

# Algorytm doboru wymiarów magnesów trwałych silników synchronicznych

Lech Nowak, Jacek Mikołajewicz, Krzysztof Kowalski, Dorota Stachowiak, Łukasz Knypiński, Wojciech Pietrowski  
Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej  
60 - 965 Poznań, ul. Piotrowo 3A, e-mail: dorota.stachowiak@put.poznan.pl

**Streszczenie** - W artykule przedstawiono algorytm wstępnego doboru wymiarów głównych magnetoelektrycznych silników synchronicznych. Tak określone wymiary mogą w procesie optymalizacji tworzyć zbiór rozwiązań startowych. Ponadto opracowano oprogramowanie do wyznaczania optymalnego punktu pracy magnesów trwałych. Uwzględniono przy tym nieliniowość obwodu magnetycznego oraz rozmagnesowujące oddziaływanie pola stojana.

## I. WPROWADZENIE

W algorytmach optymalizacji obiektów technicznych konieczne jest określenie na wstępie startowego zbioru punktów (częstek, osobników). Punkty w przestrzeni  $n$ -wymiarowej odpowiadają obiektom opisanym  $n$ -zmiennymi decyzyjnymi. Zbieżność procesu optymalizacji zależy w dużym stopniu od trafności wyboru rozwiązań startowych. Duże znaczenie ma w takim przypadku intuicja projektanta; przydaje się zbiór stosunkowo prostych reguł pozwalających określić wstępnie najważniejsze (główne) wymiary projektowanego silnika.

Wielkość każdego silnika elektrycznego determinują dwa podstawowe wymiary: wewnętrzna średnica stojana  $D$  i tzw. długość idealna  $L_i$ . Iloczyn  $D^2 L_i = V_w$  wyznacza objętość przestrzeni wirnika. W celu określenia tych wymiarów, niemal od początków rozwoju metod i algorytmów projektowania maszyn elektrycznych wykorzystywano tzw. stałe maszynowe, np. stałą Arnolda [1]. Jeżeli potraktować ją jako rzeczywistość stałą liczbę, to można przyjąć, że moment elektromagnetyczny maszyny jest proporcjonalny do objętości  $V_w$ , to znaczy  $T = c_T V_w$ .

## II. WSTĘPNY DOBÓR WYMIARÓW GŁÓWNYCH SILNIKA

W przypadku rozpatrywanych silników o wzbudzeniu magnetoelektrycznym stała  $c_T$  zależy przede wszystkim od gęstości energii materiału magnetycznie twardego, z którego są wykonane magnesy trwałe. Można ją oszacować wykorzystując np. metodę sił objętościowych. Siła działająca na pojedynczy bok cewki stojana:  $f_\alpha = B_r J_z s_p L_i$ , przy czym  $J_z$  – gęstość prądu w przewodzie,  $s_p$  – pole powierzchni przekroju przewodu. Całkując po obszarze całego uzwojenia otrzymuje się:

$$T = \frac{D^2 L_i}{4} g \cdot p \int_0^{\pi/p} \frac{B_r J_z}{2\mu_0} d\alpha \quad (1)$$

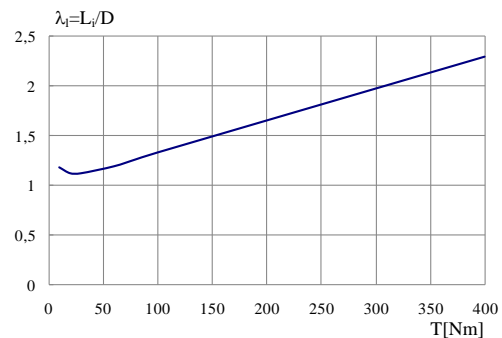
w którym  $g$  jest grubością warstwy przewodzącej, a iloczyn  $a = g J_z(\alpha)$  oznacza rozkład gęstości liniowej prądu [1]. Przyjmując średnią wartość indukcji na obwodzie  $B_r \approx 0,5$  T oraz typową dla maszyn o mocy od kilku do kilkudziesięciu kilowatów [1] wartość  $a_z \approx 50$  kA/m otrzymuje się stałą:

$$c_T = \frac{p}{4} \int_0^{\pi/p} \frac{B_r(\alpha) a_z(\alpha)}{2\mu_0} d\alpha \approx (12 \div 16) \cdot 10^3 [\text{Nm}/\text{m}^3] \quad (2)$$

W pracy [2] zebrano dane dotyczące szerokiej grupy silników magnetoelektrycznych. Z analizy tych danych wynika,

że średnia wartość stałej  $c_T$  dla silników z magnesami neodymowymi wynosi  $15 \cdot 10^{-3} [\text{Nm}/\text{cm}^3]$ , co jest zgodne z oszacowanymi powyżej wartościami. Jest to więc dobra podstawa do wstępnego doboru wymiarów głównych silnika.

Ze wzrostem momentu smukłość projektowanych maszyn wzrasta. To oznacza, że większy moment uzyskuje się w coraz to większym stopniu poprzez zwiększanie długości maszyn, a nie ich średnicy  $D$ . Wynika to z ograniczeń mechanicznych, ale także z tendencji do ograniczania momentu bezwładności. W maszynach o większej smukłości mniejsza jest ponadto długość połączeń czołowych. Zebrane na podstawie danych literaturowych wartości współczynnika smukłości  $\lambda_L = L_i/D = f(T)$  dla silników z magnesami Nd-Fe-B przedstawiono w formie wykresu na rys. 1.



Rys. 1. Współczynnik „smukłości” w funkcji postulowanego momentu

Zatem wymiary główne można szacować wg zależności:

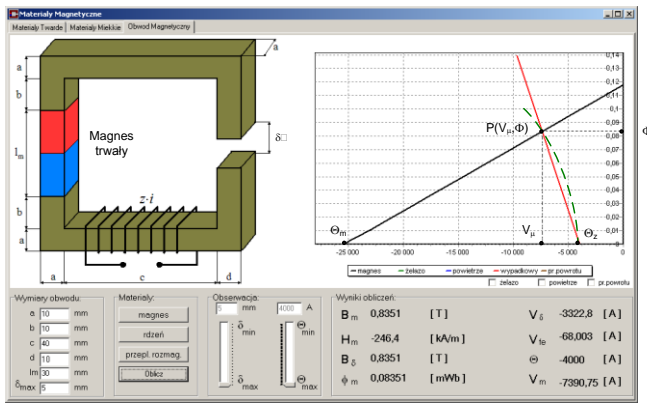
$$D = \sqrt[3]{\frac{T_N}{c_T \lambda_L}} \quad \text{oraz} \quad L_i = \lambda_L D \quad (3)$$

## III. WSTĘPNY DOBÓR WYMIARÓW MAGNESU

W maszynach magnetoelektrycznych stosuje się wiele rozwiązań konstrukcyjnych części wirnikowej. Klasyfikacja wynika z kierunku namagnesowania magnesów oraz ze sposobu ich montowania. Można wskazać 2 główne grupy silników: (a) z magnesowaniem promieniowym, (b) z magnesowaniem obwodowym. Poniżej przedstawiono algorytm doboru wymiarów magnesu w kształcie wycinka pierścienia. Taki kształt można potraktować jako przybliżenie początkowe w procesie poszukiwania optymalnego kształtu i wymiarów magnesu. Rozpiętość  $b_m$  magnesu wynika z określonej powyżej średnicy  $D$  i liczby par biegunów. Natomiast zastępcza długość  $l_m$  magnesów (liczona w kierunku namagnesowania) tworzących parę biegunów wynika z reluktancji obwodu zewnętrznego i wielkości maksymalnego przepływu odmagnesowującego.

Ze względu na bardzo dużą wartość natężenia koercji współczesnych magnesów ferrytowych i magnesów wytwarzanych na bazie tzw. „ziem rzadkich” ich krzywa odmagnesowania jest w zasadzie linią prostą. Ich względna przenikalność  $\mu_w \approx 1,01 \div 1,1$ . Do wyznaczania punktu pracy magnesu opracowano algorytm i program w środowisku Borland Del-

$\phi$ . W analizie wygodnie jest opisywać stany układu magnes-obwód zewnętrzny we współrzędnych:  $V_\mu = H \cdot l_m$  oraz  $\Phi = B \cdot S_m = B \cdot b_m L_t$ . Przy braku zewnętrznego przepływu od magnesowującego punkt pracy jest punktem przecięcia charakterystyki magnesu i zwierciadlanego odbicia charakterystyki magnesowania obwodu zewnętrznego  $\Phi = f(V_\mu)$ . Natomiast w przypadku występowania przepływu zewnętrznego  $\Theta_z$  trzeba wziąć pod uwagę charakterystykę przesunięta:  $\Phi = f(V_\mu - \Theta_z)$  - rys. 2.



Rys. 2. Wyznaczanie punktu pracy magnesu trwałego z zewnętrznym przepływem od magnesowującym

Główną część reluktancji obwodu magnetycznego maszyny stanowi reluktancja  $R_{\mu\delta}$  szczeliny głównej o długości  $\delta$ . We wstępnych obliczeniach spadki napięć w ferromagnetycznych częściach rdzenia można uwzględnić poprzez tzw. współczynnik nasycenia  $k_{ns} = 1 + V_{\mu Fe} / V_{\mu\delta}$ , przy czym  $V_{\mu Fe}$  jest sumą napięć magnetycznych w rdzeniu. Takie podejście sprowadza się do zastąpienia magnetowodu części stojanowej ekwiwalentną szczeliną o zastępczej długości  $\delta' = 2k_c k_{ns} \delta$ , przy czym  $k_c$  – współczynnik Cartera. Przyjmując zatem zastępczą, uproszczoną strukturę magnetowodu maszyny w postaci jak na rys. 2 można łatwo wyznaczyć współrzędne przecięcia obu charakterystyk, tj. współrzędne punktu pracy magnesu w układzie  $V_\mu - \Phi$ , a po podzieleniu odpowiednio przez  $l_m$  i  $S_m$  – w układzie  $H-B$ :

$$H = - \frac{\Phi_r + \frac{\mu_0 S_m}{\delta'} \Theta_z}{\mu_0 \mu_w S_m \left( 1 + \frac{l_m}{\delta'} \frac{1}{\mu_w} \right)} \quad (4)$$

$$B = \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{l_m}{\delta'} \frac{1}{\mu_w}} \right) \cdot B_r - \frac{\frac{\mu_0}{\delta'} \Theta_z}{1 + \frac{l_m}{\delta'} \frac{1}{\mu_w}} \quad (5)$$

Przepływ pary biegunów zależy od wielkości maszyny i od liczby par biegunów,  $\Theta_z = A \cdot \tau$  ( $A$  – średnie obciążenie liniowe uzwojenia stojana [1]). Na tej podstawie można oszacować długość magnesu, gdy postulowana jest indukcja wartości  $B$ :

$$l_m = \frac{\delta'}{\mu_w} \left( \frac{B_r}{B_r - B} - 1 \right) + \frac{\mu_0 \pi D A}{\mu_w p (B_r - B)} \quad (6)$$

W stanie jałowym średnia indukcja w szczelinie maszyny jest rzędu 90 % indukcji remanentu  $B_r$ . To znaczy, że przy pomi-

nięciu oddziaływania stojana należy przyjmować długość magnesów  $l_m \approx (8 \div 9) \delta'$ .

W celu oszacowania wpływu oddziaływania pola stojana założono  $\mu_w \cong 1$  oraz  $l_m / \delta' = 8$ . Z pominięciem przepływu od magnesowującego otrzymuje się  $B_0 = 0,89 B_r$ . Natomiast z uwzględnieniem przepływu, przyjmując:  $B_r = 1,2 \text{ T A/m}$ ;  $A = 20 \text{ kA/m}$ ,  $D = 10 \text{ cm}$  i  $p = 4$  otrzymuje się:  $B = 0,85 B_r$ . W przypadku dużych maszyn o małej liczbie par biegunów oddziaływanie pola stojana na punkt pracy magnesu jest zdecydowanie większe. Przykładowo dla  $p = 2$  indukcja  $B = 0,82 B_r$ , a dla  $p = 1$ :  $B = 0,74 B_r$ . Obciążenie liniowe w maszynach dużej mocy może przekraczać 50 kA/m. Przyjmując  $A = 40 \text{ kA/m}$ , dla  $p = 1$  indukcja w stanie obciążonym  $B = 0,6 B_r$ . Pominięcie zatem wpływu oddziaływania pola stojana na punkt pracy magnesu o długości dobranej stosownie do pracy w stanie jałowym może być obarczone znacznym błędem. Jeśli pominąć oddziaływanie pola stojana, to długość magnesu powinna być dobierana proporcjonalnie do długości zastępczej szczeliny powietrznej:  $l_m = k_m \delta'$ . W przypadku maszyn o większej mocy (szczególnie maszyn 2-biegunowych) ze względu na oddziaływanie stojana współczynnik  $k_m$  należy przyjmować z przedziału  $10 \div 20$ .

Ważnym parametrem charakteryzującym materiał magnetyczny twardy jest maksymalna wartość tzw. gęstości energii właściwej  $(BH)_{\max}$ . Jeżeli przyjąć liniową charakterystykę od magnesowania to punkt optymalny ma współrzędne  $(-H_c/2, B_r/2)$ , zaś  $|HB| = (BH)_{\max} = H_c B_r / 4$ . Z zależności (4) wynika zatem, że optymalna pod tym względem długość magnesu  $l_m = \mu_w \delta' + 2 \Theta_z / H_c$ . Nie oznacza to jednak, że magnes o tak dobranej długości będzie optymalny ze względu na parametry silnika. Zastosowanie magnesów o zwiększonej długości jest uzasadnione pod względem ekonomicznym jeżeli nie wiąże się z koniecznością powiększania średnicy wirnika. Długość magnesów jest wówczas ograniczona tylko możliwością ich zamontowania w wirniku w taki sposób by strumień rozproszania magnesów nie przekraczał wartości uznanych za typowe.

#### IV. PODSUMOWANIE

Przedstawiony algorytm doboru wymiarów głównych silników magnetoelektrycznych może w procesie optymalizacji tworzyć zbiór rozwiązań startowych. Opracowane oprogramowanie do wyznaczania optymalnego punktu pracy magnesów trwałych można zastosować w procesie projektowania maszyn magnetoelektrycznych, np. silników synchronicznych lub silników typu BLDC.

#### LITERATURA

- [1] Dąbrowski M., Projektowanie maszyn elektrycznych prądu zmiennego, WNT, Warszawa 1994.
- [2] Glinka T., Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.

#### ALGORITHM FOR DETERMINING THE DIMENSIONS OF PERMANENT MAGNET OF THE SYNCHRONOUS MACHNE.

In the paper an algorithm for determination of permanent magnet dimensions in synchronous machines has been presented. The provisionally calculated dimensions can be used in the optimisation procedure as set of initial values. The software for determining optimal working point of permanent magnets has been elaborated. The software procedures provide for nonlinearity of magnetic core and demagnetising influence of field exited by stator winding.