

Tomasz Zawilak, Ludwik Antal, Jan Zawilak  
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

## WPLYW OBCIĄŻENIA NA ODKSZTAŁCENIE PRĄDU W SILNIKU PRĄDU PRZEMIENNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

### THE INFLUENCE OF LOAD LEVEL ON CURRENT DEFORMATION IN AC PERMANENT MAGNET MOTOR

**Abstract:** This paper presents the influence of load level on harmonic contents in line start permanent magnet synchronous motor. All known methods leading to minimization harmonics concern only permanent magnet flux distribution and no load back EMF. Meanwhile studies carried out for 2 HP LSPMSM show that harmonics level depends on load level. It is connected with armature reaction flux and non-uniform magnetic reluctance along rotor circumference. Results of FEM calculation including flux pattern and normal component of flux density along an airgap are presented. Harmonics of phase current as a function of load torque are also shown.

#### 1. Wstęp

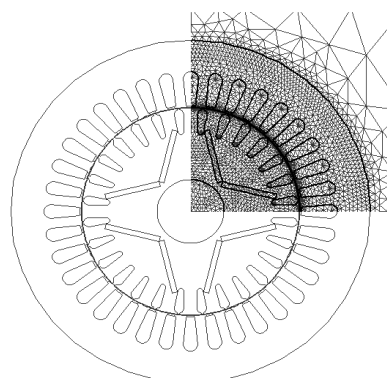
Maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi (z ang LSPMSM- Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor) przystosowane do rozruchu bezpośredniego mają liczne zalety w stosunku do silników indukcyjnych przy zachowaniu prostoty obsługi. Do wad należy zaliczyć znacznie większą, w porównaniu z silnikami indukcyjnymi, zawartość wyższych harmonicznych indukcji, prądu oraz momentu elektromagnetycznego [5]. Prostokątny rozkład siły magnetycznej magnesów generuje wyższe harmoniczne strefowe (głównie 5 i 7). Brak skosu pakietu wirnika utrudnia eliminację harmonicznych żłbkowych. Można wprowadzić ograniczać je skosem pakietu stojana, jednak komplikuje to technologię procesu zwojenia. W literaturze światowej problem wyższych harmonicznych w silnikach typu LSPMSM jest obecny, jednak nie opisano wystarczająco zjawiska ich powstawiania [2]. Zalecenia związane z konstrukcją tych silników dotyczą minimalizacji harmonicznych indukowanej siły elektromotorycznej w stanie bezprądowym [1, 3]. Wykonane i opisane w niniejszej pracy badania pokazują, że zawartość harmonicznych w silnikach typu LSPMSM zależy od obciążenia.

#### 2. Badana maszyna

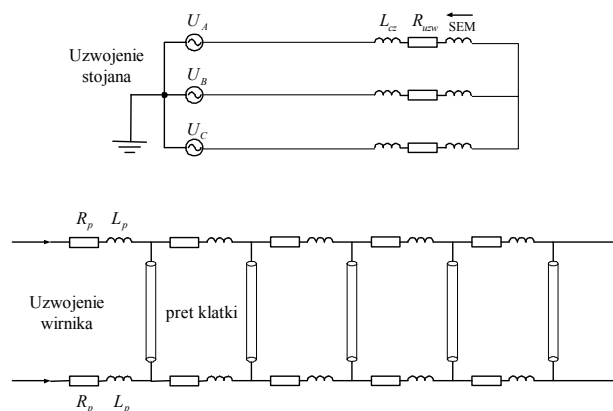
Badania wykonano wykorzystując numeryczny dwuwymiarowy polowo-obwodowy model silnika typu LSPMSM opisany w [5]. Aktualnie prezentowany model fizyczny tego silnika wykorzystuje standardowy silnik indukcyjny typu Sh 90 L4. W silniku tym całkowicie

zmieniono konstrukcję, a więc i wykrój blach wirnika.

a)



b)



Rys. 1. Polowo-obwodowy model silnika:  
a - geometria modelu, b - schemat obwodowy

Inne są wymiary i liczba żłobków wirnika, mniejsza średnica wału a ponadto wykrojono otwory dla osadzenia magnesów trwałych (typu NdFeB) ułożonych w konfiguracji „V”. Sposób rozmieszczenia magnesów ma decydujący wpływ na rozkład i kształt pola magnetycznego. W obliczeniach numerycznych rozpatrywano kilka modeli różniących się kątem rozwarcia magnesów. Do dalszych badań wybrano model o najmniejszej zawartości wyższych harmonicznych indukcji w szczelinie powietrznej w stanie bezprądowym. Geometrię części polowej wraz z fragmentem siatki dyskretyzacyjnej oraz schemat elektryczny części obwodowej modelu badanego silnika przedstawiono na rysunku 1.

### 3. Wyniki obliczeń

#### 3.1 Analiza pola magnetycznego

Dla opracowanego modelu polowo-obwodowego silnika wykonano obliczenia pola magnetycznego. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład linii pola magnetycznego (a), obwodowy rozkład (b) oraz wyniki analizy harmonicznej (c) składowej normalnej indukcji w szczelinie powietrznej w stanie bezprądowym maszyny. Z analizy harmonicznych strefowych pola wytwarzanego przez magnesy trwałe wynika, że największe amplitudy mają harmoniczne rzędu  $\nu_w = 3, 5$  i  $7$  (czyli  $p = 6, 10$  i  $14$  par biegunów). Znaczne wartości mają również harmoniczne żłobkowe wirnika (głównie  $\nu_{zw}=13$ ) oraz stojana ( $\nu_{zs}=17, 19$ ).

Wyniki obliczeń pola magnetycznego silnika pokazano na rysunku 3. W stanie obciążenia pole ulega większemu odkształceniu w porównaniu ze stanem bezprądowym. Harmoniczne strefowe niskiego rzędu ( $\nu = 5$  i  $7$ ) wzrastają odpowiednio, ponad siedmio i czterokrotnie. Zwiększenie amplitud wyższych harmonicznych w stanie obciążenia związane jest z oddziaływaniem twornika. Zjawiska tego nie należy jednak tłumaczyć wyższymi harmonicznymi siły magnetomotorycznej uzwojenia stojana, lecz nierównomiernym obwodowym rozkładem oporu magnetycznego wirnika. Magnesy umieszczone wewnątrz wirnika mają przenikalność magnetyczną względną bliską jedności, co powoduje, że opór magnetyczny dla oddziaływania twornika w osi  $d$  jest duży. Jednak droga dla strumienia oddziaływania twornika przebiega także w osi  $q$  gdzie główną składową oporu magnetycznego stanowi szcze-

lina powietrzna, kilkakrotnie mniejsza od grubości magnesów. Zmiana oporu magnetycznego na obwodzie wirnika zachodzi skokowo, zatem indukcja strumienia oddziaływania twornika również zmienia się skokowo. Powoduje to, wspomniane wcześniej, zwiększenie amplitud poszczególnych harmonicznych w stanie obciążenia.

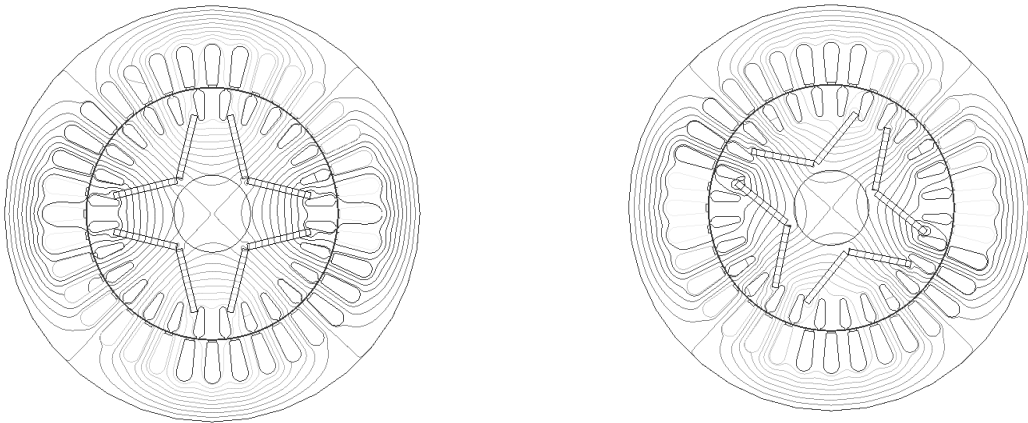
#### 3.2 Analiza harmoniczna prądu fazowego stojana badanego silnika

Wirujące synchronicznie z wirnikiem harmoniczne pola magnetycznego indukują w uzwojeniu stojana harmoniczne siły elektromotorycznej. Harmoniczne *sem* niepodzielne przez 3 (uzwojenie skojarzone w gwiazdę) powodują przepływ harmonicznych prądu w zamkniętym przez sieć uzwojeniu stojana. W wyniku tego prąd pobierany z sieci w stanie obciążenia jest odkształcony, co pokazano na rysunku 4. Podobnie jak w przypadku wyższych harmonicznych indukcji największe znacznie mają harmoniczne strefowe oraz harmoniczne żłobkowe wirnika i stojana.

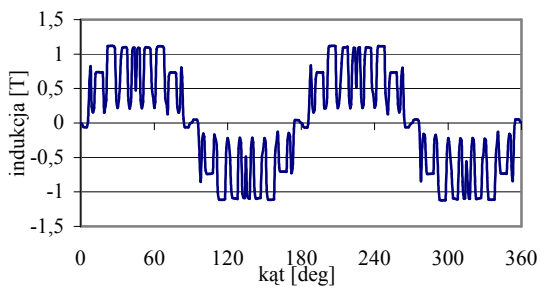
Wielkość poszczególnych harmonicznych jest uzależniona od stopnia obciążenia silnika. Dla zbadania tej zależności wykonano szereg obliczeń, w których parametrycznie zmieniano wartość kąta mocy a tym samym momentu generowanego przez silnik. Następnie wykonano analizę harmoniczną prądu dla różnych obciążeń, a wyniki przedstawiono na rysunku 5. Z wykresu wynika, że ze wzrostem obciążenia amplitudy wyższych harmonicznych rosną. Potwierdza to postawioną wcześniej hipotezę, że ich źródłem jest strumień oddziaływania twornika zależny od obciążenia.

Charakter zmian każdej z harmonicznych jest inny. Ze zmianą obciążenia harmoniczne rzędów 5, 7, 19 rosną wolniej niż harmoniczne rzędów 13, 17. Przyczyną zjawiska jest zapewne zmiana oporu magnetycznego dla poszczególnych harmonicznych, zmieniającego się z kątem mocy (inne położenie osi  $d$  i  $q$  względem strumienia oddziaływania twornika dla poszczególnych harmonicznych).

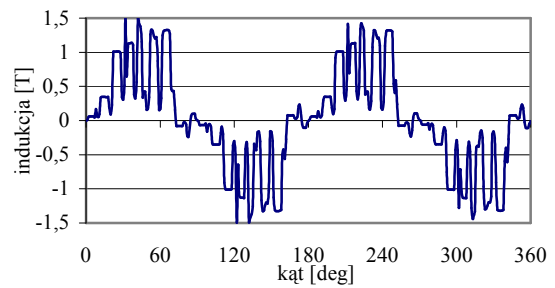
a)



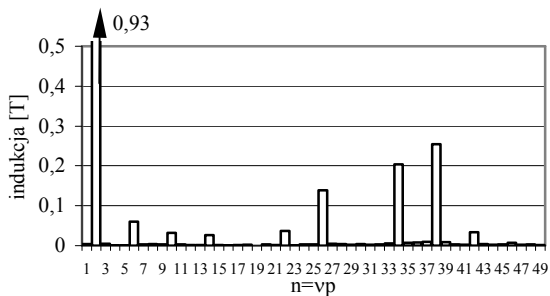
b)



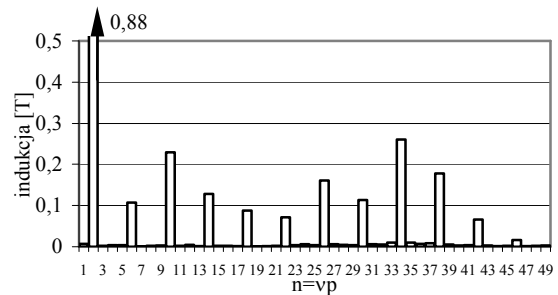
b)



c)



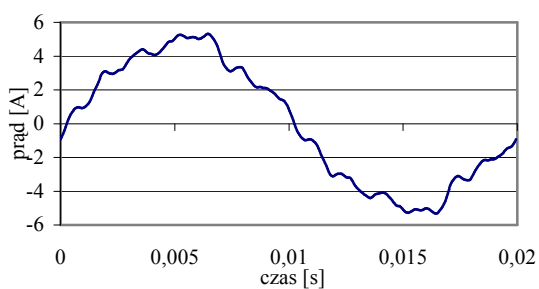
c)



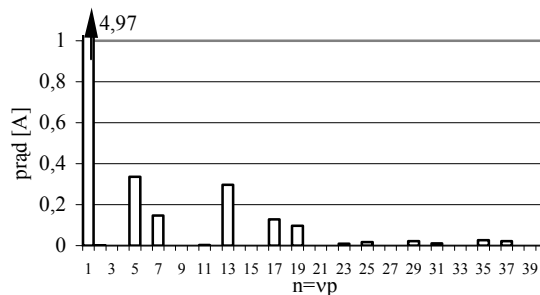
Rys.2. Linie pola magnetycznego (a), obwodowy rozkład składowej normalnej indukcji (b) oraz jej harmoniczne (c) w szczeliny powietrznej badanego silnika w stanie bezprądowym

Rys.3. Linie pola magnetycznego (a), obwodowy rozkład składowej normalnej indukcji (b) oraz jej harmoniczne (c) w szczeliny powietrznej badanego silnika w stanie obciążenia znamionowego

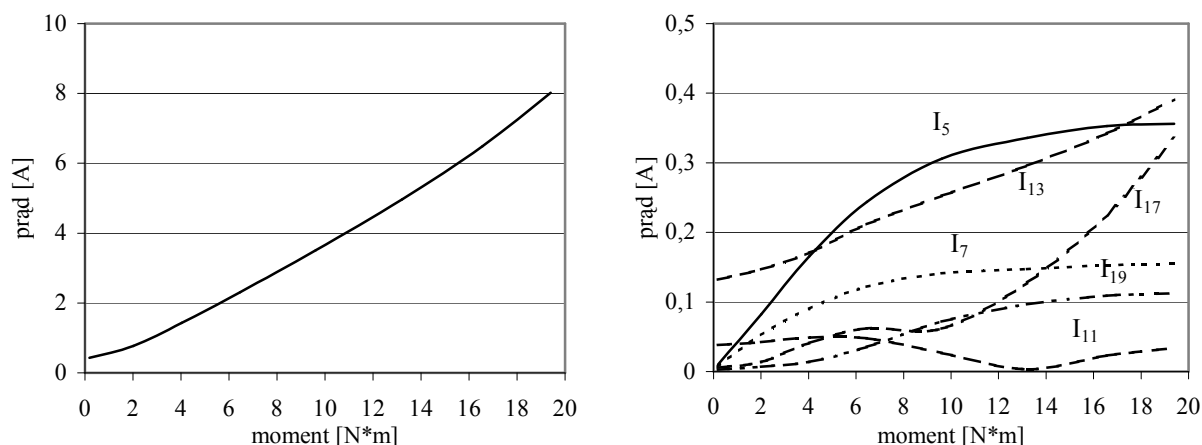
a)



b)



Rys.4. Przebieg (a) i analiza harmoniczna (b) znamionowego prądu fazowego badanego silnika



Rys.5. Zależność amplitud: pierwszej (a) oraz wyższych harmonicznych prądu (b) od momentu obciążenia badanego silnika.

#### 4. Podsumowanie

Wykonane obliczenia pozwalają stwierdzić, że w badanej maszynie typu LSPMSM występują znacznie większe odkształcenia pola magnetycznego oraz prądu twornika niż w analogicznej maszynie indukcyjnej. Zmienna przewodność magnetyczna wzdłuż obwodu wirnika odpowiada za generowanie wyższych harmonicznych w stanie obciążenia.

Optymalizacja konstrukcji magnetowodu dla stanu jałowego – jak proponuje się w literaturze – jest niewystarczająca. Konieczne jest uwzględnienie odkształcenia obwodowego rozkładu indukcji oraz prądu twornika.

#### 7. Literatura

- [1]. Gillon F., Brochet P.: *Shape optimization of a permanent magnet motor using the experimental design method*. IEEE Transactions on Magnetics, v 35, n 3 pt 1, May, 1999, p 1278-12
- [2]. Kurihara K., Wakui G., Kubota T.: *Steady-state performance analysis of permanent magnet synchronous motors including space harmonics* IEEE Transactions on Magnetics, v 30, n 3, May, 1994, p 1306-1315

- [3]. Lee J., Kim D., Park I.: *Minimization of higher back-EMF harmonics in permanent magnet motor using shape design sensitivity with B-spline parameterization*. IEEE Transactions on Magnetics, v 39, n 3 I, May, 2003, p 1269-1272

- [4]. Libert F., Soulard J., Engstrom J.: *Design of a 4-pole line start permanent magnet synchronous motor*. ICEM 2002 proceedings. Brugge, Belgium Aug. 25-28 2002, paper no. 153

- [5]. Zawilak T., Antal L.: *Pulsacje momentu elektromagnetycznego w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim*. Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines SME'2005, 14 - 17 June 2005, Jarnołtów, s.149-156

#### Autorzy

mgr inż. Tomasz Zawilak  
 dr hab. inż. Ludwik Antal  
 dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr  
 Politechnika Wrocławska  
 Inst. Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektr.  
 Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
 50-370 Wrocław  
 tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl  
 ludwik.antal@pwr.wroc.pl  
 jan.zawilak@pwr.wroc.pl