

Piotr Bogusz
Politechnika Rzeszowska

OGRANICZENIA PRACY SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO PRZY ZALEŻNYM STEROWANIU PRĄDOWYM

CONSTRAINTS OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR OPERATION UNDER DEPENDENT CURRENT CONTROL

Streszczenie: W ostatnich latach nastąpił wzrost zainteresowania samochodami z napędem elektrycznym. W obecnie produkowanych samochodach elektrycznych głównie wykorzystuje się maszyny bezszczotkowe z magnesami trwałymi oraz maszyny indukcyjne. Ponadto prowadzone są również badania z maszynami reluktancyjnymi przełączalnymi. W niniejszej pracy przedstawiono badania symulacyjne czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej o konfiguracji 8/6 przeznaczonej do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego w zakresie klasycznego sterowania prądowego i zależnego sterowania prądowego w stanach statycznych i dynamicznych.

Abstract: Electric drive vehicles become more and more popular in recent years. In electric vehicles, brushless machines with permanent magnets and induction machines are generally used. However, research on switched reluctance machines are also being conducted. In the paper, simulation tests of four-phase 8/6 switched reluctance machine for a drive of a light electric vehicle under classic current control and dependent current control in both dynamic and static states are presented.

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny przełączalny, SRM, sterowanie prądowe

Keywords: switched reluctance motor, SRM, current control

1. Wstęp

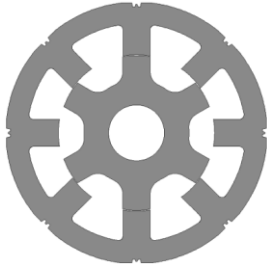
Intensywny rozwój motoryzacji powoduje, że ciągle prowadzone są prace nad poprawą komfortu jazdy, poprawą bezpieczeństwa, jak również zmniejszenia zużycia paliwa w pojazdach samochodowych, a tym samym zwiększenia jego zasięgu przypadającego na jedno tankowanie. W ostatnim dwudziestoleciu prowadzone są również intensywne prace nad rozwojem samochodów z napędem elektrycznym [1]-[3]. Stało się to możliwe dzięki rozwojowi układów energoelektronicznych, układów sterowania, jak również technologii wytwarzania akumulatorów elektrochemicznych. W odróżnieniu od napędów z silnikami spalinowymi, korzystną cechą napędów elektrycznych jest możliwość dwukierunkowej przemiany energii elektrycznej na mechaniczną i odwrotnie. Dodatkowo energię elektryczną można łatwo magazynować w akumulatorach elektrochemicznych i superkondensatorach [3]. W przypadku stosowania maszyn elektrycznych do napędu pojazdów elektrycznych istotna jest sprawność nie tylko przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną (w przypadku

pracy silnikowej), ale również mechanicznej na elektryczną (w przypadku pracy generatorowej). Jednym z typów maszyn elektrycznych, który jest testowany w napędach pojazdów elektrycznych to maszyny reluktancyjne przełączalne (SRM) [4]-[5]. Maszyny te cechuje prosta budowa, szeroki zakres regulacji prędkości jak również wysoka niezawodność. Niestety oprócz wymienionych zalet tego typu maszyn występują również wady, do których należy zaliczyć wysoki poziom generowanego hałasu oraz duże pulsacje momentu.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań symulacyjnych czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego (Switched Reluctance Motor - SRM) o konfiguracji 8/6 przy klasycznym i zależnym sterowaniu prądowym w stanach statycznych i dynamicznych. Zależne sterowanie prądowe (ang. Dependent Current Control – DCC) zostało zaproponowane w pracy [4]. Dokonano tam również porównania osiągnięć SRM dla zaproponowanej metody DCC oraz klasycznego sterowania prądowego (Classical Current Control – CCC).

2. Obiekt badań

Obiektem badań symulacyjnych jest czteropasmowa maszyna SRM o konfiguracji 8/6, której geometrię przedstawiono na rysunku 1, a jej podstawowe parametry zestawiono w tabeli 1.



Rys.1. Geometria SRM 8/6

Tabela 1. Podstawowe dane silnika SRM

Liczba pasm	4
Liczba biegunów stojana/wirnika	8/6
Napięcie znamionowe	48 V
Moc znamionowa	3,3 kW
Prędkość znamionowa	4500 obr/min

Badania przeprowadzono z zastosowaniem nieliniowego modelu symulacyjnego SRM zrealizowanego w systemie Matlab/Simulink. W modelu tym zastosowano charakterystyki strumieniowo-prądowo-kątowe oraz momentowo-prądowo-kątowe wyznaczone na podstawie obliczeń polowych. Do zasilania silnika SRM zastosowano klasyczny układ półmostkowy [4].

3. Sterowanie prądowe silnika SRM

3.1 Klasyczne sterowanie prądowe

Klasyczne sterowanie prądowe (CCC) polega na utrzymywaniu prądów pasmowych w przedziale zasilania na zadanym poziomie (I_{ref}). Funkcję pracy regulatora typu delta dla pasma odchodzącego ($k-1$) i nadchodzącego (k) można opisać następująco:

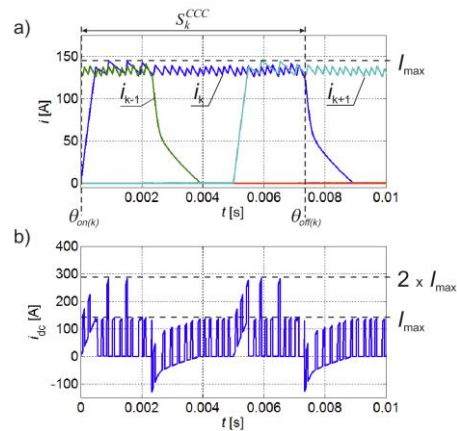
$$f_{(k-1)} = \begin{cases} 0 & \text{if } (e_{(k-1)} \leq 0) \\ 1 & \text{if } (e_{(k-1)} > 0) \end{cases} \quad k = 1 \dots N \quad (1)$$

$$f_{(k)} = \begin{cases} 0 & \text{if } (e_{(k)} \leq 0) \\ 1 & \text{if } (e_{(k)} > 0) \end{cases} \quad k = 1 \dots N \quad (2)$$

gdzie $e_{(k-1)} = I_{ref} - i_{(k-1)}$ jest uchybem prądu w paśmie odchodzącym, $e_{(k)} = I_{ref} - i_{(k)}$ jest uchybem prądu w paśmie nadchodzącym. Funkcję regulatora prądu dla sterowania CCC można zapisać jako:

$$S_{(k)}^{CCC} = \left\{ f_{(k)} \quad \theta \in \langle \theta_{on(k)}, \theta_{off(k)} \rangle \right\} \quad (3)$$

gdzie $\theta_{on(k)}$ i $\theta_{off(k)}$ są odpowiednio kątem załączenia i kątem wyłączenia pasma nadchodzącego. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi prądów pasmowych (Rys.2a) oraz prądu źródła (Rys.2b) uzyskane przy sterowaniu CCC.



Rys.2. Przebiegi prądów pasmowych (a) oraz prądu źródła (b) uzyskane przy sterowaniu CCC

Jak wynika z rysunku 2b w przypadku sterowania CCC wartość maksymalna prądu i_{dc} może osiągnąć dwukrotną wartość prądu I_{ref} . Taka sytuacja może wystąpić wówczas, gdy jednocześnie zasilane są dwa pasma.

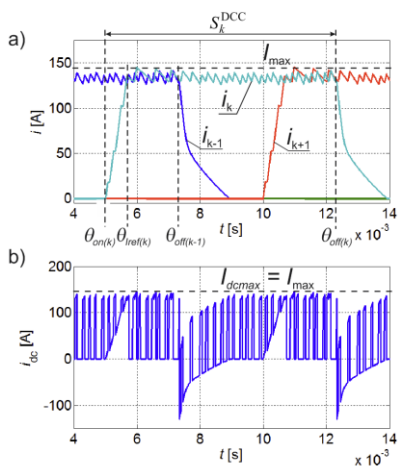
3.2 Zależne sterowanie prądowe

Zależne sterowanie prądowe (DCC) polega na uzależnieniu pracy regulatora prądu w paśmie nadchodzącym (k) od pracy regulatora prądu w paśmie odchodzącym ($k-1$). Funkcję realizującą proces sterowania DCC opisano zależnością:

$$S_k^{DCC} = \left\{ \begin{array}{ll} \overline{f_{i(k-1)}} & \theta \in \langle \theta_{on(k)}, \theta_{Iref(k)} \rangle \\ f_{i(k)} \& \overline{f_{i(k-1)}} & \theta \in \langle \theta_{Iref(k)}, \theta_{off(k-1)} \rangle \\ f_{i(k)} & \theta \in \langle \theta_{off(k-1)}, \theta_{off(k)} \rangle \end{array} \right\} \quad (4)$$

przy czym $\overline{f_{i(k-1)}}$ - jest zanegowaną funkcją $f_{i(k-1)}$ opisaną zależnością (1). Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi prądów pasmowych oraz prądu źródła przy zastosowaniu sterowania

silnika SRM metodą DCC. Na rysunku 3b można wyraźnie zobaczyć, że wartość maksymalna prądu źródła (I_{dcmax}) nie przekracza wartości maksymalnej prądów pasmowych (I_{max}), co jest korzystne, gdyż maleje wartość skuteczna prądu źródła, a tym samym zmniejszają się straty mocy na przewodach zasilających i straty w samym źródle zasilania (np. akumulatorach).



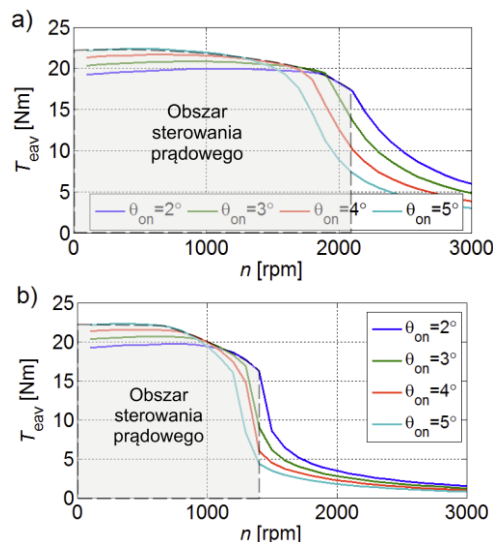
Rys.3. Przebiegi prądów pasmowych (a) oraz prądu źródła (b) uzyskane przy sterowaniu DCC

4. Badania symulacyjne

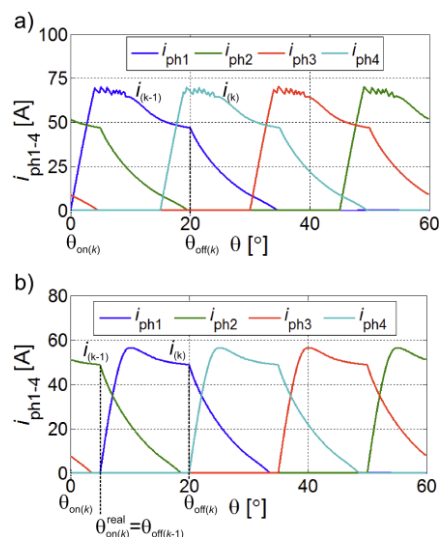
4.1. Stany statyczne

W celu porównania właściwości silnika SRM sterowanego metodami CCC i DCC wyznaczono charakterystyki średniego momentu (T_{eav}) w funkcji prędkości wirowania wirnika (n) dla różnych kątów załączenia (θ_{on}), przy przedziale zasilania 21° . Prąd odniesienia ustawiono na $I_{ref}=110A$. Jak wynika z rysunku 4 zastosowanie metody DCC powoduje ograniczenie prędkości pracy o około 1/3 w porównaniu do sterowania CCC. Ograniczenie prędkości pracy przy sterowaniu DCC wynika ze spowolnienia czasu narastania prądu w paśmie nadchodzącym, wskutek wzrostu napięcia rotacji oraz algorytmu sterowania DCC określonego zależnością (4). Przy sterowaniu jednopulsowym i włączonym algorytmie DCC, załączenie uzwojenia pasma zasilającego może nastąpić po wyłączeniu uzwojenia pasma odchodzącego. Powoduje to późniejsze załączenie uzwojenia pasma nadchodzącego, a tym samym mniejszą amplitudę prądu, co skutkuje mniejszą wartością średnią wytwarzanego momentu. Taką sytuację przedstawiono na rysunku 5,

gdzie zamieszczono przebiegi prądów pasmowych w funkcji kąta położenia wirnika dla sterowania CCC (rys.5a) i DCC (rys.5b) i tych samych parametrów sterowania i prędkości (tj. $n=1400\text{obr/min}$, $\theta_{on}=0^\circ$, $\theta_{off}=20^\circ$, $I_{ref}=67A$). Porównując te przebiegi wyraźnie widać późniejsze załączenie pasma przy sterowaniu DCC (kąt θ_{on}^{real}). Ponadto amplituda prądu jest znacznie mniejsza niż w przypadku sterowania CCC.



Rys.4. Charakterystyki średniej wartości momentu (T_{eav}) silnika SRM w funkcji prędkości (n) dla sterowania: CCC (a), DCC (b), przy różnych kątach załączenia (θ_{on})

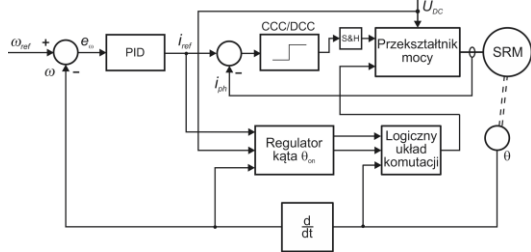


Rys.5. Przebiegi prądów pasmowych ($i_{ph1}-i_{ph4}$) w funkcji kąta położenia wirnika θ dla sterowania: CCC (a), DCC (b)

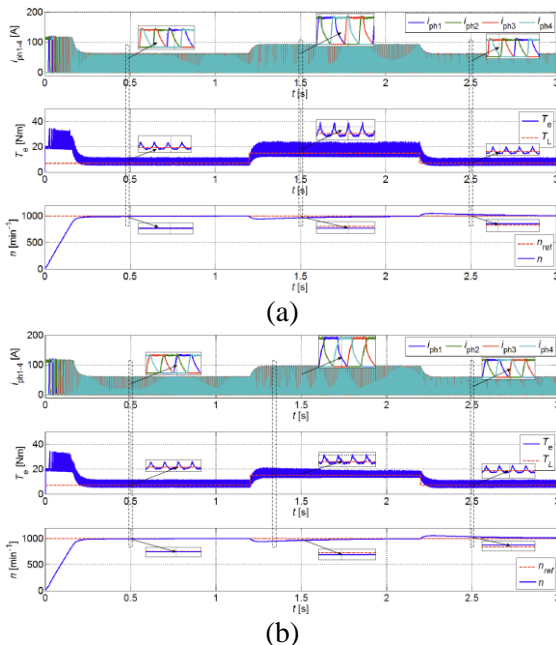
Na rysunku 4 zaznaczono obszary sterowania prądowego, przy założeniu, że wyprzedzenie załączenia uzwojenia będzie się zwiększać z się prędkością wirowania wirnika.

4.2. Stany dynamiczne

Badania silnika SRM w stanach dynamicznych zrealizowano w układzie automatycznej regulacji prędkości obrotowej, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 6. Badania przeprowadzono dla napięcia znamionowego silnika 48V. Jako regulator prędkości zastosowano regulator PID, a do regulacji prądów pasmowych zastosowano regulatory realizujące funkcje sterowania CCC i DCC [4]. W systemie sterowania ograniczono wartość maksymalną prądu odniesienia I_{refmax} do 110A.

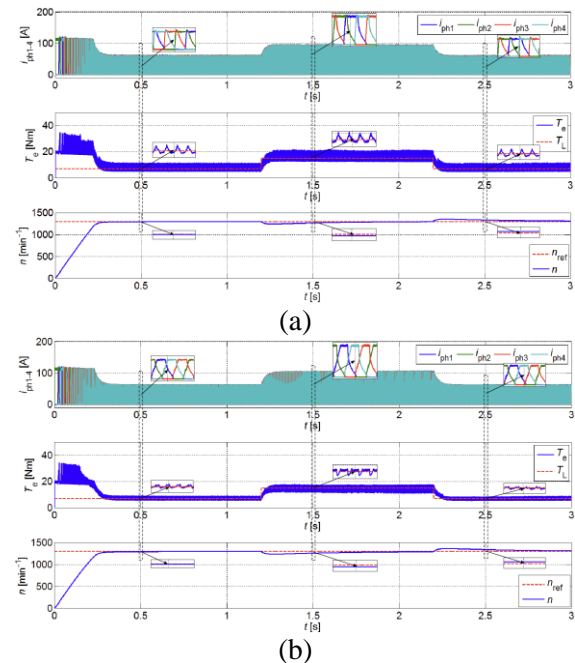


Rys.6. Schemat układu automatycznej regulacji prędkości silnika SRM



Rys.7. Przebiegi prądów pasmowych, momentów i prędkości dla rozruchu silnika SRM z zastosowaniem regulatora PID i sterowaniem metodą: CCC (a), DCC (b) dla prędkości $n_{ref}=1000\text{obr/min}$

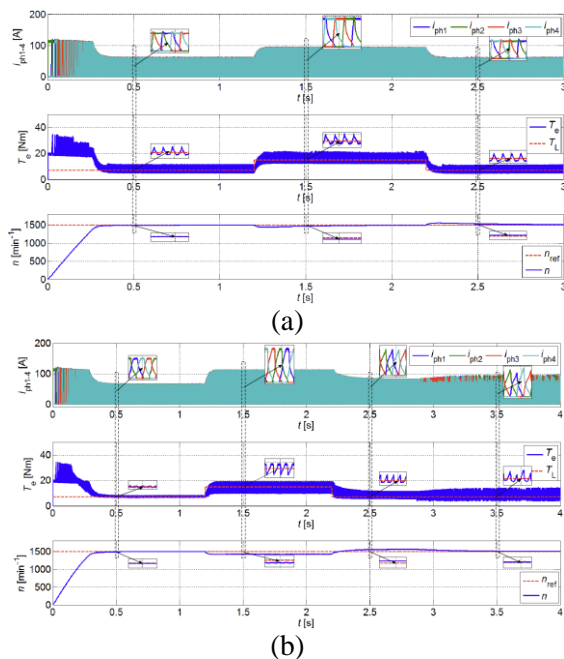
Zmianę kąta załączenia uzależniono od wartości prądu odniesienia I_{ref} oraz prędkości według zależności opisanej w pracy [5], a przedział zasilania uzwojeń pasmowych wynosił $\theta_{dwell}=21^\circ$. Symulacje stanów dynamicznych napędu wykonano dla trzech zadanych prędkości (n_{ref}) równych 1000, 1300 oraz 1500 obr/min i rozpatrywanych w niniejszej pracy algorytmów sterowania CCC i DCC. Moment obciążenia zmieniano dwukrotnie, tj. w chwili $t=1,2\text{s}$ z 7Nm na 15Nm oraz w chwili $t=2,2\text{s}$ z 15Nm na 7Nm. Przebiegi prądów pasmowych ($i_{ph1}-i_{ph4}$), momentów obciążenia (T_L) i elektromagnetycznego (T_e) oraz prędkości zadanej (n_{ref}) i wirnika (n) przedstawiono na rysunkach 7, 8 i 9.



Rys.8. Przebiegi prądów pasmowych, momentów i prędkości dla rozruchu silnika SRM z zastosowaniem regulatora PID i sterowaniem metodą: CCC (a), DCC (b) dla prędkości $n_{ref}=1300\text{obr/min}$

Obserwując rysunki 7, 8 można zauważyć, że w przypadku sterowania CCC oraz DCC regulacja prędkości odbywa się prawidłowo, a dynamika pracy systemu regulacji jest na podobnym poziomie. Można jednak zauważyć, że przy sterowaniu DCC reakcja układu jest nieznacznie wolniejsza. Obserwując przebiegi momentu elektromagnetycznego (T_e) widoczne jest wyraźne zmniejszenie pulsacji momentu przy sterowaniu DCC w zakresie większych obciążeń i prędkości wirowania wirnika (rys.7 i

8). Wynika to ze z innego kształtu prądów pasmowych przy sterowaniu DCC niż przy sterowaniu CCC. W odróżnieniu od sterowania CCC przy sterowaniu DCC prąd nie narasta pod wpływem pełnego napięcia zasilającego, lecz pod wpływem napięcia uzależnionego od pracy regulatora prądu w paśmie odchodzącym [4].



Rys.9. Przebiegi prądów pasmowych, momentów i prędkości dla rozruchu silnika SRM z zastosowaniem regulatora PID i sterowaniem metodą: a) CCC, b) DCC dla prędkości $n_{ref}=1500\text{obr/min}$

W przypadku pracy napędu przy prędkości $n_{ref}=1500\text{obr/min}$ przy sterowaniu CCC napęd zachowuje się poprawnie (rys.9a), natomiast przy sterowaniu DCC (rys.9b) zmiana momentu obciążenia z 7Nm na 15Nm spowodowała, że prądy pasmowe były sterowane na poziomie maksymalnym, tj. $I_{refmax}=110\text{A}$, a mimo tego silnik nie mógł osiągnąć prędkości zadanej $n_{ref}=1500\text{obr/min}$. Wynikało to z znacznie wolniejszego czasu narastania prądu spowodowanego uzależnieniem pracy regulatora prądu w paśmie nadchodzącym od pracy regulatora prądu w paśmie odchodzącym. Zmiana momentu obciążenia z 15Nm na 7 Nm ($t=2,2\text{s}$) spowodowała wzrost prędkości silnika, a to z kolei spowodowało, że prądy pasmowe nie osiągnęły wartości odniesienia (rys.9b). Obserwując przebiegi prądów pasmowych, prędkości i momentu elektromagnetycznego

można stwierdzić, że po czasie $t=1,2\text{s}$ napęd przy sterowaniu DCC nie osiąga zadanej wartości prędkości lub prądy pasmowe nie osiągają wartości zadanych.

5. Wnioski

W niniejszej pracy przeprowadzono badania symulacyjne napędu SRM w zakresie pracy silnikowej. W wyniku przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- zakres prędkości pracy silnika SRM przy sterowaniu DCC jest około 1/3 razy mniejszy niż przy sterowaniu DCC,
- przy sterowaniu DCC dynamika pracy napędu SRM jest zbliżona do dynamiki przy sterowaniu CCC,
- przy granicznej prędkości pracy sterowania DCC układ nie spełnia odpowiednich warunków stabilizacji prędkości.

Jak wynika z powyższych wniosków metoda DCC w porównaniu do metody CCC ma ograniczony zakres prędkości pracy, ale porównywalne właściwości dynamiczne. Dodatkowo z wyników przedstawionych w pracy [4] wynika, że zastosowanie metody DCC pozwala na poprawę sprawności napędu. Zastosowanie metody DCC jest korzystne szczególnie w napędach pojazdów elektrycznych poruszających się w ruchu miejskim w godzinach szczytu, gdzie rozwijane prędkości są niewielkie. Dzięki poprawie sprawności napędu możliwe jest zwiększenie zasięgu pojazdu.

W ramach dalszych prac badawczych związanych z zastosowaniem metody DCC do sterowania silników reluktancyjnych przełączalnych, planowane jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych mających na celu potwierdzenie wyników badań symulacyjnych związanych ze sterowaniem SRM w stanach dynamicznych.

6. Literatura

- [1]. G. Ombach, J. Junak „Kierunki rozwoju napędów elektrycznych w samochodach osobowych w zakresie mocy do 10kW”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 9, str. 163 -169, 2011.
- [2]. D. Kim, S. Hwang, H. Kim “Vehicle Stability Enhancement of Four-Wheel-Drive Hybrid Electric Vehicle Using Rear Motor Control”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 727-735, March 2008.

[3]. M. Choi, S. Kim and S. Seo, "Energy Management Optimization in a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System", IEEE Transactions on Smart Grid 3 (1), 463 – 472, 2012.

[4]. P. Bogusz "A switched reluctance motor control method limiting the maximum dc source current in the low-speed range", Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, vol. 64, no. 1, pp.197-206, 2016.

[5]. P. Bogusz „Analiza wpływu wybranych parametrów sterowania na właściwości napędu SRM pojazdu elektrycznego”, Przegląd Elektrotechniczny nr 2, str. 161-164, 2014.

Autor

dr inż. Piotr Bogusz, *pbogu@prz.edu.pl*
Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów