

Rafał Piotuch, Ryszard Palka

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

PORÓWNANIE WYBRANYCH REGULATORÓW PRĄDU W UKŁADZIE STEROWANIA SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM ZE WZBUDZENIEM OD MAGNESÓW TRWAŁYCH

COMPARISON OF CURRENT CONTROLLERS IN THE CONTROL SYSTEM OF THE PM SYNCHRONOUS MOTOR

Abstract: AC motor current controllers are much more complex than those used in DC drives, because not only does the value of the current needs to be controlled, but also the frequency. In addition, in static states, phase currents in stator windings of AC machines are quasi-sinusoidal, which makes the traditional controllers used in DC drivers (PI controllers) not the best solution (as they do not provide the best shape of the current). Complicated current controller algorithms can lead to better work in both static and dynamic states (which of course should be the main purpose of a control system), but can also lead to a decrease in total losses in both the inverter and the AC motor. The aim of this article is to compare several types of current controllers: PI, hysteresis with constant sampling time, and predictive controller, in static and dynamic states, considering numerous criteria, as well as the losses and the electromagnetic torque ripple in the PM Synchronous Motor control system.

1. Wstęp

W układach napędowych z silnikami synchronicznymi ze wzbudzeniem od magnesów trwałych (PMSM ang. Permanent Magnet Synchronous Motor) przekształtnik pełni rolę wzmacniacza mocy, który zamienia sygnały sterujące wygenerowane w układzie sterowania na sygnały o mocy dostosowanej do zasilania konkretnego silnika. Wektorowe układy sterowania silników PMSM z orientacją względem wektora pola (Field Oriented Control – FOC) wypracowują odpowiednie sygnały sterujące, które wymuszają taki prąd w maszynie, aby spełniony był nadrzędny cel regulacji. Wykorzystanie prądów, jako wielkości regulowanych daje możliwość sterowania silnikiem PMSM w sposób zbliżony do sterowania obcowzbudnym silnikiem prądu stałego, gdzie istnieje możliwość niezależnego kształtowania zarówno strumienia jak i momentu elektromagnetycznego (przy danym strumieniu) [3]. O ile w torze regulacji prędkości bardzo często wykorzystywane są regulatory PI [4,12], to w torze prądowym stosuje się różne inne regulatory np. histerezowe, dwupołożeniowe z delta-modulacją, PI(D), a także regulatory oparte o bardziej zaawansowane algorytmy np. sliding-mode [9], predykcyjne, a także neuronowe i regulatory oparte o logikę rozmytą [10].

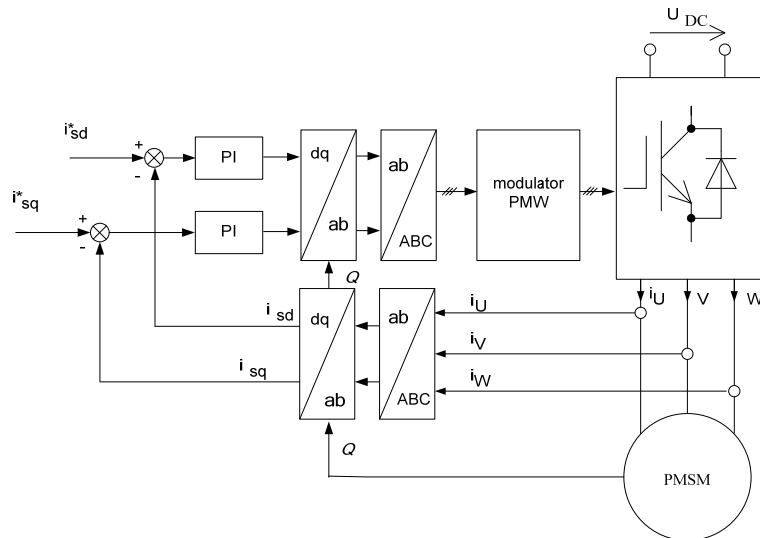
Celem artykułu jest porównanie właściwości statycznych i dynamicznych oraz pulsacji prądu i momentu elektromagnetycznego wybranych regulatorów prądu silników PMSM.

2. Wybrane regulatory prądu

Spśród wielu regulatorów prądu, jakie obecnie są implementowane w układach sterowania napędów z silnikami PMSM wybrano do analizy trzy struktury: regulator PI, regulator histerezowy (ze stałym okresem próbkowania) oraz regulator predykcyjny (ang. PCC – Predictive Current Controller).

2.1. Regulator proporcjonalno-całkujący (PI)

Na przestrzeni kilku ostatnich dekad opracowano bardzo wiele rodzajów regulatorów PI, jednakże istotną i charakterystyczną cechą dla zastosowań w napędzie, jaką posiada regulator PI jest to, iż może on być implementowany w różnych układach współrzędnych. Każda z implementacji ma swoje wady i zalety, jednakże strukturą, która ma cechy najbardziej pożądane jest struktura wykorzystująca po jednym regulatorze PI w osiach d oraz q . Jest to związane z tym, że zadane prądy w tych osiach mają charakter quasi-statyczny; w przypadku naturalnego, stacjonarnego układu współrzędnych a,b,c występują trzy regulatory, a regulowane prądy mają charakter quasi-sinusoidalny. Może to prowadzić do dużych błędów regulacji [3].



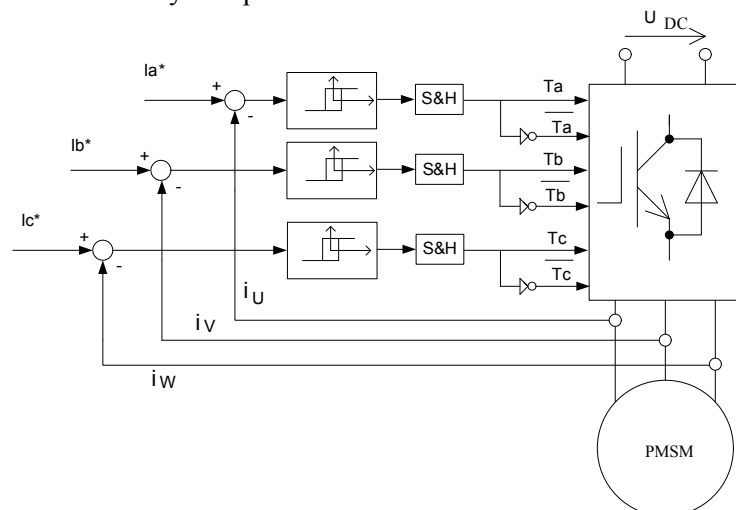
Rys.1. Regulator PI w osi d oraz q

2.2. Regulator histerezowy ze stałym okresem próbkowania

Regulator histerezowy należy do grupy regulatorów nieliniowych, które w najprostszej konfiguracji, działają na podstawie detekcji znaku uchybu prądu. Zmiana znaku uchybu prądu np. w danej fazie jest wychwycona przez układ sterowania, który wymusza pożądaną zmianę prądu poprzez odpowiednią zmianę stanu łączników energoelektronicznych. W regulatorze nieliniowym zbudowanym z wykorzystaniem idealnego komparatora warunek odtwarzania prądu zadanego z zerowym lub bliskim zeru uchybem prowadzi

do wzrostu częstotliwości modulacji do nieskończoności, a w praktyce do skrajnych wartości, gdzie łączniki energoelektroniczne pracują w warunkach dynamicznych i straty w nich wydzielane prowadzą do zniszczenia struktury półprzewodnikowej [3]. W związku z tym proponuje się wprowadzenie pętli histerezy w komparatorze.

Strukturą, jaka została wybrana do analizy przez autorów jest struktura oparta o komparator z pętlą histerezy, którego stan jest dodatkowo sprawdzany, co okres próbkowania (regulator histerezowy zmodyfikowany).



Rys 2. Regulator histerezowy ze stałym okresem próbkowania

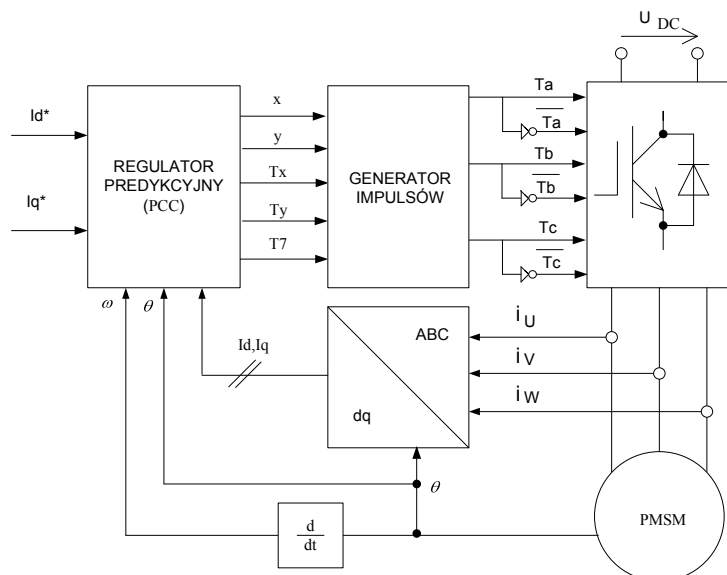
2.3. Regulator predykcyjny

Regulatory predykcyjne zadają wektor napięcia odtwarzany przez modulator PWM na

podstawie liniowych zależności opisujących model przekształtnik-silnik. Predykcja dotyczy przewidywania wartości napięcia, jakie należy kształtować na wyjściu przekształtnika, aby

w następnym kroku próbkowania uzyskać przewidywany wektor prądu, lub przynajmniej zbliżyć się do niego. W tym celu konieczne jest wyznaczenie przewidywanego przyrostu prądu w następnym kroku próbkowania. Przewidywanie to zazwyczaj odbywa się zgodnie z zasadami liniowej ekstrapolacji na podstawie kilku wcześniejszych próbek (lub też

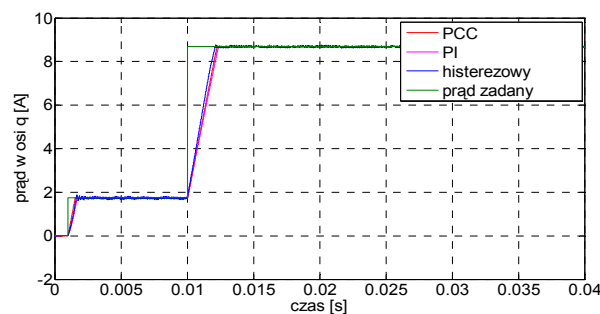
jednej próbki) [3]. Liniowe regulatory predykcyjne, ze względu na dużą liczbę operacji matematycznych, realizowane są powszechnie w układach mikroprocesorowych, najczęściej w procesorach sygnałowych dedykowanych do napędu elektrycznego, ze względu na ich bardzo duże moce obliczeniowe oraz odpowiednie interfejsy.



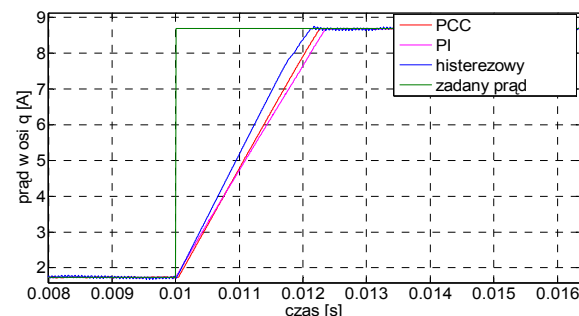
Rys. 3. Regulator predykcyjny

3. Wyniki badań symulacyjnych

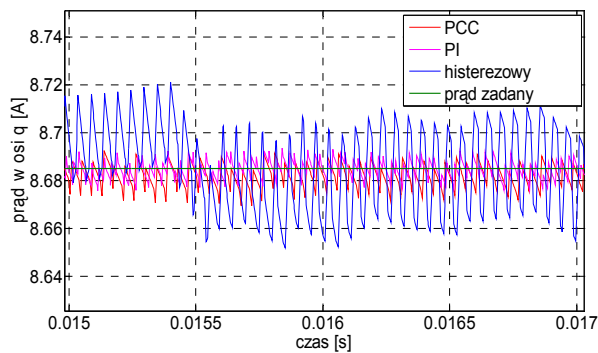
Badania symulacyjne wykonano z wykorzystaniem środowiska Matlab/Simulink oraz Toolboxa SimPowerSystems. Symulacje wykonano dla silnika 8LSA5 firmy Bernecker&Reiner o mocy znamionowej 3.3 kW, prędkości znamionowej 3000 obr/min. i parametrach podanych w [5]. Na przedstawionych wykresach pokazano wyniki badań, jakie zostały wykonane dla omówionych wcześniej regulatorów. Badanie regulatorów polegało na wymuszeniu zadanego prądu w osi q proporcjonalnego do momentu obciążenia. W chwili 0.01 s następuje skokowa zmiana momentu obciążenia od 2 do 10 Nm. Zadana wartość prądu w osi d wynosiła 0 A. Na Rys. 5, 6a, 6b, 7 przedstawiono przebiegi prądów w stanie statycznym oraz dynamicznym w układzie otwartym, bez wykorzystania pętli prędkości.



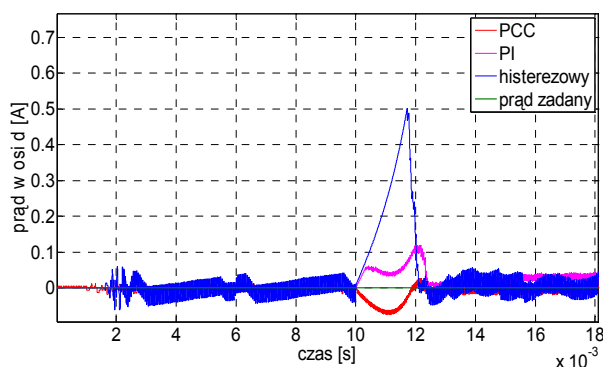
Rys. 5. Przebieg prądu w osi q przy zadanym profilu obciążenia (pętla otwarta)



Rys. 6a. Narastanie prądu w osi q przy skokowej zmianie momentu obciążenia (pętla otwarta)

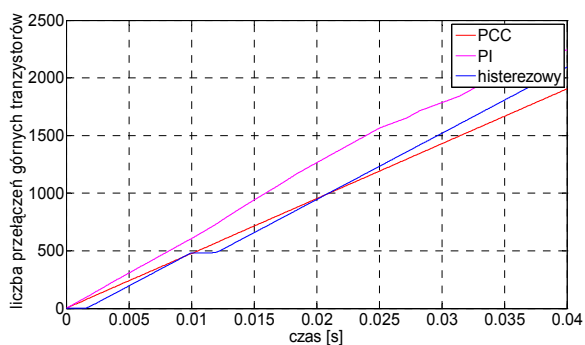


Rys. 6b. Przebiegi prądu w osi q przy zadanym profilu obciążenia (pętla otwarta)



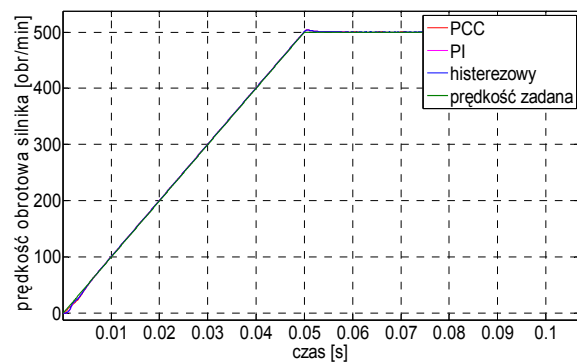
Rys. 7. Przebiegi prądu w osi d przy zadanym profilu obciążenia (pętla otwarta)

Rysunek 8 pokazuje w liczbę przełączeń w funkcji czasu dla górnych tranzystorów falownika. Dodatkowo została załączona zewnętrzna pętla prędkości.



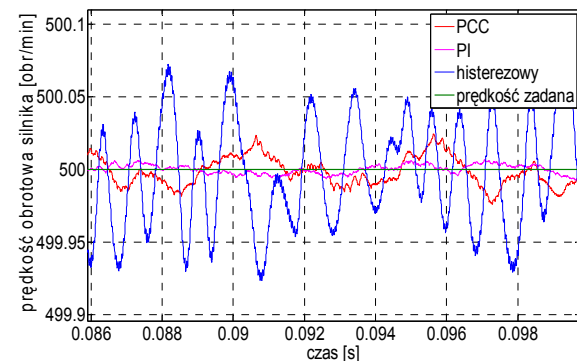
Rys. 8. Liczba przełączeń dla górnych tranzystorów falownika o zadanym profilu obciążenia (pętla zamknięta)

Na rys. 9 pokazano przebieg prędkości przy rozruchu maszyny w układzie zamkniętym z regulatorem prędkości PI (z modyfikacjami).



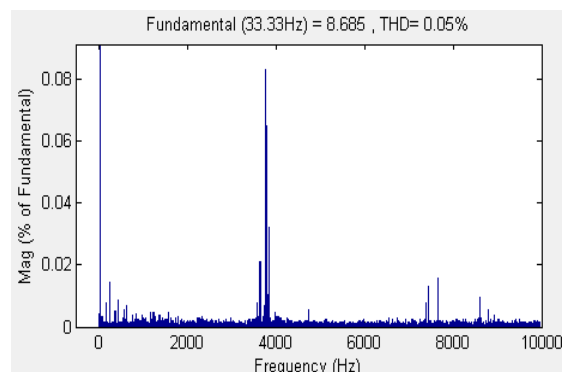
Rys. 9. Przebiegi prędkości przy rozruchu maszyny (pętla zamknięta)

Rysunek 10 przedstawia pulsacje prędkości w stanie statycznym przy wykorzystaniu struktury kaskadowej i regulatora PI (z modyfikacjami) w pętli prędkości.

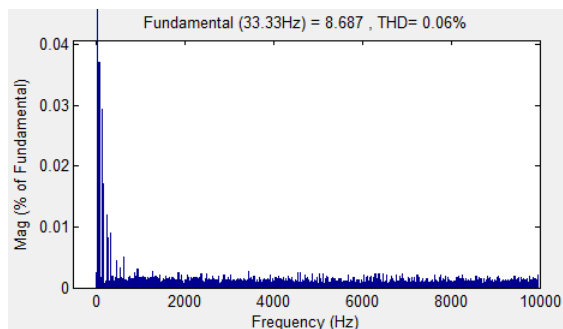


Rys. 10. Przebiegi prędkości w stanie statycznym (pętla zamknięta)

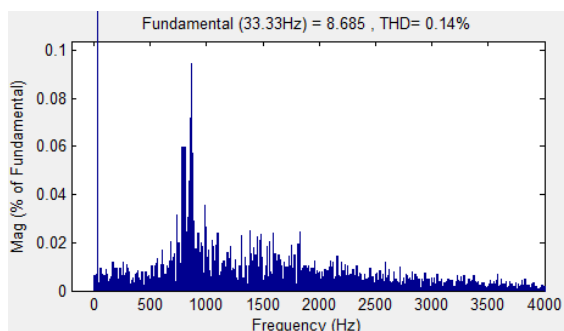
Kolejne trzy rysunki przedstawiają rozkład harmonicznych prądu w fazie A dla każdego regulatora (badania te zostały wykonane z wykorzystaniem gotowej funkcji w SimPowerSystems).



Rys. 11. Rozkład harmonicznych prądu w fazie A (regulator predykcyjny)



Rys. 12. Rozkład harmonicznych prądu w fazie A (regulator PI)



Rys. 13. Rozkład harmonicznych prądu w fazie A (regulator histerezowy)

4. Podsumowanie i wnioski

Spośród trzech przebadanych regulatorów, regulatorem, który najlepiej zachowywał się w stanie dynamicznym był regulator histerezowy (zmodyfikowany), co jest zgodne z obserwacjami innych badaczy. Porównywalną jakość pracy w stanie dynamicznym zapewniał regulator predykcyjny. Oba te regulatory przy skokowej zmianie wartości zadanej prądu w osi q odpowiadały bez przeregulowania w czasie ok. 2,3 ms. Najgorszy pod względem czasu narastania był regulator PI, który również odpowiadał bez przeregulowania, ale ze znacznie dłuższym czasem narastania. Pod względem pracy w stanie statycznym najlepsze działanie prezentował regulator PI, który działał porównywalnie z regulatorem predykcyjnym. Regulator histerezowy wymuszał zdecydowanie większą pulsację prądu, w porównaniu z pozostałymi regulatorami, co ma swoje bezpośrednie przełożenie na pulsację momentu elektromagnetycznego (a w konsekwencji pulsację prędkości). Regulator predykcyjny wymuszał pulsację prądu o amplitudzie 0.010 A (przy wartości zadanej 8.680 A), natomiast histerezowy 0.045 A. Regulator PI wymuszał najmniejszą pulsację prądu rzędu 0.008A. Najmniejszej liczby przełączeń dokonywał

regulator predykcyjny i w dodatku robił to przy stałym okresie próbkowania (co zaowocowało zmniejszonym współczynnikiem THD – ang. Total Harmonic Distortion). Największej liczby przełączeń dokonywał regulator PI. Dla zadanego profilu obciążenia stosunek średniej liczby przełączeń dla regulatora PI w stosunku do regulatora predykcyjnego wynosił 4/3. Największej liczby operacji obliczeniowych wymagał algorytm regulatora predykcyjnego, natomiast najmniejszej – regulatora histerezowego. Algorytm regulatora PI z modulatorem PWM wymagał również dużej liczby operacji. Na etapie symulacji ciężko ocenić jaki będzie czas realizacji algorytmów przedstawionych regulatorów, jednakże na podstawie literatury można wnioskować, że regulator predykcyjny będzie wymagał największej mocy obliczeniowej jednostki sterującej [3, 6], natomiast ze względu na maksymalną częstotliwość przełączania tranzystorów w falowniku częstotliwość pracy każdego regulatora i tak ograniczona jest od góry wartością około 25 kHz. Oznacza to, że regulator PPC może zostać zaimplementowany w procesorze sygnałowym TMS320F2812 firmy T.I. Najślabszej platformy wymaga regulator histerezowy. Analiza FFT prądów, wskazuje na to, że najlepszym regulatorem (o najmniejszym współczynniku THD) jest regulator predykcyjny. Konkurencyjnym regulatorem jest regulator typu PI. Współczynnik THD wyniósł odpowiednio 0.05 % i 0.06 %. Współczynnik THD dla regulatora histerezowego był na poziomie 0.14 %.

Tabela 1 prezentuje porównanie analizowanych regulatorów (+++ oznacza najlepsze właściwości).

Tab. 1. Porównanie jakości pracy regulatorów

	Histerezowy	PI	PCC
Dynamika odpowiedzi	+++	+	++
Praca w stanie statycznym	+	+++	++
Zawartość harmonicznych	+	++	+++
Liczba przełączeń	++	+	+++
Pole uchybu prądu	+	+++	++

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najlepszą jakość regulacji prezentowały dwa regulatory: PI czyli klasyczna struktura zorientowana polowo, ale dodatkowo wykorzystująca modulator PWM (ang. Pulse Width Modulation), oraz regulator predykcyjny opisany w [1]. Regulator histerezowy był regulatorem najprostszym w sensie implementacji i zapewniał najniższą jakość regulacji (pomijając dynamikę odpowiedzi). Regulatorem najbardziej skomplikowanym był regulator predykcyjny, ale z punktu widzenia strat w przekształtniku, współczynnika zawartości harmonicznym i dynamiki odpowiedzi okazał się lepszy od regulatora PI.

5. Literatura

- [1] Florent Morel, Xuefang Lin-Shi, Jean-Marie R'etif, Bruno Allard: „A predictive current control applied to a permanent magnet synchronous machine, comparison with a classical direct torque control”, France, ScienceDirect, 2008.
- [2] Dal Y. Ohm: „Dynamic Model of PM Synchronous Motors”, Drivetechn, Inc., Blacksburg, Virginia, 2000
- [3] Ruszczyc A.: „Nowe algorytmy predykcyjnych metod regulacji prądów przekształtników AC/DC i DC/AC” Rozprawa doktorska. PB, 2005.
- [4] Świerczyński D.: „Direct Torque Control with Space Vector Modulation (DTC-SVM) of Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive”, PhD Thesis, PW, 2005.
- [5] Dokumentacja techniczna firmy B&R dla maszyny synchronicznej, ze wzbudzeniem od magnesów trwałych- Motor Data 8LSA5.
- [6] A. Ruszczyk, A. Sikorski: „Trójfazowy falownik napięcia do zastosowań napędowych z predykcyjnym regulatorem prądu”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 84 NR 4/2008.
- [7] V. Utkin, J. Guldner, J. Shi: „Sliding-Mode Control in Electromechanical Systems”, Taylor&Francis London, 1999.
- [8] F. Heydari, A. Sheikholeslami, K. G. Firouzjah, S. Lesan: „Predictive Field-Oriented Control of PMSM with Space Vector Modulation Technique”, Higher Education Press and Springer-Verlag, 2009.
- [9] K. Kajstura, T. Orłowska-Kowalska: „Sterowanie ślizgowe silnikiem indukcyjnym”, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 2004.
- [10] D. Sobczuk: „Application of ANN for PMSM of Inverter Fed Induction Motor Drives, PhD Thesis, Warszawa, 1999.
- [11] H. Tunia, M. Kaźmierkowski: „Podstawy automatyki napędu elektrycznego”, ISBN: 83-01-04557-4, PWN Warszawa 1983.

Autorzy

Mgr inż. Rafał Piotuch, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: +48 91 449 46 59, e-mail: rafal.piotuch@gmail.com

Prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: +48 91 449 48 70, e-mail: rpalka@zut.edu.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Goryca