

Tomasz PAJCHROWSKI*

ENERGOOSZCZĘDNY NAPĘD Z SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM O MAGNESACH TRWAŁYCH Z ŁAGODNYM STARTEM

W artykule przedstawiono układ napędowy z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych z rozruchem bezpośrednim (LSPMSM) przeznaczony dla napędu wentylatora. Omówiony został algorytm sterowania silnika LSPMSM według zasady u/f oraz optymalizacja korekty napięcia zasilającego za pomocą algorytmu genetycznego, która zapewnia zmniejszone zużycie energii elektrycznej. Model układu opracowano w języku Matlab. Przedstawione wyniki badań symulacyjnych ilustrują poprawne działanie energooszczędny układu napędowego z silnikiem LSPMSM dla napędu wentylatora.

1. WPROWADZENIE

Silniki synchroniczne o magnesach trwałych (*PMSM*, ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*), ze względu na bardzo dobre właściwości dynamiczne, są od wielu lat powszechnie stosowane w układach precyzyjnego sterowania, między innymi w takich układach napędowych jak: napędy robotów, mechanizmy posuwu obrabiarek, napędy zwijarek czy maszyny papiernicze. Można zauważyć, że obecnie wiele prowadzonych prac badawczych koncentruje się również na wykorzystaniu silników PMSM z klatką tłumiącą i bez klatki tłumiącej, do napędów pomp i wentylatorów, gdzie wymagania dynamiczne mają znacznie mniejsze znaczenie [1, 2, 3]. W napędach tych, mamy często do czynienia ze znacznymi odległościami pomiędzy silnikiem a przekształtnikiem, dlatego wymagany pomiar położenia wirnika w tych układach jest dość trudny. Zastosowanie bezpośredniego pomiaru położenia wiąże się z koniecznością prowadzenia długiego połączenia, co zwiększa koszty i obniża niezawodność napędu. Także zastosowanie bloku obserwatora jest wiąże się z dodatkowymi problemami, z uwagi na często stosowane w tych rozwiązaniach filtry pomiędzy przekształtnikiem a silnikiem, a tym samym utrudnia to projektowanie układu napędowego. Alternatywnym rozwiązaniem sterowania dla napędu wentylatora z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych jest układ otwarty ze sterowaniem częstotliwościowym według zasady u/f [1, 2, 3]. W pracach [1, 3]

* Politechnika Poznańska.

przeprowadzono obszerne badania symulacyjne z silnikiem PMSM bez klatki tłumiącej w otwartej pętli sterowania częstotliwościowego u/f . Przedstawiono analizę stabilności wentylatorowego układu napędowego i wykazano, że układ sterowania z silnikiem PMSM bez klatki tłumiącej jest niestabilny [1, 3]. W celu zmniejszenia poboru mocy przez układ napędowy przeprowadzono wstępną optymalizację napięcia i wprowadzono dodatkową pętlę stabilizującą pracę wirnika. Wyniki symulacyjne potwierdzają słuszność zastosowanego rozwiązania dla napędu wentylatora [1, 2, 3]. W niniejszej pracy przedstawiono alternatywne rozwiązanie otwartego sterowania według zasady u/f z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych z klatką tłumiącą (ang. *LSPMSM – Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*). Silnik taki w czasie rozruchu ma właściwości maszyny indukcyjnej (w stanach dynamicznych czynny udział bierze klatka tłumiąca), a w czasie pracy ustalonej – silnika synchronicznego. Dla silnika LSPMSM nie jest konieczne stosowanie dodatkowej pętli stabilizującej pracę wirnika [1, 3] i wprowadzania jej w układzie sterowania. Klatka tłumiąca pełni rolę takiego stabilizatora, a układ jest stabilny w całym zakresie prędkości obrotowej. Jednak, w celu zapewnienia zmniejszonego poboru mocy czynnej z sieci dla całego układu napędowego, konieczna jest optymalizacja napięcia zasilającego w funkcji prędkości zadanej. Do rozwiązania tego zadania zastosowano algorytmy genetyczne [4].

2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA LSPMSM

Budowa silnika synchronicznego o magnesach trwałych z rozruchem bezpośrednim (LSPMSM) podobna jest do silnika synchronicznego o wzbudzeniu magnetoelektrycznym bez klatki tłumiącej (PMSM). Oba silniki mają konstrukcję będącą modyfikacją silnika indukcyjnego asynchronicznego. Silnik LSPMSM w stanach przejściowych ma własności maszyny indukcyjnej klatkowej, a podczas pracy z ustaloną prędkością synchroniczną – silnika synchronicznego. Model matematyczny oparty jest na podobnych zasadach jak model silnika synchronicznego o magnesach trwałych [5, 6]. Różnice wynikają z odmiennej budowy wirnika. Dla modelu matematycznego LSPMSM zakłada się istnienie klatki tłumiącej. Przy założeniach upraszczających, takich, że silnik ma uzwojenia skupione i jest symetryczny pod względem magnetycznym i elektrycznym, pomija się efekty nasycenia w obwodach magnetycznych oraz prądy wirowe i zjawisko histerezy, to w wirującym układzie współrzędnych prostokątnych dq związanych ze strumieniem wirnika, równania opisujące model LSPMSM można zapisać:

$$u_d = R_d i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad (1)$$

$$u_q = R_q i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_d}{dt} = i_D R_D + L_D \frac{di_D}{dt} \quad (3)$$

$$\psi_d = L_d (i_d - i_D) + \psi_m \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = i_Q R_Q + L_Q \frac{di_Q}{dt} \quad (5)$$

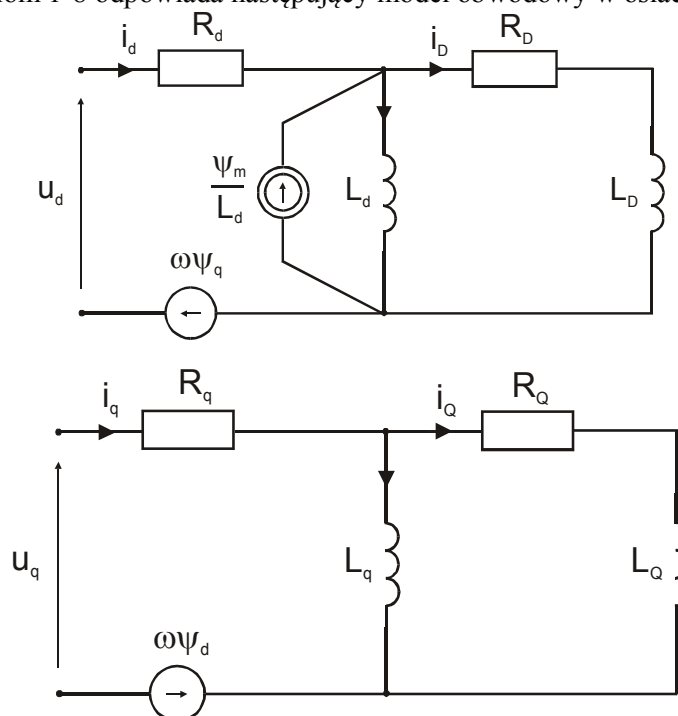
$$\psi_q = L_q (i_q - i_Q) \quad (6)$$

$$L_D = L_d \frac{\sigma_D}{1 - \sigma_D} \quad (7)$$

$$L_Q = L_q \frac{\sigma_Q}{1 - \sigma_Q} \quad (8)$$

gdzie: R_d, R_q – rezystancja stojana w osiach d i q; L_d, L_q – indukcyjność stojana w osiach d i q; L_D, L_Q – indukcyjność klatki tłumiącej w osi d i q; R_D, R_Q – rezystancja klatki tłumiącej w osi d i q; σ – współczynnik rozproszenia indukcyjności między klatką tłumiącą a uzwojeniem stojana.

Równaniom 1-8 odpowiada następujący model obwodowy w osiach dq:



Rys. 1. Model obwodowy silnika LSPMSM w osi d i q

Równanie dynamiki napędu ma postać:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L \quad (9)$$

Moment oporowy dla wentylatora można wyrazić przybliżonym równaniem:

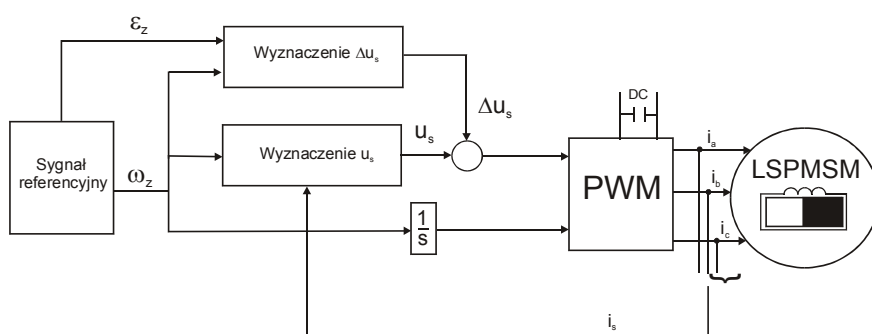
$$T_L = T_s + k_f \omega^2 \quad (10)$$

gdzie T_s to moment tarcia statycznego, a k_f jest współczynnikiem charakterystycznym dla wentylatora [3].

3. OPTIMALIZACJA NAPIĘCIA STOJANA

W pracy zaproponowano sterowanie silnikiem LSPMSM w układzie otwartym według metody u/f. W metodzie tej napięcie stojana u_s jest obliczane w celu utrzymania stałego strumienia. To pozwala na uzyskanie stałego momentu w całym zakresie prędkości. Napięcie było wyznaczane na podstawie wzoru [1, 3]:

$$u_s = i_s r_s \cos \varphi_{ui} + \sqrt{e_s^2 + (i_s r_s \cos \varphi_{ui})^2 - (i_s r_s)^2} \quad (11)$$

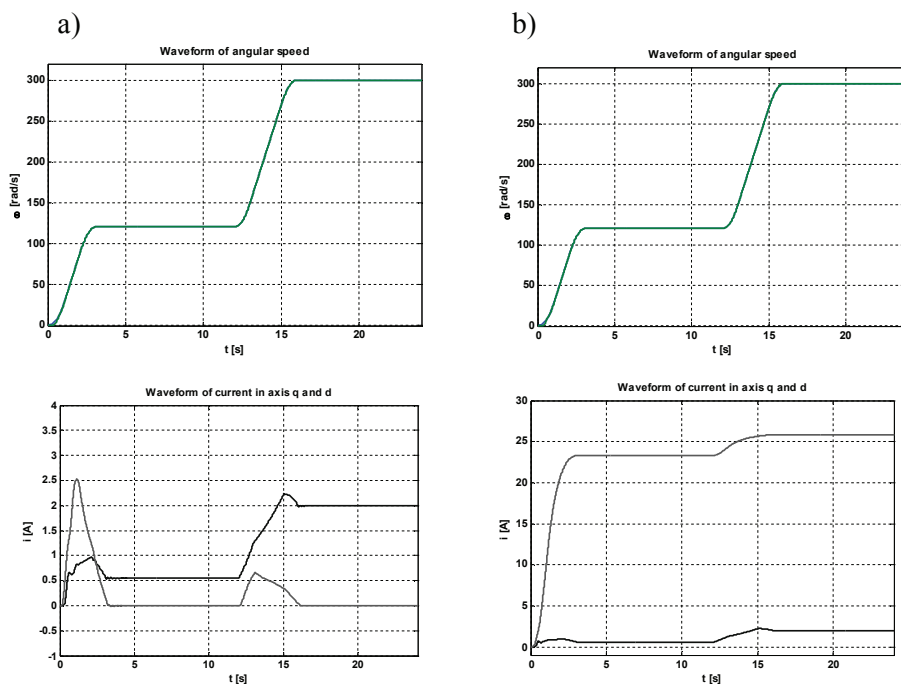


Rys. 3. Struktura sterowania energooszczędnego z silnikiem LSPMSM

W celu uzyskania najmniejszych strat w silniku LSPMSM ($i_d = 0$) w stanie ustalonym (stanów przejściowych dla napędu wentylatora w pracy nie analizowano) zbudowano model symulacyjny, którego strukturę przedstawiono na rys. 3. Za pomocą algorytmu genetycznego [4] dla różnych prędkości obrotowych, tak optymalizowano sygnał zmiany napięcia Δu_s , aby osiągnąć minimum prądu w osi d. Po serii testów symulacyjnych opracowano tablicę przeglądową, której wejścia stanowią: prędkość zadana ω_z i przyspieszenie zadane ε_z , a wyjście to sygnał zmiany napięcia Δu_s . W celu minimalizacji prądu w osi d wykorzystano bibliotekę „genetic algorithm” z pakietu Matlab i uruchomiono funkcję „gaoptimset”. Wybrano 20 osobników w populacji, liczba generacji nie przekraczała 50, a funkcja celu po której kończyła się optymalizacja dla zadanej prędkości obrotowej wynosiła $|0.01|$.

4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYNYCH

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki symulacyjne podczas odpowiedzi na wartość zadaną prędkości oraz przedstawiono przebieg prądu w osi d i q dla układu bez optymalizacji (rys. 4b) i z optymalizacją (rys. 4a) dla takiej samej trajektorii prędkości zadanej i obciążenia wentylatorowego (10). Można zauważyć, że optymalizacja modułu napięcia zasilającego została wykonana prawidłowo. Wartość prądu w osi d, dzięki korekcy napięcia zasilającego (zmniejszenie modułu napięcia zasilania) została zredukowana do wartości równej 0, przy nie zmienionej wartości prądu w osi q. Dzięki temu straty mocy czynnej w uzwojeniach i żelazie, są mniejsze. Badania zostały przeprowadzone dla równych współczynników rozproszenia (7 i 8), który wynosił 0,1, co oznacza znaczny udział współczynnika tłumienia podczas stanów dynamicznych i statycznych silnika LSPMSM.



Rys. 4. Przebieg prędkości obrotowej i prądu w osi d i q dla układu z korekcją (a) i bez korekcy napięcia (b)

Przeprowadzono również optymalizację dla innych wartości współczynnika rozproszenia, które różniły się tylko tym, że dla wyższych wartości rozproszenia (mniejszy udział klatki tłumiącej) wyraźnie wzrastają oscylacje prądu w obu osiach oraz prędkości. Oznacza to, że potrzebna jest dodatkowa pętla stabilizacji prędkości obrotowej [1, 3].

5. WNIOSKI

Przedstawioną w artykule metodę sterowania silnikiem LSPMSM według zasady u/f można zastosować w układach bezczujnikowego sterowania o niskiej dynamice, takich jak pompy czy wentylatory. W porównaniu z silnikiem PMSM, nie wymaga ona stosowania dodatkowych układów stabilizacji. Poprawne zachowanie się napędu stanowi doskonały punkt wyjścia do badań eksperymentalnych.

LITERATURA

- [1] P.D. Chandana Perera, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, and P. Thogersen, "A sensorless, stable V/f control method for Permanent-magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol 39, pp. 783-791, May/June 2003.
- [2] M. Kiuchi, T. Ohnishi, H. Hagiwara, and Y. Yasuda, "V/f control of Permanent Magnet Synchronous Motors suitable for home appliances by DC-link peak current control method," International Power Electronic Conference, IPEC 2010, pp. 567-573.
- [3] Brock. S., Pajchrowski T.: Energy-optimal v/f control of permanent magnet synchronous motor for fan application, Sympozjum Maszyn Elektrycznych - SME 2011.
- [4] Rutkowski L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
- [5] Jazdżyński W., Bajek M., Obliczenia analityczne silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) z pominięciem zjawisk nieliniowych, *Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 83/2009.
- [6] Rahman M., Little T., Slemon G.: Analytical models for interior-type permanent magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, tom 21, nr 5, 1985, ss. 1741-1743.

ENERGY – OPTIMAL CONTROL OF LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

This paper presents the drive system of line start synchronous motor with permanent magnet (LSPMSM) for fan application. There was presented to the motor u/f control algorithm for LSPMSM and optimization of the supply voltage using a genetic algorithm, which provides reduced power consumption. The model developed in Matlab. The simulation results illustrate the correct operation of energy-efficient of LSPMSM drive for fan applications.