

Analiza wpływu wybranych parametrów sterowania na właściwości napędu SRM pojazdu elektrycznego

Streszczenie. W niniejszej pracy obiektem prowadzonych badań była czteropasmowa maszyna reluktancyjna przełączalna (SRM), przeznaczona do napędu pojazdu elektrycznego. W celu wykonania badań napędu, opracowano jego model symulacyjny oraz zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze umożliwiające badania w stanach statycznych i dynamicznych. W artykule zamieszczono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych w postaci przebiegów prądów, momentu i prędkości zarejestrowane w stanach dynamicznych dla różnych wartości kątów załączenia i wyłączenia, przy sterowaniu prądowym. Ponadto przedstawiono wyniki badań dla sterowania jednopulsowego ze stanem zerowego napięcia, którego wprowadzenie miało na celu ograniczenie maksymalnej wartości prądu źródła.

Abstract. In this paper, the object of study was a four-phase SRM machine, designed to drive an electric vehicle. In order to perform simulation tests of the drive, a simulation model was developed. Designed and built test stand allows a research of the drive in static and dynamic conditions. In paper were presented waveforms of current, torque and speed for dynamic states with different values of switching angles and current control obtained in simulation and experimental studies. Furthermore, it was used a single pulse control with zero voltage state in order to limit the maximum value of source current. (**Analysis of chosen control parameters influence on properties of electric vehicle switched reluctance drive**).

Słowa kluczowe: maszyna reluktancyjna przełączalna, pojazd elektryczny, stany dynamiczne.

Keywords: switched reluctance machine, electric vehicle, dynamic states.

doi:10.12915/pe.2014.02.42

Wstęp

Do zasadniczych zalet maszyn reluktancyjnych przełączalnych (ang. Switched Reluctance Machines - SRM) należy zaliczyć: szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej, możliwość pracy ze stałą mocą w szerokim zakresie prędkości oraz dużą odporność na przeciążenia [1]-[2]. Dzięki tym cechom, maszyny tego typu bardzo dobrze nadają się do napędu pojazdów elektrycznych [3] – [6]. Podstawową zaletą napędów elektrycznych w porównaniu do spalinowych jest maksymalny moment podczas rozruchu oraz możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania pojazdu [3]-[4], [7]. Natomiast wadą jest niska gęstość energii uzyskiwana z obecnie dostępnych baterii akumulatorów elektrochemicznych, a tym samym krótki zasięg uzyskiwany z jednego ładowania. Dlatego, też samochody elektryczne mają przyszłość w segmencie miejskim, gdzie nie jest wymagany duży zasięg, ale wymagana jest czystość środowiska naturalnego. W pojeździe elektrycznym, gdzie występuje częsta zmiana prędkości i obciążenia istotna jest optymalizacja parametrów sterujących silnikiem elektrycznym, tak aby uzyskać podczas sterowania jak największą sprawność lub największą średnią wartość momentu. Istotnym problemem jest również żywotność akumulatorów, która zależy nie tylko od typu akumulatora, jakości jego wykonania, ale również od warunków eksploatacji. Prąd pobierany ze źródła zasilania przez napędy z maszynami reluktancyjnymi przełączalnymi charakteryzuje się dużymi pulsacjami. Poziom pulsacji tego prądu zależy od punktu pracy maszyny oraz sposobu i parametrów sterowania. Ograniczenie wartości maksymalnej tego prądu pozwoli na poprawę warunków eksploatacji akumulatorów.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wpływu kątów sterujących na pracę napędu przy sterowaniu prądowym oraz wpływu stanu zerowego napięcia na wartość maksymalną prądu źródła.

Wpływ parametrów sterujących na osiągi maszyny SRM

Na regulację prędkości wirnika w maszynie reluktancyjnej przełączalnej mają trzy parametry: kąt załączenia θ_{on} , kąt wyłączenia θ_{off} oraz amplituda prądu w uzwojeniach silnika. Zmiana amplitudy prądów pasmowych poniżej prędkości bazowej realizowana jest poprzez regulatory prądów, natomiast regulacja kątów sterujących powinna być realizowana w zależności od przyjętej strategii:

- maksymalnej średniej wartości momentu elektromagnetycznego,
- maksymalnej sprawności,
- minimalizacji pulsacji momentu.

Maksymalna średnia wartość momentu jest wymagana, np. podczas manewru wyprzedzania. Natomiast podczas spokojnej jazdy pożądana jest praca z maksymalną sprawnością, a podczas ruszania z miejsca minimalizacja pulsacji momentu. W niniejszej pracy przedstawiono wpływ zmiany kątów sterujących na dynamikę napędu.

Zmiana amplitudy prądu

Wartość chwilową momentu wytworzonego przez silnik przy pominięciu nasycenia obwodu magnetycznego i sprzężeń międzypasmowych można określić następującą zależnością:

$$(1) \quad T_e = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_{ph}} \frac{\partial L_k(\theta)}{\partial \theta} i_k^2$$

gdzie: L_k – jest indukcyjnością k -tego uzwojenia pasma, a i_k jest prądem w uzwojeniu k -tego pasma, N_{ph} – liczba pasm stojana.

Jak wynika ze wzoru (1) zasadniczy wpływ na wartość wytworzonego momentu ma amplituda prądu pasmowego. Utrzymanie zadanej wartości prądu na określonym poziomie realizuje odpowiedni regulator prądu pasmowego. Jednak, aby prąd mógł osiągnąć zadaną wartość zanim indukcyjność własna pasma zacznie narastać, konieczne jest odpowiednie wyprzedzenie załączenia zasilania danego uzwojenia. Miarą tego wyprzedzenia jest kąt załączenia θ_{on} .

Zmiana kątów sterujących

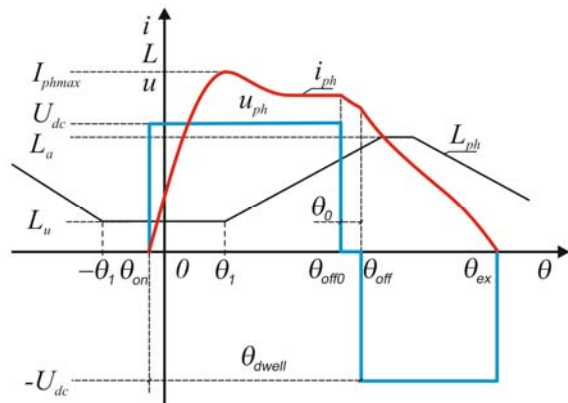
Zakładając, że obwód magnetyczny maszyny się nie nasycy oraz pomijając rezystancję uzwojeń maszyny, kąt załączenia maszyny można obliczyć z następującej zależności:

$$(2) \quad \theta_{on} = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s - \beta_r}{2} - \frac{L_u I_{max}}{U_{dc}} \omega$$

gdzie: N_r – liczba zębów wirnika, β_s i β_r kąty szerokości biegunów stojana i wirnika, L_u – indukcyjność uzwojenia

pasma w położeniu niewspółosiowym, I_{\max} – wartość prądu pasmowego w położeniu (rys.1), ω – prędkość kątowa wirnika, U_{dc} – napięcie źródła zasilania.

Przyjęto, że gdy wirnik znajduje się w położeniu niewspółosiowym to $\theta = 0^\circ$.



Rys.1. Przebieg indukcyjności pasmowej L_{ph} , prąd i_{ph} i napięcie u_{ph} pasmowe maszyny SRM

Zależność (2) jest słuszna w przypadku, gdy L_u jest stała w przedziale $[-\theta_1, \theta_1]$ oraz przy założeniu, że prąd narasta liniowo. W rzeczywistości, gdy ząb wirnika znajduje się pomiędzy biegunami stojana (tzw. położenie niewspółosiowe), indukcyjność L_u zmienia się nieznacznie, ponieważ obwód magnetyczny jest nienasycony (duża szczelina powietrzna). Natomiast kąt wyłączenia θ_{off} jest trudny do obliczenia ze względu na nieliniowo opadający prąd, jak również zmieniającą się z kątem położenia wirnika i prądem pasmowym indukcyjność (ząb wirnika i biegun stojana zachodzą na siebie – występuje nasycenie rdzenia). Przedział zasilania pasma silnika można zdefiniować jako różnica kątów załączenia i wyłączenia ($\theta_{dwell} = \theta_{off} - \theta_{on}$).

Wprowadzenie stanu zerowego napięcia na końcu przedziału zasilania pozwala w znaczący sposób zmniejszyć pulsacje prądu źródła, a w szczególności obniżyć jego wartość maksymalną (I_{dcmax}). Jest to bardzo istotne ze względu na wydajność prądową źródła zasilania. W przypadku zasilania napędu z baterii akumulatorów, obniżenie wartości maksymalnej pobieranej przez napęd znacząco wpływa na trwałość tych akumulatorów. Miarą długości trwania stanu zerowego napięcia jest kąt θ_0 (rys. 1).

Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono z zastosowaniem modelu symulacyjnego zbudowanego w systemie Matlab/Simulink [7] dla silnika reluktancyjnego przełączalnego o konfiguracji 8/6 przeznaczanego do napędu pojazdu elektrycznego, którego podstawowe dane przedstawiono w tabeli 1.

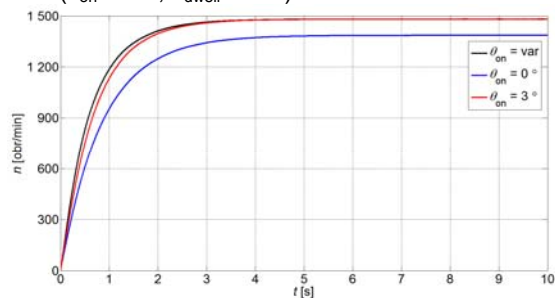
Tab.1. Dane badanej maszyny

Typ maszyny	SRM
Liczba pasm N_{ph}	4
Liczba biegunów stojana/wirnika N_s/N_r	8/6
Napięcie zasilania U_{dc}	48V
Moc znamionowa P_N	3,3kW
Prędkość maksymalna n_{max}	4500 obr/min

W celu porównania wyników symulacyjnych i laboratoryjnych badania napędu wykonano dla napięcia $U_{dc}=24V$. Do regulacji prądów pasmowych zastosowano regulator PI. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie zmian prędkości w czasie t dla przypadków, gdy:

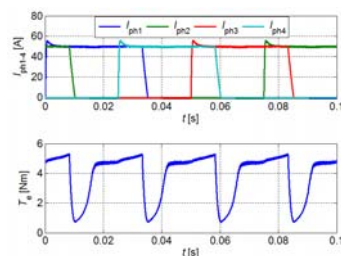
- kąt załączenia i przedział zasilania były stałe ($\theta_{on} = 0^\circ$ i $\theta_{on} = 3^\circ$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$)

- kąt załączenia się zmieniał liniowo z prędkością ($\theta_{on} = \text{var}$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$).

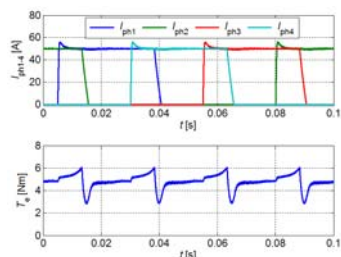


Rys.2. Zależności $n=f(t)$ podczas rozruchu SRM dla: $\theta_{on}=(\text{var}, 0^\circ, 3^\circ)$, przy $I_{ref}=50A$, $\theta_{dwell}=20^\circ$

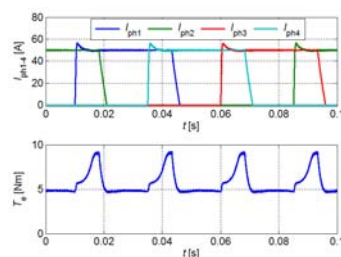
Można zauważyć, że najszybciej prędkość narasta w przypadku zmiennego kąta załączenia. Kąt załączenia zmieniał się w zakresie od 6° (przy $n=0$) do 3° (przy prędkości ustalonej). Na rysunkach 3 – 5 przedstawiono przebiegi prądów pasmowych i_{ph} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $I_{ref} = 50 A$, $n = 100 \text{ obr/min}$ i odpowiednio kątów załączenia θ_{on} równych 0° , 3° i 6° , przy przedziale przewodzenia $\theta_{dwell} = 20^\circ$.



Rys.3. Przebiegi prądów pasmowych i momentu silnika dla $\theta_{on}=0^\circ$, $I_{ref}=50A$ i $n=100 \text{ obr/min}$



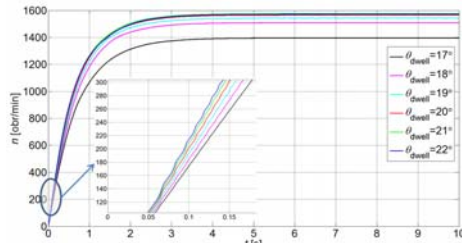
Rys.4. Przebiegi prądów pasmowych i momentu silnika dla $\theta_{on}=3^\circ$, $I_{ref}=50 A$ i $n=100 \text{ obr/min}$



Rys.5. Przebiegi czasowe prądów pasmowych i momentu wypadkowego dla $\theta_{on}=6^\circ$, $I_{ref}=50 A$ i $n=100 \text{ obr/min}$

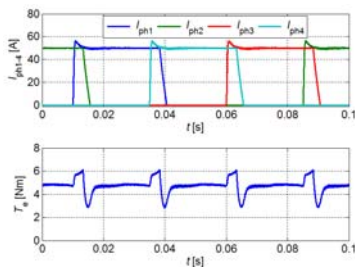
Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi czasowe prądów pasmowych i_{ph1-4} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $\theta_{on}=0^\circ$. Przy tym kącie załączenia występują bardzo duże pulsacje momentu, a minimalny moment wynosi $T_{emin} = 0,703 \text{ Nm}$. Może to grozić utknięciem silnika w przypadku zwiększenia momentu obciążenia. Średnia wartość momentu elektromagnetycznego wytwarzanego w tym punkcie pracy wynosi $T_{eav} = 3,88 \text{ Nm}$. Rysunek 4 przed-

stawia przebiegi czasowe prądów pasmowych I_{ph} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $\theta_{on} = 3^\circ$. W tym przypadku występują znacznie mniejsze pulsacje momentu. Minimalna wartość momentu wynosi $T_{emin} = 4,6$ Nm, przy jednoczesnym wzroście wartości średniej do $T_{eav} = 4,81$ Nm. Przebiegi czasowe prądów pasmowych I_{ph} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $\theta_{on} = 6^\circ$ przedstawiono na rysunku 5. W tym przypadku wartość średnia wytwarzanego momentu wynosi $T_{eav} = 5,65$ Nm i jest największa z rozpatrywanych przypadków.

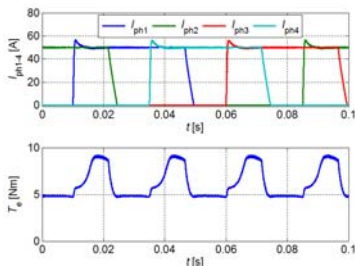


Rys. 6. Zależności $n=f(t)$ podczas rozruchu SRM dla różnych przedziałów zasilania oraz $\theta_{on}=var$, $I_{ref}=50$ A

Na rysunku 6 przedstawiono zależności prędkości n w funkcji czasu dla różnych przedziałów zasilania i zmiennym kącie załączenia θ_{on} , przy $I_{ref} = 50$ A i $U_{dc} = 24$ V. Zmniejszenie przedziału zasilania do 17° powoduje znaczny spadek momentu napędowego, co skutkuje wyraźnym zmniejszeniem prędkości ustalonej silnika. Na rysunkach 7 i 8 analizie poddano dwa skrajne przypadki dla przedziałów przewodzenia $\theta_{dwell} = 17^\circ$ i 22° , gdzie przedstawiono przebiegi prądów pasmowych I_{ph} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $I_{ref} = 50$ A, $n = 100$ obr/min i $\theta_{on} = 6^\circ$.



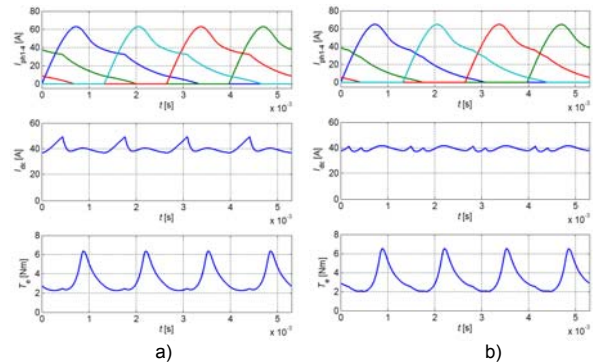
Rys. 7. Przebiegi prądów pasmowych i momentu silnika dla $\theta_{on}=6^\circ$, $\theta_{dwell}=17^\circ$, $I_{ref}=50$ A i $n=100$ obr/min



Rys.8. Przebiegi prądów pasmowych i momentu silnika dla $\theta_{on}=6^\circ$, $\theta_{dwell}=22^\circ$, $I_{ref}=50$ A i $n=100$ obr/min

Gdy przedział przewodzenia wynosi $\theta_{dwell} = 17^\circ$ (rys.7) wartość średnia momentu dla prędkości $n = 100$ obr/min wynosi $T_{eav} = 4,74$ Nm, a minimalna wartość momentu $T_{emin} = 2,84$ Nm. Dla przedziału przewodzenia $\theta_{dwell} = 22^\circ$ (rys.8), znacząco wzrastają pulsacje momentu, ale jednocześnie wzrastają minimalna i średnia wartość momentu, które wynoszą odpowiednio $T_{emin} = 4,67$ Nm i $T_{eav} = 6,19$ Nm. Można zaobserwować wzrost pulsacji prędkości wraz ze wzrostem przedziału zasilania (rys.6). Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi prądów pasmowych, prądu źródła

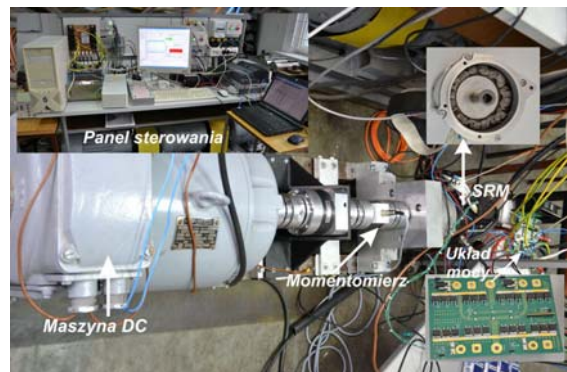
oraz momentu wytwarzanego przez silnik, dla dwóch przypadków: $\theta_b=0^\circ$ oraz $\theta_b=3^\circ$. Symulacje przeprowadzono dla tego samego punktu pracy (tj. $n=1890$ obr/min, $T_e=3,37$ Nm). Dla przypadku, gdy nie występował stan zerowego napięcia ($\theta_b=0^\circ$), silnik zasilono napięciem $U_{dc}=21,65$ V. Natomiast, gdy stan zerowego napięcia występował przez $\theta_b=3^\circ$, napięcie zasilające zwiększono do $U_{dc}=22,2$ V. Z przebiegów przedstawionych na rysunku 9 wyraźnie widać różnice w przebiegach prądu źródła (I_{dc}). Wartość maksymalna prądu została ograniczona z $I_{dcmax}=49,16$ A ($\theta_b=0^\circ$) do $I_{dcmax}=41,1$ A ($\theta_b=3^\circ$).



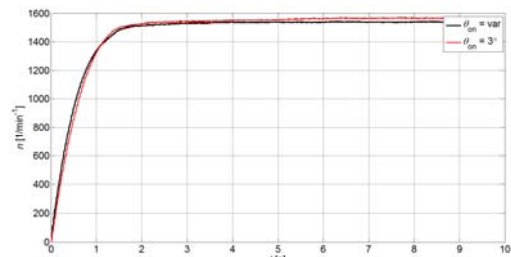
Rys. 9. Przebiegi prądów pasmowych, prądu źródła oraz momentu silnika dla: a) $\theta_b=0^\circ$, b) $\theta_b=3^\circ$

Wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku składającym się z maszyny SRM, przekładni planetarnej, maszyny prądu stałego oraz układu sterowania. Do sterowania stanowiska badawczego zastosowano kartę dSpace DS1103. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 10.



Rys.10. Widok stanowiska badawczego

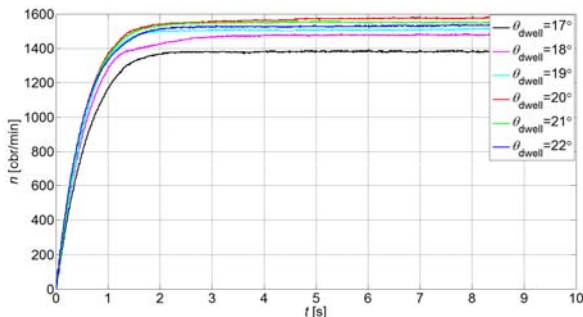


Rys.11. Zależności $n=f(t)$ podczas rozruchu SRM dla: $\theta_{on}=var$ (czarny), $\theta_{on}=3^\circ$ (czerwony), przy $I_{ref}=50$ A, $\theta_{dwell}=20^\circ$

Na rysunku 11 przedstawiono porównanie zmian prędkości w czasie t dla przypadków, gdy:

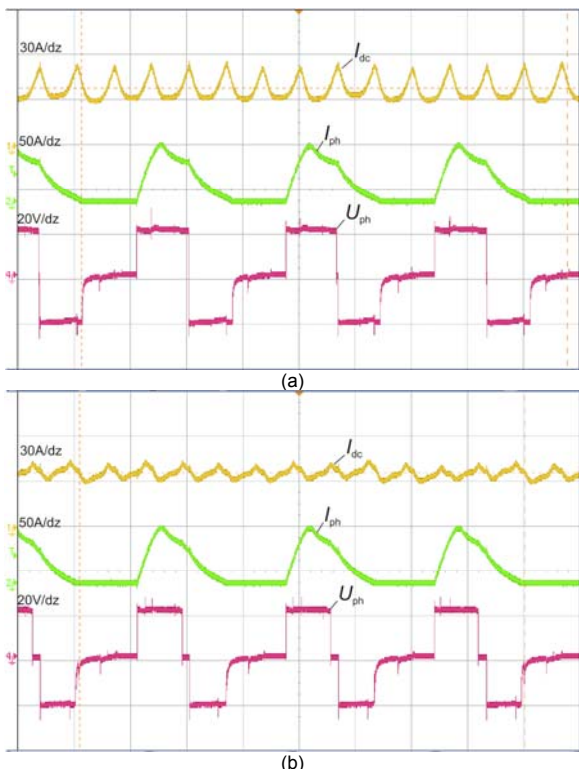
- kąt załączenia i przedział zasilania były stałe ($\theta_{on} = 3^\circ$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$)
- kąt załączenia się zmieniał liniowo z prędkością ($\theta_{on} = var$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$)

Różnice prędkości jakie powstały w stanie ustalonym wynikają ze zmiany oporów mechanicznych w stanowisku badawczym. W początkowej fazie rozruchu, prędkość narasta szybciej w przypadku zmieniającego się kąta załączenia ($\theta_{on} = \text{var}$). Na rysunku 12 przedstawiono zależności prędkości n w funkcji czasu dla różnych przedziałów zasilania ($\theta_{dwell} = 17^\circ - 22^\circ$) i zmiennym kącie załączenia ($\theta_{on} = \text{var}$). Przebiegi zarejestrowano przy ograniczeniu prądu pasmowego do $I_{ref} = 50$ A i napięciu zasilającym $U_{dc} = 24$ V.



Rys. 12. Zależności $n=f(t)$ podczas rozruchu silnika SRM dla różnych przedziałów zasilania oraz $\theta_{on}=\text{var}$, $I_{ref}=50$ A

Oscylogramy prądu źródła I_{dc} , prądu pasmowego I_{ph} oraz napięcia pasmowego U_{ph} dla przypadków, gdy przedziały stanu zerowego napięcia wynosiły odpowiednio $\theta_0=0^\circ$ i $\theta_0=3^\circ$, przedstawiono na rysunku 13. Oscylogramy zarejestrowano dla prędkości $n=1890$ obr/min. W celu osiągnięcia tego samego punktu pracy dla przypadku, gdy $\theta_0=3^\circ$, konieczne było podniesienie napięcia o 0,5V.



Rys.13. Przebiegi prądu źródła (I_{dc}), prądu pasma (I_{ph}) oraz napięcia pasmowego (U_{ph}): a) $\theta_0=0^\circ$, b) $\theta_0=3^\circ$

Wyraźną redukcję wartości maksymalnej prądu źródła (I_{dc}) można zauważyć porównując oscylogramy zamieszczone na rysunku 13. Gdy, kąt θ_0 jest równy 0° , wartość maksymalna prądu źródła wynosi $I_{dcmax}=53$ A, a gdy kąt ten wynosi $\theta_0=3^\circ$ wartość maksymalna prądu źródła

została ograniczona do $I_{dcmax}=41$ A. We wszystkich przedstawionych przypadkach, wyniki badań symulacyjnych są zbliżone do wyników badań eksperymentalnych, co świadczy o przydatności zastosowanego modelu symulacyjnego.

Wnioski

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę wpływu zmiany kątów sterujących na dynamikę napędu z silnikiem SRM przeznaczonym do pojazdu elektrycznego oraz wykazano, że wprowadzenie stanu zerowego napięcia skutecznie ogranicza wartość maksymalną prądu pobieraną ze źródła zasilania. Problem odpowiedniego doboru, kątów sterujących jest bardzo istotny w przypadku zastosowania maszyny SRM do napędu pojazdu elektrycznego, gdzie występują rozruchy ciężkie. Natomiast wprowadzenie stanu zerowego napięcia może pozwolić na zastosowanie źródła zasilania o mniejszej wydajności prądowej. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- rozszerzenie przedziału zasilania przy małych prędkościach jest jak najbardziej pożądane, gdyż wzrasta średnia wartość wytwarzanego momentu, a wartość minimalna momentu jest na wysokim poziomie,
- rozszerzenie przedziału zasilania powoduje również znaczący wzrost pulsacji momentu, dlatego podczas rozruchu wskazane byłoby zastosowanie metody minimalizacji pulsacji momentu,
- wprowadzenie stanu zerowego napięcia o szerokości $\theta_0=3^\circ$, pozwoliło na ograniczenie maksymalnej wartości prądu źródła, aż o 22%,

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 308438.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 "Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej" współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.

LITERATURA

- [1] Vujčić V. P.: *Minimization of Torque Ripple and Copper Losses in Switched Reluctance Drive*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 1, January 2012, pp. 388 - 389
- [2] Xue, X.D. ; Lin, J.K. ; Zhang, Z. ; Ng, T.W. ; Luk, K.F. ; Cheng, K.W.E. ; Cheung, N.C.: *Study of motoring operation of in-wheel switched reluctance motor drives for electric vehicles*, 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2009. PESA 2009. , pp. 1-6
- [3] Fuengwarodsakul N. H., Inderka R. B., Menne M., De Doncker R. W.: *High-Dynamic Four-Quadrant Switched Reluctance Drive Based on DITC*, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 41, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 2005, pp. 1232-1242
- [4] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Praca prądnicowa maszyny reluktancyjnej przełączalnej w zakresie sterowania prądowego*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10/2005, str. 35-40
- [5] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Silnik reluktancyjny przełączalny przeznaczony do napędu małego mobilnego pojazdu elektrycznego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 66, Studia i materiały nr 32, 2012, str. 203-208
- [6] Takeno M., Chiba A., Hoshi N., Ogasawara S., Takemoto M., Rahman M. A.: *Test Results and Torque Improvement of the 50-kW Switched Reluctance Motor Designed for Hybrid Electric Vehicles*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 4, July/August 2012, pp. 1327 - 1334
- [7] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J., A. Powrózek.: *Modelowanie pracy silnikowo-prądnicowej napędu z maszyną reluktancyjną przełączalną*, Przegląd Elektrotechniczny, 12a/2012, ISSN 0033-2097, R. 88, s. 56-61.

Autor: dr inż. Piotr Bogusz, e-mail: pbogu@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów