

# Napęd bezszczotkowego silnika prądu stałego z rozmytym regulatorem prędkości

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono badania symulacyjne napędu z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego, w którym układ sterowania wykorzystuje logikę rozmytą. Głównym celem było opracowanie regulatora prędkości obrotowej silnika w postaci regulatora rozmytego. Ma on zapewnić lepsze właściwości regulacyjne. Punktem odniesienia były wyniki jakości regulacji prędkości obrotowej otrzymane przy zastosowaniu klasycznego regulatora proporcjonalno-całkującego.

**Abstract.** This paper presents the simulation of brushless DC motor drive, wherein the control system uses fuzzy logic. The main objective was to develop a speed controller in the form of fuzzy controller. This solution aims to provide better control properties. The reference point were the results of the speed control obtained using the conventional proportional-integral controller. (**Fuzzy logic speed controller for brushless DC motor drive**).

**Słowa kluczowe:** regulator prędkości, logika rozmyta, napęd elektryczny, silnik bezszczotkowy prądu stałego (BLDC)

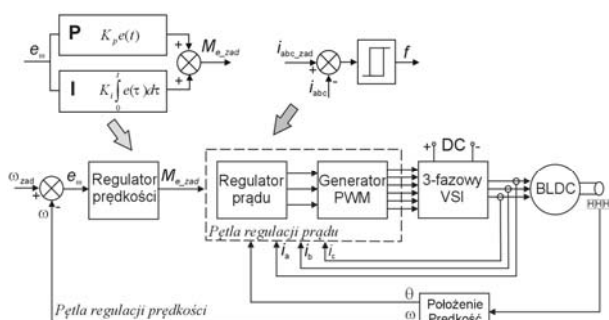
**Keywords:** speed controller, fuzzy logic, motor drive, brushless DC motor (BLDC)

doi:10.12915/pe.2014.12.52

## Wstęp

Bezczotkowe silniki prądu stałego BLDC (ang. *Brushless DC Motor*) dzięki swoim właściwościom mechanicznym i elektrycznym są coraz częściej stosowane. Bardzo chętnie wykorzystywane są w układach napędowych stacjonarnych oraz przenośnych urządzeń przemysłowych, jak i powszechnego użytku, zwłaszcza małej i średniej mocy. Rosnąca popularność tego typu silników znajduje swoje odzwierciedlenie w literaturze naukowej i branżowej. Prezentowane publikacje dotyczą m. in. możliwości zastosowań BLDC, projektowania nowych konstrukcji silników w celu poprawy parametrów elektromechanicznych oraz sposobów ich zasilania [1,2,3,4,5,6,7,8,9]. Ważną część badań, podobnie jak dla innych maszyn elektrycznych, stanowią poszukiwania efektywniejszych strategii sterowania nimi oraz doboru algorytmów regulacji. Jest to zagadnienie istotne z punktu widzenia procesów wymagających dokładnego sterowania prędkością czy też pozycją silnika, zwłaszcza w dynamicznych warunkach pracy lub warunkach zakłóceń elektromagnetycznych [6,8,10,11,12].

W artykule przedstawiono badania symulacyjne napędu z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego, w którym w układzie sterowania zastosowano regulator rozmyty (ang. *Fuzzy Logic Controller*) [13,14,15]. Głównym celem było opracowanie regulatora prędkości obrotowej silnika oraz ocena skuteczności jego działania. Zaproponowane rozwiązanie ma zapewnić lepsze właściwości regulacyjne niż najczęściej stosowany klasyczny regulator typu PI, i jednocześnie charakteryzować się jak najprostszą postacią, w przypadku późniejszej implementacji w układzie rzeczywistym.



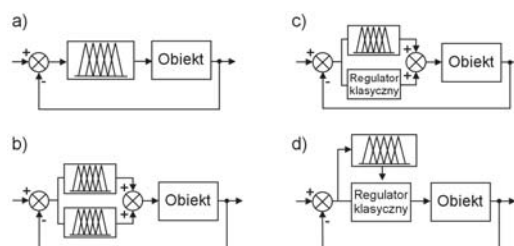
Rys.1. Przykład układu sterowania napędem z silnikiem BLDC i pomiarem położenia wału silnika

## Budowa układu napędowego

Podstawowym elementem modelowanego układu napędowego jest trójfazowy silnik bezszczotkowy prądu stałego z magnesami trwałymi. Czujnikami położenia wirnika są hallotrony. Układ pracuje w podwójnej zamkniętej pętli sterowania, gdzie pętla wewnętrzna odpowiada za regulację prądu, natomiast pętla zewnętrzna realizuje sterowanie prędkością kątową. Komutatorem elektronicznym jest falownik napięcia z modulacją szerokości impulsów zasilany z baterii akumulatorów. Przykładowy schemat klasycznego układu sterowania silnikiem BLDC zamieszczono na rysunku 1.

## Regulatory rozmyte

W układach sterowania są implementowane różnorodne struktury regulatorów rozmytych. Regulatory FLC mogą funkcjonalnie odpowiadać podstawowym regulatorom klasycznym P, PD, PI, PID. Regulatory rozmyte o bardziej złożonej budowie współpracują np. z regulatorami konwencjonalnymi [13,14]. Przykłady konfiguracji regulatorów rozmytych przedstawiono na rysunkach 2a÷2d.



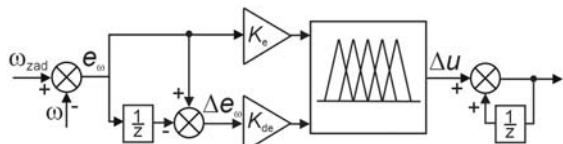
Rys.2. Typowe struktury regulatorów rozmytych: a,b) podstawowych, c,d) złożonych; opr. na podst. [14]

Równanie (1) przedstawia zależność na wartość zmiany sterowania rozmytego regulatora prędkości  $\Delta u(k)$  równoważną opisowi (2) konwencjonalnego regulatora proporcjonalno-całkującego [13]. Strukturę regulatora FLC typu PI, dla którego reguły przyjmują postać (3), pokazano na rysunku 3.

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

$$(2) \quad u(t) = K_p e_{\omega}(t) + K_i \int_0^t e_{\omega}(\tau) d\tau$$

gdzie:  $\Delta u$  – zmiana sygnału sterującego,  $K_e$ ,  $K_{de}$  – współczynniki skalujące,  $e_{\omega}$  – uchyb prędkości kątowej,  $\Delta e_{\omega}$  – zmiana uchybu prędkości kątowej,  $K_p$  – współczynnik proporcjonalności,  $K_i$  – współczynnik całkowania.

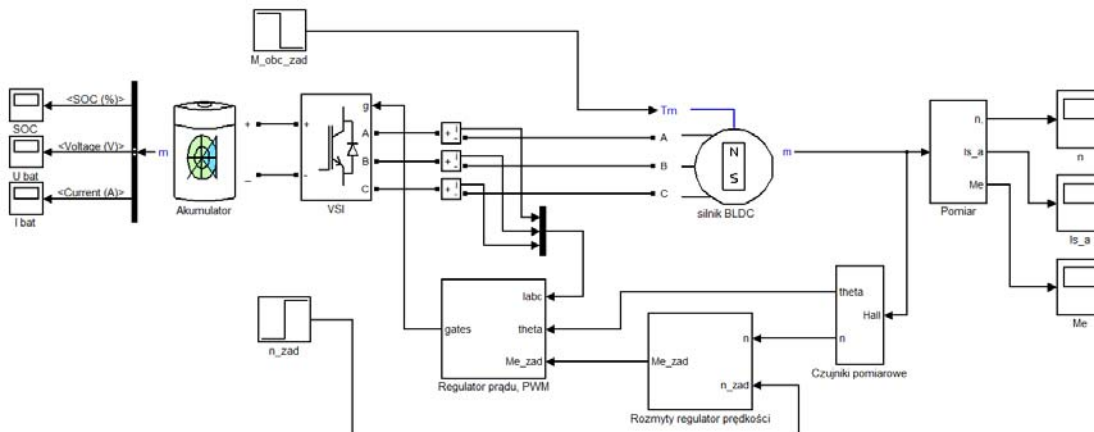


Rys.3. Struktura rozmytego regulatora PI; opr. na podst. [14]

(3) IF  $e$  is  $A$  AND  $\Delta e$  is  $B$  THEN  $\Delta u$  is  $C$   
gdzie:  $A, B, C$  –zbiory rozmyte.

### Model komputerowy

Model komputerowy zrealizowano w programie Matlab/Simulink z biblioteką SimPowerSystems, a do zaprojektowania regulatora rozmytego wykorzystano przybornik Fuzzy Logic Toolbox. Schemat układu napędowego zaprezentowano na rysunku 4, a w tabeli 1



Rys.4. Schemat modelu symulacyjnego

Tabela 2. Zestawienie parametrów regulatorów prędkości PI, FLCPI1 i FLCPI2 dla fazy rozruchowej  $n_{zad}=2500$  obr/min i  $M_{obc}=1Nm$

Parametr	Regulator prędkości		
	PI	FLCPI1	FLCPI2
Czas regulacji [s]	0,495	0,135	0,115
Przeregulowanie [%]	-	0,33	0,23
ITAE	12,76	2,100	2,028
Liczba funkcji przynależności dla wejścia $e$	-	3	3
Liczba funkcji przynależności dla wejścia $\Delta e$	-	3	3
Liczba funkcji przynależności dla wyjścia $\Delta u$	-	3	3

Tabela 3. Zestawienie parametrów regulatorów prędkości FLCPI3, FLCPI4 i FLCPI5 dla fazy rozruchowej  $n_{zad}=2500$  obr/min i  $M_{obc}=1Nm$

Parametr	Regulator prędkości		
	FLCPI3	FLCPI4	FLCPI5
Czas regulacji [s]	0,100	0,085	0,095
Przeregulowanie [%]	-	0,06	0,12
ITAE	2,181	2,138	2,174
Liczba funkcji przynależności dla wejścia $e$	5	5	7
Liczba funkcji przynależności dla wejścia $\Delta e$	5	5	7
Liczba funkcji przynależności dla wyjścia $\Delta u$	5	5	9

### Wyniki symulacji

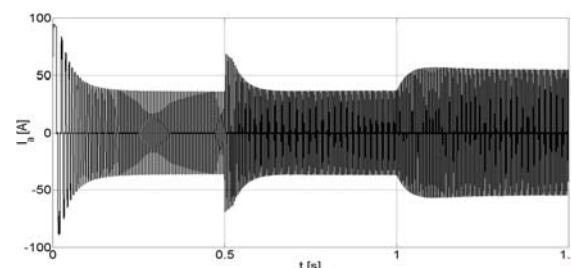
W ramach badań dokonywano zmian wybranych parametrów regulatora rozmytego (m.in. liczba i kształt funkcji przynależności) oraz obserwowano podstawowe wielkości elektromechaniczne silnika i wartości

ważniejsze parametry symulacyjne. W modelu regulatorem prądu jest regulator histerezyowy, natomiast badany regulator prędkości to rozmyty regulator PI typu Mamdaniego (rys. 3).

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne silnika

Parametr	Wartość
Napięcie znamionowe silnika	48 V DC
Moc znamionowa silnika	4 kW
Moment znamionowy	3,5 Nm
Rezystancja fazy stojana	0,23 $\Omega$
Indukcyjność fazy stojana	0,14 mH
Liczba par biegunów	4
Stała napięciowa	5,67 V/1000 obr/min
Moment bezwładności	$4,12 \cdot 10^{-4}$ kgm <sup>2</sup>

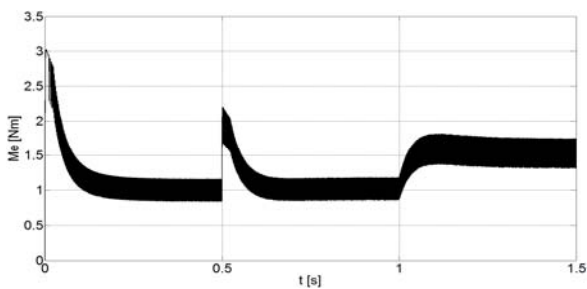
uzyskiwanych wskaźników jakości regulacji dla zmieniających się warunków pracy układu napędowego.



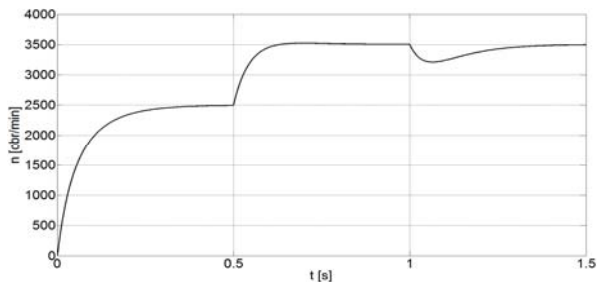
Rys.5. Charakterystyka czasowa prądu fazowego dla pracy napędu z konwencjonalnym regulatorem prędkości PI

Na rysunkach 5÷10 zostały przedstawione przykładowe przebiegi prądu fazowego, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej silnika dla rozruchu układu przy zadanej prędkości 2500 obr/min i stałego momentu obciążenia 1 Nm oraz zmiany prędkości do 3500 obr/min oraz wzrostu momentu obciążenia do wartości 1,5 Nm dla regulatorów prędkości PI oraz FLCPI1 i FLCPI4. W tabelach 2 i 3 zaprezentowano wartości wskaźników jakości regulacji dla wybranych regulatorów (konwencjonalnego PI oraz rozmytych FLCPI1÷FLCPI5) dla fazy rozruchowej  $t=0÷0.5s$ . Sprawdzono również pracę układu z rozmytymi regulatorami prędkości dla zbiorów rozmytych zmiennych wejściowych i wyjściowej w postaci 3 i 5 funkcji przynależności gaussa oraz trapezoidalnych. Jednakże w tych przypadkach uzyskane wyniki były niezadawalające. Ponadto, w kolejnym kroku, przestrzeni rozmytej zmiennych lingwistycznych na 7 wartości lingwistycznych nie przyniosło znaczącej poprawy parametrów regulacji, wydłużając czas obliczeń w stosunku do regulatora FLCPI1 ponad dwukrot-

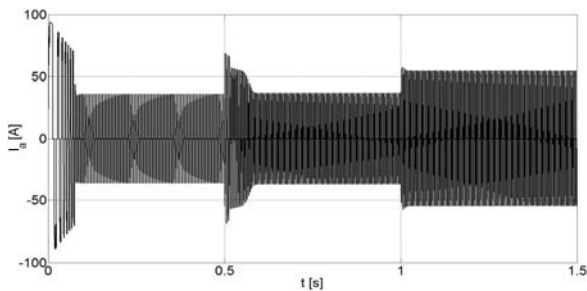
nie, a do FLCPI4 o ok. 50%. Niewielki wzrost wskaźnika ITAE dla regulatorów FLCPI3 i FLCPI4 wynika ze zwiększenia się amplitudy tętnień prędkości obrotowej do 1 obrotu.



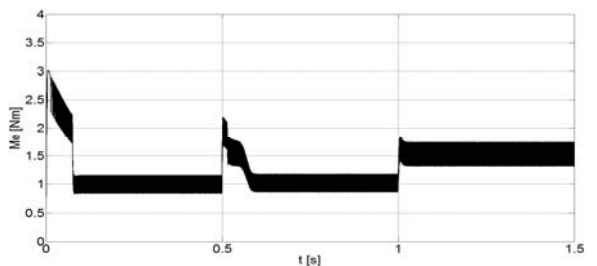
Rys.6. Charakterystyka czasowa momentu elektromagnetycznego dla pracy napędu z konwencjonalnym regulatorem prędkości PI



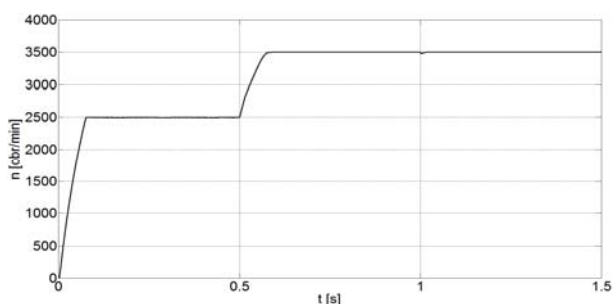
Rys.7. Charakterystyka czasowa prędkości obrotowej dla pracy napędu z konwencjonalnym regulatorem prędkości PI



Rys.8. Charakterystyka czasowa prądu fazowego dla pracy napędu z rozmytym regulatorem prędkości FLCPI4



Rys.9. Charakterystyka czasowa momentu elektromagnetycznego dla pracy napędu z rozmytym regulatorem prędkości FLCPI4



Rys.10. Charakterystyka czasowa prędkości obrotowej dla pracy napędu z rozmytym regulatorem prędkości FLCPI4

## Podsumowanie

Opracowany model komputerowy oraz wykonane symulacje potwierdzają poprawne działanie rozmytego regulatora prędkości w układzie napędowym z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego. Poza uzyskanymi lepszymi parametrami jakości regulacji w stosunku do regulatora klasycznego, również w warunkach zakłócenia, zaletą tego typu regulatora jest to, że do jego zaprojektowania nie jest konieczna znajomość dokładnego opisu matematycznego systemu. Badania wskazują, że proces regulacji prędkości obrotowej w układzie napędowym najkorzystniej przebiega przy zastosowaniu regulatora FLCPI4, a nadmierne rozbudowywanie struktury regulatora jest niecelowe. Nie uzyskuje się już spektakularnej poprawy wskaźników jakości regulacji, a w przypadku próby implementacji sprzętowej, wpłynie na pracę układu rozmytego (wydłuży czas obliczeń lub będzie wymagać większych mocy obliczeniowych).

## LITERATURA

- [1] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J., Projekt silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną przeznaczonego do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego, *Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 100 (2013), cz. I, 9-14.
- [2] Dukalski P., Silnik BLDC z magnesami trwałymi jako napęd wózka inwalidzkiego, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 86 (2010), 267-272.
- [5] Goryca Z., Metody sterowania silników BLDC, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* Nr 66, *Studia i Materiały*, 32 (2012), 32-47.
- [3] Kolano K., Napęd drzwi kabinowych dźwigu osobowego z wysokowydajnym silnikiem BLDC, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012) nr 11b, 348-349.
- [6] Krishnan R., Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, *CRC Press*, (2009).
- [4] Li Z., Ruan Y., Autonomous Inspection Robot for Power Transmission Lines Maintenance While Operating on the Overhead Ground Wires, *Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 7, No. 4 (2010) 107, 111-116.
- [7] Popenda A., A control strategy of a BLDC motor, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 188-191.
- [8] Xia C-L., Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls, *John Wiley&Sons*, (2012).
- [9] Yedamale P., AN885 Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, *Microchip Technology Inc.*, (2003).
- [10] Olesiak K.: Application of the Fuzzy Controller in the Speed Control System of an Induction Motor. *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 336-339.
- [11] Prauzner T., Zakłócenia elektromagnetyczne w elektronicznych systemach alarmowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2012), nr 12, 205-208.
- [12] Ptak P., Borowik L., Analiza wpływu częstotliwości sygnału na czułość czujnika indukcyjnego do pomiarów grubości powłok ochronnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013) nr 12, 269-271.
- [13] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., Wprowadzenie do sterowania rozmytego, Warszawa, *WNT* (1996).
- [14] Kovacic Z., Bogdan S., Fuzzy Controller Design. Theory and Applications, *Taylor&Francis*, (2006).
- [15] Piegat A., Modelowanie i sterowanie rozmyte, Warszawa, *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, (2003).

**Autor:** dr inż. Beata Jakubiec, Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Zakład Ergoelektroniki, Robotyki i Jakości Energii, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [beja@el.pcz.czest.pl](mailto:beja@el.pcz.czest.pl)