

Krzysztof DRÓŹDŹ*
Krzysztof SZABAT*

ROZMYTY REGULATOR PRĘDKOŚCI TYPU TSK UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM O MAGNESACH TRWAŁYCH

W pracy przedstawiono strukturę sterowania prędkością układu napędowego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych PMSM ze zmiennym momentem bezwładności z wykorzystaniem metod sterowania rozmytego. W badanym układzie zastosowano odporny na zmiany wartości momentu bezwładności regulator rozmyty typu TSK oraz przeprowadzono badania porównawcze struktur sterowania prędkością z klasycznym regulatorem PI. W celu doboru optymalnych wartości współczynników regulatorów wykorzystano algorytm genetyczny. Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku Matlab.

1. WSTĘP

Nowoczesnym układom serwonapędowym stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące dynamiki ich działania. Sprostanie takim wymaganiom umożliwia zastosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSM). Silniki te osiągają wysoką dynamikę dzięki małemu momentowi bezwładności oraz dużemu stosunkowi osiąganego momentu mechanicznego do masy. Wymienione cechy silników PMSM oraz możliwość ich pracy przy wysokich obrotach powodują coraz większą popularność tego typu układów napędowych. Przykładami ich zastosowań są napędy robotów [3], obrabiarek sterowanych numerycznie [2], serwonapędy [5]. Pomimo ich szerokiego zastosowania oraz wielu zalet silniki synchroniczne z magnesami trwałymi stanowią skomplikowany obiekt regulacji, który wymaga zastosowania złożonych metod sterowania [1].

W pętli sterowania prędkością często wykorzystywane są klasyczne regulatory PI. Rozwiązanie takie cechuje się pewnymi wadami. Współczynniki wzmocnień proporcjonalnego i całkującego, zoptymalizowane dla pewnego zakresu zmian błędu regulacji prędkości nie są optymalne dla innych zakresów zmian tej wielkości. Podobnie jest w przypadku zmian momentu bezwładności układu, które powszechnie występują w wielu typach napędów. Jedną z metod poprawy tej

* Politechnika Wroclawska.

wady jest zastosowanie programowalnych zmian parametrów regulatora prędkości (*gain scheduling*). Metoda ta jest często wykorzystywana w sterowaniu obiektami nieliniowymi w przypadkach, gdy konieczna jest zmiana nastaw regulatora uzależniona od zmiennych warunków pracy układu [4]. Do zastosowania tej metody konieczne jest wykorzystanie sygnału dostępnego pomiarowo oraz skorelowanego ze zmianami obiektu, który zwany jest zmienną wiodącą. Takim sygnałem jest błąd regulacji prędkości układu napędowego oraz jego pochodna. W klasycznym zastosowaniu metody *gain scheduling* parametry nastaw regulatora prędkości zgromadzone są w tablicy i odpowiednio przekazywane do regulatora w zależności od wartości zmiennej wiodącej. Zaletą takiego rozwiązania jest prostota w jego realizacji, natomiast wadą skokowe przełączanie wartości poszczególnych wzmocnień regulatora prędkości, co może prowadzić do skokowych zmian sygnału sterującego. W perspektywie dłuższego czasu eksploatacji napędu, takie zjawisko może przyczynić się do skrócenia żywotności jego części mechanicznych. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie logiki rozmytej. System rozmyty spełniający rolę tablicy przełączeń nastaw regulatora prędkości, charakteryzuje się ich płynnymi zmianami w funkcji błędu prędkości zadanej oraz jego pochodnej. Takie działanie eliminuje wadę, jaką posiada klasyczna tablica przełączeń.

W artykule przeanalizowano działanie struktury sterowania wykorzystującej liniowy regulator prędkości PI oraz nieliniowy model silnika PMSM. Następnie zaproponowano rozwiązanie alternatywne wykorzystujące rozmyty regulator prędkości typu TSK i dokonano porównania.

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU BADAŃ I STRUKTURA STEROWANIA

W badaniach symulacyjnych wykorzystano nieliniowy model matematyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, który może być opisany w układzie współrzędnych związanych z wirnikiem (*d-q*) następującymi równaniami [6]:

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e \tilde{L}_q I_q, \quad (1)$$

$$V_q = R_s I_q + \tilde{L}_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_e L_d I_d + \omega_m K_e, \quad (2)$$

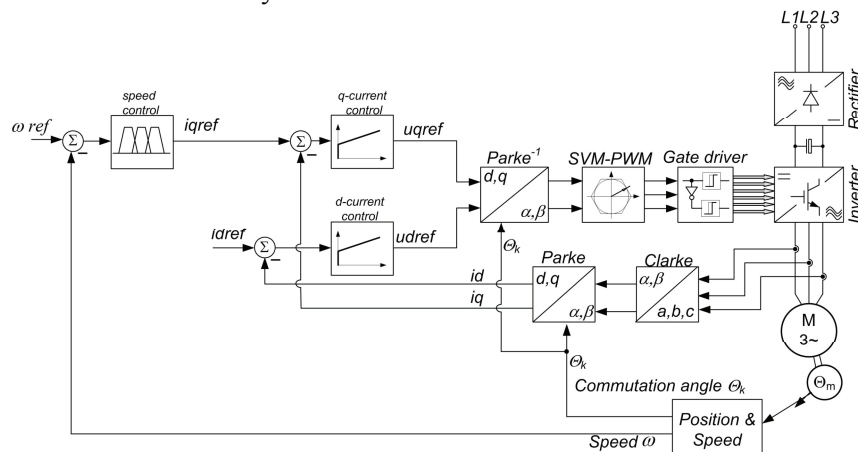
$$M_e = \frac{3}{2} p [(L_d - \tilde{L}_q) I_d I_q + \tilde{K}_t I_q] \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_L), \quad (4)$$

gdzie: V_d , V_q , I_d , I_q – napięcia i prądy stojana w osiach d i q , L_d – indukcyjność w osi d , \tilde{L}_q – nieliniowa zależność indukcyjności w osi q , R_s – rezystancja uzwojeń stojana, ω_e – pulsacja elektryczna, ω_m – prędkość kątowna wirnika, p – liczba par biegunów, M_e , M_L – moment elektromagnetyczny i obciążenia, J – moment bezwładności napędu, \tilde{K}_t – nieliniowa zależność stałej momentu od prądu w osi q .

Przyjęty powyżej nieliniowy model jest zgodny z rzeczywistością w całym obszarze charakterystyki rozwijanego momentu elektromagnetycznego $M_e = f(I_q)$. Dodatkowo indukcyjność (reaktancja) w osi q jest silnie zależna od prądu I_q . Wartość momentu elektromagnetycznego w przypadku liniowego modelu silnika jest wprost proporcjonalna do wartości prądu w osi q i zależy od parametrów konstrukcyjnych. W przypadku uwzględnienia nieliniowości rozwijany moment nie jest funkcją liniową.

Sterowanie silników synchronicznych o magnesach trwałych często realizowane jest za pomocą połowo zorientowanej struktury sterowania, która przedstawiona została na rysunku 1.



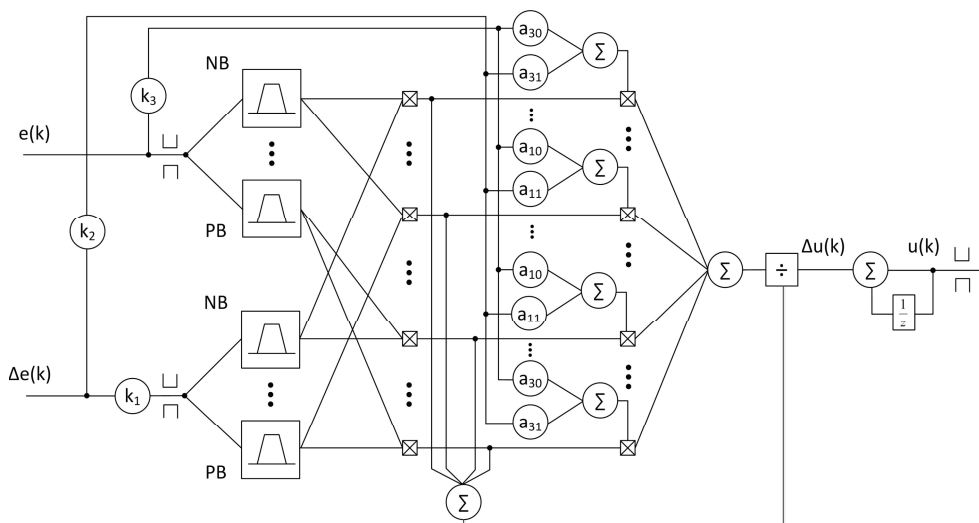
Rys. 1. Struktura sterowania

W przypadku pracy bez osłabiania pola, wartość prądu w osi d powinna być utrzymywana na zerowym poziomie. Przy takich warunkach struktura ta realizuje strategię sterowania z zachowaniem stałego kąta mocy [6].

3. ROZMYTY REGULATOR PRĘDKOŚCI TYPU TSK

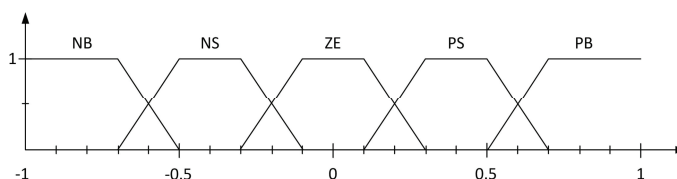
W klasycznej strukturze sterowania układem napędowym z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych często wykorzystuje się regulatory PI wraz z ich modyfikacjami. Rozwiązania te cechują się pewnymi wadami opisanymi we wstępie. W celu poprawienia właściwości dynamicznych układu

w całym zakresie zmian prędkości oraz przy występowaniu zmiennego momentu bezwładności napędu opracowano regulator rozmyty typu TSK. Na rysunku 2. przedstawiono strukturę omawianego regulatora.



Rys. 2. Struktura regulatora rozmytego

W opisywanym regulatorze zastosowano trapezowe funkcje przynależności zmiennych wejściowych, które zaprezentowano na rysunku 3. Zmiennymi wejściowymi regulatora są błąd regulacji prędkości $e(k)$ oraz jego pochodna $\Delta e(k)$. W przypadku obu zmiennych wejściowych wykorzystano takie same funkcje przynależności. Przyjętą bazę reguł zestawiono w tabeli 1. W celu doboru nastaw regulatora ustalono następujące wartości współczynników: $k_1 = 0.1$, $a_{ij} = 1$ ($i = 1, 2, 3$; $j = 0, 1$). Pozostałe współczynniki k_2 i k_3 dobrano na podstawie podobieństwa do regulatora PI, gdzie wartość wzmocnienia K_p odpowiada wartości współczynnika k_2 , a wartość wzmocnienia K_I wartości współczynnika k_3 .



Rys. 3. Zastosowane funkcje przynależności zmiennych wejściowych regulatora $e(k)$ i $\Delta e(k)$

Po przeprowadzeniu testów na poprawne działanie struktury sterowania, dokonano optymalizacji wartości współczynników a_{ij} za pomocą algorytmu genetycznego.

Przyjęto następujące kryterium optymalizacji:

$$I = I_1 \cdot I_2, \quad (5)$$

$$I_1 = \int e_1^2 t^2 dt, \quad (6)$$

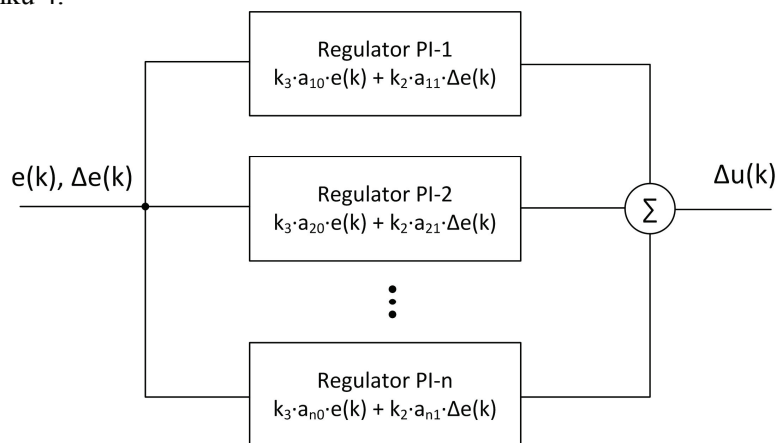
$$I_2 = \int e_2^2 t^2 dt, \quad (7)$$

gdzie: e_1 - wartość błędu regulacji przy znamionowym momencie bezwładności $J = J_N$ i znamionowym momencie obciążenia M_{ON} , e_2 - wartość błędu regulacji przy momencie bezwładności $J = 2J_N$ i znamionowym momencie obciążenia, t - czas.

Tabela 1. Baza reguł

$e(k) \backslash \Delta e(k)$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	a_{30} a_{31}	a_{30} a_{31}	a_{30} a_{31}	a_{30} a_{31}	a_{10} a_{11}
NS	a_{30} a_{31}	a_{30} a_{31}	a_{20} a_{21}	a_{10} a_{11}	a_{30} a_{31}
ZE	a_{30} a_{31}	a_{20} a_{21}	a_{10} a_{11}	a_{20} a_{21}	a_{30} a_{31}
PS	a_{30} a_{31}	a_{10} a_{11}	a_{20} a_{21}	a_{30} a_{31}	a_{30} a_{31}
PB	a_{10} a_{11}	a_{30} a_{31}	a_{30} a_{31}	a_{30} a_{31}	a_{30} a_{31}

Opisywany regulator można przedstawić jako quasi-liniowy regulator rozmyty składający się z kilku liniowych regulatorów PI, którego schemat przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat quasi-liniowego regulatora rozmytego

Wartość zmiany sygnału sterującego można tu opisać poniższą zależnością:

$$\Delta u(k) = \tilde{K}_p \Delta e(k) + \tilde{K}_I e(k), \quad (8)$$

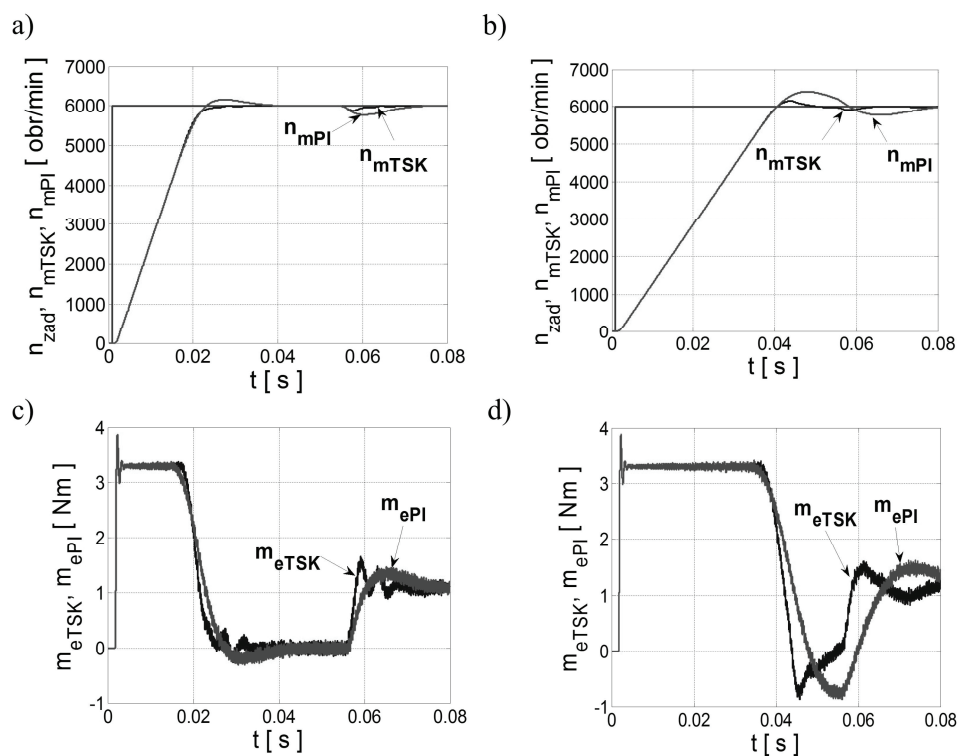
gdzie:

$$\tilde{K}_p = \sum_{i=1}^m k_2 a_{i1}, \quad (9)$$

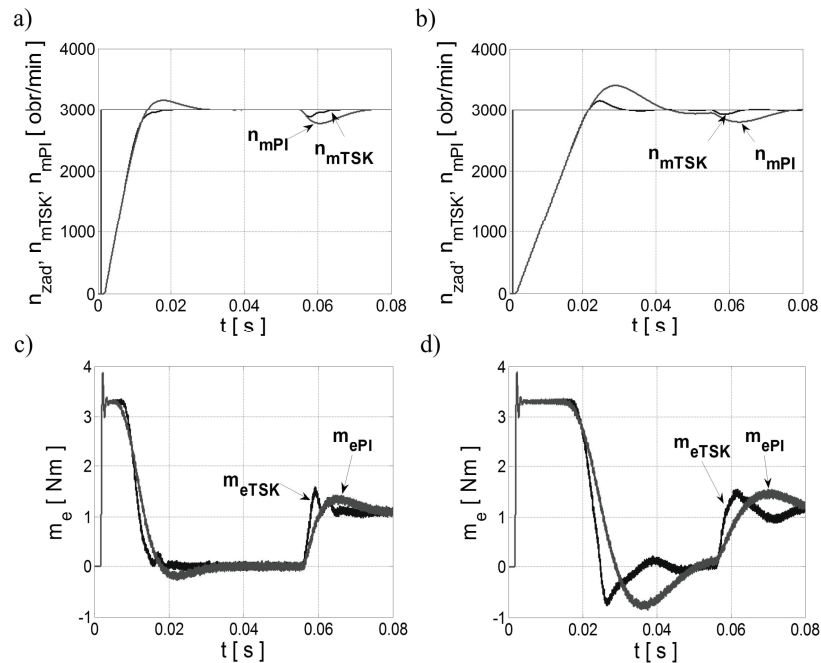
$$\tilde{K}_I = \sum_{i=1}^m k_3 a_{i0}. \quad (10)$$

4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

W rozdziale tym przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych. Przeprowadzono badania porównawcze w odniesieniu do działania układu z przyrostowym regulatorem PI.



Rys. 5. Przebiegi: prędkości zadanej $n_{zad} = 6000$ obr/min, prędkości osiągniętej dla $J = J_N$ (a), dla $J = 2J_N$ (b) przy zastosowaniu regulatora TSK n_{mTSK} oraz PI n_{mPI} , momentu elektromagnetycznego dla $J = J_N$ (c), dla $J = 2J_N$ (d) m_{eTSK} , m_{ePI}



Rys. 6. Przebiegi: prędkości zadanej $n_{zad} = 3000$ obr/min, prędkości osiągniętej dla $J = J_N$ (a), dla $J = 2J_N$ (b) przy zastosowaniu regulatora TSK n_{mTSK} oraz PI n_{mPI} , momentu elektromagnetycznego dla $J = J_N$ (c), dla $J = 2J_N$ (d) m_{eTSK} , m_{ePI}

Uzyskane wyniki przy zastosowaniu wartości prędkości zadanej $n_{zad} = 6000$ obr/min oraz zmiennym momencie bezwładności układu napędowego J przedstawiono na rysunku 5., natomiast dla wartości prędkości zadanej $n_{zad} = 3000$ obr/min i zmiennym momencie bezwładności wyniki zaprezentowano na rysunku 6. Z przebiegów wynika, że dzięki zastosowaniu regulatora rozmytego typu TSK osiągnięto znaczną poprawę właściwości dynamicznych układu napędowego. Widoczne jest znaczne zmniejszenie lub eliminacja przeregulowań przebiegów prędkości oraz szybsza reakcja układu w przebiegu momentu elektromagnetycznego.

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie rozmytego regulatora prędkości typu TSK w strukturze sterowania układu napędowego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych w znaczący sposób poprawiło jego właściwości dynamiczne. Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych i badań symulacyjnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- omawiane rozwiązanie stanowi alternatywę dla metody *gain scheduling*, zapewnia eliminację głównej wady tej metody jaką jest skokowe przełączanie nastaw regulatora,
- zastosowanie regulatora TSK o nastawach dobranych za pomocą algorytmu genetycznego umożliwia poprawę właściwości dynamicznych napędu zwłaszcza w przypadku układu o zmiennym momencie bezwładności,
- regulator TSK, w porównaniu do klasycznego regulatora Mamdaniego, może być przedstawiony jako zestaw miękko przełączalnych regulatorów klasycznych. Takie podejście jest atrakcyjne w praktyce przemysłowej.

W kolejnych pracach planuje się eksperymentalną weryfikację proponowanego rozwiązania.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu Adaptacyjne sterowanie rozmyte złożonego układu napędowego o zmiennych parametrach, 2012-2015, 2011/03/B/ST7/02517

LITERATURA

- [1] Cychowski M., Serkies P., Nalepa R., Szabat K., Model predictive speed and vibration control of dual-inertia PMSM Drives, Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium, Page(s): 1919- 1924, 2011.
- [2] Hangbo C., Dangui H., On composite position control of CNC system feeding PMSM based on position feedforward and SVPWM, Mechatronics and Automation (ICMA), International Conference on Mechatronics and Automation, Pages: 735-740, 2010.
- [3] Hongjia W., Dianguo X., Ming Y., Xianguo G., Minitype servo controller design for humanoid robot joint system, Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Pages: 1707-1711, 2011.
- [4] Panda S.K., Lim J.M.S., Dash P.K., Lock K.S., Gain-scheduled PI speed controller for PMSM drive, Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON 97. 23rd International Conference, Pages: 925-930, 1997.
- [5] Serkies P., Nalepa N., Szabat K., Cychowski M., Współpraca regulatora predykcyjnego z napędem PMSM i połączeniem sprzężystym, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 64, Wrocław, 2010.
- [6] Zawirski K., Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.

FUZZY TSK SPEED CONTROLLER FOR THE PMSM DRIVE SYSTEM

In this paper the speed control structure for the PMSM drive system with changeable inertia is considered. As the speed controller the TSK type fuzzy system is considered. The coefficients of the controller are selected with the help of genetic algorithm. The comparative study between the system with the classical PI controller and the system with fuzzy controller is presented. The obtained results shown the advantage of the control structure with the fuzzy controller.