

Jerzy KUDŁA

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

OBLICZANIE NIELINIOWYCH CHARAKTERYSTYK SPRZEŻEŃ MAGNETYCZNYCH POLA MAGNETYCZNEGO GŁÓWNEGO W MASZYNIE SYNCHRONICZNEJ Z WYDATNYMI BIEGUNAMI

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodykę obliczeń pola magnetycznego głównego w maszynach elektrycznych z wydatnymi biegunami przy uwzględnieniu nieliniowych charakterystyk magnesowania rdzeni ferromagnetycznych stojana i wirnika, opartą na numerycznym rozwiązaniu równań pola magnetycznego metodą elementów skończonych. Wyznaczono charakterystyki sprzężeń magnetycznych tego pola z obwodami elektrycznymi maszyny w osiach d i q oraz dokonano ich aproksymacji za pomocą syntetycznych charakterystyk sprzężeń. Obliczenia szczegółowe przeprowadzono dla hydrogeneratora o mocy 150 MV·A.

CALCULATIONS OF NONLINEAR CHARACTERISTICS OF MAIN MAGNETIC FLUX LINKAGES IN A SYNCHRONOUS MACHINE WITH SALIENT POLES

Summary. Methodology of main magnetic flux calculations for electric machines with salient poles when taking into account nonlinear magnetization characteristics of rotor and stator ferromagnetic cores has been presented in the paper. It is based on numerical solution of magnetic flux equations by the finite element method. Characteristics of magnetic flux linkages with machine electric circuits in d and q axes have been determined. Their approximation has been made by means of the synthetic characteristics of magnetic linkages. The detailed calculations have been carried out for a hydrogenerator with 150 MV·A power.

1. WPROWADZENIE

Zjawisko nasycenia rdzeni ferromagnetycznych stojana i wirnika maszyn elektrycznych prądu przemiennego, spowodowane nieliniowymi charakterystykami magnesowania materiałów magnetycznych tworzących rdzenie, utrudnia sformułowanie poprawnych modeli matematycznych maszyn elektrycznych. Pominięcie tego zjawiska lub też uwzględnienie go w niedostatecznym stopniu może być jedną z przyczyn rozbieżności między wynikami obliczeń oraz wynikami pomiarów laboratoryjnych. Rozbieżności te mogą pojawić się zwłaszcza przy badaniach takich stanów pracy maszyny, w których stan nasycenia rdzeni ferromagnetycznych zmienia się w szerokich granicach.

W ostatnich kilkunastu latach w wielu ośrodkach naukowych podejmowane są różnorodne próby uwzględnienia zjawiska nasycenia w obwodowych modelach matematycznych maszyn elektrycznych, za pośrednictwem nieliniowych charakterystyk sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego w maszynie z jej obwodami elektrycznymi [1]...[9]. Z technicznego punktu widzenia na szczególną uwagę zasługują prace bazujące na rozdziale wypadkowego pola magnetycznego w maszynie na pola składowe: główne i rozproszenia i na oddzielnej analizie zjawiska nasycenia rdzeni ferromagnetycznych przez te pola. Dzięki takiemu sposobowi postępowania wspomniane wyżej charakterystyki wyrazić można za pomocą niewielkiej liczby zmiennych niezależnych, co w znacznym stopniu upraszcza model matematyczny maszyny oraz ułatwia wyznaczenie jego parametrów. W artykule rozpatrzono zjawisko nasycenia rdzeni ferromagnetycznych przez pole magnetyczne główne w maszynie synchronicznej z wydatnymi biegunami. Podano metodykę obliczeń tego pola oraz charakterystyk jego sprzężeń z obwodami elektrycznymi maszyny w osiach d i q . Przeprowadzono analizę tych charakterystyk oraz zaproponowano ich aproksymację za pomocą syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych. Obliczenia szczegółowe wykonano dla hydrogeneratora ADV - 566 o mocy 150 MV·A.

2. METODYKA OBLICZEŃ POLA MAGNETYCZNEGO GŁÓWNEGO W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH PRĄDU PRZEMIENNEGO Z WYDATNYMI BIEGUNAMI

Wyznaczenie pola magnetycznego głównego w maszynie elektrycznej, w której uwzględnia się jej rzeczywistą strukturę geometryczną, nieliniowe, jednoznaczne charakterystyki magnesowania rdzeni ferromagnetycznych stojana i wirnika oraz uzwojenia

umieszczone w żłobkach, wymaga opracowania modeli fizycznych maszyny, w których to pole występuje w sposób dominujący, oraz opracowania metodyki jego obliczenia.

Przy realizacji obydwu zadań skorzystać można z:

- wynikającej z całkowitego prawa przepływu koncepcji uzwojenia lub uzwojeń magnesujących, wytwarzających pole magnetyczne główne i zastępujących działanie uzwojeń stojana i wirnika (w sensie równoważności ich okładów prądowych),
- wynikającej z analizy sprzężeń magnetycznych w wyidealizowanej maszynie elektrycznej wydawnobiegunowej o idealnie gładkich powierzchniach stojana i wirnika i sinusoidalnie rozłożonych uzwojeniach magnesujących możliwości stosowania transformacji dwuosiowej Parka przy nasycających się rdzeniach ferromagnetycznych stojana i wirnika [4].

Korzystając z nich przyjęto do obliczeń pola magnetycznego głównego model fizyczny maszyny elektrycznej o następujących cechach:

- rdzenie ferromagnetyczne stojana i wirnika są względem siebie nieruchome (wynik transformacji Parka),
- uzwojenia magnesujące, wytwarzające pole magnetyczne główne, umieszczone są jedynie w żłobkach stojana,
- uzwojenia i obwody elektryczne wirnika są otwarte.

W modelu tym, odwzorowującym w sposób wierny strukturę geometryczną maszyny, pole magnetyczne sprzęgające się z uzwojeniami magnesującymi nie jest wyłącznie polem magnetycznym głównym. Dlatego też w pracy przyjęto, że pole magnetyczne główne w maszynie tworzy podstawowa harmoniczna przestrzenna składowej promieniowej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej maszyny, występująca na powierzchni wyznaczonej przez promień zewnętrzny wirnika.

Wyznaczenie podstawowej harmonicznej przestrzennej składowej promieniowej indukcji magnetycznej wymaga rozwiązania nieliniowego zagadnienia magnetostatycznego w przekroju płaskim maszyny, określonego przez równanie (1)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu(B) \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu(B) \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j, \quad (1)$$

gdzie:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}, \quad \nu(B) = \frac{1}{\mu(B)}, \quad (2)$$

w którym wartości przenikalności magnetycznej oraz gęstości prądu zależą od rodzaju jednorodnego podobszaru maszyny, co pokazano w tablicy 1.

Tablica 1

Rodzaj jednorodnego podobszaru	μ	j
szczelina powietrzna żłobki wirnika	$\mu = \mu_0$	$j = 0$
rdzenie ferromagnetyczne stojana i wirnika	$\mu = \mu(B)$	$j = 0$
żłobki stojana	$\mu = \mu_0$	$j \neq 0$

Gęstości prądów płynących w żłobkach stojana określone są poprzez wartości chwilowe fazowych prądów magnesujących, wyrażonych za pośrednictwem wektora przestrzennego prądu magnesującego według relacji (3).

$$i_{\mu A} = \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re}\{L_{\mu}\}, \quad i_{\mu B} = \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re}\{a^2 L_{\mu}\}, \quad i_{\mu C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re}\{a L_{\mu}\}, \quad (3)$$

$$L_{\mu} = I_{\mu} e^{j\gamma_{\mu}}.$$

Przy rozwiązywaniu wyżej wymienionego zagadnienia brzegowego konieczne jest uwzględnienie:

- jednorodnego warunku brzegowego Dirichleta ($A = 0$) na brzegu zewnętrznym otaczającym maszynę,
- warunków symetrii bądź antysymetrii na częściach brzegu powstałych z rozcięcia przekroju poprzecznego maszyny na powtarzające się segmenty,
- warunków przejścia na granicach jednorodnych podobszarów (k i l)

$$A_k = A_l$$

(4)

$$\frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{\partial A_k}{\partial n} = \frac{1}{\mu_l} \cdot \frac{\partial A_l}{\partial n}$$

Rozwiązanie nieliniowego zagadnienia magnetostatycznego w rozpatrywanym modelu fizycznym maszyny jest możliwe tylko przy wykorzystaniu metod numerycznych (np. metody elementów skończonych).

Biorąc pod uwagę, że w maszynach elektrycznych z wydatnymi biegunami amplituda i położenie (argument) wyznaczanego wektora przestrzennego podstawowej harmonicznej składowej promieniowej indukcji magnetycznej zależy od modułu i argumentu wektora przestrzennego prądu magnesującego, obliczenia rozkładu pola magnetycznego należy przeprowadzić dla różnych wartości modułu i argumentu tego prądu.

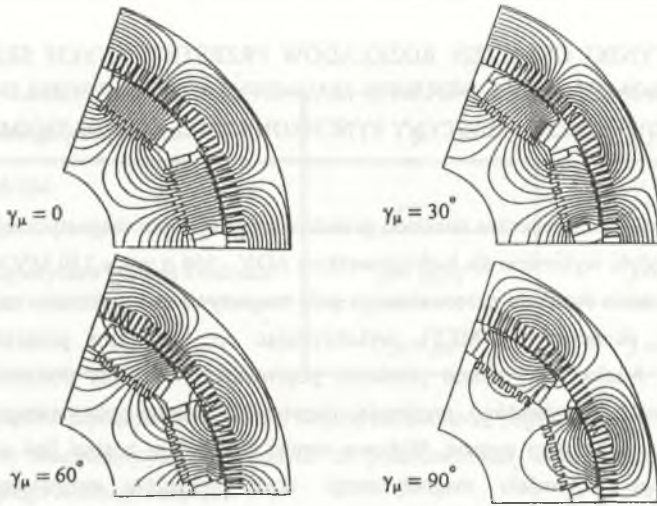
2. WYNIKI OBLICZEŃ ROZKŁADÓW PRZESTRZENNYCH SKŁADOWEJ PROMIENIOWEJ INDUKCJI MAGNETYCZNEJ W SZCELINIE POWIETRZNEJ MASZYNY SYNCHRONICZNEJ Z WYDATNYMI BIEGUNAMI

Obliczenia numeryczne rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej według podanej wyżej metodyki wykonano dla hydrogeneratora ADV - 566 o mocy 150 MVA.

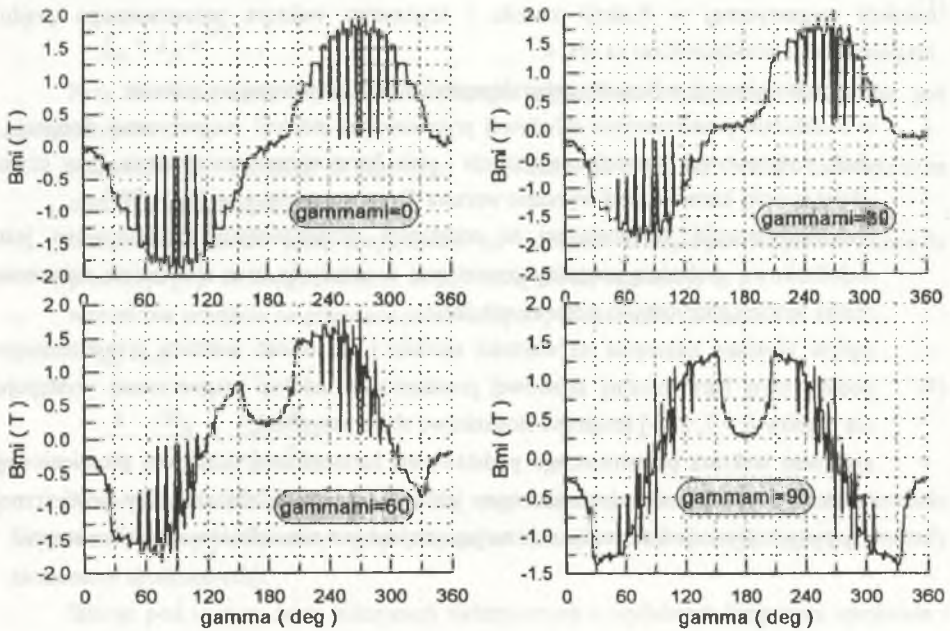
Obliczenia rozkładu przestrzennego pola magnetycznego wykonano za pomocą metody elementów skończonych (MES), wykorzystując do tego celu program komputerowy FEMAG*. Analizowany obszar przekroju poprzecznego maszyny podzielono na elementy trójkątne (~9 tys. elementów), przyjmując rozwiązanie równań pola wewnątrz nich w postaci wielomianu pierwszego stopnia. Wybrane wyniki obliczeń w postaci linii ekwipotencjalnych wektorowego potencjału magnetycznego oraz rozkładów przestrzennych składowej promieniowej indukcji magnetycznej i jej widma harmonicznego obliczonych dla $I_{\mu} = 1,8$ [-]; $\gamma_{\mu} = 0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}$ przedstawiono na rys. 1, 2, 3. Natomiast charakterystyki modułu i argumentu wektora przestrzennego podstawowej harmonicznego składowej promieniowej indukcji magnetycznej w funkcji modułu i argumentu wektora przestrzennego prądu magnesującego przedstawiono na rys. 4.

Z przedstawionych wykresów i charakterystyk wynikają następujące wnioski:

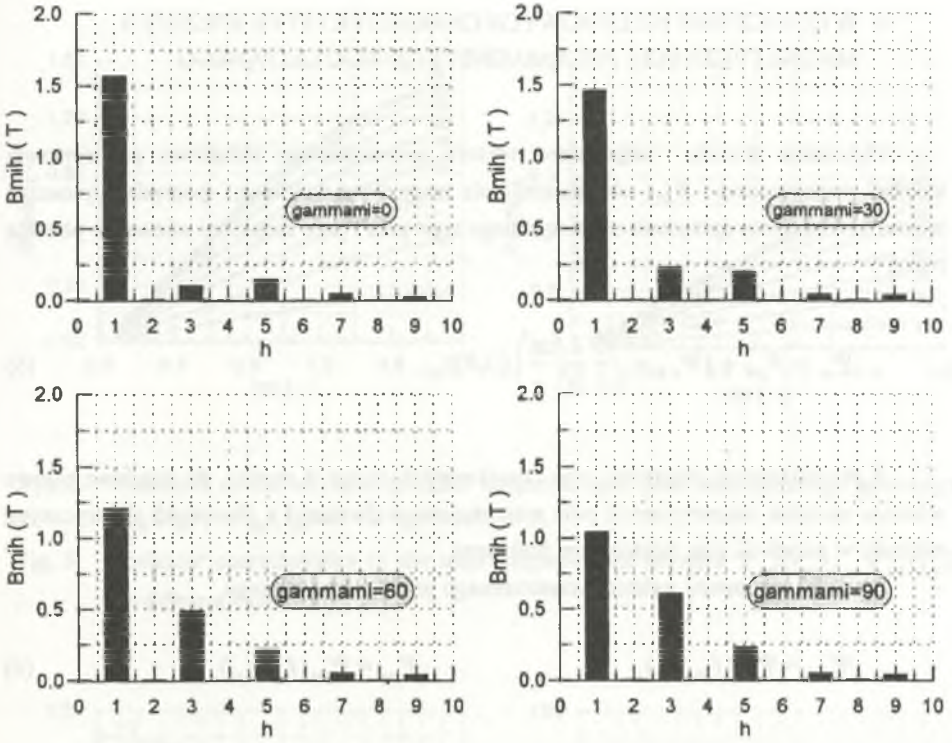
- w rozkładzie przestrzennym składowej promieniowej indukcji magnetycznej dominują, obok podstawowej harmonicznego, trzecia i piąta harmonicznego przestrzenna, przy czym udział trzeciej harmonicznego wyraźnie wzrasta dla argumentów $\gamma_{\mu} \in (60^{\circ} \div 90^{\circ})$,
- obecność trzeciej harmonicznego w rozkładzie przestrzennym spowodowana jest niejednakową grubością szczeliny powietrznej w maszynie oraz zjawiskiem nasycenia rdzeni ferromagnetycznych stojana i wirnika,
- wpływ zjawiska nasycenia na wartości modułu i argumentu wektora przestrzennego podstawowej harmonicznego składowej promieniowej indukcji magnetycznej występuje dla prądów $I_{\mu} > 1, 2$ [-] (maszyna stosunkowo słabo nasycona),
- argument wektora przestrzennego podstawowej harmonicznego składowej promieniowej indukcji magnetycznej zdeterminowany jest zmienną grubością szczeliny powietrznej maszyny, wpływ zjawiska nasycenia na jego zmianę jest niewielki i wynosi kilka stopni.



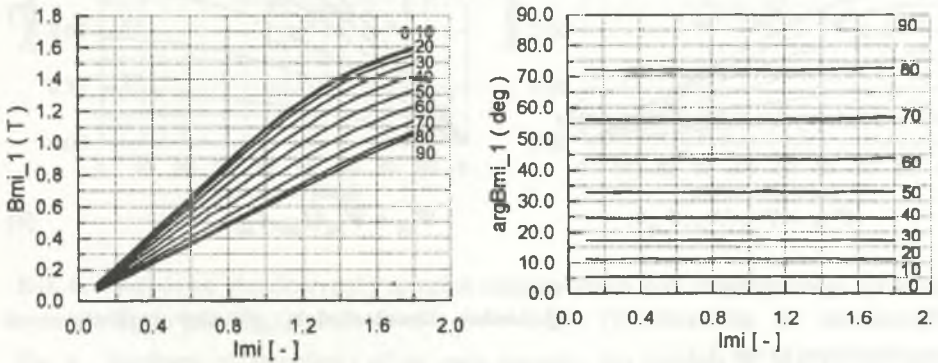
Rys. 1. Linie ekwipotencjalne wektorowego potencjału magnetycznego
 Fig. 1. Isolines of the magnetic vector potential



Rys. 2. Rozkład przestrzenny składowej promieniowej indukcji magnetycznej na powierzchni wyznaczonej przez promień zewnętrzny wirnika
 Fig. 2. Distribution of radial component of magnetic flux density on the surface determined by the rotor external radius



Rys. 3. Widmo harmoniczne rozkładu przestrzennego składowej promieniowej indukcji magnetycznej
 Fig. 3. Harmonic spectrum of radial component of magnetic flux density



Rys. 4. Charakterystyki modułu i argumentu wektora przestrzennego podstawowej harmonicznej przestrzennej indukcji magnetycznej
 Fig. 4. Plots of the magnitude and argument of the space vector of fundamental harmonic of magnetic flux density

4. WYZNACZENIE NIELINIOWYCH CHARAKTERYSTYK SPRĘŻEŃ MAGNETYCZNYCH POLA MAGNETYCZNEGO GŁÓWNEGO

Obliczenie modułu i argumentu wektora przestrzennego składowej promieniowej indukcji magnetycznej $\underline{B}_{\mu 1}$, określającej pole magnetyczne główne, pozwala wyznaczyć wektor przestrzenny sprzężenia magnetycznego tego pola i jego składowe osiowe za pomocą relacji

$$\underline{\Psi}_{\mu} = \Psi_{\mu d} + j\Psi_{\mu q} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2}{p} \left(\frac{z_1}{a} \right) \xi_{1l} R \underline{B}_{\mu 1}. \quad (5)$$

Z przedstawionej zależności oraz charakterystyk na rys. 4 wynika, że składowe osiowe wektora sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego z obwodami elektrycznymi maszyny w osiach d i q są nieliniowymi funkcjami:

– modułu i argumentu wektora przestrzennego prądu magnesującego

$$\Psi_{\mu d} = \Psi_{\mu d}(I_{\mu}, \gamma_{\mu}), \quad \Psi_{\mu q} = \Psi_{\mu q}(I_{\mu}, \gamma_{\mu}), \quad (6)$$

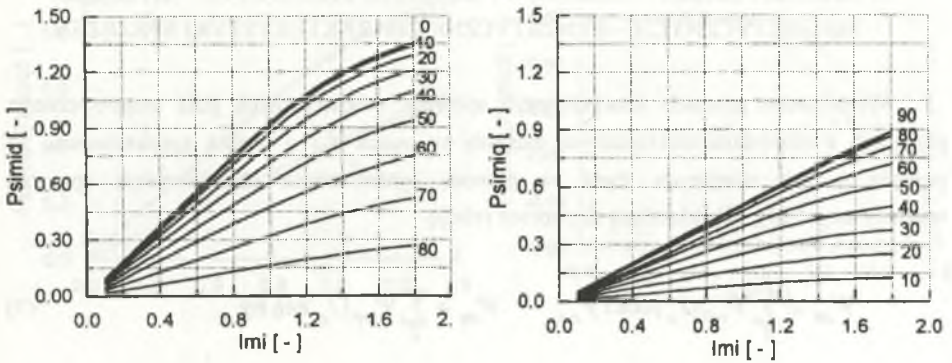
lub też uwzględniając, że

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{\mu d}^2 + I_{\mu q}^2}, \quad \gamma_{\mu} = \arctg \frac{I_{\mu q}}{I_{\mu d}}, \quad (7)$$

– składowych osiowych tego prądu

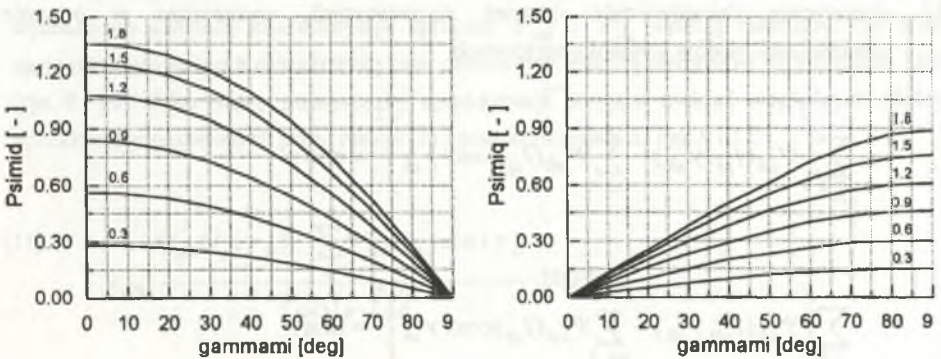
$$\Psi_{\mu d} = \Psi_{\mu d}(I_{\mu d}, I_{\mu q}), \quad \Psi_{\mu q} = \Psi_{\mu q}(I_{\mu d}, I_{\mu q}). \quad (8)$$

Wyznaczone na podstawie (5) odpowiednie charakterystyki sprzężeń magnetycznych przedstawiono na rys. 5, 6.



Rys. 5. Nieliniowe charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego $\Psi_{\mu d}(I_\mu)$, $\Psi_{\mu q}(I_\mu)$ dla różnych wartości γ_μ

Fig. 5. Nonlinear characteristics of the main magnetic flux linkages $\Psi_{\mu d}(I_\mu)$, $\Psi_{\mu q}(I_\mu)$ for different values of γ_μ



Rys. 6. Nieliniowe charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego $\Psi_{\mu d}(\gamma_\mu)$, $\Psi_{\mu q}(\gamma_\mu)$ dla różnych wartości I_μ

Fig. 6. Nonlinear characteristics of the main magnetic flux linkages $\Psi_{\mu d}(I_\mu)$, $\Psi_{\mu q}(I_\mu)$ for different values of I_μ

5. APROKSYMACJA NIELINIOWYCH CHARAKTERYSTYK SPRĘŻEŃ MAGNETYCZNYCH – SYNTETYCZNE CHARAKTERYSTYKI SPRĘŻEŃ

Wyznaczone gromady charakterystyk sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego z obwodami elektrycznymi maszyny w osiach d i q można aproksymować za pomocą funkcji sklejanych, bądź za pomocą syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych [4], [6], określonych poprzez relację

$$\Psi_{\mu d} \cong \sum_i \Psi_{\mu di}(I_\mu) \cos i \gamma_\mu, \quad \Psi_{\mu q} \cong \sum_i \Psi_{\mu qi}(I_\mu) \sin i \gamma_\mu. \quad (9)$$

W pracy jako syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych przyjęto:

- a) charakterystyki sprzężeń magnetycznych, obliczone dla dwóch szczególnych położenia wektora przestrzennego prądu magnesującego $\gamma_\mu = 0$ i $\gamma_\mu = \pi/2$, czyli

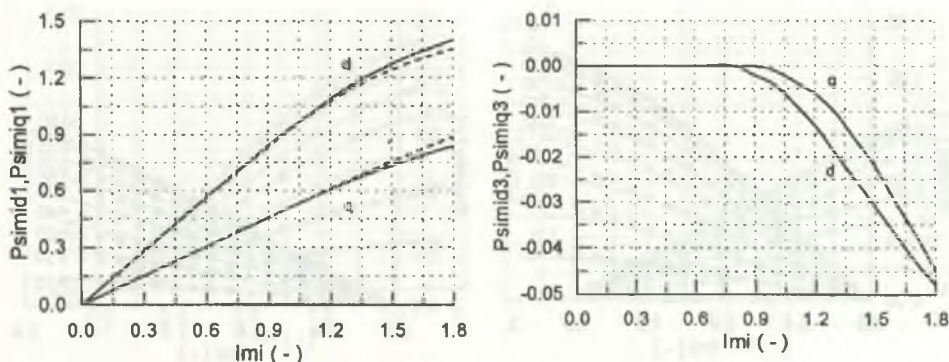
$$\Psi_{\mu d1} = \Psi_{\mu d}(I_\mu, \gamma_\mu = 0), \quad \Psi_{\mu q1} = \Psi_{\mu q}(I_\mu, \gamma_\mu = \pi/2), \quad (10)$$

- b) syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych, wyznaczone w procesie minimalizacji błędów średniokwadratowych

$$\sum_{j,k} \left(\Psi_{\mu d}(I_{ij}, \gamma_{\mu k}) - \sum_{i=1,3} \Psi_{\mu di}(I_{ij}) \cos i \gamma_{\mu k} \right)^2 = \min, \quad (11)$$

$$\sum_{j,k} \left(\Psi_{\mu q}(I_{ij}, \gamma_{\mu k}) - \sum_{i=1,3} \Psi_{\mu qi}(I_{ij}) \sin i \gamma_{\mu k} \right)^2 = \min.$$

Oba rodzaje syntetycznych charakterystyk przedstawiono na rys. 7.



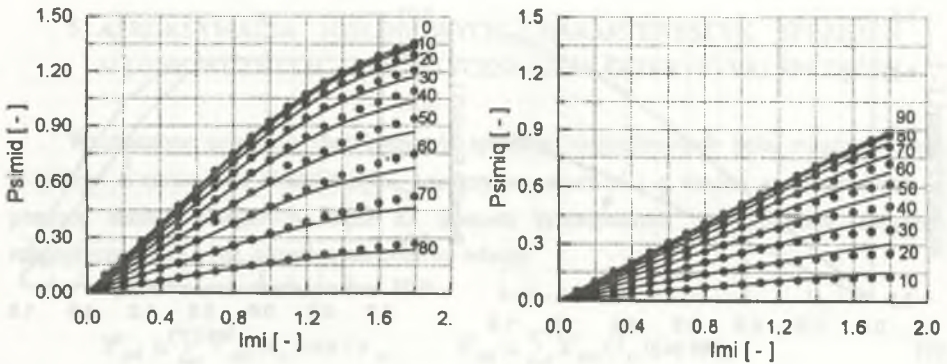
Rys. 7. Syntetyczne charakterystyki $\Psi_{\mu d, q1}(I_{\mu})$, $\Psi_{\mu d, q3}(I_{\mu})$
 - - - - - wyznaczone wg a), ————— wyznaczone wg b)

Fig. 7. Synthetic characteristics $\Psi_{\mu d, q1}(I_{\mu})$, $\Psi_{\mu d, q3}(I_{\mu})$
 - - - - - determined according to a), ————— determined according to b)

Wykorzystując obydwa rodzaje syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych wyznaczono gromady charakterystyk sprzężeń $\Psi_{\mu d}$ i $\Psi_{\mu q}$ według zależności (9), które następnie porównano z charakterystykami obliczonymi metodą elementów skończonych MES (rys. 8 i 10). Jako miarę poprawności aproksymacji przyjęto rozkład względnych błędów aproksymacji określonych przez relacje (2) i przedstawionych na rys. 9 i 11.

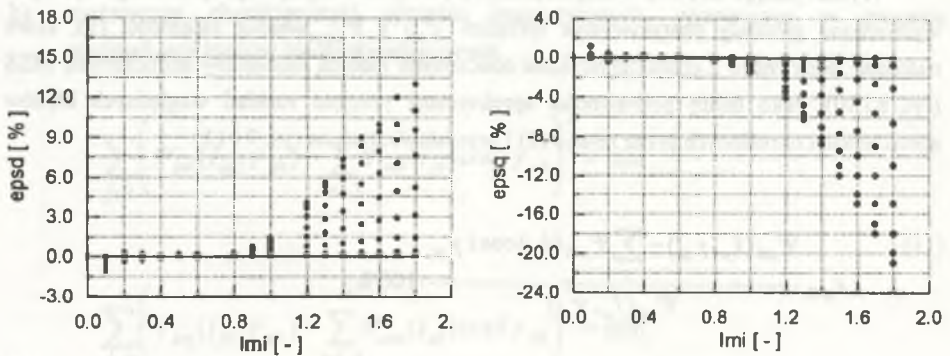
$$\varepsilon_{d\%} = \frac{\Psi_{\mu d}(I_{\mu}, \gamma_{\mu}) - \sum_i \Psi_{\mu di}(I_{\mu}) \cos i \gamma_{\mu}}{\Psi_{\mu d}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})} \cdot 100\%, \tag{12}$$

$$\varepsilon_{q\%} = \frac{\Psi_{\mu q}(I_{\mu}, \gamma_{\mu}) - \sum_i \Psi_{\mu qi}(I_{\mu}) \sin i \gamma_{\mu}}{\Psi_{\mu q}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})} \cdot 100\%.$$



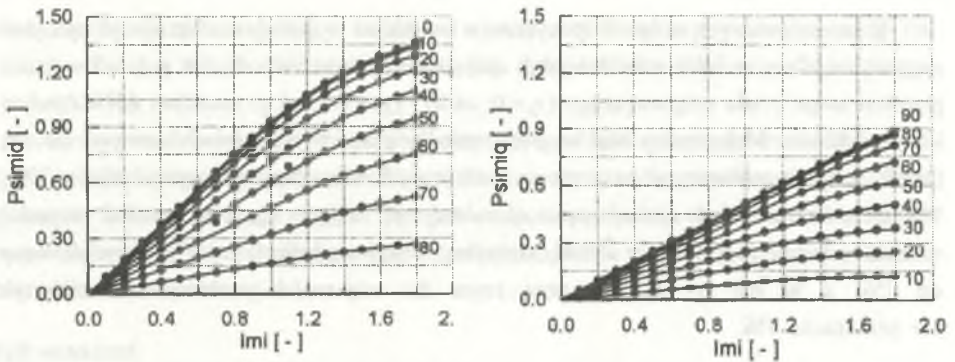
Rys. 8. Porównanie charakterystyk $\Psi_{\mu,d}(I_{\mu})$, $\Psi_{\mu,q}(I_{\mu})$ dla różnych kątów γ_{μ}
 ••••• - obliczonych (MES), ——— - aproksymowanych za pomocą syntetycznych charakterystyk wyznaczonych według a)

Fig. 8. Comparison of characteristics $\Psi_{\mu,d}(I_{\mu})$, $\Psi_{\mu,q}(I_{\mu})$ for different angles γ_{μ}
 ••••• - calculated (FEM), ——— - approximated by means of the synthetic characteristics determined according to a)



Rys. 9. Rozkład wartości względnego błędu procentowego $\epsilon_{d\%}$, $\epsilon_{q\%}$ pomiędzy charakterystykami $\Psi_{\mu,d}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})$, $\Psi_{\mu,q}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})$ obliczonymi metodą MES oraz za pomocą syntetycznych charakterystyk wyznaczonych według a)

Fig. 9. Distribution of the relative percentage error values $\epsilon_{d\%}$, $\epsilon_{q\%}$ between characteristics $\Psi_{\mu,d}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})$, $\Psi_{\mu,q}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})$ calculated by the FEM and by means of the synthetic characteristics determined according to a)

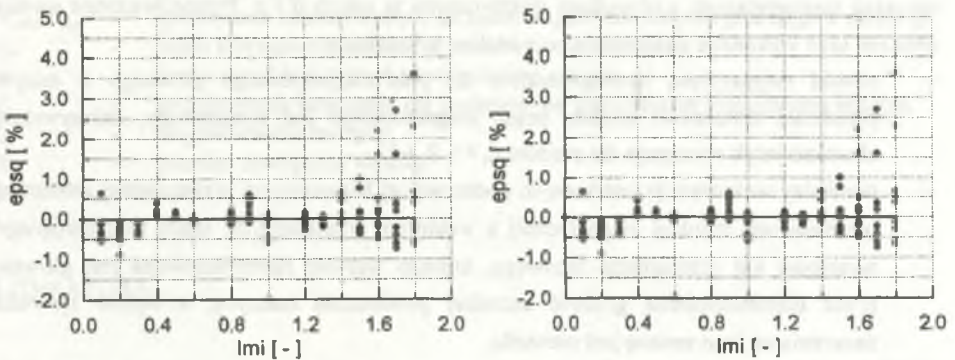


Rys. 10. Porównanie charakterystyk $\Psi_{\mu d}(I_{\mu})$, $\Psi_{\mu q}(I_{\mu})$ dla różnych kątów γ_{μ}

••••• - obliczonych (MES), ——— - aproksymowanych za pomocą syntetycznych charakterystyk wyznaczonych według b)

Fig. 10. Comparison of characteristics $\Psi_{\mu d}(I_{\mu})$, $\Psi_{\mu q}(I_{\mu})$ for different angles γ_{μ}

••••• - calculated (FEM), ——— - approximated by means of the synthetic characteristics determined according to b)



Rys. 11. Rozkład wartości względnego błędu procentowego $\epsilon_{d\%}$, $\epsilon_{q\%}$ pomiędzy charakterystykami $\Psi_{\mu d}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})$, $\Psi_{\mu q}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})$ obliczonymi metodą (MES) oraz za pomocą syntetycznych charakterystyk wyznaczonych według b)

Fig. 11. Distribution of relative percentage error values $\epsilon_{d\%}$, $\epsilon_{q\%}$ between characteristics $\Psi_{\mu d}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})$, $\Psi_{\mu q}(I_{\mu}, \gamma_{\mu})$ calculated by the FEM and by means of the synthetic characteristics determined according to b)

Z przedstawionych na rys. 7-10 wykresów wynika, że wyrażenie charakterystyk sprzężeń magnetycznych za pomocą charakterystyk sprzężeń obliczonych dla dwóch położenia wektora przestrzennego prądu magnesującego ($\gamma_\mu = 0$; oś d) i ($\gamma_\mu = \pi/2$; oś q) umożliwi tylko zgrubne ich przybliżenie. Maksymalny błąd względny między charakterystykami obliczonymi metodą (MES) a aproksymowanymi za pomocą syntetycznych charakterystyk wynosi około 20%. Wyznaczenie natomiast syntetycznych charakterystyk $\Psi_{\mu d, q1}$, $\Psi_{\mu d, q2}$ w wyniku procedur minimalizacji daje zadowalające wyniki. Maksymalny błąd względny w osi d jest zredukowany do 1%, a w osi q do 3%, przy czym dla większości punktów charakterystyk nie przekracza 1%.

5. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiona metodyka obliczeń pola magnetycznego głównego w maszynach elektrycznych z wydatnymi biegunami, bazująca na numerycznym rozwiązaniu nieliniowego zagadnienia magnetostaticznego w przekroju płaskim maszyny, pozwoliła na wyznaczenie tego pola dla hydrogenerators ADV-566 i na obliczenie nieliniowych charakterystyk jego sprzężeń magnetycznych z obwodami elektrycznymi w osiach d i q . Przeprowadzone wyniki obliczeń oraz wykonane na ich podstawie analizy pokazały, że:

- obwód magnetyczny hydrogenerators dla pola magnetycznego głównego w dużym przedziale zmienności modułu prądu magnesującego jest nienasycony, zakrzywienie charakterystyk występuje dla prądów $I_\mu > 1, 2$ [-],
- pomiędzy wektorem przestrzennym podstawowej harmonicznnej przestrzennej składowej promieniowej indukcji magnetycznej a wektorem przestrzennym prądu magnesującego występuje kąt przesunięcia fazowego, którego wartość zdeterminowana jest głównie przez nierównomierną grubość szczeliny powietrznej maszyny, a wpływ zjawiska nasycenia na jego zmianę jest niewielki,
- w rozkładzie przestrzennym składowej promieniowej indukcji magnetycznej występuje duży udział 3 harmonicznnej przestrzennej spowodowany zarówno nierównomierną grubością szczeliny powietrznej jak i zjawiskiem nasycenia,
- nieliniowe charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola magnetycznego głównego z obwodami elektrycznymi maszyny można z dobrą dokładnością aproksymować za pomocą dwóch w każdej osi syntetycznych charakterystyk sprzężeń magnetycznych (błąd względny jest praktycznie w całym zakresie mniejszy od 1%),

- korzystanie tylko z jednej w każdej osi syntetycznej charakterystyki wyznaczonej dla $\gamma_\mu = 0$, $\gamma_\mu = \pi/2$, stosowane w praktyce jest mało dokładne (błąd względny mniejszy od 20%).

Syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych stanowią wygodne narzędzie do opisu sprzężeń magnetycznych obwodów elektrycznych maszyny z polem magnetycznym głównym. Ich wyznaczenie możliwe jest już za pomocą dwóch charakterystyk sprzężeń magnetycznych obliczonych dla kątów $\gamma_\mu \neq 0, \pi/2$ (np. $\gamma_\mu = 20^\circ$, $\gamma_\mu = 70^\circ$), co wydatnie skraca czas obliczeń komputerowych.

Spis oznaczeń

- $A = A_z$ - składowa w osi z wektorowego potencjału magnetycznego,
- B_x, B_y, B - składowe w osi x, y wektora indukcji magnetycznej oraz jego moduł,
- $I_\mu, I_{\mu d}, \gamma_\mu$ - wektor przestrzenny prądu magnesującego, jego moduł i argument (względem osi d wirnika),
- $I_{\mu d}, I_{\mu q}$ - składowe osiowe wektora przestrzennego prądu magnesującego,
- $i_{\mu A}, i_{\mu B}, i_{\mu C}$ - wartości chwilowe prądów magnesujących płynących w fazach A, B, C stojana,
- $B_{\mu 1}, B_{\mu 2}$ - wektor przestrzenny podstawowej harmonicznej przestrzennej składowej promieniowej indukcji magnetycznej i jego moduł,
- $\Psi_{\mu d}, \Psi_{\mu d s}, \Psi_{\mu q}$ - wektor przestrzenny sprzężenia magnetycznego pola magnetycznego głównego i jego składowe osiowe,
- $\Psi_{\mu d s}, \Psi_{\mu q s}$ - syntetyczne charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola głównego w osi d i q ,
- z_1 - liczba szeregowo połączonych zwojów uzwojeń stojana,
- a - liczba par gałęzi równoległych uzwojeń stojana,
- ξ_1 - współczynnik uzwojenia dla podstawowej harmonicznej przestrzennej indukcji,
- l_h - długość idealna maszyny,
- R - promień zewnętrzny wirnika.

LITERATURA

1. de Mello F.P., Hannett L.N.: Representation of saturation in synchronous machines, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No 4, November 1986, pp.8-18.
2. El-Serafi A.M., Abdallah A.S.: Effect of the saturation curves in various axes on salient-pole synchronous machines; Proc of ICEM'90, pp 404-409.
3. Filc R.W., Ljabuk N.N.: Matematičeskoje modelirovanje javnopoljusnich sinchronnych maszin. Izdatielstvo Svit, Lwow 1991.
4. Kudła J.: Indukcyjności maszyn elektrycznych prądu przemiennego z nieliniowym obwodem magnetycznym głównym; XVI Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, SPETO, Gliwice - Ustroń 1993, Tom II, ss. 369-375.

5. Kudła J.: Nieliniowe charakterystyki sprzężeń magnetycznych pola głównego w maszynie synchronicznej cylindrycznej. Prace XXXI Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Ustroń 1995.
6. Ramshaw R.S., Xie G.: Nonlinear model of nonsalient synchronous machines, Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, No 7, July 1984.
7. Shackhaft G., Henser P.B.: Model of generator saturation for use in power system studies. Proc. IEE, vol. 126, No 8, August 1979, pp. 759-763.
8. Sobczyk T.J., Sobczyk K.: On modelling of electromechanical energy converters with nonlinear magnetic circuit. Proc. of ICEM'90, Cambridge 1990, pp. 1012-1015.
9. Vas P.: Generalized analysis of saturated A.C. machines. Archiv für Elektrotechnik (64) 1981, No. 1, pp. 57-62.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz, prof. WSI w Opolu

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 lutego 1996 r.

Abstract

Methodology of main magnetic flux calculations for electric machines with salient poles when taking into account nonlinear magnetization characteristics of rotor and stator ferromagnetic cores has been presented in the paper. It has been based on numerical solution of nonlinear magnetostatic problem (1) by the finite elements method, and has enabled to determine the fundamental radial component of a magnetic density in the machine air-gap. Calculations of the magnetic field distributions have been carried out for different values of magnitude and argument of the magnetizing current space vector (Figs. 1-3). Characteristics of magnetic linkages (5) of the machine electric circuits in d and q axes (Figs. 5, 6) have been determined basing on the calculated characteristics (Fig. 4). Approximation of these characteristics using the synthetic characteristics of magnetic linkages (9) has been suggested. Linkage characteristics calculated for $\gamma_\mu = 0$ and $\gamma_\mu = \pi/2$ (10) and characteristics determined by mean-square error minimization (11) have been assumed to be the synthetic characteristics of magnetic linkages. Comparison of the magnetic linkage characteristics calculated by the finite element method (FEM) and those calculated by means of the synthetic characteristics of magnetic linkages (Figs. 8-11) has proved that it is possible to approximate these characteristics by two (in each axis) synthetic characteristics. Use of one synthetic characteristic only (in each axis) leads to unsatisfactory results. Application of the synthetic characteristics of magnetic linkages makes analysis of machine properties easier and reduces number of calculations necessary for determination of these properties.