

STEROWANIE ROZMYTE W NAPĘDZIE Z WIELOFAZOWYM PMSM

Streszczenie

W pracy zaprezentowano badania symulacyjne układu napędowego z 3-fazowym oraz 5-fazowym silnikiem PMSM i rozmytym regulatorem prędkości. Opracowano komputerowe modele napędów oraz przeprowadzono badania dla zadanych warunków pracy. Porównano uzyskane charakterystyki czasowe wybranych wielkości elektromechanicznych oraz podstawowe wskaźniki jakości regulacji.

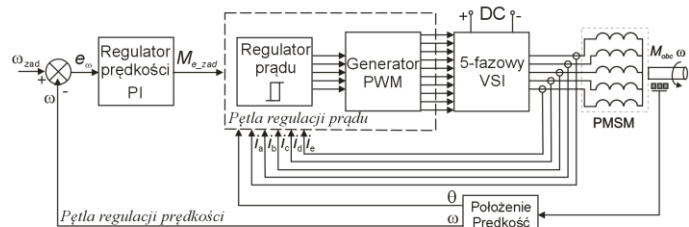
WSTĘP

W nowoczesnych układach napędowych coraz częściej znajdują zastosowanie silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi (BLDC, PMSM). Ich rosnąca popularność jest związana z doskonałymi właściwościami elektrycznymi i mechanicznymi, a także coraz większą przystępną ceną. Aby lepiej wykorzystać ich zalety oraz zapewnić większą niezawodność i odporność na zakłócenia, prowadzone są działania w poszukiwaniu odpowiednich konstrukcji, czy też skuteczniejszych metod sterowania. Dlatego też z zainteresowaniem spotykają się rozwiązania napędów z silnikami wielofazowymi i algorytmy sterowania wykorzystujące np. logikę rozmytą [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10].

W artykule przedstawiono badania symulacyjne napędów z trójfazowym i pięcioletowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi PMSM (ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*), w których zamiast klasycznego regulatora PI prędkości obrotowej, zastosowano regulator rozmyty FLC (ang. *Fuzzy Logic Controller*).

1. UKŁAD NAPĘDOWY Z PMSM

Na rysunku 1 zaprezentowano przykładowy schemat układu napędowego z pięcioletowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi. Ma on podobną strukturę jak napęd z silnikiem trójfazowym, jednakże w tym przypadku ze względu na większą liczbę faz, rozbudowany jest komutator elektroniczny (falownik napięcia) oraz układ sterowania. Napęd, zasilany ze źródła napięcia stałego, pracuje w podwójnej zamkniętej pętli sterowania. W pętli wewnętrznej realizowana jest regulacja prądu (regulator histerezowy), natomiast pętla zewnętrzna z regulatorem PI odpowiada za sterowanie prędkością [11,12].



Rys. 1. Schemat układu napędowego z pięcioletowym silnikiem PMSM

2. ROZMYTY REGULATOR PRĘDKOŚCI

W miejsce konwencjonalnego regulatora PI (rys. 2a), najczęściej stosowanego w układzie sterowania prędkością, można zaimplementować odpowiadający mu funkcjonalnie regulator o strukturze rozmytej. Na rysunku 2b zaprezentowano schemat

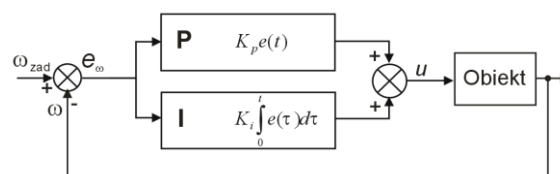
układu regulacji z regulatorem FLC typu PI. Równanie (1) opisuje zależność na wartość zmiany sterowania rozmytego regulatora prędkości $\Delta u(k)$, natomiast reguły sterowania dla regulatora typu Mamdaniego można ogólnie przedstawić jako wyrażenie (2) [13,14].

$$\Delta u(k) = K_{de} \Delta e_{\omega}(k) + K_e e_{\omega}(k) \quad (1)$$

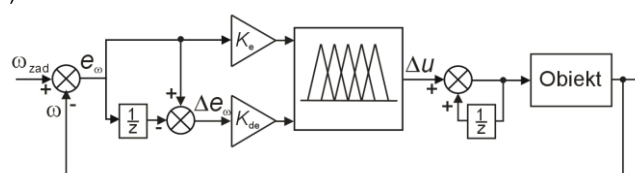
$$\text{IF } e \text{ is } A \text{ AND } \Delta e \text{ is } B \text{ THEN } \Delta u \text{ is } C \quad (2)$$

gdzie: Δu – zmiana sygnału sterującego, K_e , K_{de} – współczynniki skalujące, e_{ω} – uchyb prędkości kątowej, Δe_{ω} – zmiana uchybu prędkości kątowej, A , B , C – zbiory rozmyte.

a)



b)



Rys. 2. Ogólna struktura regulatorów: a) klasycznego PI, b) rozmytego typu PI

3. MODEL SYMULACYJNY

W programie MATLAB/Simulink z biblioteką SimPowerSystems przygotowano modele komputerowe napędów z trój- i pięcioletowym silnikiem PMSM. Wykorzystano tu opis matematyczny silników w układzie współrzędnych dq . Przykładowo dla silnika 3-fazowego ma on postać (3)-(4). Równania momentu elektromagnetycznego określają zależności (5) i (6). Model silnika pięcioletowego można przedstawić w podobny sposób, ale wówczas opis składa się z równań wyrażonych w dwóch układach ortogonalnych d_1q_1 i d_2q_2 [6,12,15,16].

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega \quad (3)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d i_d \omega + \psi_f \omega \quad (4)$$

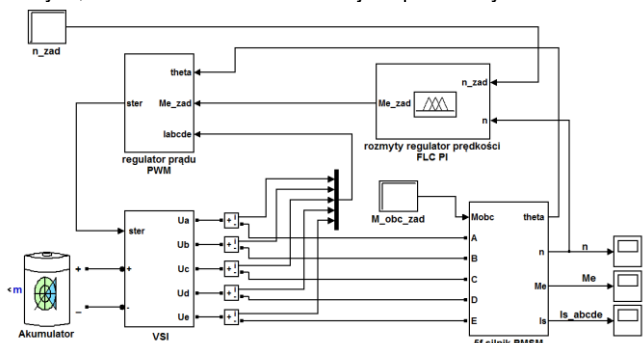
$$M_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{obc} \quad (5)$$

$$M_e = 1,5p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (6)$$

gdzie: u_d, u_q – składowe napięcia zasilania stojana w osi podłużnej i poprzecznej, i_d, i_q – składowe prądy stojana w osi d i q , L_d, L_q – indukcyjności stojana w osi podłużnej i poprzecznej, ψ_f – strumień wzbudzenia od magnesów trwałych skojarzony z uzwojeniem stojana, ω – prędkość kątowna wirnika, J – moment bezwładności układu napędowego, B – współczynnik tarcia lepkiego, M_{obc} – moment obciążenia, p – liczba par biegunów.

W zrealizowanych modelach konwencjonalny regulator prędkości PI zastąpiono rozmytym regulatorem PI. Regulator FLC zaprojektowano z wykorzystaniem przybornika Fuzzy Logic Toolbox. W strukturze rozmytej zastosowano zbiory rozmyte zmiennych wejściowych i wyjściowej w postaci trzech trapezoidalnych funkcji przynależności.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat symulacyjny układu napędowego z 5-fazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, natomiast w tabeli 1 ważniejsze parametry modelu.



Rys. 3. Model symulacyjny układu napędowego z pięciofazowym silnikiem PMSM i rozmytym regulatorem prędkości

Tab. 1. Podstawowe dane symulacyjne silnika pięciofazowego

Parametr	Wartość
Napięcie znamionowe silnika	145 V
Moc silnika	6,5 kW
Prędkość obrotowa	1500 obr/min
Moment znamionowy	45 Nm
Rezystancja stojana	0,14 Ω
Indukcyjność	3,7 mH
Liczba par biegunów	4
Moment bezwładności	2,3·10 ⁻³ kg·m ²

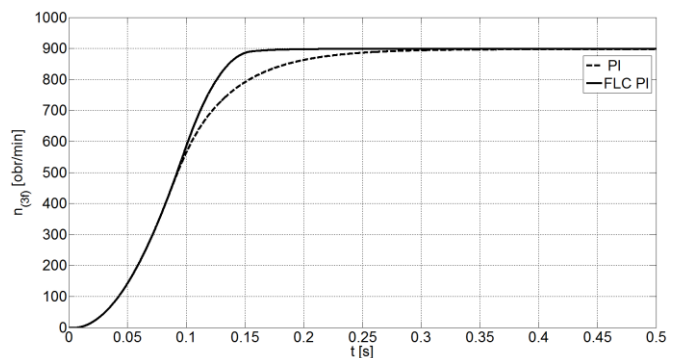
4. WYNIKI BADNAŃ

Badania symulacyjne przeprowadzono dla napędów elektrycznych z trój- i pięciofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi. Obserwowano charakterystyki czasowe prędkości obrotowej, prądów fazowych oraz momentu elektromagnetycznego dla modeli z różnymi regulatorami prędkości i zmieniających się warunków pracy układów. Na rysunkach 4÷6 zaprezentowano przebiegi uzyskane dla układu z 3-fazowym silnikiem PMSM z konwencjonalnym i rozmytym regulatorem prędkości typu PI dla zadanej prędkości obrotowej 900 obr/min oraz momentu obciążenia 10 Nm. Wykre-

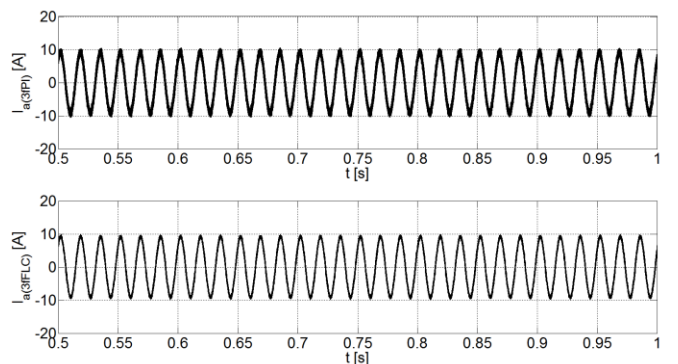
sy prędkości obrotowej przedstawiają fazę rozruchu układu, natomiast charakterystyki jednego z prądów fazowych oraz momentu elektromagnetycznego demonstrują przebiegi tych wielkości w stanie ustalonym. Podobny zestaw przebiegów czasowych otrzymanych dla napędu z pięciofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi z dwoma typami regulatorów prędkości oraz identycznych warunków zadanych zamieszczono na rysunkach 7÷9. Skuteczność sterowania oceniono na podstawie wartości uzyskanych wskaźników jakości regulacji prędkości w postaci czasu regulacji i przeregulowania. Otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Wskaźniki jakości regulacji

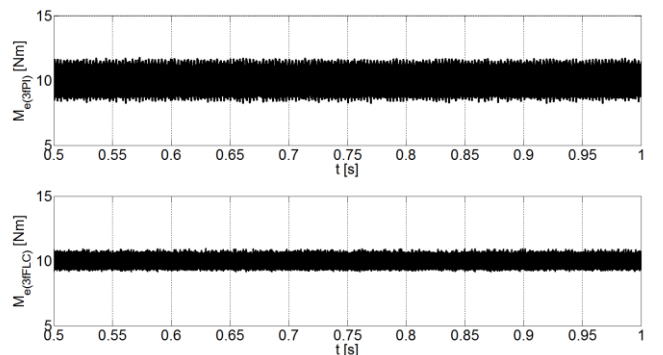
Parametr	Napęd 3-fazowy		Napęd 5-fazowy	
	PI	FLC PI	PI	FLC PI
Czas regulacji [s]	0,31	0,18	0,26	0,2
Przeregulowanie [%]	-	-	0,64	-



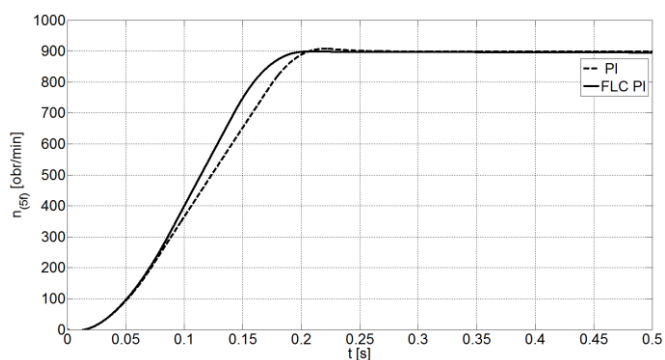
Rys. 4. Charakterystyki czasowe prędkości obrotowej napędu trójfazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI w fazie rozruchu



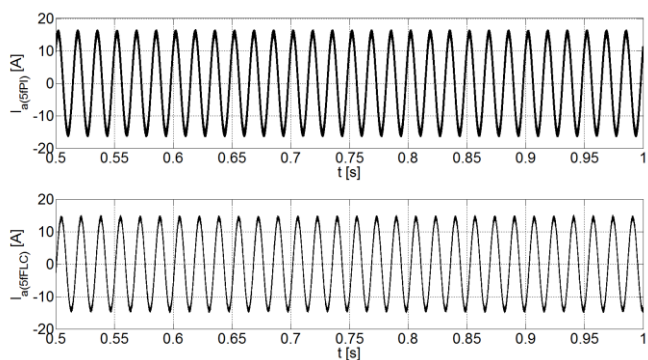
Rys. 5. Charakterystyki czasowe prądu fazowego I_a napędu trójfazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI w stanie ustalonym



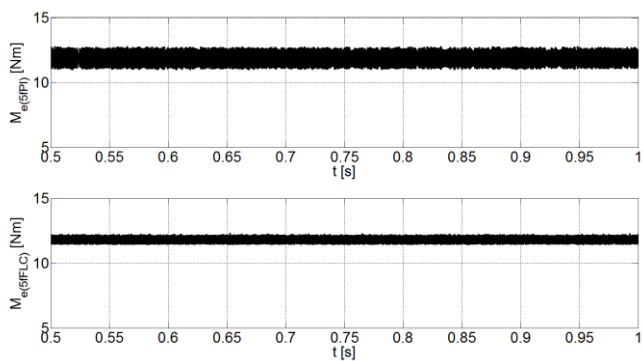
Rys. 6. Charakterystyki czasowe momentu elektromagnetycznego napędu trójfazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI w stanie ustalonym



Rys. 7. Charakterystyki czasowe prędkości obrotowej napędu pięciofazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI w fazie rozruchu



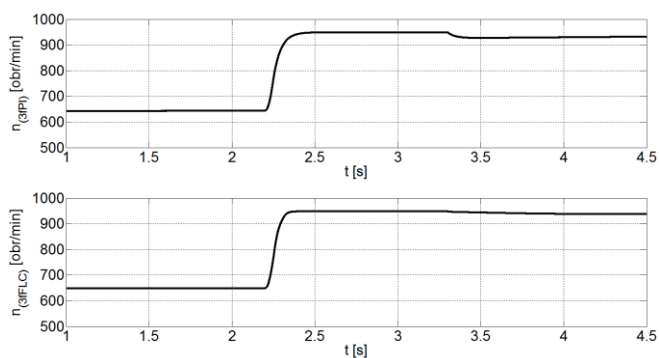
Rys. 8. Charakterystyki czasowe prądu fazowego I_a napędu pięciofazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI w stanie ustalonym



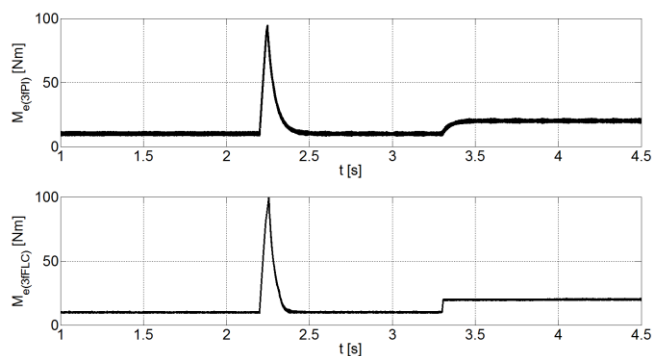
Rys. 9. Charakterystyki czasowe momentu elektromagnetycznego napędu pięciofazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI w stanie ustalonym

Ponadto wykonano symulacje dla zmiany prędkości zadanej z 650 obr/min na 950 obr/min ($t=2,2$ s) oraz wzrostu momentu obciążenia z 10 Nm do 20 Nm ($t=3,3$ s). Uzyskane przebiegi prędkości obrotowej oraz momentu elektromagnetycznego dla silnika trójfazowego i pięciofazowego zademonstrowano odpowiednio na rysunkach 10÷11 oraz 12÷13.

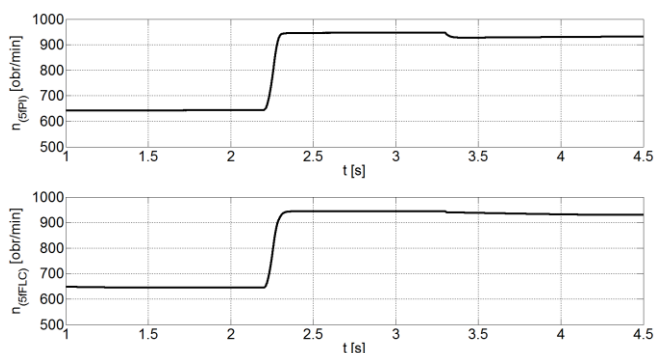
Na podstawie otrzymanych charakterystyk można zauważyć, że zastosowanie regulatora rozmytego w pętli sterowania prędkością w układach napędowych z 3-fazowym oraz 5-fazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi wpływa na skrócenie czasu regulacji prędkości obrotowej, jak również znaczące zmniejszenie amplitudy i pulsacji momentu elektromagnetycznego.



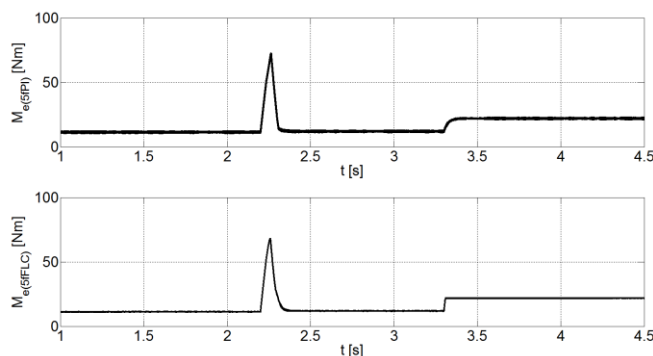
Rys. 10. Charakterystyki czasowe prędkości obrotowej napędu trójfazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI przy zmianie prędkości zadanej oraz momentu obciążenia



Rys. 11. Charakterystyki czasowe momentu elektromagnetycznego napędu trójfazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI przy zmianie prędkości zadanej oraz momentu obciążenia



Rys. 12. Charakterystyki czasowe prędkości obrotowej napędu pięciofazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI przy zmianie prędkości zadanej oraz momentu obciążenia



Rys. 13. Charakterystyki czasowe momentu elektromagnetycznego napędu pięciofazowego PMSM z regulatorem prędkości PI oraz FLC PI przy zmianie prędkości zadanej oraz momentu obciążenia

PODSUMOWANIE

W pracy zamodelowano dwa układy napędowe z trój- i pięciofazowym silnikiem PMSM. W ramach badań symulacyjnych obserwowano podstawowe wielkości elektromechaniczne napędów, w których konwencjonalny regulator prędkości PI zastąpiono regulatorem o strukturze rozmytej i działaniu proporcjonalno-całkującym. Uzyskane wyniki wskazują na korzystny wpływ regulatora FLC, zarówno na jakość regulacji prędkości w układach, a także na przebieg momentu elektromagnetycznego.

BIBLIOGRAFIA

1. Knypiński Ł., Nowak L., *Algorytm optymalizacji magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej 2012, Nr 66/32.
2. Levi E., *Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2008, Vol. 55, No. 5.
3. Li Y., Zhao J., Chen Z., Liu X., *Investigation of a Five-Phase Dual-Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor Used for Electric Vehicles*. Energies 2014, No. 7.
4. Meinguet F., Nguyen N.-K., Sandulescu P., Kestelyn X., Semail E., *Fault-Tolerant Operation of an Open-End Winding Five-Phase PMSM Drive with Inverter*. IECON 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 2013.
5. Olesiak K., *An algorithm for tuning a fuzzy controller in a drive control system of a permanent magnet synchronous motor*. Przegląd Elektrotechniczny 2014, Vol. 90, No.12.
6. Parsa L., Toliyat H., *Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives*. IEEE Transactions on Industry Applications 2005, Vol.41.
7. Popena A., *A concept of control of PMSM angular velocity*. Przegląd Elektrotechniczny 2013, Vol. 89, No. 12.
8. Ruba M., Surdu F., Szabo L., *Study of a Nine-Phase Fault Tolerant Permanent Magnet Starter-Alternator*. Journal of Computer Science and Control Systems 2011, Vol.4, No.1.
9. Stumberger B., Hadziselimovic M., Hren G., *Projekt silnika synchronicznego z magnesami trwałymi zagłębionymi w wirniku o uzwojeniu ułamkowożłobkowym skupionym*. Przegląd Elektrotechniczny 2013, Vol. 89, No. 2b.
10. Zalas P., Antal L., *Silnik PMSM małej mocy przeznaczony do rozruchu synchronicznego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96).
11. Chau K.T., Chan C.C., Liu C., *Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles*. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2008, Vol. 55, No. 6.
12. Ahmad M., *High Performance AC Drives: Modelling Analysis and Control*. Springer 2010.
13. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*. WNT, Warszawa 1996.
14. Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
15. Glinka T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
16. Krishnan R., *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press 2009.

FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR MULTIPHASE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE

Abstract

The paper describes simulation studies of fuzzy speed controllers for three-phase and five-phase permanent magnet synchronous motor drives. The computer models of propulsion systems have been developed. Then the results of simulation tests are presented. The time curves of the stator phase current, the electromechanical moment, the rotational speed and basic indicators of the quality of regulation are compared.

Autor:

dr inż. **Beata Jakubiec** – Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa,