

Jerzy WITKOWSKI¹⁾

ZASADY WYZNACZANIA PARAMETRÓW OBWODU BIEGUNÓW KOMUTACYJNYCH W MASZYNIE PRĄDU STAŁEGO O BLACHOWANYM NIEKONWENCJONALNIE OBWODZIE MAGNETYCZNYM

Streszczenie. W referacie przedstawia się metodę obliczania przepływu biegunów komutacyjnych w silniku bocznikowym o blachowanym niekonwencjonalnie jarzmie stojana. Podstawową wyjściową do obliczeń jest model jarzma zastępczego stojana. Wprowadzając w miejsce wielowarstwowej struktury jarzma (spiralnie zwinięty cylinder z taśmy blachy magnetycznej) jarzmo zastępcze, uzyskuje się model magnetyczny o strukturze trójwarstwowej. Takie przekształcenie jarzma stojana umożliwia analizę porównawczą parametrów obwodu biegunów komutacyjnych w stosunku do maszyny klasycznej oraz pozwala na podstawie równań obwodowych obliczyć konieczny przepływ w celu uzyskania poprawnej komutacji. W pracy omawia się wpływ spiralnie blachowanego jarzma stojana na warunki komutacji przy zachowaniu niezmiennych wymiarów twornika i obciążeń elektromagnetycznych w stosunku do maszyny klasycznej o takiej samej mocy i prędkości obrotowej.

PRINCIPLES OF DETERMINATION OF COMMUTATING POLE CIRCUIT PARAMETERS IN CASE OF DC MACHINE WITH CORE MADE OF MAGNETIC SHEETS ASSEMBLED IN UNCONVENTIONAL WAY

Summary. The calculation method of a MMF of commutating poles of a DC shunt motor with the core made of magnetic sheets assembled in an unconventional way is presented in the paper. The model of an equivalent stator core is the basis for the calculations. Thanks to the introduction of the equivalent core instead of a multi-layer core structure (multi-layer helical cylinder made of magnetic sheets) a three-layer model has been obtained. This stator core transformation enables the comparative analysis of the commutating poles circuit parameters with respect to a classical DC machine. This enables also, when basing on circuit equations, determination of a necessary MMF required for a correct commutation process. The influence of a stator core made of helical multi-layer magnetic sheets on the commutation conditions is shown in the paper. The analysis have been conducted at the same unaltered rotor dimensions and at the same electromagnetic load with respect to a DC machine of the same power and rated speed and of a classical construction.

Key words: unconventional dc machines, magnetic circuit made of magnetic sheets, core of magnetic sheets assembled in an unconventional way

1. WSTĘP

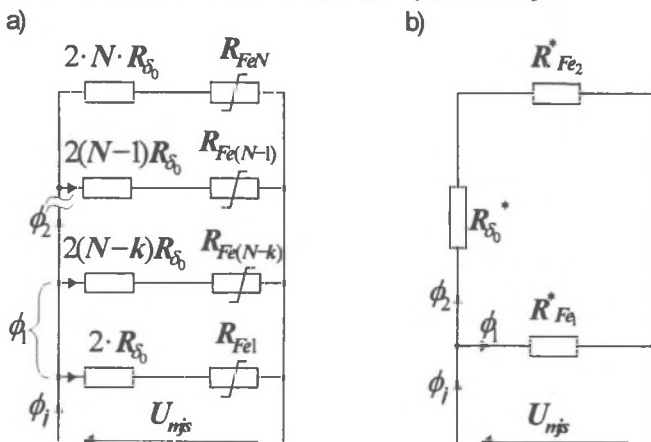
Przedstawiana maszyna prądu stałego ma obwód magnetyczny całkowicie blachowany, różniący się od typowego wykonania tym, że jarzmo stojana jest blachowane niekonwencjonalnie w taki sposób, że jest ono wykonane w formie spiralnie zwiniętego cylindra z taśmy blachy magnetycznej (rys. 2a). Jarzmo stojana blachowane ma złożoną niejednorodną strukturę spowodowaną poprzecznym uwarstwieniem blach jarzma stojana w stosunku do głównej osi magnetycznej. Takie uwarstwienie powoduje nierównomierny rozkład gęstości strumienia jarzmowego w kierunku promieniowym. Zatem poszczególne warstwy ferromagnetyka mają różne wartości przenikalności magnetycznej. Ta złożona struktura jarzma powoduje, że analiza obwodowa jak i numeryczna obwodu magnetycznego są skomplikowane. Dlatego do obliczenia obwodu biegunów komutacyjnych wykorzystuje się model zastępczy jarzma.

¹ Dr inż., Akademia Marynarki Wojennej, 81 - 103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69, tel. (058) 626 26 07, fax (058) 625 38 81.

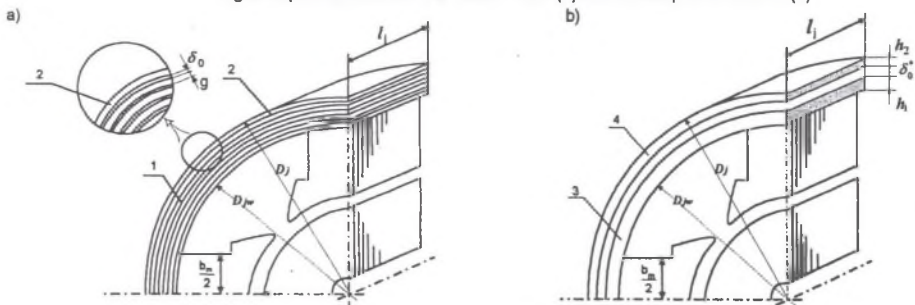
2. OBWÓD MAGNETYCZNY BLACHOWANY NIEKONWENCJONALNIE I JEGO MODEL FIZYCZNY

Zgodnie z właściwościami magnetowodu blachowanego niekonwencjonalnie dla jarzma obowiązuje schemat zastępczy równoległe połączonych nieliniowych reluktancji [6]. Na podstawie znanego (obliczonego wcześniej) rozkładu indukcji magnetycznej wzdłuż wysokości jarzma (rys. 3) można dla każdej m -tej warstwy blachy określić wartości przenikalności magnetycznej i w ten sposób wyznaczyć wartości wszystkich występujących reluktancji w schemacie zastępczym (rys. 1a) jarzma zwijanego.

W budowie modelu zastępczego musi być spełniony warunek, aby w warstwach skrajnych na granicy środowisk wartości przenikalności i indukcji magnetycznej miały takie same wartości, jakie występują w jarzmie rzeczywistym wielowarstwowym. Takie wymagania spełnia jarzmo zastępcze o strukturze trójwarstwowej, w której dwie warstwy ferromagnetyczne o różnych przenikalnościach oddzielone są szczeliną niemagnetyczną (powietrzna).



Rys. 1. Schemat zastępczy jarzma zwijanego (a) i jego uproszczenie (b)
Fig.1. Equivalent circuit of a "rolled" core (a) and its simplified version (b)

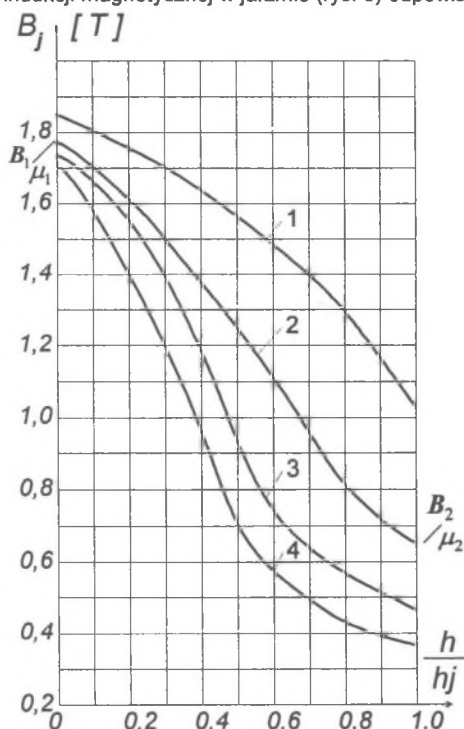


Rys. 2. Struktura wielowarstwowa jarzma stojana blachowanego niekonwencjonalnie (a) oraz odpowiadająca jej struktura jarzma zastępczego trójwarstwowego (b): 1 - jarzmo stojana blachowane, 2 - pojedynczy zwój blachy, 3 - jarzmo wewnętrzne, ferromagnetyk o przenikalności μ_1 i grubości h_1 , 4 - jarzmo zewnętrzne, ferromagnetyk o przenikalności μ_2 i grubości h_2 , δ_0 - szczelina między zwojami, δ_0^* - szczelina między warstwami jarzma zastępczego

Fig. 2. Structure of a multi-layer stator core made of magnetic sheets assembled in an unconventional way (a) and a corresponding structure of an equivalent three-layer core (b) 1 - stator core made of magnetic sheets, 2 - single turn of a magnetic sheet, 3 - internal core, ferromagnetic material of a permeability μ_1 , and a thickness h_1 , 4 - external core, ferromagnetic material of a permeability μ_2 , and a thickness h_2 , δ_0 - air gap between single turns (sheets), δ_0^* - air gap between single layers of an equivalent core

Obwodowy schemat zastępczy jarzma zwijanego pokazany na rys. 1a można uprościć wg schematu przedstawionego na rys. 1b. Występujące tam reluktancje R_{Fe1} i R_{Fe2} są reluktancjami jarzma zastępczego ferromagnetyka wewnętrznego i zewnętrznego w strukturze trójwarstwowej (rys. 2b) o przenikalnościach równych odpowiednio warstwie skrajnej wewnętrznej i zewnętrznej, jakie występują w jarzmie rzeczywistym. Reluktancja $R_{\delta 0}$ na schemacie wg rys. 1b jest reluktancją szczeliny powietrznej między ferromagnetykami. Na rys. 2b przedstawiono strukturę jarzma zastępczego trójwarstwowego.

Parametrami jarzma zastępczego są: przenikalności magnetyczne μ_1 i μ_2 obu ferromagnetyków tworzących jarzmo zastępcze, ich grubości h_1 i h_2 oraz grubości δ_0 szczeliny powietrznej. Wyznaczanie parametrów jarzma zastępczego jest podane w pracy [9], a strukturę jarzma zastępczego przedstawia rys. 2b. Należy zaznaczyć, że parametry jarzma zastępczego odpowiadają tylko jednej określonej wartości indukcji magnetycznej B_δ w szczelinie głównej i muszą być każdorazowo ustalone przy jej zmianie. Parametry te wyznacza się na podstawie rozkładu indukcji magnetycznej w jarzmie (rys. 3) odpowiadającemu danej indukcji B_δ w szczelinie głównej.



Rys. 3. Rozkład indukcji magnetycznej w jarzmie stojana blachowanym przy różnej liczbie warstw N dla indukcji w szczelinie maszyny $B_\delta = 0,6 \text{ T}$,

- 1 - $N = 40$,
- 2 - $N = 50$,
- 3 - $N = 60$,
- 4 - $N = 70$,

gatunek blachy 2,6-E2-0,5

Fig.3. Flux density distribution within the stator core made of magnetic sheets at different number of layers N determined for the machine air gap flux density $B_\delta = 0,6 \text{ T}$,

- 1 - $N = 40$
- 2 - $N = 50$
- 3 - $N = 60$
- 4 - $N = 70$

magnetic steel sheet type 2,6-E2-0,5

3. OBLICZANIE PRZEPŁYWU I WYBÓR SZCELINY BIEGUNA KOMUTACYJNEGO

Przepływ magnetyczny biegunów komutacyjnych i szczeliny biegunów odbiera się tak, by w strefie komutacyjnej wytworzyć indukcję B_k , która w zezwojach komutujących będzie indukować napięcie rotacji e_r . To napięcie powinno być nieco większe niż średnie napięcie samoindukcji e_s zezwoju komutującego. Zatem przepływ biegunów komutacyjnych można obliczyć jako sumę dwóch składników:

- przepływu potrzebnego do skompensowania oddziaływania twornika w strefie komutacji

$$\theta_{2k}^* = A \tau$$

(1)

oraz

- przepływu dodatkowego potrzebnego do wytwarzania indukcji B_k w strefie komutacji

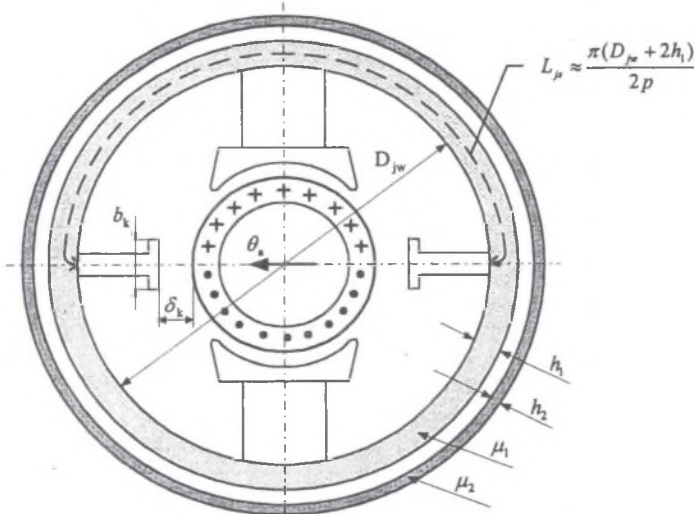
$$\theta_{2k}^* = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta k} \delta_k k_{ck} \quad (2)$$

Całkowity przepływ na parę biegunów w maszynie bez uzwojenia kompensacyjnego wynosi:

$$\theta_{2k} = A \tau + \frac{2}{\mu_0} B_{\delta k} \delta_k k_{ck} \quad (3)$$

Wzór powyższy słuszny jest przy założeniu, że pomija się spadki napięć magnetycznych w ferromagnetycznych częściach obwodu magnetycznego biegunów komutacyjnych. W maszynie o klasycznej budowie magnetowodu lub całkowicie blachowanej w sposób konwencjonalny takie uproszczenie jest dopuszczalne, gdyż w elementach ferromagnetycznych indukcje są małe, a w jarzmie współczynnik nasycenia jest niewielki. Zatem permeancje elementów są bardzo duże i napięcia magnetyczne w tych elementach mogą być pominięte. W maszynie o blachowanym niekonwencjonalnie stojanie obwód magnetyczny biegunów komutacyjnych jest bardziej złożony. Wprowadzając zastępcze trójwarstwowe jarzmo stojana można przeprowadzić obliczenia metodą obwodową analogicznie do maszyny klasycznej.

Zasadniczą różnicą w obliczeniach przepływu biegunów komutacyjnych w tym przypadku polega na konieczności uwzględnienia napięć magnetycznych w ferromagnetycznej jarmkowej części stojana.



Rys. 4. Rysunek pomocniczy do wyznaczenia napięcia magnetycznego w jarmkowej części stojana dla strumienia biegunów komutacyjnych

Fig.4. The auxiliary figure for stator core MMF determination at the presence of magnetic flux produced by commutating poles

Na rys. 4 pokazano obwód magnetyczny z jarmkiem zastępczym i zaznaczoną średnią długością drogi strumienia magnetycznego biegunów komutacyjnych. Jak wiadomo z zasady budowy modelu, warstwa wewnętrzna jarmka zastępczego jest ferromagnetykiem o małej przenikalności $\mu_1 \approx 100 \mu_0$, zatem całkowity przepływ na parę biegunów θ_{2k} musi uwzględniać napięcia magnetyczne w części jarmkowej stojana i może być wyrażony:

$$\theta_{2k} = A \tau + \frac{2}{\mu_0} B_{\delta k} \delta_k k_{ck} + \frac{\phi_k}{2\mu_1 l_{js} h_1} \cdot \frac{\pi(D_{jw} + 2h_1)}{2p} \quad (4)$$

gdzie:

A - układ prądowy twornika,

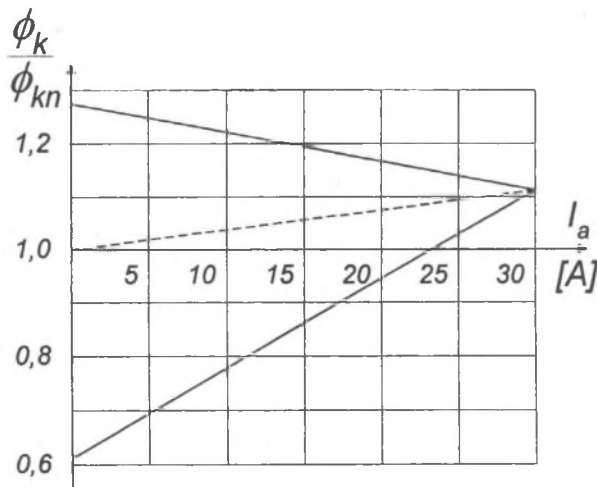
$B_{\delta k}$ - indukcja w szczelinie pod biegunem komutacyjnym,

- δ_k - grubość szczeliny pod biegunem komutacyjnym,
- k_{ck} - współczynnik Cartera dla szczeliny pod biegunem komutacyjnym,
- D_{jw} - średnica wewnętrzna jarzma stojana,
- h_1 - grubość wewnętrznej warstwy jarzma zastępczego,
- l_{js} - długość jarzma stojana,
- μ_1 - przenikalność magnetyczna warstwy wewnętrznej jarzma zastępczego,
- ϕ_k - strumień w biegunie komutacyjnym,
- τ - podziałka biegunowa.

W obliczeniach θ_{zk} przepływu biegunów komutacyjnych (wzór (4)) pominięto bocznikujące oddziaływanie jarzma zewnętrznego na strumień biegunów komutacyjnych. Uproszczenie takie możliwe jest ze względu na dużą różnicę reluktancji dróg magnetycznych w jarzmie trójwarstwowym. W przedstawionej maszynie stosunek reluktancji jarzma wewnętrznego do reluktancji drogi dla strumienia bocznikującego (bardzo duża reluktancja szczeliny powietrznej δ_o) kształtuje się jak 1 :20.

4. WYNIKI BADAŃ I WNIOSKI

Na bazie silnika bocznikowego typu PRAZa 180L-4 o mocy $P_n = 5,5$ kW, $U_n = 220$ V, $I_n = 29$ A, $n_n = 950$ obr./min produkcji ZEÜOia „Elmor” w Gdańsku wykonano maszynę prototypową z jarzmem zwiżanym z taśmy blachy elektrotechnicznej gatunku 2,6-E2-0,5 grubości $g = 0,5$ mm o liczbie warstw $N = 50$. Maszyna ta przy indukcji $B_s = 0,6$ T w szczelinie głównej (rozkład indukcji w jarzmie przedstawia krzywa 2 na rys. 3) i przy niezmiennych parametrach biegunów komutacyjnych (niezmieniona liczba zwojów $z_k = 50$ /biegun i szczelina $\delta_k = 3$ mm) uzyskuje komutację lekko opóźnioną. Przy obciążeniu znamionowym, jak wynika z obliczeń przeprowadzonych na podstawie wzoru (4), indukcja w szczelinie pod biegunem komutacyjnym wynosi $B_k = 0,088$ T i jest niższa niż w maszynie typowej ($B_k = 0,1$ T). Przeprowadzone badania strefy komutacji beziskrowej potwierdzają występowanie komutacji lekko opóźnionej (rys. 5).



Rys.5. Strefa beziskrowej komutacji
Fig.5. Sparkless commutation zone

W celu uzyskania komutacji lekko przyspieszonej przy utrzymaniu niezmiennego stosunku $\theta_k / A \cdot \tau = 1,2$, jaki występuje w maszynie typowej, należy zmniejszyć szczelinę pod biegunem komutacyjnym z $\delta_k = 3$ mm do $\delta_k = 2,6$ mm. Zmniejszenie szczeliny δ_k powoduje mniejsze rozproszenie magnetyczne biegunów, a co za tym idzie, możliwość zmniejszenia szerokości b_k

nabiegownika bieguna komutacyjnego. Drugim możliwym rozwiązaniem jest zwiększenie zwojności uzwojenia komutacyjnego, a zatem zwiększenie θ_k . Odpowiedź, w jakim kierunku powinna nastąpić zmiana w obwodzie biegunów komutacyjnych, wymaga rozszerzonych badań laboratoryjnych.

LITERATURA

1. Dąbrowski M.: Pola i obwody magnetyczne maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1971.
2. Dubicki B.: Maszyny elektryczne. Tom I. Maszyny prądu stałego. PWN, Warszawa 1958.
3. Gabrys W., Gogolewski Z.: Maszyny prądu stałego. Konstrukcja, obliczanie, wytwarzanie. PWT, Warszawa 1960.
4. Latek W.: Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle. WNT, Warszawa 1979.
5. Muszalski Z.: Teoria i fizyka komutacji maszyn elektrycznych. PWN, Warszawa 1997.
6. Witkowski J.: Niekonwencjonalna maszyna prądu stałego o zmniejszonym strumieniu rozproszenia zewnętrznego. Praca doktorska. Wydział Elektryczny PG, Gdańsk 1988.
7. Witkowski J.: Electromagnetic parameters of an unconventional dc motor. Zeszyty Naukowe PŁ, Elektryka nr 92/1998, s. 123-128.
8. Witkowski J.: Zasady wyznaczania wymiarów głównych maszyny prądu stałego z jarmem blachowanym niekonwencjonalnie. Prace Naukowe PW, Elektryka z. 111/1999, s. 377-384.
9. Witkowski J.: Model fizyczny obwodu magnetycznego maszyny prądu stałego o blachowanym niekonwencjonalnie jarmie. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pom. El. PW Zeszyty Nr 50/20, str. 245-250. Wrocław, 2000.
10. PN-E-06701: 1988: Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Władysław Paszek

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 lutego 2001 r.

Abstract

The stator core assembled from magnetic sheets in an unconventional way has got a complex and non-homogenous structure caused by its crosswise lamination with respect to the main magnetic axis. Such a structure of the core causes that the circuit and the numerical analysis of the magnetic circuit becomes very complex, therefore the equivalent circuit of the core is utilized in the calculations. The main condition that has to be met when creating the equivalent circuit is that the magnetic permeability and the flux density inside the adjacent layers within the contact zone of two different environments should take the same values as those in the real multi-layer core.

The equivalent circuit of the "rolled" core shown in Fig.1.a can be simplified to the circuit shown in Fig.1.b.

The $R_{F_{e1}}$ and $R_{F_{e2}}$ shown there are the reluctance of an equivalent internal and external ferromagnetic material within the 3-layer stator core structure. R_{δ_0} is the reluctance of the air gap δ_0 (Fig.2b). The stator core parameters are: magnetic permeability μ_1 and μ_2 of the both ferromagnetic materials, their thickness h_1 and h_2 and the air gap δ_0 . These parameters can be determined on the basis of the flux density distribution inside the core (Fig.3) corresponding to the given B_{δ} air gap flux density. The introduction of the 3-layer stator core enables the circuit calculations performed in the same way as in case of a classical machine.

The necessity of taking into account the MMF across the ferromagnetic part of the stator yoke core (equation 4) at the commutating pole MMF calculations is the basic difference with respect to the classical machine. The performed calculations have shown that the nominal load of the prototype machine leads to a slight under-commutation. This has been confirmed by the experimental investigations of the sparkles zone (Fig.5). In order to achieve a slight over-commutation at constant relation $\Theta_k / A \cdot \tau = 1.2$ (typical for classical machine) the air gap δ_k under the commutating pole should be decreased from 3mm to 2.6mm.