

Piotr Bogusz
Politechnika Rzeszowska

ANALIZA STANÓW DYNAMICZNYCH MASZyny RELUKTANCYJNEJ PRZEŁĄCZALNEJ PRZEZNACZONEJ DLA LEKKIEGO POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

DYNAMIC STATES ANALYSIS OF SWITCHED RELUCTANCE MACHINE TO LIGHT ELECTRIC VEHICLE DRIVE

Streszczenie: W niniejszej pracy obiektem prowadzonych badań była czteropasmowa maszyna SRM, przeznaczona do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego zaprojektowana i wykonana w ramach realizowanego projektu badawczego. W celu wykonania badań symulacyjnych napędu, opracowano model symulacyjny oraz zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze umożliwiające badania napędu w stanach statycznych i dynamicznych. W artykule zamieszczono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych w postaci przebiegów prądów, momentu i prędkości zarejestrowane dla stanów dynamicznych dla różnych wartości kątów załączenia i wyłączenia, przy sterowaniu prądowym.

Abstract: The main advantage of switched reluctance machine is a wide speed control range, a possibility to work with a constant power in a wide speed range and a high resistance to overloads. Thus this machine is well suitable to drive electric vehicles. In this paper four-phase Switched Reluctance Machine designed and made in the framework of the research project was studied to drive a light electric vehicle. For the study of simulation tests the simulation model was created and a test stand was designed and made to study the drive in static and dynamic states. Simulation and experimental results as waveforms of currents, torques and speeds in dynamic states were placed in paper.

Słowa kluczowe: maszyna reluktancyjna przełączalna, pojazd elektryczny, stany dynamiczne
Keywords: switched reluctance machine, electric vehicle, dynamic states

1. 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 mobilnych [3] – [7]. Podstawową zaletą napędów elektrycznych w porównaniu do spalinowych jest maksymalny moment podczas rozruchu oraz możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania pojazdu [3]-[4], [8]. 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 istotną jest optymalizacja parametrów sterujących silnikiem elektrycznym, tak aby uzyskać podczas sterowania jak największą sprawność lub największą średnią wartość momentu.

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu zmian kątów sterujących na dynamikę maszyny reluktancyjnej przełączalnej podczas rozruchu przy sterowaniu prądowym. Na dynamikę rozruchu silnika reluktancyjnego przełączalnego, wpływ mają kąty sterujące załączeniem zasilania poszczególnych uzwojeń oraz amplituda prądów pasmowych.

2. Model matematyczny

Pomijając prądy wirowe w rdzeniu stojana i wirnika oraz zakładając, że w przypadku nieliniowości obwodu magnetycznego wektor strumieni skojarzonych ψ zależy od kąta obrotu wirnika θ i od N prądów w poszczególnych pasmach i_1, \dots, i_N uzwojenia maszyny, według definicji:

$$\psi(\theta, \mathbf{i}) \stackrel{def}{=} [\psi_1(\theta, i_1, \dots, i_N), \dots, \psi_N(\theta, i_1, \dots, i_N)]^T \quad (1)$$

równania N - pasmowej maszyny SRM mają strukturę:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R} \mathbf{i} + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}(\theta, \mathbf{i}) \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_L = T_e \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

$$T_e = \frac{\partial W_c^*(\theta, \mathbf{i})}{\partial \theta} \quad (5)$$

przy czym:

$$\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_N]^T, \quad \mathbf{i} = [i_1, \dots, i_N]^T, \\ \mathbf{R} = \text{diag}(R_1, \dots, R_N)$$

W równaniach (1) - (5) zastosowano następujące oznaczenia: θ – kąt położenia wirnika, J – moment bezwładności wirnika, D – współczynnik tarcia lepkiego, T_L – moment obciążenia, T_e – moment elektromagnetyczny silnika, $W_c^*(\theta, \mathbf{i})$ - całkowita koenergia pola magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny.

Zakładając, że strumienie poszczególnych pasm $\psi_1(\theta), \dots, \psi_N(\theta)$ można przedstawić w postaci sumy strumieni, z których każdy zależy tylko od jednego prądu pasma, według definicji:

$$\boldsymbol{\Psi}(\theta, \mathbf{i}) = \left[\sum_{j=1}^{N_{ph}} \psi_{1j}(\theta, i_1), \dots, \sum_{j=1}^N \psi_{Nj}(\theta, i_N) \right]^T \quad (6)$$

wyrażenie na moment elektromagnetyczny (5) można zapisać w postaci:

$$T_e = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_k} \psi_{kk}(\theta, \bar{i}_k) d\bar{i}_k \right) \quad (7)$$

3. 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.

W pojeździe elektrycznym ważne są wszystkie trzy przypadki w zależności od żądania kierowcy. Maksymalna średnia wartość momentu będzie 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.

3.1. Zmiana amplitudy prądu

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

$$T_e = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \frac{\partial L_{kk}(\theta)}{\partial \theta} i^2 \quad (8)$$

gdzie: L_{kk} – jest indukcyjnością k -tego uzwojenia pasma.

Jak wynika ze wzoru (8) zasadniczy wpływ na wartość wytworzonego momentu, a tym samym dynamikę napędu SRM 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} .

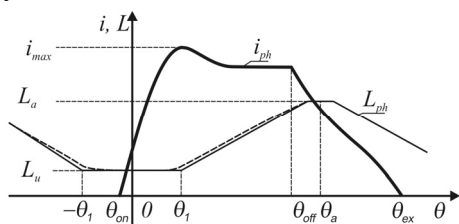
3.2. Zmiana kątów sterujących

Zakładając, że obwód magnetyczny maszyny się nie nasycy, gdy wirnik znajduje się w położeniu niewspółosiowym oraz pomijając rezystancję uzwojeń maszyny, kąt załączenia maszyny można obliczyć z następującej zależności:

$$\theta_{on} = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s - \beta_r}{2} - \frac{L_u I_{max}}{U_{dc}} \omega \quad (9)$$

gdzie: N_r – jest liczba zębów wirnika, β_s i β_r są odpowiednio, kątami szerokości bieguna stojana i wirnika, L_u – indukcyjność uzwojenia pasma w położeniu niewspółosiowym, I_{max} –

wartość prądu pasmowego w położeniu θ_1 (rys.1), ω – prędkość kątowna wirnika, U_{dc} - napięcie źródła zasilania.



Rys.1. Przebieg indukcyjności pasmowej L_{ph} (linia ciągła – wyidealizowany, linia przerywana – rzeczywisty) oraz prąd pasmowy I_{ph} maszyny SRM

Zależność (9) jest słuszna w przypadku, gdy L_u jest stała w przedziale $\langle -\theta_1, \theta_1 \rangle$ oraz przy założeniu, że prąd narasta liniowo. W rzeczywistości indukcyjność L_u zmienia się w tym przedziale w sposób przedstawiony na rysunku 1 (linia przerywana), a prąd nie zawsze narasta liniowo (np. przy sterowaniu jednopulsowym). Dlatego obliczona wartość θ_{on} z zależności (9) wymaga korekty w odniesieniu do rzeczywistego silnika.

Natomiast kąt wyłączenia θ_{off} jest trudny do obliczenia ze względu na nieliniowo opadający prąd, jak również zmieniającą się z kątem położenia i prądem indukcyjność. Przedział zasilania pasma silnika można zdefiniować jako różnica kątów załączenia i wyłączenia ($\theta_{dwell} = \theta_{off} - \theta_{on}$).

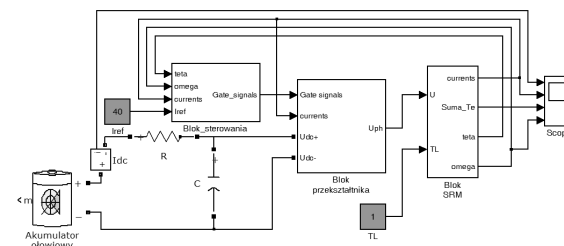
4. Wyniki badań symulacyjnych

Model symulacyjny zrealizowano w systemie Matlab/Simulink dla czteropasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego o konfiguracji 8/6 przeznaczanego do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego [5], którego podstawowe dane przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane badanej maszyny

Typ maszyny	SRM
Liczba pasm	4
Liczba biegunów stojana/wirnika	8/6
Napięcie zasilania	48V
Moc znamionowa	3,3kW
Prędkość maksymalna	4500 obr/min

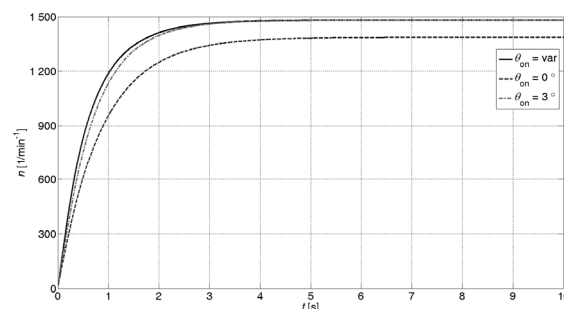
Schemat blokowy modelu symulacyjnego przedstawiono na rysunku 2. Szczegółowy opis modelu zamieszczono w pracy [8].



Rys.2. Schemat blokowy modelu symulacyjnego

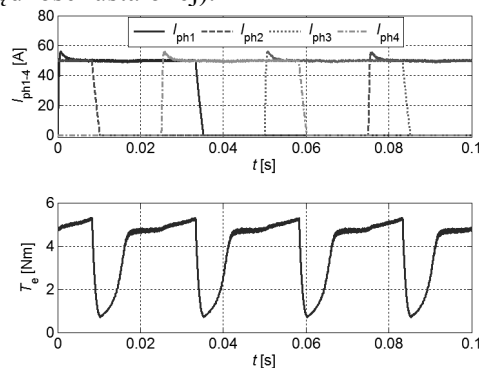
Ze względu na ograniczenia wynikające z dostępnego źródła zasilania, badania napędu wykonano dla napięcia $U_{dc}=24V$. Do regulacji prądów pasmowych zastosowano regulatory PI. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie zmian prędkości w czasie t dla przypadków, gdy:

- 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 ($\theta_{on} = \text{var}$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$)

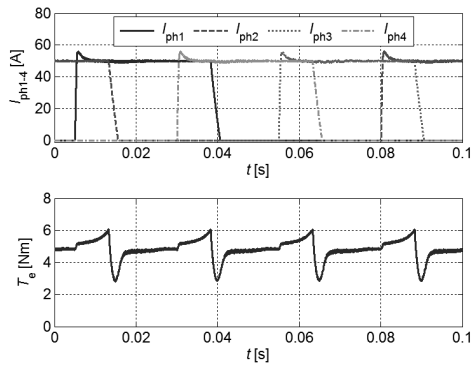


Rys.3. Zależności $n=f(t)$ podczas rozruchu silnika SRM dla: $\theta_{on}=\text{var}$, $\theta_{on}=0^\circ$, $\theta_{on}=3^\circ$, przy $I_{ref}=50A$, $\theta_{dwell}=20^\circ$

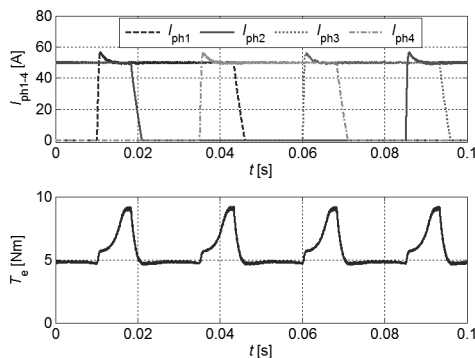
Można zauważyć, że najszybciej prędkość narasta w przypadku zmiennego kąta załączenia. Kąt załączenia zmieniał się w zakresie od 6° (przy rozruchu) do 3° (przy prędkości ustalonej).



Rys.4. Przebiegi czasowe prądów pasmowych i momentu wypadkowego dla $\theta_{on}=0^\circ$, $I_{ref}=50A$ i $n=1000\text{obr/min}$



Rys.5. Przebiegi czasowe prądów pasmowych i momentu wypadkowego dla $\theta_{on}=3^\circ$, $I_{ref}=50A$ i $n=100\text{obr/min}$

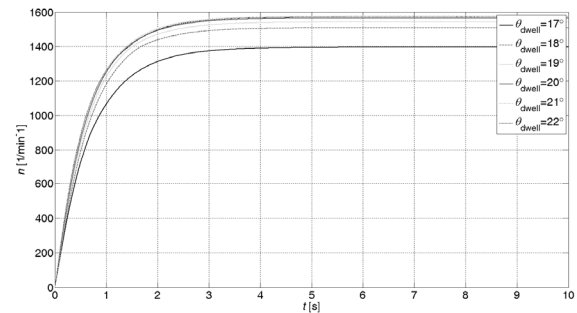


Rys.6. Przebiegi czasowe prądów pasmowych i momentu wypadkowego dla $\theta_{on}=6^\circ$, $I_{ref}=50A$ i $n=100\text{obr/min}$

Na rysunkach 4 – 6 przedstawiono przebiegi prądów pasmowych I_{ph} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $I_{ref} = 50\text{ A}$, $n = 100\text{ obr/min}$ i odpowiednio kątów załączenia θ_{on} równych 0° , 3° i 6° , przy przedziale przewodzenia $\theta_{dwell} = 20^\circ$. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi czasowe prądów pasmowych I_{ph} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $\theta_{on}=0^\circ$. Można zauważyć, że 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 5 przedstawia 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 $T_{emin} = 4.6\text{ Nm}$, przy jednoczesnym wzroście wartości średniej do $T_{eav} = 4,81\text{ Nm}$.

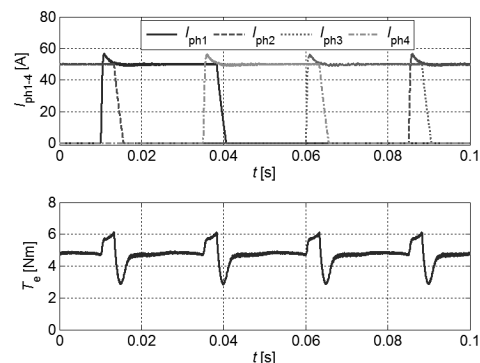
Przebiegi czasowe prądów pasmowych I_{ph} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $\theta_{on} = 6^\circ$ przedstawiono na rysunku 6. W tym przypadku wartość średnia wytwarzanego momentu wynosi $T_{eav} = 5,65\text{ Nm}$ i jest największa z rozpatrywanych przypadków.



Rys.7. Zależności $n=f(t)$ podczas rozruchu silnika SRM dla różnych przedziałów zasilania i zmiennym $\theta_{on}=\text{var}$, $I_{ref}=50A$

Na rysunku 7 przedstawiono zależności prędkości n w funkcji czasu dla różnych przedziałów zasilania i zmiennym kącie załączenia θ_{on} , przy $I_{ref} = 50\text{ A}$ i $U_{dc} = 24\text{ V}$. Na przedstawionej rodzinie charakterystyk można zauważyć, że zmniejszenie przedziału zasilania do 17° powoduje znaczny spadek momentu napędowego, co skutkuje wyraźnym zmniejszeniem prędkości ustalonej silnika.

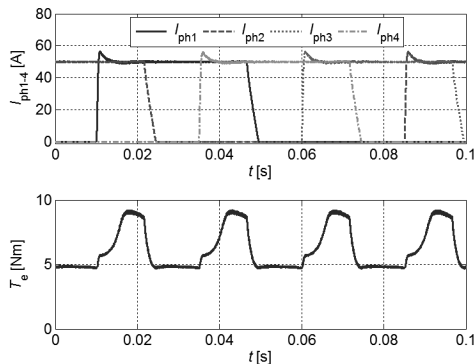
Na rysunkach 8 i 9 analizie poddano dwa skrajne przypadki dla przedziałów przewodzenia $\theta_{dwell} = 17^\circ$ i 22° , gdzie przedstawiono przebiegi prądów pasmowych I_{ph} i momentu elektromagnetycznego T_e dla $I_{ref} = 50\text{ A}$, $n = 100\text{ obr/min}$ i $\theta_{on} = 6^\circ$.



Rys.8. Przebiegi czasowe prądów pasmowych i momentu wypadkowego dla $\theta_{on}=6^\circ$, $\theta_{dwell}=17^\circ$, $I_{ref}=50A$ i $n=100\text{obr/min}$

Gdy przedział przewodzenia wynosi $\theta_{dwell} = 17^\circ$ (rys.8) wartość średnia momentu dla prędkości

$n = 100$ obr/min wynosi $T_{\text{eav}} = 4,74$ Nm, a minimalna wartość momentu $T_{\text{emin}} = 2,84$ Nm.

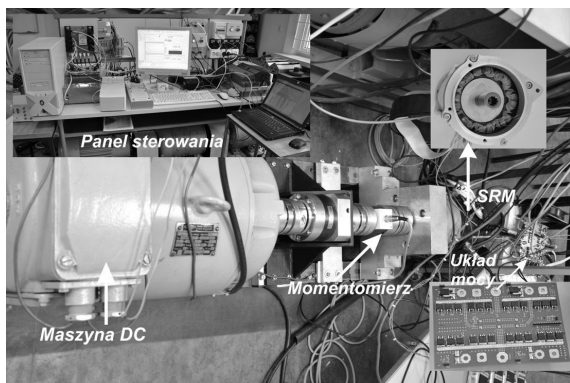


Rys.9. Przebiegi czasowe prądów pasmowych i momentu wypadkowego dla $\theta_{\text{on}}=6^\circ$, $\theta_{\text{dwell}}=22^\circ$, $I_{\text{ref}}=50A$ i $n=100$ obr/min

Dla przedziału przewodzenia $\theta_{\text{dwell}} = 22^\circ$ (rys.9), znacząco wzrastają pulsacje momentu, ale wzrasta minimalna i średnia wartość momentu, które odpowiednio wynoszą $T_{\text{emin}} = 4,67$ Nm i $T_{\text{eav}} = 6,19$ Nm.

5. Wyniki badań laboratoryjnych

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

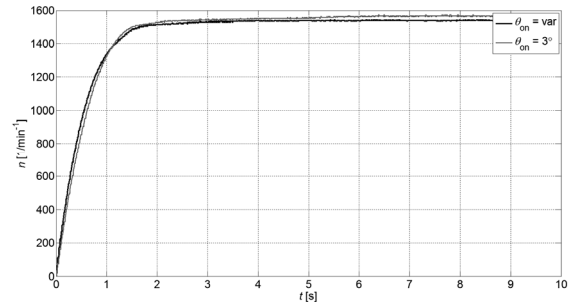


Rys.10. Widok stanowiska badawczego

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

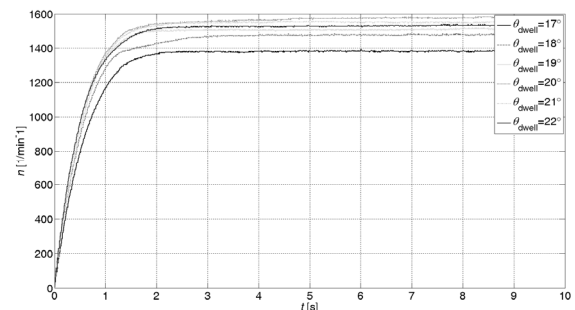
- kąt załączenia i przedział zasilania były stałe ($\theta_{\text{on}} = 3^\circ$, $\theta_{\text{dwell}} = 20^\circ$)

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

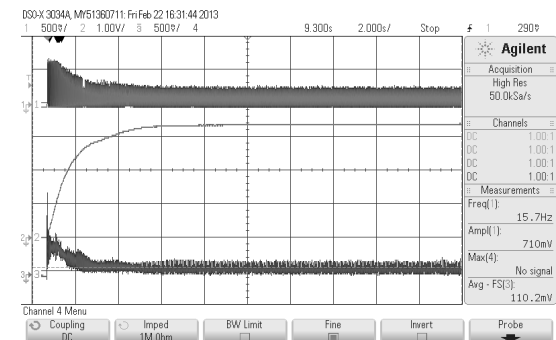


Rys.11. Zależności $n=f(t)$ podczas rozruchu silnika SRM dla: $\theta_{\text{on}}=\text{var}$, $\theta_{\text{on}}=3^\circ$, przy $I_{\text{ref}}=50A$, $\theta_{\text{dwell}}=20^\circ$

Różnice prędkości jakie powstały dla prędkości ustalonej wynikają ze zmiany oporów mechanicznych w stanowisku badawczym. Widać jednak, że w początkowej fazie rozruchu, prędkość narasta szybciej w przypadku zmieniającego się kąta załączenia. Na rysunku 12 przedstawiono zależności prędkości n w funkcji czasu dla różnych przedziałów zasilania i zmiennym kącie załączenia θ_{on} , przy $I_{\text{ref}} = 50$ A i $U_{\text{dc}} = 24$ V, które zarejestrowano w warunkach laboratoryjnych.



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



Rys.13. Oscylogram rozruchu silnika SRM: (1) prąd pasmowy, (2) prędkość, (3) moment

Na rysunku 13 przedstawiono oscylogram zarejestrowany podczas rozruchu badanego silnika SRM, na którym widoczne są przebiegi prądu pasmowego, prędkości i sygnału z momentomierza.

6. Wnioski

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę wpływu zmiany kątów sterujących na dynamikę napędu z silnikiem SRM przeznaczonym do lekkiego pojazdu elektrycznego. Problem odpowiedniego doboru, kątów sterujących jest bardzo istotny w przypadku zastosowania maszyny SRM do napędu pojazdu elektrycznego, gdyż mogą wystąpić rozruchy ciężkie. Z przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- zmiana kątów sterujących podczas rozruchu ma wpływ na dynamikę napędu
- zbyt krótki przedział zasilania powoduje znaczący spadek wytwarzanego momentu, a najbardziej niebezpieczny jest chwilowy jego spadek, który może doprowadzić do utknięcia maszyny
- 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,
- wyniki badań symulacyjnych są zbliżone do wyników badań eksperymentalnych, co świadczy o przydatności zastosowanego modelu symulacyjnego.

7. Literatura

- [1] Krishnan R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.
- [2] Miller T.J.E.: *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes 2001
- [3] Inderka R. B., Menne M., De Doncker R. W. A. A.: *Control of Switched Reluctance Drives for Electric Vehicle Applications*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, VOL. 49, NO. 1, February 2002, pp. 48-53
- [4] Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop: *Praca prądnicowa maszyny reluktancyjnej*

przelączalnej w zakresie sterowania prądowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10/2005, str. 35-40

[5] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Silnik reluktancyjny przelączalny 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, Motoki ; Chiba, Akira ; Hoshi, Nobukazu ; Ogasawara, Satoshi ; Takemoto, Masatsugu ; Rahman, M. Azizur: *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., Tomczewski K., Wróbel K.: *Weryfikacja pomiarowa wyników obliczeń polowych silnika reluktancyjnego przelączalnego*, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 86/2010, s.91 – 94

[8] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J, A. Powrózek.: *Modelowanie pracy silnikowo-prądnicowej napędu z maszyną reluktancyjną przelączalną*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12a/2012, ISSN 0033-2097, R. 88, s. 56-61.

Autor

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

Informacje dodatkowe

Praca wykonana w ramach projektu badawczego
 N N511 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.

Aparatura wykorzystana do przeprowadzenia badań została zakupiona w wyniku realizacji Projektu „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Priorytet I. Konkurencyjna i Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 Regionalny system innowacji.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński