

Układ sterowania maszyną reluktancyjną przełączalną z wykorzystaniem regulatora wielooscylacyjnego pracującego w funkcji kąta do redukcji pulsacji momentu obrotowego

Streszczenie. W artykule przedstawiony został układ sterowania maszyną reluktancyjną przełączalną pozwalający na redukcję tętnień momentu obrotowego. Metoda sterowania bazuje na wykorzystaniu regulatora wielooscylacyjnego (Multioscillatory controller - MOSC) w torze regulacji prędkości obrotowej maszyny. Przedstawiono nowe podejście polegające na zastosowaniu członów oscylacyjnych próbkowanych w dziedzinie kąta położenia wału maszyny w przeciwieństwie do standardowego próbkowania w dziedzinie czasu. Podejście to zapewnia, że charakter zmian prędkości obrotowej jest stały w funkcji kąta położenia wirnika a co za tym idzie próbkując sygnał prędkości względem zmian kąta położenia wirnika można w układzie regulacji zastosować człony oscylacyjne o z góry zdefiniowanych częstotliwościach własnych. Zaproponowany układ sterowania zweryfikowany został z wykorzystaniem modeli numerycznych w środowisku PLECS.

Abstract. This paper presents control system of a switched reluctance machine for torque ripple reduction. The control method uses oscillatory terms as a part of speed controller. The presented approach uses oscillatory terms in the rotor angle domain (angle sampled), instead of well-known time domain. This method assures synchronization of resonant frequencies of oscillatory terms with the variable rotor speed. The proposed control system is verified with numerical simulations in PLECS software. (**Control system of a switched reluctance machine with angle sampled multioscillatory controller for torque ripple reduction**)

Słowa kluczowe: maszyna reluktancyjna przełączalna, regulator wielooscylacyjny, pulsacje momentu obrotowego.

Keywords: switched reluctance machine, multioscillatory controller, torque ripple, angle sampled.

Wprowadzenie

Silnik reluktancyjny przełączalny (ang. Switched Reluctance Machine – SRM) jest rodzajem maszyny synchronicznej. SRM zbudowany jest z jawnobiegunowego stojana oraz jawnobiegunowego wirnika. Liczby biegunów stojana oraz wirnika są parzyste. Liczba par biegunów wirnika musi być różna od liczby par biegunów stojana, typowo o jedną parę [1]. Koncentryczne uzwojenia umieszczone są na biegunach stojana. Uzwojenia położone na przeciwległych biegunach połączone są szeregowo i tworzą pasma fazowe maszyny (Rys. 1). Poszczególne pasma fazowe maszyny są niezależne i niepołączone ze sobą galwanicznie. Maszyny reluktancyjne przełączalne charakteryzują się dużą niezawodnością oraz prostą budową przekładającą się na niewielki koszt wykonania [1][2]. Brak uzwojeń na wirniku oraz brak magnesów trwałych są dodatkowymi atutami. Problemem maszyn reluktancyjnych przełączalnych jest wysoki poziom pulsacji momentu obrotowego, co przekłada się na generowany hałas oraz szybsze zużywanie się układu napędowego [2][3][10]. Pulsacje momentu obrotowego mogą być ograniczone przez odpowiedni projekt maszyny [4]. W przypadku gdy modyfikacja maszyny nie jest możliwa, redukcję tętnień momentu obrotowego można osiągnąć przez odpowiednie sterowanie prądami fazowymi maszyny wykorzystując np. logikę rozmytą [3], sterowanie predykcyjne [5] czy adaptacyjne sterowanie ślizgowe z optymalizacją rojem cząstek [10].

W publikacji przedstawiony jest układ sterowania wykorzystujący w torze regulacji prędkości obrotowej regulator wielooscylacyjny próbkowany w dziedzinie kąta położenia wału maszyny (ASMOSC). Takie podejście zapewnia, że charakter zmian prędkości obrotowej jest stały w funkcji kąta położenia wirnika, dzięki czemu można w układzie regulacji zastosować człony oscylacyjne o z góry zdefiniowanych częstotliwościach własnych. Działanie zaproponowanego układu sterowania zweryfikowano z wykorzystaniem środowiska symulacyjnego PLECS.

Opisywane rozwiązanie układu sterowania z wykorzystaniem regulatora wielooscylacyjnego z próbkowaniem w dziedzinie kąta obrotu wału silnika

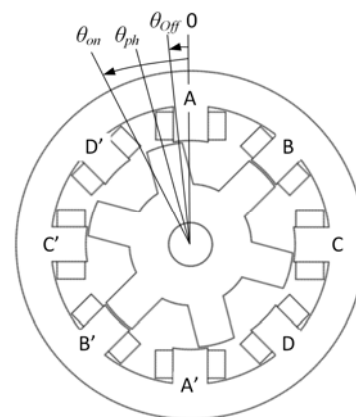
zgłoszone zostało w urzędzie patentowym RP pt. „Sposób regulacji silnika reluktancyjnego oraz silnik reluktancyjny” (numer zgłoszenia P.432816).

Zasada działania maszyny SRM

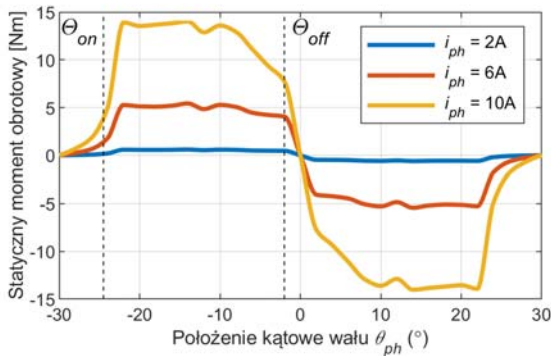
Schemat poglądowy badanej, czterofazowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej o budowie 8/6 przedstawiony został na rysunku 1 [1], natomiast jej parametry przedstawione zostały w tabeli 1. Na rysunku 2 przedstawiona została (uzyskana numerycznie w analizie FEM) rodzina charakterystyk momentu statycznego w funkcji położenia kąтового wirnika dla różnych prądów pasma fazowego oraz przykładowe kąty sterowania.

Tabela 1. Parametry badanej maszyny SRM

Liczba pasm fazowych:	4
Geometria:	8 biegunów stojana, 6 biegunów wirnika
Indukcyjność pasma fazowego:	15 mH – 100 mH
Moc projektowana:	1 kW
Prędkość bazowa projektowana:	1000 obr/min
Napięcie zasilania:	350 V



Rys. 1. Schemat poglądowy czterofazowej maszyny SRM



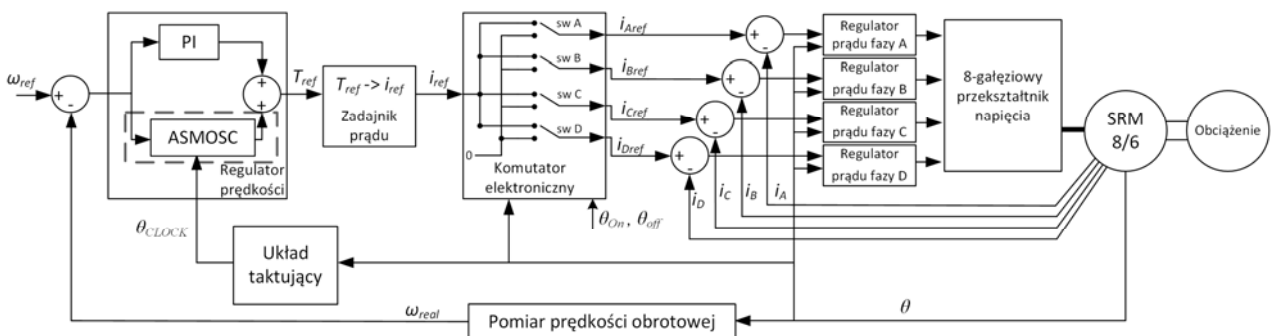
Rys.2. Rodzina charakterystyk statycznych momentu obrotowego w funkcji położenia kąowego wału dla różnych prądów fazowych

Prąd uzwojenia stojana wytwarza pole magnetyczne. Obecność pola magnetycznego wytwarza siłę przyciągającą wirnik w kierunku najmniejszej reluktancji obwodu magnetycznego, tj. biegun wirnika przyciągany jest do namagnesowanego bieguna stojana [1]. Jeżeli biegun wirnika odchylony jest od bieguna stojana wytwarzany jest moment obrotowy, którego wartość jest funkcją położenia kąowego wału oraz prądu uzwojenia stojana (Rys.2). Moment obrotowy pojedynczego pasma fazowego można wyrazić zależnością:

$$T_e = \frac{\partial L(\theta_{ph}, i)}{\partial \theta_{ph}} \frac{i_{ph}^2}{2} \quad (1)$$

gdzie: θ_{ph} jest położeniem kąowym bieguna wirnika względem osi magnetycznej najbliższego zasilanego pasma fazowego (Rys. 1), L jest indukcyjnością tego pasma, i_{ph} jest prądem pasma fazowego.

Wypadkowy moment obrotowy maszyny jest sumą momentów obrotowych generowanych przez poszczególne pasma fazowe maszyny. Praca układu sterowania polega na cyklicznym włączaniu (aktywacji pasma) oraz wyłączeniu (dezaktywacji pasma) prądu uzwojenia w taki sposób aby generowany moment obrotowy miał stały zwrot [1][2]. Włączanie oraz wyłączenie zasilania pasm fazowych odbywa się na podstawie położenia kąowego wału maszyny (Komutator elektroniczny – Rys. 3). Wyróżniamy kąt włączenia θ_{on} , przy którym prąd pasma fazowego jest włączany oraz kąt wyłączenia θ_{off} przy którym rozpoczyna się jego wyłączenie. Kąty θ_{on} i θ_{off} zwane są kątami sterowania [1][2]. Kąty sterowania dobierane są w zależności od typu maszyny, punktu pracy oraz przyjętej strategii sterowania [3]. Jeżeli pasmo fazowe jest aktywne, to jego prąd regulowany jest do zadanej przez regulator prędkości wartości. Jeżeli pasmo fazowe jest nieaktywne, jego prąd sprowadzony jest do zera.



Rys. 3. Układ sterowania SRM

W silniku SRM przebieg momentu obrotowego jest okresowy. Za jeden okres przyjmuje się jeden obrót wału maszyny. Występujące w przebiegu momentu obrotowego harmoniczne są rzędu $n-k$, gdzie $n=\{1, 2, \dots\}$ a k jest liczbą przełączeń pasm fazowych na jeden pełny obrót i wynosi:

$$k = \frac{360^\circ}{N_r} - \frac{360^\circ}{N_s} = \frac{N_r N_s}{N_s - N_r} \quad (2)$$

gdzie N_r – liczba biegunów wirnika, N_s – liczba biegunów stojana. Pulsacje momentu obrotowego powodują powstanie pulsacji prędkości obrotowej:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_g - M_o}{J} \quad (3)$$

gdzie: M_g – moment obrotowy silnika, M_o – moment obrotowy obciążenia, J – moment bezwładności układu napędowego.

Układ sterowania SRM

Układ sterowania składa się z kaskadowego połączenia regulatora prędkości obrotowej, komutatora elektronicznego oraz regulatorów prądów fazowych. Dodatkowo, układ ten wyposażony jest w układ taktujący dla regulatora wielooscylacyjnego, zadajnik prądu oraz układ pomiaru prędkości obrotowej. Schemat układu sterowania SRM przedstawiony został na rysunku 3. Zadajnik prądu oblicza wartość referencyjną prądu i_{ref} na podstawie zadanego momentu obrotowego T_{ref} z regulatora prędkości obrotowej na podstawie równania:

$$i_{ref} = c \sqrt{T_{ref}} \quad (4)$$

gdzie: c jest współczynnikiem skalującym. Współczynnik c jest parametrem konstrukcyjnym i wyznaczany jest na podstawie rodziny charakterystyk przedstawionej na rysunku 2. Przebieg momentu obrotowego oraz prądów fazowych dla układu sterowania z regulatorem prędkości PI (bez regulatora wielooscylacyjnego) przedstawiony został na rysunku 4.

Zgodnie z zasadą modelu wewnętrznego (Internal Model Principle – IMP), wprowadzenie w układzie sterowania regulatora zawierającego model zakłócenia pozwala na uzyskanie zerowego uchybu ustalonego [6]. Ze względu na to, że tętnienia momentu obrotowego w maszynie SRM mają charakter okresowy o znanych częstotliwościach możliwe jest zastosowanie regulatora wielooscylacyjnego (Multioscillatory Controller – MOSC) w celu ich redukcji. Regulator wielooscylacyjny jest częścią regulatora prędkości obrotowej i składa się z n członów oscylacyjnych połączonych równolegle [7][8][9]. Transmitancja operatorowa członu oscylacyjnego wynosi:

$$G_{osc}(s) = k_n \frac{s}{s^2 + \omega_n^2}$$

(5)

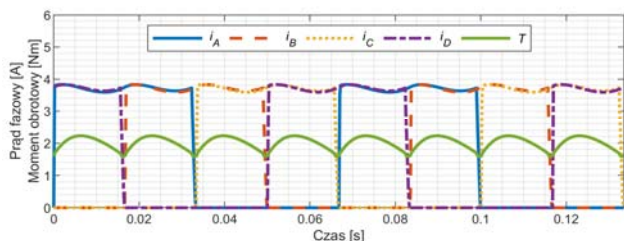
gdzie: k_n jest wzmacnieniem członu oscylacyjnego a ω_n jest jego pulsacją własną. W celu redukcji pulsacji momentu obrotowego silnika, częstotliwości własne członów oscylacyjnych muszą odpowiadać harmonicznym momentu obrotowego (2) [6][7]. Częstotliwości własne członów oscylacyjnych w przedstawionym układzie sterowania wynoszą:

$$(6) \quad f_{osc1} = k, f_{osc2} = 2k, f_{osc3} = 3k, f_{osc4} = 4k$$

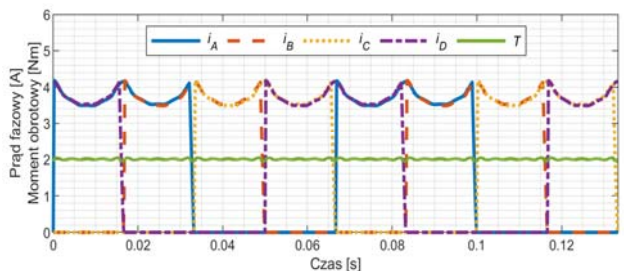
W przypadku napędu o zmiennej prędkości obrotowej konieczna jest ciągła adaptacja częstotliwości własnych członów oscylacyjnych z częstotliwościami (pulsacjami) momentu obrotowego [7].

Adaptacja regulatora prędkości obrotowej

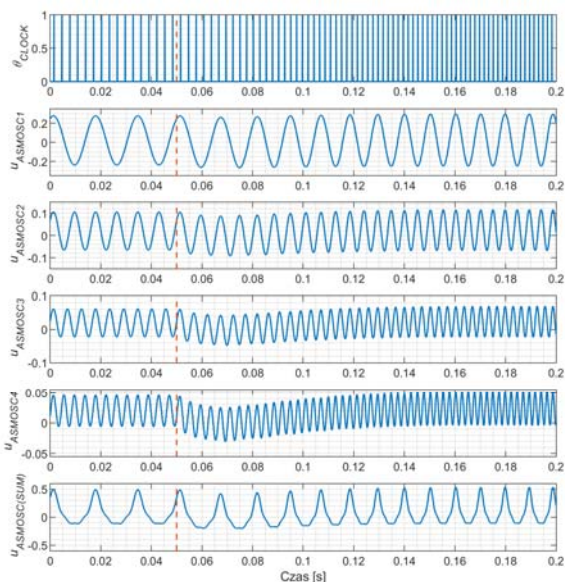
W zaproponowanym układzie sterowania regulator prędkości obrotowej składa się z cyfrowego regulatora PI oraz z cyfrowego regulatora wielooscylacyjnego. Regulatory dyskretyzowane są metodą Tustina z prewarpingiem. Regulator PI taktowany jest standardowo, ze stałą częstotliwością (stały okres próbkowania w czasie). Regulator wielooscylacyjny taktowany jest na podstawie zmian położenia kąтового wału maszyny, co stałą wartość kąta obrotu skutkując zmiennym okresem próbkowania w przypadku zmieniającej się prędkości obrotowej. Takie rozwiązanie powoduje, że okresowość zmian uchybu regulacji dla regulatora wielooscylacyjnego jest stała i niezależna od prędkości obrotowej silnika. Regulator wielooscylacyjny z próbkowaniem w dziedzinie kąta został nazwany ASMOSC (Angle Sampled MOSC). Na rysunku 6 przedstawiony został sygnał taktujący ASMOSC (θ_{CLOCK}), wyjścia poszczególnych członów oscylacyjnych ($u_{ASMOSC1}$, $u_{ASMOSC2}$, $u_{ASMOSC3}$, $u_{ASMOSC4}$) oraz sumaryczny sygnał wyjściowy regulatora ASMOSC ($u_{ASMOSC(SUM)}$). Częstotliwość przedstawionego sygnału taktującego θ_{CLOCK} została zmniejszona szesnastokrotnie w celu zachowania czytelności rysunku.



Rys. 4. Przebieg prądów fazowych oraz momentu obrotowego w SRM dla układu sterowania prędkością z wykorzystaniem regulatora PI



Rys. 5. Przebieg prądów fazowych oraz momentu obrotowego w SRM dla układu sterowania prędkością z wykorzystaniem regulatora PI+ASMOSC



Rys.6. Przebiegi sygnałów regulatora ASMOSC: sygnał taktujący (θ_{CLOCK}), sygnały wyjściowe członów oscylacyjnych ($u_{ASMOSC1}$, $u_{ASMOSC2}$, $u_{ASMOSC3}$, $u_{ASMOSC4}$) oraz sumaryczny sygnał wyjściowy regulatora ASMOSC ($u_{ASMOSC(SUM)}$)

W czasie $t = 0,05$ s nastąpiła zmiana referencyjnej wartości prędkości obrotowej silnika. Widoczna jest płynna zmiana częstotliwości taktowania ASMOSC (Rys. 6, θ_{CLOCK}) oraz adekwatna zmiana częstotliwości sygnałów wyjściowych poszczególnych członów oscylacyjnych.

Na rysunku 5 przedstawione zostały przebiegi prądów fazowych silnika oraz momentu obrotowego dla układu sterowania prędkością z wykorzystaniem regulatora PI oraz ASMOSC. Wykorzystanie ASMOSC w układzie regulacji prędkości obrotowej pozwala na redukcję tętnień momentu obrotowego silnika a zatem i tętnień jego prędkości obrotowej (3).

Adaptacja regulatora prądu

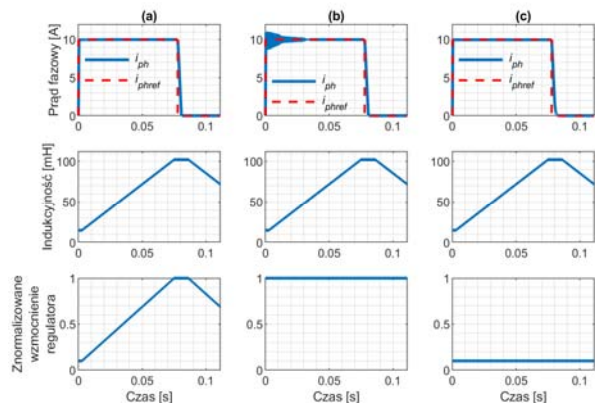
W proponowanym układzie sterowania zastosowany został zestaw regulatorów prądu typu P, oddzielnych dla każdego z pasm fazowych. Indukcyjność pasma fazowego jest zmienna i zależy od położenia kąowego wału maszyny [1]. W celu uzyskania dobrych właściwości układu regulacji (dobrego odtwarzania przebiegu wartości referencyjnej) wzmacnienie regulatora k_p jest zmieniane w zależności od chwilowej wartości indukcyjności, zależnej od położenia kąowego wału maszyny:

$$(7) \quad k_p = var(\theta_{ph})$$

Przebieg prądu referencyjnego, prądu rzeczywistego, indukcyjności statycznej pasma fazowego oraz znormalizowanego wzmacnienia regulatora przedstawione zostały na rysunku 7 dla trzech przypadków: a) wzmacnienie adaptacyjne, b) wzmacnienie stałe – dobrane dla największej indukcyjności, c) wzmacnienie stałe – dobrane dla minimalnej indukcyjności.

Regulator z adaptacyjnym wzmacnieniem (Rys.7a) charakteryzuje wysoka jakość regulacji (wysoka dynamika oraz brak przeregulowania w całym zakresie położzeń kąowych wirnika). W przypadku stałej wartości wzmacnienia, w przebiegu prądu występuje przeregulowanie mające charakter oscylacyjny (Rys.7b) lub dynamika wyłączenia prądu jest niska (Rys.7c). Opóźnione wyłączenie prądu związane z niską dynamiką regulatora może spowodować, że prąd uzwojenia stojana nie zaniknie przed osiągnięciem położenia $\theta_{ph} = 0^\circ$, co przełoży się na

wytworzenie przez to uzwojenie chwilowego ujemnego momentu obrotowego (Rys.2).



Rys. 7. Przebiegi prądu referencyjnego, prądu pasma fazowego, indukcyjności statycznej pasma fazowego oraz wzmocnienie regulatora prądu dla różnych przypadków

Podsumowanie

Klasyczny układ napędowy z wykorzystaniem maszyny reluktancyjnej przełączalnej charakteryzuje się dużymi pulsacjami momentu obrotowego. Zastosowanie w układzie regulacji prędkości obrotowej regulatora wielooscylacyjnego próbkowanego ze stałym krokiem położenia kąowego wirnika pozwala na istotną redukcję tętnień momentu obrotowego co przekłada się na zmniejszenie tętnień prędkości obrotowej wału. Dodatkowo, proponowane rozwiązanie pozwala na redukcję tętnień momentu obrotowego przy różnych prędkościach obrotowych (a także w czasie jej zmiany) bez konieczności przestrajania regulatora wielooscylacyjnego.

Zastosowanie adaptacyjnego regulatora prądu zapewnia dobrą dynamikę regulacji w całym zakresie położenia kąowego wirnika pozwalając na prawidłowe odtwarzanie przebiegu referencyjnego bez przeregulowań.

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Jackiewicz, Politechnika Warszawska, Instytut sterowania i elektroniki przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: krzysztof.jackiewicz@ee.pw.edu.pl; mgr inż. Andrzej Straś, Politechnika Warszawska, Instytut sterowania i elektroniki przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: andrzej.stras@ee.pw.edu.pl; mgr inż. Tomasz Bałkowiec, Politechnika Warszawska, Instytut sterowania i elektroniki przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: tomasz.balkowiec@ee.pw.edu.pl; dr hab. inż. Arkadiusz Kaszewski, Politechnika Warszawska, Instytut sterowania i elektroniki przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: arkadiusz.kaszewski@ee.pw.edu.pl

Praca badawcza finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu TECHMATSTRATEG1/346922/4/ NCBR/2017 „Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużych mocy i wysokich częstotliwości”.

LITERATURA

- [1] Krishnan R., Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, *Industrial Electronic Series*, (2001)
- [2] Biernat A., Jackiewicz K., Bieńkowski K., Vibration analysis of SRM designed for motoring and generating operation with spread spectrum current control, *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, (2017), 1-9
- [3] M. Divandari and A. Dadpour, Radial force and torque ripple optimization for acoustic noise reduction of SRM drives via fuzzy logic control, *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*, (2010), 1-6
- [4] P. T. Hieu, D. Lee and J. Ahn, Design of 2-phase 4/2 SRM for torque ripple reduction, *2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (2012), 1-6
- [5] S. Mehta, M. A. Kabir and I. Husain, Extended Speed Current Profiling Algorithm for Low Torque Ripple SRM Using Model Predictive Control, *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, (2018), 4558-4563
- [6] B. Ufnalski, A. Galecki, A. Kaszewski and L. Grzesiak, On the Similarity and Challenges of Multiresonant and Iterative Learning Current Controllers for Grid Converters Under Frequency Fluctuations and Load Transients, *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*, (2018), 1-10
- [7] Jackiewicz K., Straś A., Ufnalski B., Grzesiak L., Comparative study of two repetitive process control techniques for a grid-tie converter under distorted grid voltage conditions, *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 113 (2019), 164-175
- [8] A. Galecki, L. Grzesiak, B. Ufnalski, A. Kaszewski and M. Michalczyk, Multi-oscillatory current control with anti-windup for grid-connected VSCs operated under distorted grid voltage conditions, *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, (2017), 1-10
- [9] Yepes A., Digital resonant current controllers for voltage source converters, *PhD Thesis*, (2011)
- [10] M. M. Namazi, M. M. Borujeni, A. Rashidi, S. M. S. Nejad and J. Ahn, Torque ripple reduction of switched reluctance motor drive with adaptive sliding mode control and Particle Swarm Optimization, *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, (2015), 371-376