

Krzysztof Bieńkowski, Adam Rogalski
Politechnika Warszawska, Warszawa

SPARAMETRYZOWANY MODEL POŁOWY SILNIKA REDUKTOROWEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

FEM MODEL OF PERMANENT MAGNET VERNIER MOTOR

Abstract: Two-dimensional Finite Element analysis and parameterized model of Permanent Magnet Vernier Motor is presented in this paper. The model allows to obtain magnetic flux distribution in the core and air gap and calculate electromagnetic torque. Influence of geometrical parameters and material properties on produced torque could be researched by means of presented model.

1. Wstęp

W dziedzinie napędów wolnoobrotowych coraz częściej postulowana jest idea eliminacji przekładni mechanicznej poprzez zastosowanie napędów bezpośrednich. Przekładnie mechaniczne odznaczają się, co prawda, dużą gęstością przeniesionego momentu, lecz wymagają okresowej obsługi i są źródłem dodatkowego hałasu. W przypadku przekładni wielostopniowych i ślimakowych o dużych przełożeniach, są także przyczyną znaczących strat mocy. Jednakże zastosowanie silnika wolnoobrotowego zamiast motoreduktora wciąż nie jest częstym rozwiązaniem, z uwagi na fakt, że tradycyjne konstrukcje silników wielobiegunowych mają większe gabaryty i mniejszą sprawność od motoreduktorów. Odmiernym podejściem do problemu silnika wolnoobrotowego jest koncepcja maszyny reduktorowej. Idea synchronicznego silnika reduktorowego (ang. Vernier Motor), w którym pole magnetyczne wiruje ze znacznie większą prędkością niż wirnik, nie jest nowa. Początkowo były to silniki reluktancyjne [1,2], jednak odznaczały się małą sprawnością, dużym prądem magnesującym i małą gęstością objętościową momentu. Dostępność nowych materiałów magnetycznie twardych, o dużej energii odmagnesowania, zwróciła uwagę konstruktorów na możliwość zastosowania wzbudzenia magnetoelektrycznego w silnikach reduktorowych [3,4,10].

2. Konstrukcja i zasada działania

Stojan silnika reduktorowego wzbudzanego magnesami trwałymi przypomina stojan silnika indukcyjnego. W otwartych żłobkach o kształcie prostokątnym umieszczone jest uzwojenie rozłożone, którego zadaniem jest wytworzenie pola wirującego. Uzwojenie może posiadać

dowolną liczbę pasm fazowych, jednak zwykle są to uzwojenia trójfazowe jedno- lub dwuwarstwowe. Współczynnik wypełnienia podziałki żłobkowej stojana zwykle dobiera się z przedziału (0,45- 0,5).

Wirnik składa się z pakietu blach tworzących jarzmo i magnesów trwałych naklejonych na powierzchni przyszczelinowej. Magnesy tworzą układ naprzemiennych biegunów magnetycznych. Liczba par biegunów wirnika określona jest zależnością [5]:

$$p_r = Q_s \pm p \quad (1)$$

gdzie:

Q_s - liczba żłobków stojana,

p - liczba par biegunów stojana.

Oprócz konstrukcji wirnika z powierzchniowym ułożeniem magnesów o naprzemiennych kierunkach magnesowania stosowane są także inne aranżacje, w tym struktura Halbacha [6,7]. Konstruowane są także silniki o stojanie z wydatnymi biegunami i uzwojeniem skupionym [7,8].

Struktura reluktancyjna strefy żłobkowo-zębowej stojana i biegunów magnetycznych wirnika tworzy swoistego rodzaju układ noniusza, w którym następuje efekt redukcji prędkości obrotowej w wyniku sprzężenia magnetycznego. Niewielki kąt obrotu wirnika powoduje obrót osi strumienia magnetycznego w stojanie o znacznie większy kąt wynikający z koincydencji zębów stojana i biegunów wirnika.

Podziałki biegunowe stojana i wirnika oraz podziałka żłobkowa stojana spełniają równanie noniusza:

$$Q_s t_s = p_r \tau_r = (M p_r \pm p) \tau_s \quad (2)$$

gdzie:

$$t_s = \frac{2\pi}{Q_s} \text{ – podziałka żłobkowa stojana,}$$

$$\tau_r = \frac{2\pi}{p_r} \text{ – podziałka biegunowa wirnika,}$$

$$\tau_s = \frac{2\pi}{p} \text{ – podziałka biegunowa stojana,}$$

M – moduł noniusza.

Jeżeli prędkość kątowna wirowania pola stojana

$$\text{wynosi } \omega_s = \frac{2\pi f}{p}, \text{ to synchroniczna prędkość}$$

kątowna wirnika wyniesie $\omega_r = \frac{\omega_s}{p_r}$, a współczynnik redukcji prędkości:

$$i_\omega = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{1}{p_r} \quad (3)$$

W klasycznym ujęciu stosowanym do opisu maszyn prądu przemiennego silnik reduktorowy z magnesami trwałymi wytwarza moment obrotowy w wyniku oddziaływania harmonicznych żłobkowych pola stojana z wirnikiem o odpowiadającej ilości par biegunów wirnika. Rząd harmonicznych żłobkowych stojana wyraża się wzorem:

$$v = kQ \pm p \quad (4)$$

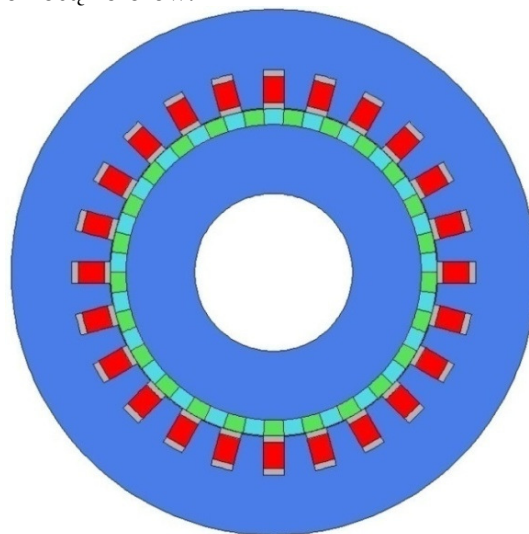
Jak wykazano w pracy [9] harmoniczne żłobkowe stojana rosną wraz z szerokością szczytów żłobka. W silnikach indukcyjnych są to harmoniczne wytwarzające momenty pasożytnicze, a w celu ich zmniejszenia stosuje się żłobki półzamknięte i odpowiednio dobiera parametry uzwojenia stojana. W silnikach reduktorowych w celu uzyskania dużej amplitudy harmonicznej żłobkowej stosuje się żłobki otwarte i zastosować należy uzwojenia o współczynnikach grupy i skrótu dobranych tak, aby nie tłumiły odpowiednich harmonicznych.

3. Model połowy

Na rysunku 1. przedstawiony został widok poszczególnych regionów modelu silnika reduktorowego. W prostokątnych żłobkach stojana umieszczone są obszary reprezentujące boki cewek uzwojenia. Przypisując odpowiednią wartość gęstości prądu każdemu obszarowi można modelować dowolne jednowarstwowe uzwojenie rozłożone zamykające się w określonej ilości żłobków stojana Q_s . Modelowanie uzwojeń dwuwarstwowych wymaga wprowadzenia dwóch obszarów przewodzących w każ-

dy żłobek. Na dnie żłobków przewidziany jest obszar powietrzny, który reprezentuje kanał chłodzący uzwojenie. Silniki reduktorowe wymagają wymuszonego chłodzenia z uwagi na małą prędkość obrotową. Bezpośrednie przewietrzanie silnika może być w pewnych zastosowaniach dobrą metodą zwiększenia gęstości objętościowej momentu.

Na walcowej powierzchni jarzma wirnika umieszczone są obszary odpowiadające magnesom trwałym. Kierunek magnesowania jest promieniowy, a jego zwrot uwidocznił się za pomocą kolorów.



Rys. 1. Widok poszczególnych regionów modelu połowego silnika reduktorowego

Model określony jest jednoznacznie następującym zbiorem parametrów:

d_{se} – średnica zewnętrzna stojana,

d – średnica wewnętrzna stojana,

δ – grubość szczeliny przywirnikowej,

d_{ri} – średnica wewnętrzna wirnika,

h_{ys} – wysokość jarzma stojana,

h_k – wysokość kanału wentylacyjnego,

h_c – wysokość boku cewki uzwojenia,

h_m – wysokość magnesu,

b_q – szerokość żłobka,

b_m – szerokość magnesu,

Q_s – liczba żłobków stojana,

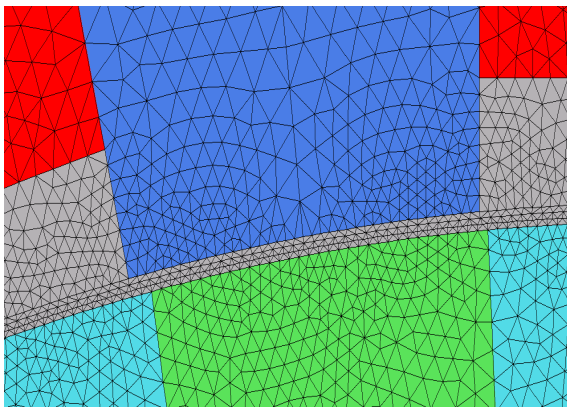
p_r – liczba par biegunów wirnika,

\mathbf{j}_s – wektor gęstości prądów o długości Q_s .

α – kąt obrotu lokalnego układu współrzędnych wirnika.

Pozostałe wymiary potrzebne do zdefiniowania wszystkich regionów obliczane są za pomocą procedury sterującej przebiegiem obliczeń. Tam także obliczane są wartości wektora gęstości prądów w poszczególnych żłobkach stojana na podstawie wprowadzonych parametrów uzwojenia oraz ustalana jest ilość węzłów sieci elementów skończonych na bokach każdego z regionów. Materiałowi rdzenia i magnesom przyporządkowane są odpowiednie charakterystyki magnesowania. Na zewnętrznym brzegu rdzenia stojana i wewnętrznym brzegu rdzenia wirnika ustalone zostały warunki brzegowe Dirichleta – pominięte zostało wnikanie strumienia do wału i rozproszenie zewnętrzne. W prezentowanym przykładzie liczba żłobków stojana $Q_s = 24$, liczba par biegunów stojana $p = 1$, a liczba par biegunów wirnika $p_r = 25$.

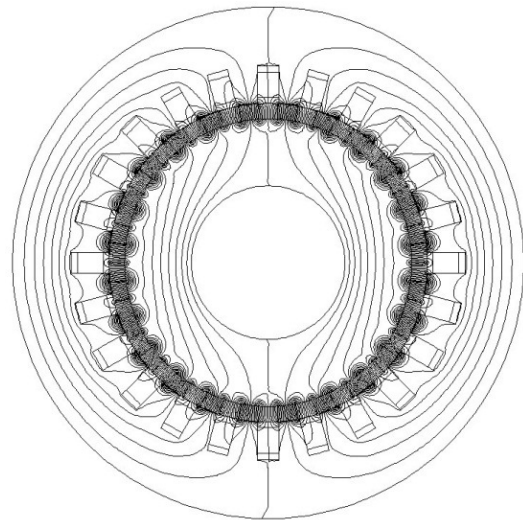
W zależności od priorytetu dokładności rozwiązania lub szybkości obliczeń model można podzielić na około 50 do 200 tys. elementów skończonych. Uzyskanie rozwiązania, w którym błąd średniokwadratowy obliczeń jest mniejszy od 2% wymaga podziału na około 100 tys. elementów skończonych pierwszego rzędu. Miejszem wymagającym szczególnej uwagi podczas budowania modelu jest szczelina powietrzna, która w omawianym modelu podzielona została na trzy warstwy (rys.2.). Pierwsza warstwa leżąca pod zębem stojana jest związana z globalnym układem współrzędnych, druga przylegająca do magnesów wirnika jest związana z lokalnym układem współrzędnych wirnika, a trzecią – środkową warstwę stanowi specjalny region typu „GAP”, w którym sieć powstaje po podziale stojana i wirnika.



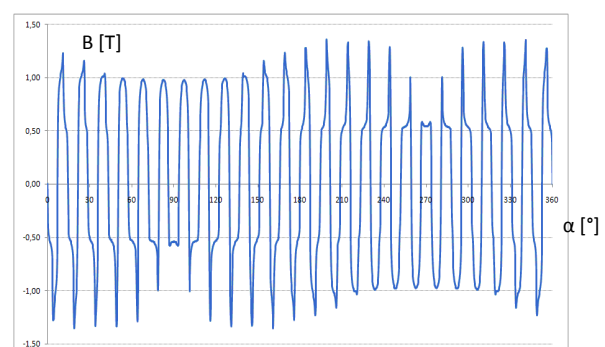
Rys. 2. Widok szczeliny powietrznej pod zębem stojana z podziałem na elementy skończone

4. Rozkład pola magnetycznego

Obliczeń pola magnetycznego dokonano w przekroju maszyny prostopadłym do osi wału wirnika, zakładając płaskorównoległy rozkład pola w silniku. Dzięki temu można było zastosować dwuwymiarową metodę elementów skończonych. Na rysunku 2. przedstawione są izolinie potencjału, w przypadku gdy prąd w uzwojeniu stojana nie płynie. Źródłem pola magnetycznego są wyłącznie magnesy wirnika. Pole zamyka się głównie pomiędzy sąsiednimi magnesami, jednakże część strumienia przenika do stojana tworząc układ dwóch biegunów magnetycznych. Rozkład składowej radialnej indukcji w szczelinie przedstawia rysunek 3.

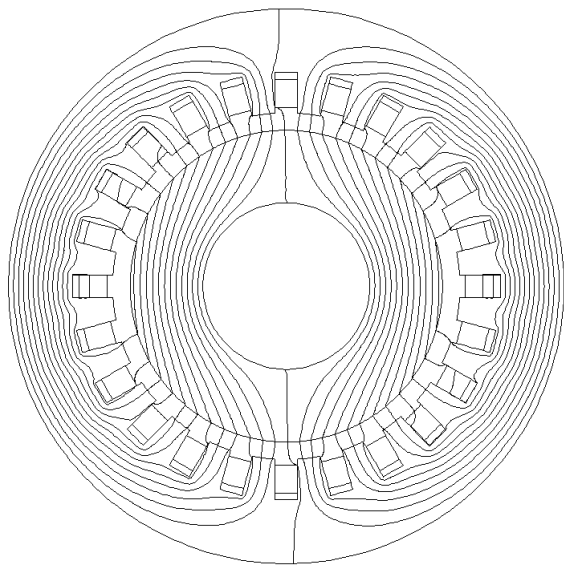


Rys. 3. Izolinie skalarne potencjału magnetycznego dla zerowego prądu stojana

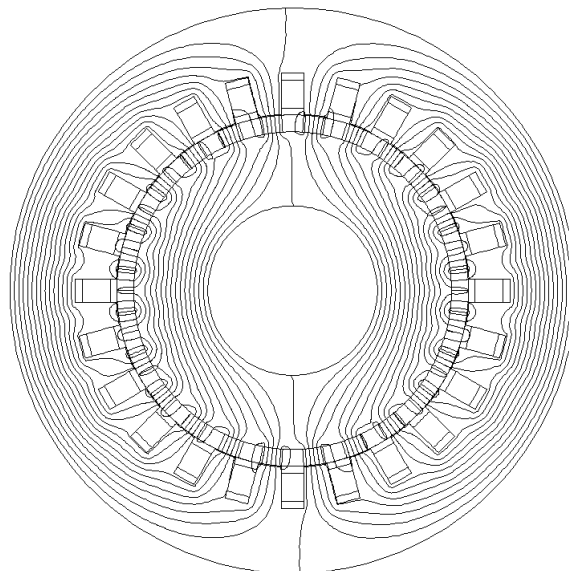


Rys. 4. Rozkład składowej radialnej indukcji magnetycznej wzdłuż szczeliny powietrznej w stanie bezprądowym

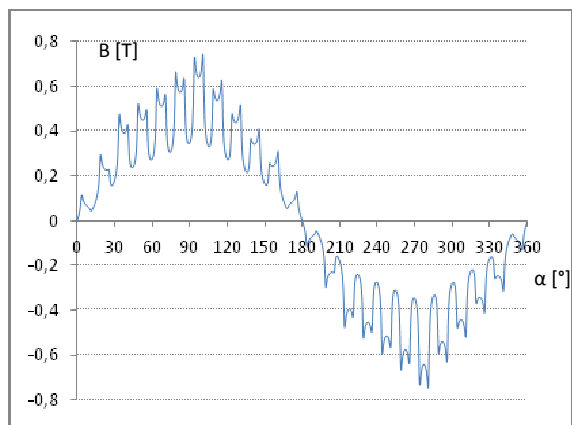
Rysunek 5. przedstawia rozkład pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd w uzwojeniu stojana po usunięciu magnesów. Na wykresie indukcji (rys. 6.) zauważyć można znaczny udział wyższych harmonicznych żłobkowych.



Rys. 5. Izolinie skalarne potencjału magnetycznego dla amplitudy gęstości prądu stojana $j_s = 3,5 \text{ A/mm}^2$ i zerowego wektora magnetyzacji



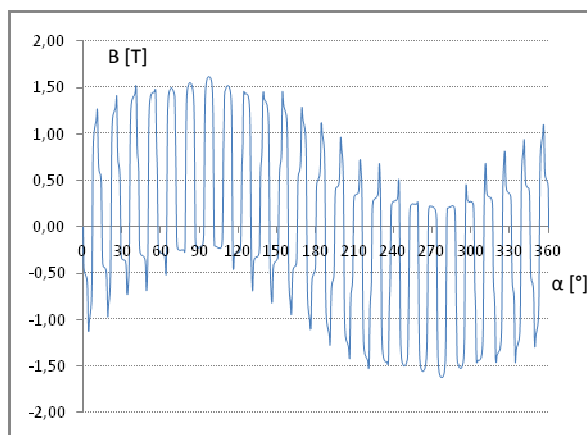
Rys. 7. Izolinie skalarne potencjału magnetycznego przy wymuszeniu przepływem uzwojenia stojana i magnesów wirnika w położeniu podłużnym



Rys. 6. Składowa radialna indukcji w szczeliny przy wymuszeniu przepływem uzwojenia

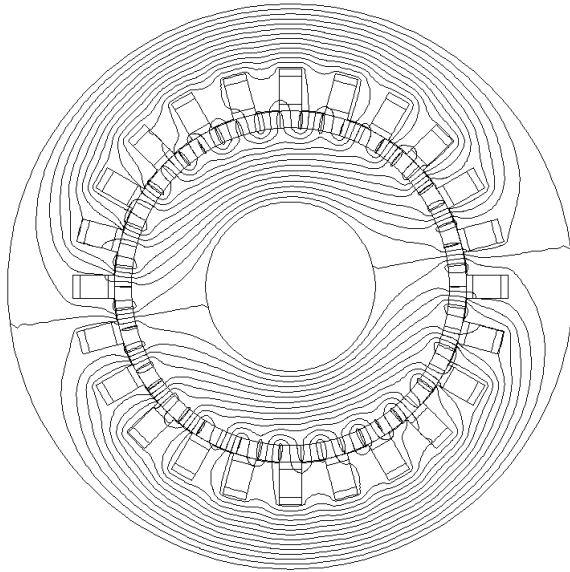
Rozkład pola magnetycznego przy współdziałaniu obu przepływów przedstawia rysunek 7. W położeniu podłużnym odpowiadającemu stanowi jałowemu silnika występuje największy strumień i największe nasycenie jarzm stojana i wirnika.

Składowa radialna indukcji w szczeliny stanowi falę o podstawowej długości wynikającej z liczby par biegunów stojana zmodulowaną przez pole wzbudzone przez magnesy wirnika (rys. 8.).

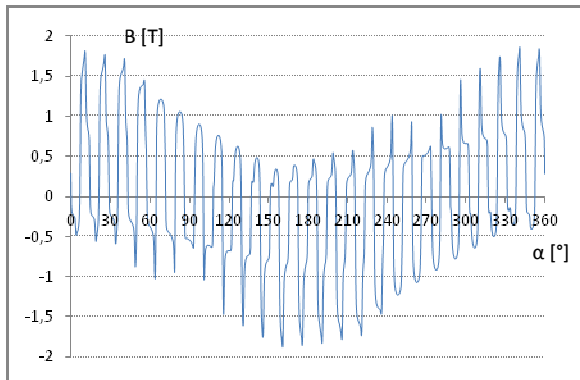


Rys. 8. Składowa radialna indukcji magnetycznej wzdłuż szczeliny powietrznej przy wymuszeniu przepływem uzwojenia stojana i magnesów wirnika w położeniu podłużnym

Jeżeli oś przepływu uzwojenia stojana ustawiona jest prostopadle do osi magnetycznej pola wirnika (rys. 9.), to oś wypadkowego strumienia magnetycznego nie pokrywa się z osią przepływu uzwojenia stojana, lecz jest obrócona o kąt odpowiadający połowie podziałki biegunowej wirnika.



Rys. 9. Izolinie skalarnego potencjału magnetycznego przy wymuszeniu przepływem uzwojenia stojana i magnesów wirnika w położeniu poprzecznym



Rys. 10. Składowa radialna indukcji magnetycznej wzdłuż szczeliny powietrznej przy wymuszeniu przepływem uzwojenia stojana i magnesów wirnika w położeniu podłużnym

5. Moment obrotowy silnika

Przy znanym rozkładzie pola w obszarze modelu silnika statyczny moment obrotowy można obliczyć przez całkowanie tensora naprężeń Maxwella wzdłuż szczeliny powietrznej. W przypadku dwuwymiarowego rozkładu pola magnetycznego wyznaczonego przy określonym położeniu kątowym α wirnika względem stojana, wyrażenie na moment może przyjąć postać:

$$T = r^2 l_{Fe} \int_0^{2\pi} \frac{B_n(\alpha, r) B_t(\alpha, r)}{\mu_0} d\alpha \quad (5)$$

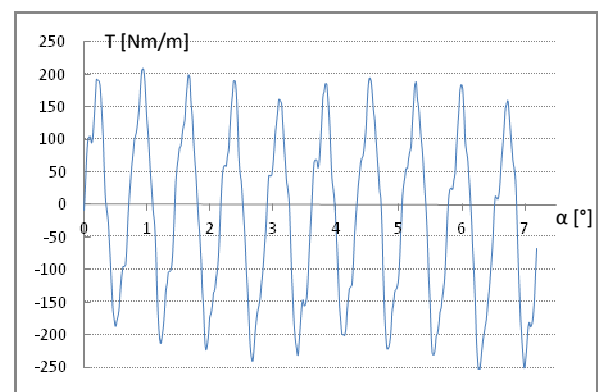
gdzie:

r – promień okręgu leżącego w szczelinie powietrznej stanowiącego drogę całkowania,

l_{Fe} – długość rdzenia maszyny,

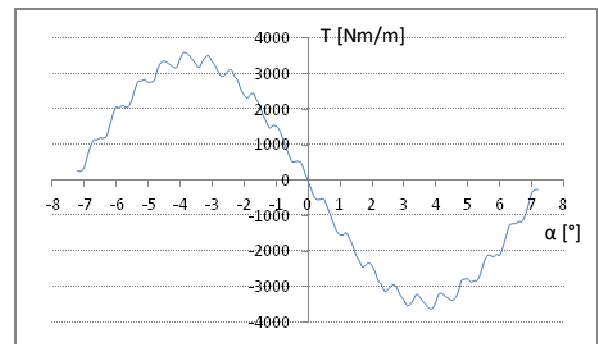
$B_n(\alpha, r)$, $B_t(\alpha, r)$ – składowe indukcji normalna i styczna do okręgu w punkcie (α, r) .

W stanie bezprądowym obliczyć można moment zaczepowy wywołany przyciąganiem zębów stojana przez magnesy wirnika, zależny od położenia wirnika. W omawianym przykładzie jest to moment okresowy o wartości średniej równej zero i okresie równym 0,72 stopnia kąta obrotu wirnika (rys.11.).



Rys. 11. Statyczny moment zaczepowy w funkcji położenia wirnika.

Zależność statycznego momentu obrotowego wytwarzanego przy ustalonym przepływie uzwojenia, od kąta położenia wirnika przedstawia rysunek 12. Jest to funkcja okresowa o okresie równym podziałce biegunowej wirnika, w której wyróżnić można falę podstawową oraz falę wynikającą z istnienia znacznego momentu zaczepowego.



Rys. 12. Moment elektromagnetyczny w funkcji położenia wirnika dla gęstości prądu $j = 3,5 \text{ A/mm}^2$

6. Podsumowanie

Przedstawione obliczenia pola i momentu dla przykładowego silnika, którego wymiary nie były optymalizowane obrazują wiele niedoskonałości konstrukcji i problemów, które należy rozwiązać w procesie projektowania maszyny. Wobec braku uznanych procedur projektowania silników reduktorowych z magnesami trwałymi, prezentowany model polowy może stanowić narzędzie wspomagające projektowanie i weryfikację konstrukcji. Zdaniem autorów najistotniejsze problemy stojące przed projektantami silników reduktorowych można przedstawić następująco:

- Dobranie właściwej objętości magnesów trwałych w stosunku do przepływu uzwojenia tak, aby zapewnić dużą głębokość modulacji fali indukcji w szczelinie i stopnia nasycenia obwodu magnetycznego.
- Zastosowanie uzwojeń dwuwarstwowych o współczynnikach nie tłumiących harmonicznych żłobkowych, a także uzwojeń ułamkowo żłobkowych.
- Odpowiedni dobór współczynnika zapelnienia podziałki żłobkowej stojana i współczynnika zapelnienia podziałki biegunowej wirnika, w celu minimalizacji momentu zaczepowego oraz poszukiwanie innych sposobów jego redukcji.
- Ustalenie właściwego stosunku średnicy zewnętrznej do wewnętrznej stojana oraz współczynnika smukłości maszyny w zależności od mocy i prędkości obrotowej.

7. Literatura

- [1]. Lee, C.H.; , "Vernier Motor and Its Design," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* , vol.82, no.66, pp.343-349, June 1963.
- [2]. L. W. Chubb; "Viernier motor", 1933 - US Patent no 1894979.
- [3]. Ishizaki, A.; Tanaka, T.; Takasaki, K.; Nishikata, S.; , "Theory and optimum design of PM Vernier motor," *Electrical Machines and Drives, 1995. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 412)* , vol., no., pp.208-212, 11-13 Sep 1995.
- [4]. J. Pouillange; "Electromagnetic Vernier Machine", 1988 – US Patent no 4757220.
- [5]. Toba, A.; Lipo, T.A.; , "Generic Torque-Maximizing Design Methodology of Surface Permanent-Magnet Vernier Machine," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 36, n°6, pp. 1539-1545, November-December 2000.
- [6]. Linni Jian; Chau, K.T.; , "A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays,"

Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.25, no.2, pp.319-328, June 2010.

[7]. Shi-Uk Chung; Ji-Won Kim; Byung-Chul Woo; Do-Kwan Hong; Ji-Young Lee; Dae-Hyun Koo; , "A Novel Design of Modular Three-Phase Permanent Magnet Vernier Machine With Consequent Pole Rotor," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.47, no.10, pp.4215-4218, Oct. 2011.

[8]. Jianguo Li; Diyun Wu; Xiaodong Zhang; Shuang Gao; , "A new permanent-magnet vernier in-wheel motor for electric vehicles," *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE* , vol., no., pp.1-6, 1-3 Sept. 2010.

[9]. Antal L.; Antal M.; Zawilak J.: „Wpływ szerokości otwarcia żłobków na parametry eksploatacyjne silnika indukcyjnego małej mocy” ZESZYTY PROBLEMOWE - MASZYNY ELEKTRYCZNE NR 73/2005. BOBRME KOMEL.

[10]. J. Pouillange; "Electromagnetic Vernier Machine", 1988 – US Patent no 4757220.

[11] Matt, D.; Martire, T.; Enrici, P.; Jac, J.; Ziegler, N.; "Passive Wind Energy Conversion system Association of a direct-driven synchronous motor with vernier effect and a diode rectifier," *Proceedings of MELECON'2008, 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, ISBN 978-1-4244-1633-2, CD-ROM, Ajaccio, France, May 5-7, 2008.

Autorzy

Instytut Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej
Pl. Politechniki 1, 06-661 Warszawa
Krzysztof.Bienkowski@ee.pw.edu.pl
Adam.Rogalski@ime.pw.edu.pl