

PROJEKT SILNIKA VCM DO AKTYWNEJ WIBROIZOLACJI DRGAŃ

TOMASZ TRAWIŃSKI
ZBIGNIEW PILCH

IETiP, Zakład Mechatroniki, Wydział Elektryczny

SŁAWOMIR KCIUK

Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Politechnika Śląska

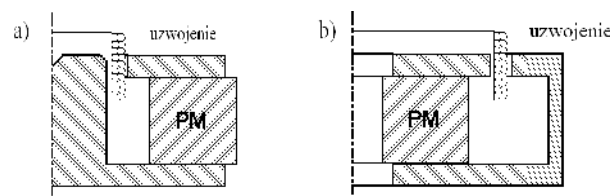
Streszczenie. W artykule przedstawiona została koncepcja silnika elektrycznego służącego do bezpośredniego napędu stołu, z aktywną wibroizolacją. Przedstawiono dobór wielkości geometrycznych obwodu magnetycznego silnika pod kątem uzyskania maksymalnej wartości średniej indukcji magnetycznej w jego szczelinie powietrznej oraz wymiarów geometrycznych szczeliny i punktu pracy magnesu trwałego (określonego przez maksymalną gęstość energii). Modele obliczeniowe implementowane zostały w programach Matlab/Femlab®.

1. WSTĘP

Silniki VCM, czyli liniowe silniki prądu stałego z ruchomą cewką (wzbudzone od magnesów trwałych), swoją nazwę wzięły od pierwotnego ich miejsca zastosowania, którym był układ napędowy membran głośników. Skrót VCM pochodzi z języka angielskiego i oznacza Voice Coil Motor – czyli w wolnym tłumaczeniu – Silnik Cewki Głosowej. Silniki tego typu cechują się prostą konstrukcją, składającą się z:

- obwodu magnetycznego – złożonego z rdzenia ferromagnetycznego (o dużej przenikalności magnetycznej względnej), magnesu trwałego i szczeliny powietrznej;
- obwodu elektrycznego – złożonego z uzwojenia oraz taśm – doprowadzeń zasilających;
- obwodu mechanicznego – złożonego z systemu zawieszenia i centrowania uzwojenia w szczelinie, elementy te cechują się symetrią osiową.

Uproszczony, poglądowy rysunek przedstawiający najczęściej spotykane rozwiązania konstrukcyjne tych silników przedstawiono poniżej.

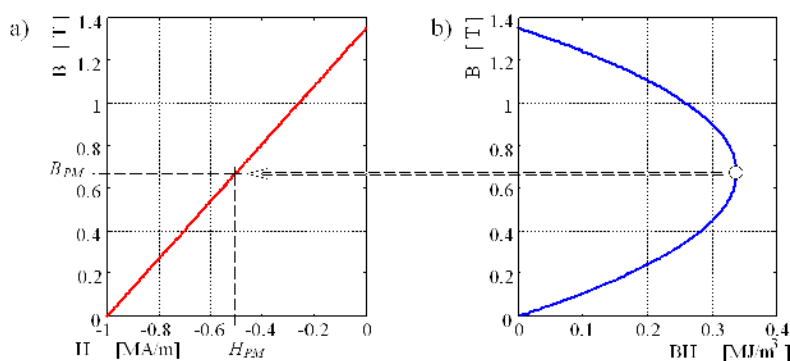


Rys. 1. Przykłady uproszczeń geometrycznych obwodu magnetycznego liniowych silników VCM

Zastosowanie tego typu silników do bezpośredniego napędu stołów w celach wibroizolacyjnych, napotyka pewne problemy techniczne. Problemy te związane są głównie ze względnie małymi wartościami sił generowanymi w tych konstrukcjach oraz ograniczonym, przez wymiar uzwojenia (jego wysokość), zakresem ruchu liniowego. Produkowane seryjnie silniki posiadają maksymalne siły ciągu do 500 N, przy zakresie ruchu nieprzekraczającym 50mm. Zaletą tych silników są natomiast ich dobre własności dynamiczne.

2. WYTYCZNE DO DOBORU WYMIARÓW OBWODU MAGNETYCZNEGO SILNIKA

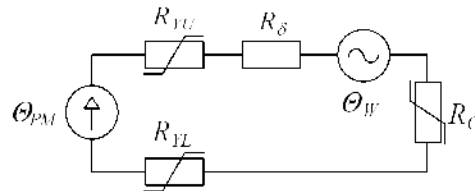
Podstawowymi parametrami, jakie musi spełniać silnik, jest generacja siły ciągu $|F_z| \geq 1000 \text{ N}$ oraz zakres ruchu $|\Delta z| \geq 50 \text{ mm}$. Ponadto powinien posiadać możliwie małą masę oraz powinien być stabilny cieplnie. W dalszych rozważaniach wzięto pod uwagę dwie możliwe konstrukcje – przedstawione w poglądowy sposób na rys.1. W konstrukcji z magnesem zewnętrznym zdecydowano się zastosować magnes ferrytowy, natomiast w konstrukcji z magnesem wewnętrznym zdecydowano się zastosować magnes neodymowy. Sposób wyboru takiej a nie innej konfiguracji obwodów magnetycznych i odpowiadającym im magnesom trwałym wynika z własności samych magnesów. Magnesy ferrytowe posiadają nieliniowe krzywe odmagnesowania, przy jednocześnie małych wartościach indukcji remanentu B_r ($0,25 \div 0,35 \text{ T}$) oraz koercji H_c ($150 \div 200 \text{ kA/m}$) – podstawową zaletą tych magnesów jest ich niska cena (20-krotnie niższa od magnesów neodymowych [1]). Przy tak małych wartościach indukcji remanentu oraz koercji magnes ten musi mieć duże pole powierzchni w porównaniu do pola powierzchni szczeliny powietrznej (w której dąży się do osiągnięcia dużych wartości indukcji) – stąd też konfiguracja przedstawiona na rys.1.a) jest korzystna. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku magnesów neodymowych, dla których korzystna jest konfiguracja przedstawiona na rys.1.b). W konstrukcji obwodów magnetycznych dąży się do tego, aby wykorzystać maksymalnie magnes trwały pod względem energetycznym. Sprowadza się to do wyboru takich wymiarów geometrycznych fragmentów magnetowodu, aby punkt pracy magnesu trwałego dany był przez indukcję magnetyczną B_{PM} oraz natężenie pola H_{PM} odpowiadającym punktowi o maksymalnej wartości iloczynu BH (określonego na podstawie charakterystyki odmagnesowania magnesu trwałego – patrz rys.2.).



Rys. 2. Krzywa odmagnesowania dla magnesu neodymowego (a) oraz zależność BH (b)

Dla przyjętych konfiguracji magnetowidów, jak na rys.1. można, przy założeniu ciągłości linii pola i pominięciu rozproszenia, przyporządkować obwodowy schemat zastępczy (poprzez analogię do obwodów elektrycznych), w którym obwodom magnetycznym jarzm (górnego R_{YU} i dolnego R_{YL}), kolumn (środkowej i zewnętrznej R_C) odpowiadają nieliniowe rezystancje magnetyczne i liniowa rezystancja magnetyczna szczeliny powietrznej R_d oraz

źródła przepływu magnesującego Θ_{PM} (magnes trwały) i odmagnesowującego Θ_W (uzwojenie). Obwodowy schemat zastępczy silnika, obwodu magnetycznego silników z rys.1. przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Obwód magnetyczny silnika VCM

Przy doborze wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego często przyjmuje się dodatkowe założenie upraszczające polegające na pominięciu oddziaływania odmagnesowującego uzwojenia i przyjęciu stałej przenikalności magnetycznej względnej rdzenia $m_r = \infty$, co równoznaczne jest z pominięciem nieliniowych rezystancji w obwodzie na rys.3. Korzystając z prawa przepływu, możemy napisać równanie, dla tak uproszczonego obwodu:

$$\Theta_{PM} + \Theta_d = H_{PM} l_{PM} + H_d l_d = 0, \quad (1)$$

gdzie: Θ_{PM} - przepływ magnesu trwałego, Θ_d - przepływ w szczelinie powietrznej, H_{PM} - natężenie pola magnetycznego w magnesie trwałym, l_{PM} - długość (wysokość) magnesu trwałego, H_d - natężenie pola magnetycznego w szczelinie, l_d - długość szczeliny.

Równanie (1) można przekształcić do postaci (obliczając natężenie pola magnetycznego w szczelinie):

$$H_d = -\frac{l_{PM}}{l_d} H_{PM} \quad (2)$$

Korzystając z zasady ciągłości strumienia magnetycznego (strumień w magnesie i szczelinie powietrznej jest taki sam), otrzymujemy wyrażenie na indukcję w magnesie trwałym:

$$B_{PM} = \frac{B_d S_d}{S_{PM}} = m_0 \frac{H_d S_d}{S_{PM}} \quad (3)$$

gdzie: S_{PM} , S_d - pola przekrojów magnesu trwałego i szczeliny powietrznej.

Podstawiając wyrażenia (2) do (3), otrzymujemy związek pomiędzy indukcją i natężeniem pola magnetycznego a wymiarami geometrycznymi szczeliny i magnesu (długościami i polami przekrojów):

$$B_{PM} = -m_0 \frac{l_{PM}}{S_{PM}} \frac{S_d}{l_d} H_{PM} \quad (4)$$

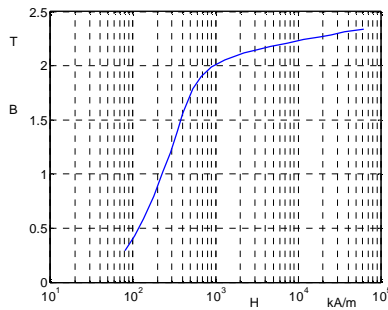
Znając wymiary geometryczne magnesu trwałego, jego pożądaną punkt pracy (patrz rys.2.), można na podstawie (4) dobrać wymiary szczeliny. Przy doborze wymiarów geometrycznych jarzm oraz szczeliny powietrznej można wykorzystać np. metody polowe.

3. OBLICZENIA POŁOWE OBWODU MAGNETYCZNEGO SILNIKA

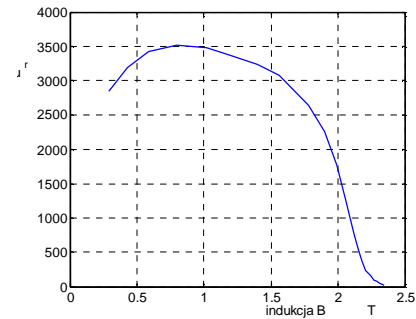
Przyjęto następujące parametry materiałów na obwód magnetyczny projektowanego silnika:

- NdFeB neodymowy magnes trwały o indukcji remanentu $B_r = 1,3 \text{ T}$ oraz natężeniu powściągającym (koercji) $B_H C = 1000 \text{ kA/m}$,

- obwód jarzm składa się z izotropowego materiału o krzywej magnesowania oraz przenikalności magnetycznej względnej przedstawionej na rys.4 i rys.5.



Rys. 4. Krzywa magnesowania jarzm

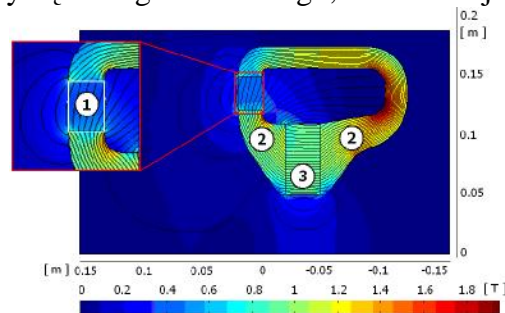


Rys. 5. Względna przenikalność magnetyczna jarzm

W obliczeniach polowych wykorzystano symetrię osiową projektowanego silnika, stąd też analizy polowej dokonano w cylindrycznym układzie współrzędnych z dwuwymiarowym polem o współrzędnych $\{r, z\}$. Przeprowadzono serie obliczeń polowych przy różnych wymiarach geometrycznych szczeliny. Z obliczeń tych wynikała optymalna wysokość jarzm w okolicach szczeliny powietrznej, wynosząca 20 mm. Dla ustalonej wysokości dobrano długość promieniową szczeliny powietrznej, posługując się wyrażeniem (4), która wyniosła 14,5 mm. W obliczeniach polowych wykonano obliczenia rozkładu pola magnetycznego przy różnych wymiarach geometrycznych – długościach szczeliny powietrznej. Obliczano średnie wartości indukcji, natężenia pola magnetycznego w magnesie trwałym oraz w obszarze szczeliny „1” na rys.6 (obszar wewnątrz białego prostokąta). Obliczono objętościową gęstość energii magnesu trwałego. Średnie wartości indukcji, natężenia pola magnetycznego obliczono według relacji:

$$w_{sr} = \frac{1}{V} \int_V w dV, \quad (5)$$

gdzie: V – objętość szczeliny bądź magnesu trwałego, w – indukcja bądź natężenie pola.

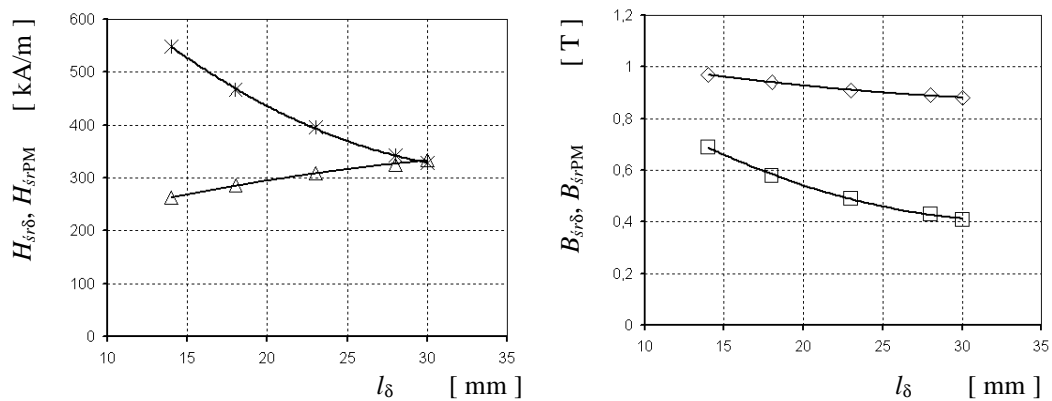


Rys. 6. Wyniki obliczeń polowych przedstawiające moduł indukcji magnetycznej: w jarzmach (2), w magnesie trwałym (3), w szczeliny powietrznej (obszar w powiększeniu oznaczony jako (1)) oraz w przylegającym otoczeniu

Tabela 1. Wyniki obliczeń dla różnych długości szczeliny powietrznej

l_d	$ B_{PM} H_{PM} $	B_{PM}	H_{PM}	B_d	H_d
mm	kJ	T	$\frac{kA}{m}$	T	$\frac{kA}{m}$
14	252,0	0,97	-262,3	0,69	549,4
18	266,4	0,94	-286,0	0,58	467,0
23	278,6	0,91	-308,3	0,49	395,0
28	287,2	0,89	-325,6	0,43	342,6
30	290,9	0,88	-334,0	0,41	327,9

Na rys.7. przedstawiono zmianę średnich wartości natężenia pola magnetycznego i indukcji w obszarach szczeliny powietrznej oraz w magnesie trwałym. Jak widać, wartości te nie zmieniają się liniowo w funkcji długości szczeliny.

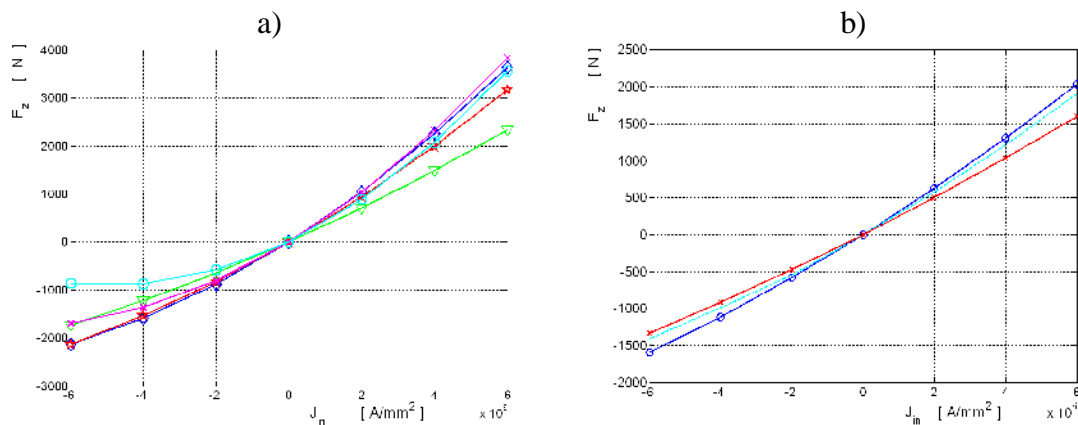


Rys. 7. Wykresy średnich wartości w szczelinie i w magnesie trwałym natężenia pola magnetycznego ($H_{sr\delta}$ - Δ) i indukcji ($B_{sr\delta}$ - \square) w funkcji długości szczeliny powietrznej l_{δ}

Ostatecznie wybrano długość szczeliny powietrznej wynoszącą $l_{\delta}=28$ mm. Dla szczeliny o takiej długości (i wysokości 20 mm) punkt pracy magnesu trwałego leży nieco powyżej punktu o maksymalnej gęstości energii. Daje to pewny zapas ze względu na odmagnesowujący wpływ uzwojenia, który podczas normalnej pracy (podniesienie stołu wraz z dodatkowym obciążeniem na wymaganą wysokość odniesienia) będzie przesunął punkt pracy magnesu w okolice punktu optymalnego (o największej gęstości energii).

3. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA, DOBÓR UZWOJENIA

Ze względu na założony zakres przemieszczeń liniowych biegnika projektowanego silnika VCM, który powinien wynosić $\Delta z = \pm 50$ mm, uzwojenie powinno mieć wysokość co najmniej 120 mm. Drugim warunkiem, jaki musi być spełniony, jest minimalna siła ciągu o wartości $|F_z|=1000$ N. Uzwojenie składa się więc z dwóch cylindrycznych cewek złożonych z 6 sekcji. Taka budowa uzwojenia umożliwia zasilanie tylko fragmentu uzwojenia (kilku sekcji). Pozwala to na znaczne zmniejszenie oddziaływania przepływu odmagnesowującego (wytworzonego przez prąd uzwojenia) na punkt pracy magnesu trwałego w różnych położeniach - wysunięciach cewki względem szczeliny powietrznej. W celu zbadania powyższych faktów wykonano serie obliczeń numerycznych przy wymuszeniu stałej gęstości prądu na całej wysokości uzwojenia o wartościach w granicach $-6 \div 6$ A/mm² oraz przy zasilaniu trzech sekcji znajdujących się w obrębie szczeliny powietrznej (przy tych samych wartościach gęstości prądu). Jednocześnie zmieniano położenie uzwojenia w całym wymaganym zakresie przemieszczeń liniowych. Na rys.8 przedstawiono wyniki badań, w których na rys.8.a. przedstawiono charakterystyki statyczne silnika w przypadku zasilania całego uzwojenia. Linia oznaczona: „V” - przedstawia charakterystykę statyczną przy środkowym położeniu cewki, „O” - przedstawia charakterystykę statyczną przy dolnym położeniu cewki, - „X” przedstawia charakterystykę statyczną przy górnym położeniu cewki zaś pozostałe linie przy położeniach pośrednich. Na rys.8b przedstawiono charakterystyki statyczne przy sekcyjnym zasilaniu uzwojenia (trzech sekcji), przy trzech położeniach sekcji względem szczeliny powietrznej. Charakterystyki oznaczone przez: „O” - dla położenia trzeciej sekcji w szczelinie powietrznej (dwie pozostałe sekcje znajdują się nad szczeliną), „X” - dla położenia drugiej sekcji w szczelinie powietrznej.



Rys. 8. Charakterystyki statyczne - siła ciągu w funkcji gęstości prądu cewki oraz jej położenia (względem szczeliny powietrznej)

4. PODSUMOWANIE

Z przedstawionych na rys.8 wyników obliczeń wynika, że możliwe jest osiągnięcie, przy przyjętych gabarytach, sił ciągu na poziomie wyższym niż 1000N. Jednak ze względu na duży zakres ruchu liniowego cewki uzwojenia, zasilanie całego uzwojenia powoduje duży wpływ (szczególnie w dolnych położeniach cewki) odmagnesowujący na magnes trwały. Szczególnie dobrze widoczne jest to na rys.8a, w zakresie ujemnych wartości gęstości prądu – wartość siły ciągu (co do wartości bezwzględnej) zaczyna raptownie maleć mimo zwiększania wartości gęstości prądu. Problem zasilania uzwojenia sekcjami (pracują tylko te sekcje, które są najbliżej szczeliny powietrznej) można rozwiązać kosztem niemal dwukrotnego zmniejszenia wartości siły ciągu. Otrzymana charakterystyka siła ciągu - gęstość prądu (rys.8.b.) jest zdecydowanie bardziej liniowa od przedstawionej na rys.8a oraz cechuje się mniejszym rozrzutem w zależności od położenia zasilanych sekcji względem środka szczeliny powietrznej.

LITERATURA

1. Leonowicz M.: Materiały magnetycznie twarde, „Przegląd Elektrotechniczny”, 9/2002, s.261÷268.
2. Soiński M.: Materiały magnetycznie miękkie do temperaturowej kompensacji obwodów z magnesami trwałymi, „Wiadomości Elektrotechniczne”, 1/2000, s.16÷20.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego 4 T07D 005 29, finansowanego ze środków KBN w 2006r.

VCM MOTOR DESIGN FOR ACTIVE VIBRATION ISOLATION

Abstract. In the article the conception of the electric motor for direct drive of the table for active isolation and damping of vibrations has been presented. In the article the selection of geometrical dimension of magnetic circuit according to maximal mean value of magnetic flux density in air-gap and dimensions of air-gap and also for operating point for permanent magnet (defined by maximal value of electromagnetic energy) has been shown. The proposed models are implemented in Matlab/Femlab® programs.