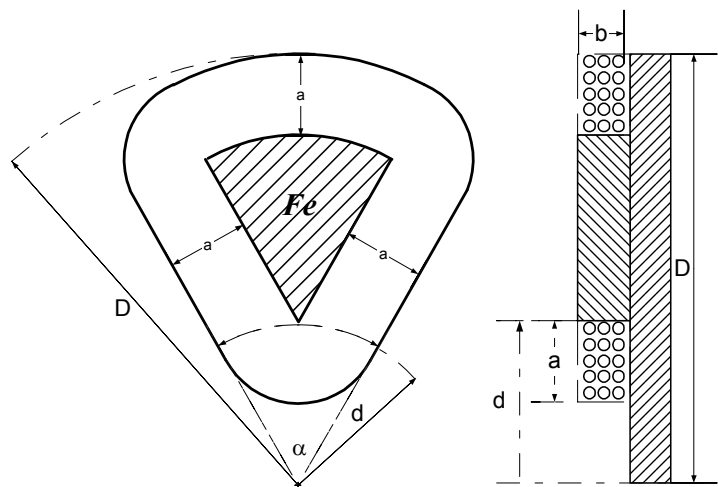
S_{Fe}, S_{Cu} - przekrój bieguna rdzenia i przekrój przewodu uzwojenia.

Podstawiając zależność (4) do równania (1) otrzymuje się

$$T = \sqrt{2} p^2 j B (z S_{Cu}) S_{Fe} \quad (5)$$

Poszukując optymalnego przekroju bieguna S_{Fe} zakłada się $B = \text{const.}$, $j = \text{const.}$, gdyż są to parametry niezależne od S_{Fe} .

Wartość maksymalną powierzchni S_{Fe} otrzyma się przy biegunie trójkątnym (rys.2).



Rys. 2 . Podział powierzchni bieguna silnika tarczowego na rdzeń i uzwojenie

W tym przypadku:

$$2a = \frac{\pi d}{2p}$$

Powierzchnia rdzenia

$$S_{Fe} = \frac{1}{2} \left[\frac{\pi(D-2a)}{2p} - 2a \right] \frac{D-2a-d}{2}$$

Powierzchnia bieguna, którą zajmuje uzwojenie determinuje odcinek a :

$$zS_{Cu} = ab$$

gdzie: b - jest wymiarem osiowym bieguna. Przekrój S_{Fe} nie zależy od wymiaru osiowego b .

Podstawiając zależności (6 i 7) do równania (5) i po przekształceniu otrzymuje się:

$$\frac{T}{jBb} = \frac{\pi D^3}{16\sqrt{2}} \beta \left[\pi \left(1 - \frac{\pi}{2p} \beta \right) - \pi \beta \right] \left(1 - \frac{\pi}{2p} \beta - \beta \right)$$

Gdzie: $\beta = \frac{d}{D}$

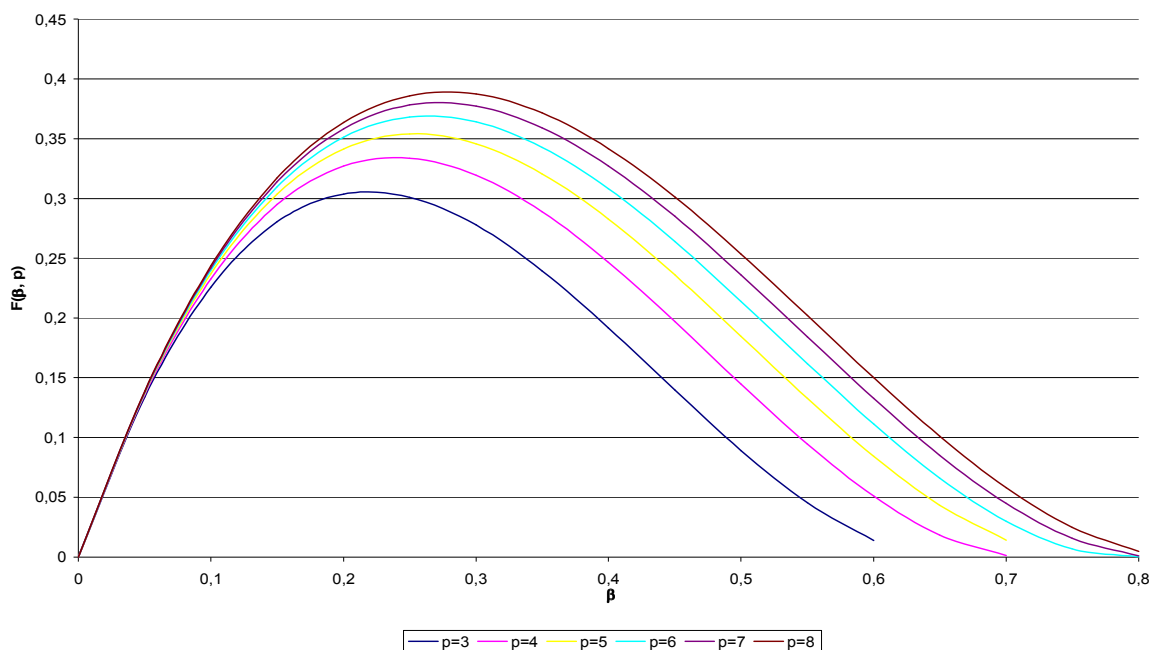
Całkowita powierzchnia bieguna

$$S = \frac{\pi D^2}{2p}$$

Prawa strona równania wyrażona w postaci funkcji

$$F(\beta, p) = \beta \left[\pi \left(1 - \frac{\pi}{2p} \beta \right) - \pi \beta \right] \left(1 - \frac{\pi}{2p} \beta - \beta \right)$$

pozwała określić optymalny podział tarczy bieguna na liczbę par biegunów i ustalić jaką część powierzchni bieguna powinien zajmować rdzeń. Na rysunku 3 przedstawiono wykres funkcji $F(\beta, p)$ w zależności od β przy parametrycznie zmienianej liczbie par biegunów p . Funkcja $F(\beta, p)$ uzyskuje wyraźne maksimum, przy czym to maksimum rośnie wraz ze wzrostem liczby par biegunów od 0,31 dla $p = 3$ do 0,38 dla $p = 8$. Optymalny stosunek średnic β zależy także od liczby par biegunów i zmienia się od wartości 0,22 dla $p = 3$ do 0,27 dla $p = 8$.



Rys. 3. Przebiegi zmienności funkcji $f(c,p)$ dla różnych średnic i ilości biegunów w zależności od grubości cewki

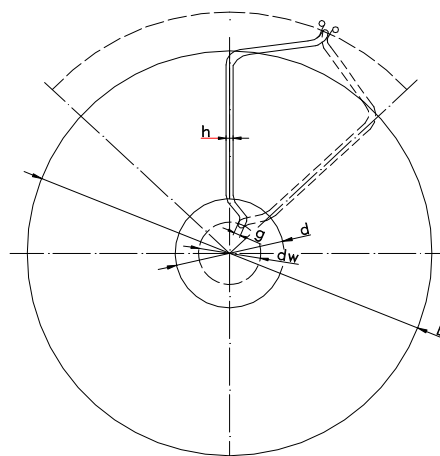
Wykorzystując powyższe równania i rys. 3 obliczono moc znamionową silnika, złożonego z dwóch pasm uzwojenia, w zależności od wymiarów: d , D , $a = b$ i c . Oznaczenia jak na rys.1. W obliczeniach założono: liczbę par biegunów $p=6$, prędkość kątową $\omega_m=314$ 1/sek. (3000 ob./min.), średnią gęstość prądu w przekroju cewki $j = 3$ A/mm², indukcję magnetyczną pod biegunem $B = 0,8$ T. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

P	D	d	$a = b$	c
kW	mm	mm	mm	mm
1	192	50	7	49
2	230	60	8	59
3,5	268	70	9	68
5,5	306	80	11	78
8,5	345	90	12	88
15	383	100	13	98

3. Silnik bezrdzeniowy

Drugim wariantem rozwiązania silnika tarczowego jest twornik bezrdzeniowy. W tym przypadku łatwo jest zrealizować zarówno uzwojenie dwu- jak i trójpasemowe. Rozpatrzmy wariant wykonania silnika trójpasemowego z uzwojeniem dwuwarstwowym. Takie wykonanie uzwojenia ma zalety technologiczne, gdyż wszystkie cewki są identyczne, a twornik jest płaski. Twornik musi mieć solidną konstrukcję mechaniczną, gdyż uzwojenie musi przenosić moment elektromagnetyczny podczas, gdy w silniku rdzeniowym (rys. 1) moment jest przenoszony przez rdzeń.



Rys. 4. Twornik silnika tarczowego bezrdzeniowego z uzwojeniem dwuwarstwowym

Silniki bezrdzeniowe mają większą szczelinę magnetyczną powiększoną przez grubość uzwojenia, co skutkuje grubszymi magnesami trwałymi. Ich zaletą, w stosunku do silników z twornikiem rdzeniowym, jest brak momentu zaczepowego i pulsacji momentu przy wirowaniu. Mogą być stosowane w tych napędach, gdzie moment zaczepowy i pulsacje momentu są niepożądane, np. w precyzyjnych serwonapędach stosowanych w centrach obrabiarkowych, urządzeniach nawigacyjnych i pozycjonujących. Rysunek 4 przedstawia tarczę twornika z wyróżnioną cewką uzwojenia. Średnica wewnętrzna d_w wynika z wymiarów główek zezwojów

$$\pi d_w k_g = 2p m q g$$

Jeśli założyć uzwojenie trójpaśmowe $m = 3$, liczbę par biegunów $p = 6$, liczbę zezwojów w paśmie uzwojenia pod jednym biegunem $q = 2$, grubość jednej warstwy uzwojenia $g = 2$ mm oraz współczynnik wypełnienia okręgu o średnicy d_w główkami zębów $k_g = 0,7$, to średnica wewnętrzna uzwojenia

$$d_w = 65 \text{ mm.}$$

Podobnie można określić średnicę wewnętrzną części aktywnej uzwojenia

$$\pi d k_p = 2p m q h$$

przy czym h oznacza szerokość zezwoju, a k_p współczynnik wypełnienia obwodu o średnicy d zezwojami. Zakładając, że zezwój składa się z dwóch zwojów o przekroju (z izolacją) $(2 + 2)$ mm, to $h = 4$ mm. Odstępy między zezwojami determinuje współczynnik $k_p = 0,7$, to $d = 130$ mm. Powierzchnia magnesu trwałego i strumień magnetyczny

$$S_{PM} = \frac{\pi (D + d)}{4p} k_{PM} \frac{D - d}{2}$$

$$\phi = BS_{PM}$$

Napięcie rotacji indukowane w jednym zwoju

$$e = -z \frac{d\phi}{dt}$$

Założmy, że strumień sprzęgający się z zezwojem uzwojenia zmienia się liniowo - rys.5.

$$\phi(\alpha) = \phi \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} \right)$$

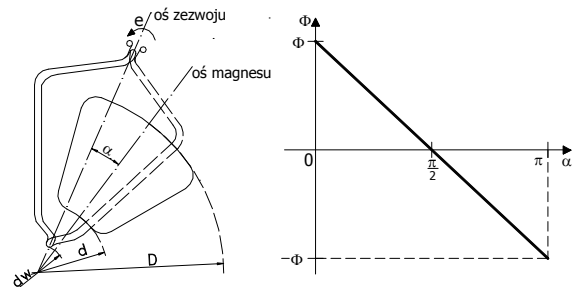
$$\text{to } e = z\phi \frac{2}{\pi} \frac{d\alpha}{dt} = z\phi\omega \frac{2}{\pi}$$

Mechaniczna prędkość kątowa

$$\omega_m = \frac{\omega}{p}$$

Wartość skuteczna napięcia rotacji

$$E = \frac{2z}{\sqrt{2}} \frac{\phi\omega}{\pi}$$



Rys. 5. Położenie magnesu trwałego względem zezwoju twornika

Przykład rozwiązania silnika o parametrach: 3 kW, 180 V, 2000 obr/min.

Wymiary obwodu magnetycznego:

$$d = 130 \text{ mm, } D = 330 \text{ mm, } k_{PM} = 0,8,$$

Liczba par biegunów $p = 6$. Szerokość obwodowa zezwoju $h = 2 \times 2$ mm, grubość zezwoju $g = 2$ mm (w zezwoju są dwa zwoje wykonane z przewodu o przekroju kwadratowym, wymiary podane są łącznie z izolacją).

Prędkość kątowa $\omega_m = 209$ 1/sek., $\omega = 6 \times 314 = 1254$ 1/sek.

Powierzchnia magnesu trwałego pod jednym biegunem

$$S_{PM} = 4,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Indukcja w szczelinie magnetycznej

$$B = 0,7 \text{ T,}$$

Strumień magnetyczny

$$\phi = 3,3 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

Liczba zezwojów pod jednym biegunem $q = 2$, liczba zwojów w paśmie uzwojenia $z = 48$.

Napięcie rotacji indukowane w jednym paśmie uzwojenia $E = 87$ V. Napięcie międzypasmowe jest równe $2 \times 87 = 174$ V.

Przekrój przewodu $S_{Cu} = 3,6$ mm²

Gęstość prądu $j = 5$ A/mm².

Prąd znamionowy $I = 18$ A.

Moc znamionowa $P = 174 \times 18 = 3130$ W.

4. Podsumowanie

W artykule rozpatrzono dwa typy silników tarczowych:

- z wydatnymi biegunami, w których rdzeń magnetyczny twornika ukształtowano z blachy ferromagnetycznej, jak to przedstawiono na rys.1,

- z twornikiem bezrdzeniowym i uzwojeniem dwuwarstwowym, jak na rys.4.

Dla silników z wydatnymi biegunami wyznaczono zależności momentu obrotowego silnika w funkcji liczby par biegunów p i stosunku średnic wewnętrznej d do zewnętrznej D , ($\beta = d/D$) – rys.3. W oparciu o te wykresy obliczono moc znamionową silnika, przy prędkości obrotowej 3000 ob./min., w zależności do jego wymiarów. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Dla silnika z twornikiem bezrdzeniowym podano podstawowe zależności wiążące wymiary silnika z parametrami elektromechanicznymi. Wykorzystując te zależności zdetermi-

nowano wymiary twornika silnika o parametrach: 3 kW, 180 V, 2000 ob/min.

Podana w artykule metodyka określenia wymiarów obwodu magnetycznego twornika i danych nawojowych uzwojenia stanowi pierwszy etap projektowania silnika tarczowego. Silnik o tak dobranych wymiarach należy, w drugim etapie projektowania, zoptymizować obliczając jego obwód magnetyczny np. metoda elementów skończonych.

5. Literatura

- [1]. Glinka T., Jakubiec M.: Rozwiązania konstrukcyjne silników tarczowych. Śląskie Wiadomości Elektryczne, Nr 5/2007r. Str. 29-32.
- [2]. Glinka T.: Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi. Wyd. Pol. Śląskiej. Gliwice 2002r.
- [3]. Mendrela E., Łukaniszyn M., Macek-Kamińska K.: Tarczowe silniki prądu stałego z komutacją elektroniczną. Wyd. PAN Oddział Katowice 2002r.
- [4]. Wiak S., Welfle H.: Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych. Wyd. Pol. Łódzkiej. Łódź 2001r.