

**Wiesław Jażdżyński**  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

## **MODEL DYNAMICZNY LSPMSM I OCENA JEGO PRZYDATNOŚCI DO OPTIMALIZACJI KONSTRUKCJI NA PODSTAWIE OBLICZEŃ I POMIARÓW**

### **LSPMSM DYNAMIC MODEL AND ASSESS ITS SUITABILITY FOR DESIGN OPTIMIZATIONS BASED ON A CALCULATION AND EXPERIMENT**

**Streszczenie:** Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim jest droższy od równoważnego silnika indukcyjnego, jednak ma znacznie większą sprawność i jego zastosowanie w napędach o ruchu ciągłym jest uzasadnione ekonomicznie. Ważną cechą tej maszyny jest jej zdolność do samorozruchu. W dużej części artykuł jest poświęcony temu problemowi. W analizie przyjęto dynamiczny model obwodowy maszyny i poddano go dyskusji. W oparciu o wyniki obliczeń analitycznych, polowych i pomiarów na istniejącym silniku wyznaczone zostały parametry modelu. Po ich weryfikacji przeprowadzono badania symulacyjne w celu oceny wpływu silnika na własności dynamiczne systemu elektromechanicznego. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność modelu do badań związanych z optymalizacją konstrukcji silnika.

**Abstract:** The line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) is more expensive in a comparison to an equivalent induction motor, but it has much higher efficiency and its application in continuous-duty drives is economically justified. An important feature of this machine is ability of self-starting. In majority the paper is devoted to this problem. A dynamic lumped-parameter model of the motor is employed and discussed. Basing upon calculation results and experiments performed on a prototype, the model parameters have been determined. A simulation analysis has been completed after model verification in order to estimate the influence of the motor on dynamic properties of an electromechanical system. Obtained results confirm a usefulness of the proposed model in a research concerning motor optimization.

**Słowa kluczowe:** *maszyny elektryczne, silnik synchroniczny, magnesy trwałe, model dynamiczny*  
**Keywords:** *electrical machines, synchronous motor (LSPMSM), permanent magnets, dynamic model*

### **1. Wstęp**

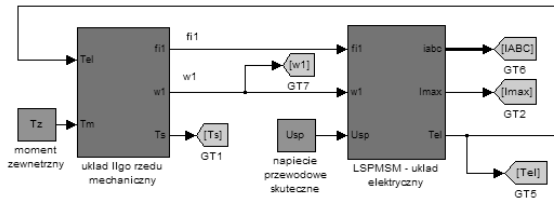
Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) posiada dwie ważne zalety: ma zdolność do samorozruchu oraz wysoką sprawność w stanie obciążenia. W prawidłowo skonstruowanym silniku dzięki klatce wirnik uzyskuje prędkość podsynchroniczną, a dzięki magnesom trwałym osiąga prędkość synchroniczną. W początkowej fazie rozruchu obecność magnesów nie jest korzystna. Zastosowanie postępowania optymalizacyjnego na etapie projektowania pozwala uzyskać najkorzystniejszy kompromis między pojawiającymi się sprzecznościami związanymi z obecnością magnesów. W postępowaniu tym konieczne jest wykorzystanie modelu dynamicznego silnika. W artykule przedstawiono model analityczny, który okazał się skuteczny w procedurze projektowania optymalnej konstrukcji LSPMSM. Wykonano badania z

wykorzystaniem tego modelu, ze szczególnym uwzględnieniem wyznaczania jego parametrów i ich wpływu na dynamikę. Analizowany jest silnik wykonany w ramach zakończonej pracy badawczej [1] i omawiany na poprzedniej konferencji SME [2].

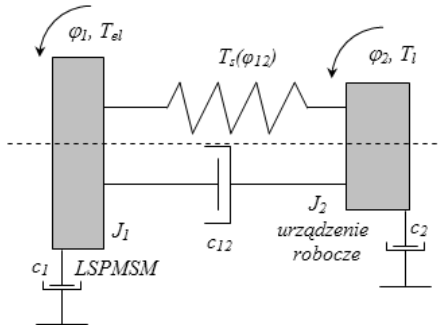
### **2. Model dynamiczny LSPMSM i jego parametry.**

Analizowany jest magnetycznie liniowy model analityczny LSPMSM. Model matematyczny przyjęto tak jak to zaproponowano w [3] ze zmianami wynikającymi z zastąpienia uzwojenia wzbudzenia klasycznej maszyny synchronicznej przez układ magnesów trwałych. Konstrukcja LSPMSM oraz dyskusja w [3] wskazują, że reprezentacja obwodów wirnika przy pomocy pojedynczych klatek w osiach  $q$  oraz  $d$  jest wystarczająca do uzyskania zadowalających wyników symulacji. Przyjęty model analityczny był weryfikowany przy pomocy modelu polowego oraz pomiarów.

Silnik LSPMSM jest znany z dużej dynamiki momentu elektromagnetycznego w czasie rozruchu. W artykule przeanalizowano wpływ tej dynamiki na zachowanie systemu elektromechanicznego reprezentowanego przez LSPMSM połączonego z urządzeniem roboczym przy pomocy sprzęgła elastycznego. Schemat blokowy modelu w środowisku Matlab-Simulink przedstawiono na rys. 1, a model części mechanicznej systemu na rys. 2.



Rys. 1. Schemat blokowy analizowanego systemu elektromechanicznego z LSPMSM.



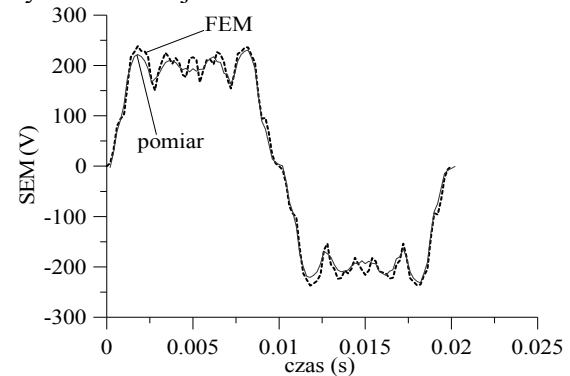
Rys. 2. Model części mechanicznej systemu elektromechanicznego z LSPMSM.

Przy przyjętych założeniach monoharmoniczny model dynamiczny silnika jest zdefiniowany przy pomocy parametrów:

$\{r'_s, r'_{kq}, r'_{kd}, L_{ls}, L_{mq}, L'_{lkq}, L_{md}, L'_{lkd}, E_m, J_1\}$ , gdzie  $E_m$  jest amplitudą podstawowej harmonicznej SEM indukowanego w uzwojeniu fazowym stojana w stanie jałowym,  $J_1$  jest momentem bezwładności wirnika, a znaczenie pozostałych parametrów i model są jak w [3], [4].

Wartość parametru  $r_s$  została zmierzona, do wyznaczenia parametrów  $\{r'_{kq}, r'_{kd}, L_{ls}, L'_{lkq}, L'_{lkd}\}$  posłużono się klasycznymi wzorami obliczeń projektowych [5] przy założeniu, że klatka jest symetryczna elektrycznie i magnetycznie. Wartość momentu bezwładności wyliczono z wymiarów i konstrukcji wirnika oraz z zależności definiujących tą wielkość. W programie syntezy projektowej użytym w optymalizacji pozostałe parametry  $\{L_{mq}, L_{md}, E_m\}$  są określone analitycznie.

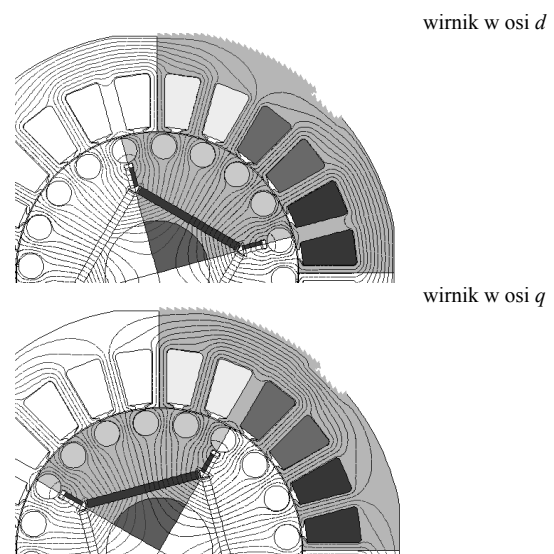
Wartość  $E_m$  można zweryfikować tak eksperymentalnie jak przy pomocy obliczeń polowych. Rys. 3 przedstawia wynik takiego działania dla prototypu LSPMSM pracującego jako generator na biegu jałowym przy prędkości synchronicznej.



Rys. 3. Porównanie funkcji SEM (jeden okres) indukowanej w uzwojeniu fazowym stojana LSPMSM.

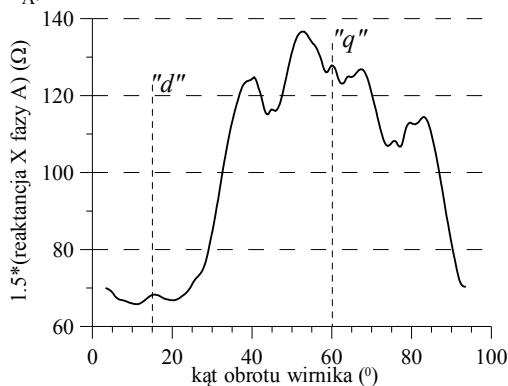
Można zauważyć dużą zgodność wskazującą na zasadność wykorzystania metody polowej do wyznaczenia pozostałych parametrów  $\{L_{mq}, L_{md}\}$ . Wyznaczenie tych parametrów na drodze eksperymentalnej napotyka na duże trudności ze względu na równoczesną aktywność magnesów trwałych i klatki, której nie można „wylączyć”. Modele polowe nie mają tego ograniczenia.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład pola w silniku, gdy faza A stojana jest zasilona napięciem sinusoidalnym o małej wartości (wyznaczane są reaktancje nienasycone).



Rys. 4. Rozkład pola przy zasileniu jednej fazy stojana i ustawieniu wirnika w osi  $d$  i  $q$

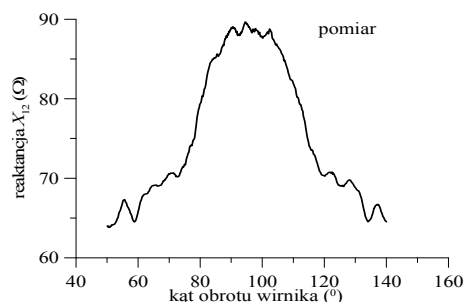
Przyjęcie wartości reaktancji  $X_q$  i  $X_d$  wyznaczonych dla jednego położenia wirnika może być dyskusyjne w modelu monoharmonicznym. Z zapisu równań modelu wynika, że lepszym przybliżeniem będą pierwsze harmoniczne funkcji reaktancji zależnej od kąta położenia wirnika. Funkcja taka jest przedstawiona dla jednej podziałki biegunowej na rys. 5 z uwzględnieniem, że między funkcją reaktancji synchronicznej  $X_{qd}$  oraz fazy stojana  $X_A$  jest zależność:  $X_{qd}=1.5^* X_A$ .



Rys. 5. Funkcja reaktancji synchronicznych w zależności od kąta położenia wirnika

Wartości reaktancji otrzymane z rozkładu harmonicznego funkcji na rys. 5 są bardzo bliskie wartościom otrzymanym w programie syntezy projektowej dla optymalnej konstrukcji silnika prototypowego. Większe różnice wystąpiły w przypadku podstawowej harmonicznej SEM.

Próby eksperymentalnego wyznaczania reaktancji synchronicznych wymagają na ogół złożonej aparatury pomiarowej (kąty obciążenia). Można spotkać się z podejściem uproszczonym polegającym na zasilaniu napięciem jednofazowym dwóch faz silnika połączonych w szereg. Wynik takiego postępowania przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Funkcja reaktancji synchronicznej wyznaczona eksperymentalnie w sposób uproszczony.

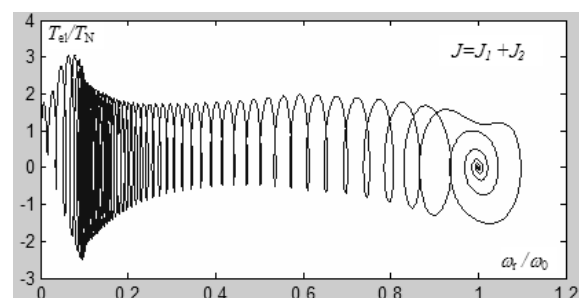
Można zauważyć, że postępowanie to daje wyniki niedokładne (zaniżone) i nie nadaje się do weryfikacji modeli używanych w optymalizacji konstrukcji.

### 3. Symulacja dynamiki

Obecność magnesów trwałych jest przyczyną, że charakterystyka średniego momentu rozruchowego zmienia co najmniej jeden raz znak przed osiągnięciem punktu synchronicznego. Zbyt silne magnesy mogą spowodować utknięcie silnika w pobliżu punktu startowego. W pracy [2] badano przy pomocy wyników symulacji przewidywane zachowanie się silnika w czasie swobodnego rozruchu, gdy zwiększany był moment bezwładności. Przy założeniu stałości parametrów w czasie rozruchu silnik był zdolny uzyskać prędkość synchroniczną przy dodatkowym momencie bezwładności nawet 500 razy większym od własnego.

Zjawiskiem niekorzystnym może być również zwiększenie rezystancji wirnika (nagrzewanie). Bardziej szczegółowo badano to w pracy [6].

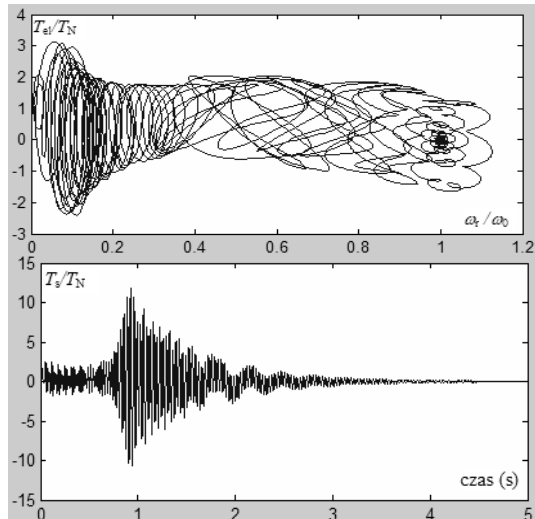
Poniżej przedstawiono niektóre wyniki badań symulacyjnych dotyczących oceny wpływu LSPMSM na dynamikę systemu elektromechanicznego w czasie rozruchu swobodnego dla modelu układu mechanicznego jak na rys.2. Założono dla uproszczenia brak tłumienia ( $c_1, c_2, c_{12} = 0$ ), liniowość sprzęgła ( $T_s = k_1 * \Delta\varphi$ ) oraz  $J_2 = 2J_1$ . We wszystkich przypadkach przyjęto napięcie zasilające obniżone do wartości  $U_T = 150V$  (zamiast 230V).



Rys. 7 Praca samotna - rozruch swobodny LSPMSM z 3-krotnie większym momentem bezwładności i obniżonym napięciem.

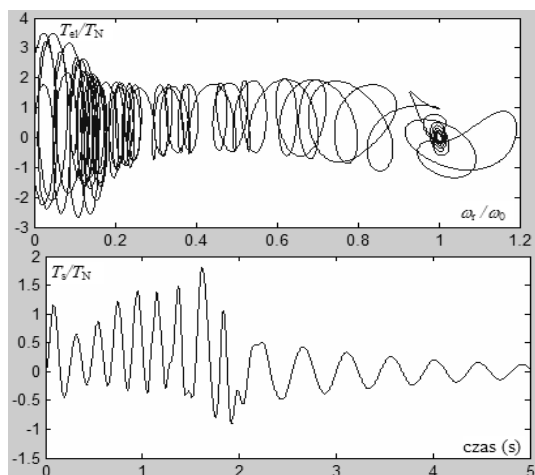
Pierwszy przypadek dotyczy pracy samotnej silnika. Pomimo obniżenia napięcia amplituda składowej zmiennej przekracza wartość znamionową momentu praktycznie w całym okresie rozruchu.

W drugim przypadku współczynnik sprężystości sprzęgła jest taki, aby częstość drgań własnych systemu była  $\omega_n = 0.6 * \omega_0$ . Pojawia się zjawisko rezonansu, które manifestuje swoją obecność tak w trajektorii momentu elektromagnetycznego (E-M), jak momentu skrętnego na wale. Moment ten osiąga wartość przekraczającą przeszło 10-krotnie moment znamionowy. Taka sytuacja będzie skutkowałą awarią systemu.



Rys. 8a,b. Przebieg względnego momentu E-M ( $T_e/T_N$  u góry) i skrętnego  $T_s/T_N$  dla pulsacji własnej systemu  $\omega_n = 0.6 * \omega_0$

Przyjęcie w trzecim przypadku wartości współczynnika  $k_1$  tak, aby zachodziło  $\omega_n = 0.1 * \omega_0$  daje wynik jak na rys.9.



Rys. 9a,b. Przebieg względnego momentu E-M ( $T_e/T_N$  u góry) i skrętnego  $T_s/T_N$  dla pulsacji własnej systemu  $\omega_n = 0.1 * \omega_0$

Amplituda drgań momentu E-M zmieniła się niewiele, natomiast amplituda drgań momentu skrętnego zmalała blisko 10-krotnie.

#### 4. Wnioski.

Analityczny model LSPMSM może być użyteczny w postępowaniu optymalizacyjnym, o ile wcześniej zostanie poddany uważnej analizie weryfikacyjnej.

Modele polowe wydają się być bardziej przydatnym narzędziem weryfikacyjnym modelu obwodowego niż pomiary ze względu na złożoność konstrukcji LSPMSM, która skutkuje złożonością układu pomiarowego i wynikającą z tego zwiększoną niepewnością pomiaru.

Duża dynamika LSPMSM w czasie rozruchu, z reguły większa niż w silnikach indukcyjnych, może być w praktycznych rozwiązaniach z łatwością zredukowana, poprzez dobór odpowiedniej charakterystyki sprzęgła.

#### 5. Literatura

- [1]. W. Jażdżyński, M. Bajek. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego własnego NN510108538 *Wielokryterialna optymalizacja konstrukcji energooszczędnych wybranych maszyn elektrycznych w aspekcie nowych klas sprawności IE1-IE4*, Kraków, 2010-2012.
- [2]. Jażdżyński W., Bajek M.: *A comparison of operation properties of a high-efficiency squirrel-cage induction motor and LSPMSM*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Seria: Studia i Materiały nr.32, tom 1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2012, str. 238-243.
- [3]. Krause P.C.: *Analysis of electric machinery*, 1986, McGraw-Hill
- [4]. Jażdżyński W.  
[http://kme.agh.edu.pl/file/teaching/pp/06/SM1-SM3\\_instrukcja\\_i\\_materiały\\_3.pdf](http://kme.agh.edu.pl/file/teaching/pp/06/SM1-SM3_instrukcja_i_materiały_3.pdf)
- [5]. Kopyłow, J.P.: *Projektowanie elektrycznych maszyn*. Moskwa, Energia, 1980.
- [6]. Bajek M.: „*Analiza własności i synteza projektowa silnika synchronicznego z magnesami trwałymi do rozruchu bezpośredniego (LSPMSM) z wykorzystaniem metod polowych i optymalizacji*”, Kraków, 2013, str. 1-143. (dostępna w bibliotece AGH).

#### Autor

Dr hab. inż. Wiesław Jażdżyński, prof. n.z. AGH. AGH w Krakowie, Katedra Elektroenergetyki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30 (e-mail: [wjaz@agh.edu.pl](mailto:wjaz@agh.edu.pl)).

#### Recenzent

prof. dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski