

Badania maszyny reluktancyjnej przełączalnej, przeznaczonej do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop

1. Wstęp

Do napędu lekkich pojazdów elektrycznych przez długi czas stosowano silniki komutatorowe szeregowe i obcowzbudne prądu stałego. Jednak ze względu na stosunkowo niską sprawność, wysoką awaryjność oraz konieczność częstych przeglądów maszyny tego typu są zastępowane maszynami bezkomutatorowymi z magnesami trwałymi typu PMSM (ang. *Permanent Magnet Synchronous Machines*) i BLDCM (ang. *Brushless DC Machines*) oraz indukcyjnymi (ang. *Induction Machines*) i reluktancyjnymi przełączalnymi (ang. *Switched Reluctance Machines* – SRM). Najkorzystniejsze parametry eksploatacyjne uzyskuje się, stosując napędy z maszynami typu PMSM i BLDC. Maszyny tego typu posiadają bardzo wysoką sprawność oraz małe gabaryty wynikające z zastosowania wysokoenergetycznych magnesów trwałych. Ich wadą jest wysoka cena oraz postępująca z czasem degradacja magnesów, wynikająca z procesu starzenia. W maszynach z magnesami trwałymi istnieje ryzyko rozmagnesowania się magnesów pod wpływem zbyt silnego pola pochodzącego od uzwojeń stojana. Drugą grupą maszyn stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych są maszyny indukcyjne, które posiadają gorsze parametry eksploatacyjne niż maszyny bezkomutatorowe z magnesami trwałymi, ale są tańsze w produkcji. Kolejną grupą maszyn bezkomutatorowych, braną pod kątem stosowania do napędu pojazdów elektrycznych, są maszyny reluktancyjne przełączalne. Maszyny te posiadają bardzo prostą konstrukcję i są tanie w produkcji. Jednak wadą ich są duże pulsacje momentu i głośna praca [1].

Celem niniejszej pracy jest prezentacja wyników badań laboratoryjnych czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej o konfiguracji 8/6, zaprojektowanej w Zakładzie Elektrodynamiki i Systemów Elektromaszynowych Politechniki Rzeszowskiej.

2. Obiekt badań

Obiektem badań jest czteropasmowa maszyna reluktancyjna przełączalna o konfiguracji 8/6. Przekrój poprzeczny maszyny przedstawiono na rysunku 1, a podstawowe parametry zestawiono w tabeli 1. Wyniki badań symulacyjnych prowadzonych na etapie projektu maszyny przedstawiono w pracy [2].

Zaprojektowaną maszynę SRM wykonano, a jej widok przedstawiono na rysunku 2.

3. Stanowisko badawcze

Do badania wykonanego prototypu maszyny SRM zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, którego szczegółowy

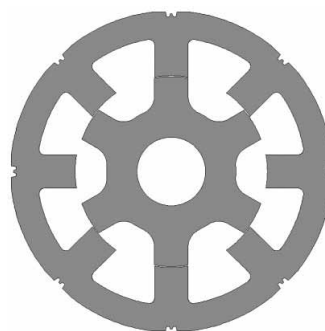
Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych napędu z prototypową maszyną reluktancyjną przełączalną o konfiguracji 8/6, przeznaczoną do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego. Badania zrealizowano na specjalnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym. W ramach prac badawczych dla pracy silnikowej i podstawowych metod sterowania maszyny SRM wyznaczono charakterystyki mechaniczne oraz sprawności.

Słowa kluczowe: maszyna reluktancyjna przełączalna, pojazd elektryczny, badania laboratoryjne

STUDIES OF SWITCHED RELUCTANCE MACHINE FOR LIGHTWEIGHT ELECTRIC VEHICLE

Abstract: In the paper, the results of laboratory studies of drive with the prototype 8/6 switched reluctance machine for light-weight electric vehicle were presented. The studies were carried out on the designed and realized laboratory stand. The mechanical and efficiency characteristics of switched reluctance machine under classic control methods for motoring operation were determined.

Keywords: switched reluctance machine, electric vehicle, laboratory tests

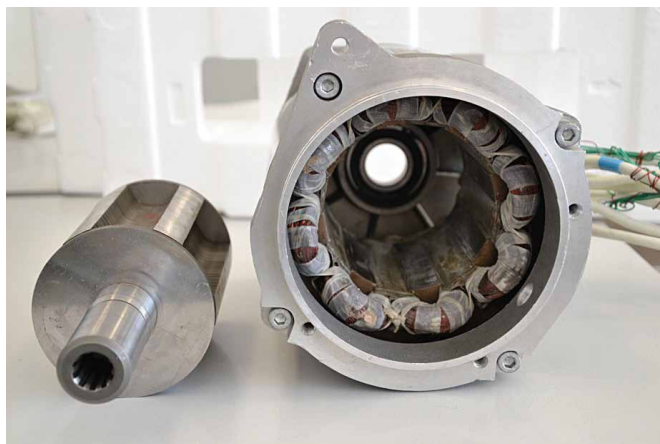


Rys. 1. Przekrój poprzeczny czteropasmowej maszyny SRM o konfiguracji 8/6

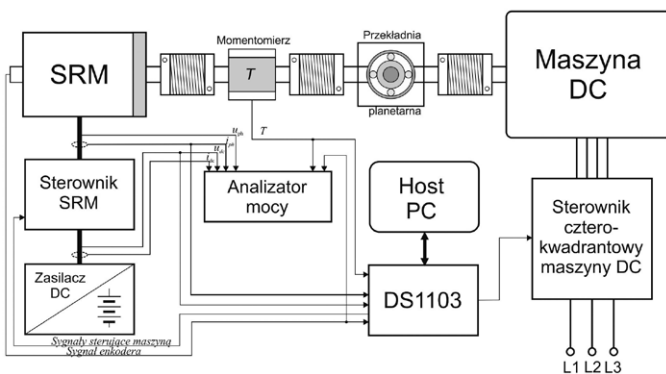
opis przedstawiono w pracy [3]. Schemat blokowy stanowiska przedstawiono na rysunku 3. Stanowisko to posiada możliwość badania maszyn SRM zarówno przy pracy silnikowej, jak i generatorowej. Ponadto, przy jego niewielkiej modyfikacji, istnieje możliwość testowania stanów dynamicznych maszyny niezależnie od stanu naładowania akumulatorów. Jest to bardzo istotna właściwość, bo cena akumulatorów jest wysoka, a ich trwałość ograniczona.

Tabela 1. Podstawowe parametry maszyny SRM

Liczba pasm N	4
Liczba biegunów stojana N_s	8
Liczba zębów wirnika N_r	6
Średnica zewnętrzna stojana d_{se} [mm]	169
Grubość szczeliny powietrznej δ [mm]	0,5
Kąt bieguna stojana β_s [°]	20
Kąt zęba wirnika β_r [°]	20,5
Napięcie znamionowe [V]	48
Moc znamionowa [kW]	3,3

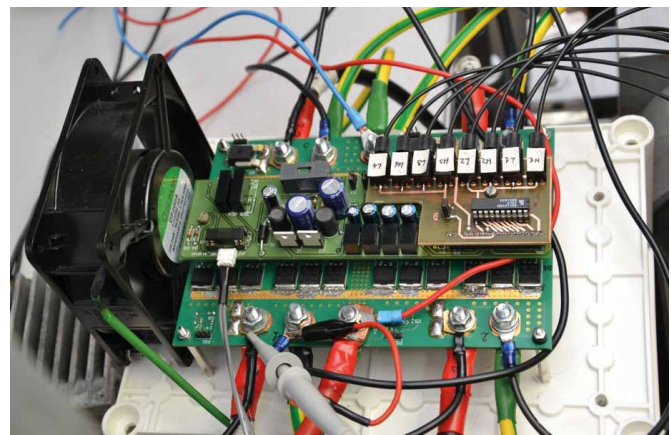


Rys. 2. Widok czteropasmowej maszyny SRM o konfiguracji 8/6



Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Do sterowania czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej zastosowano klasyczny półmostek typu H [1], w którym na jedno pasmo przypadają dwa tranzystory i dwie diody. Taka topologia układu zasilania umożliwia w pełni zastosowanie sterowania cztero-kwadrantowego maszyny SRM. Widok zaprojektowanego i wykonanego przez autorów sterownika przedstawiono na rysunku 4. Układ mocy przeznaczony do zasilania maszyny SRM wyposażono w interfejs pozwalający



Rys. 4. Prototypowy układ sterowania czteropasmowej maszyny SRM

na sterowanie zarówno z karty prototypującej DS1103, jak również z autonomicznego modułu procesora sygnałowego. Płytkę modułu mocy zaprojektowano tak, aby dobrze odprowadzała ciepło wydzielane na tranzystorach i diodach, dzięki czemu nie ma konieczności stosowania radiatorów.

Jednak w przypadku pracy maszyny z pełną mocą, płytka wymaga chłodzenia wymuszonego.

4. Wyniki badań laboratoryjnych

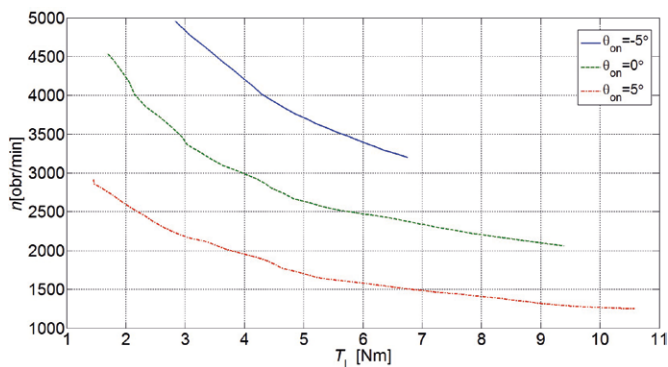
4.1. Wyznaczanie charakterystyk mechanicznych

Badania przy zasilaniu napięciem $U_{dc} = 36$ V

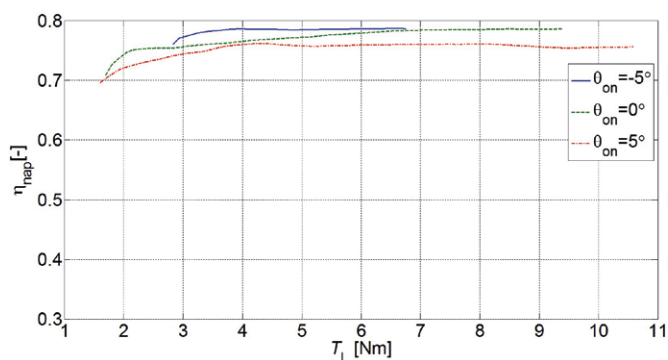
Rejestrację charakterystyk naturalnych maszyny SRM 8/6 w szerokim zakresie obciążenia przeprowadzono przy obniżonym napięciu zasilającym ($U_{dc} = 36$ V) i sterowaniu jednopulsowym. Wynikało to z ograniczeń stanowiska badawczego, którego dopuszczalna prędkość wynosiła $n_{gr} = 5000$ obr./min. Prędkość ta była podyktowana ograniczeniami zarówno przekładni planetarnej, jak i maszyny obciążającej. Ponieważ silnik SRM posiada charakterystykę mechaniczną zbliżoną do silnika szeregowego DC, niewielka zmiana obciążenia powoduje znaczące zmiany prędkości obrotowej. W związku z powyższym zastosowano zabezpieczenie programowe, które przy wzroście prędkości powyżej 5000 obr./min obniża napięcie zasilające badanej maszyny. Ze względu na bezpieczeństwo sterownika maszyny oraz zasilacza DC podczas pomiarów wprowadzono ograniczenia wartości maksymalnej prądu pasmowego do $I_{phmax} = 130$ A, a prądu źródła do $I_{dcmax} = 110$ A.

Na rysunku 5 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych $n = f(T_L)$, zarejestrowanych przy napięciu zasilającym $U_{dc} = 36$ V dla kąta zasilania $\theta_{dwell} = 20^\circ$ i kątów załączenia $\theta_{on} = [-5^\circ, 0, 5^\circ]$ przy sterowaniu jednopulsowym. Jednocześnie na podstawie wykonanych pomiarów wyznaczono charakterystyki sprawności dla poszczególnych kątów załączenia, które przedstawiono na rysunku 6.

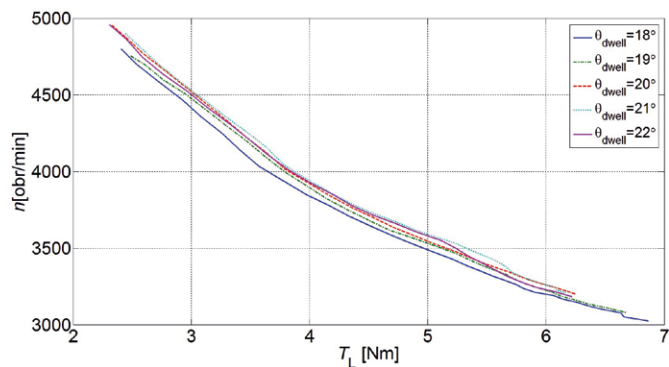
Z przedstawionych na rysunku 5 charakterystyk wynika, że zwiększenie wyprzedzenia załączenia uzwojenia zwiększa moment elektromagnetyczny wytwarzany przez silnik, co



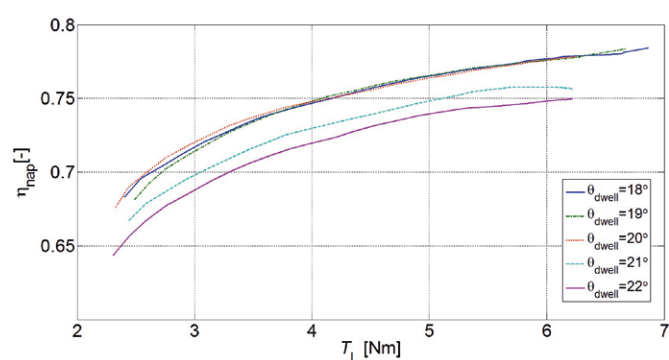
Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne wyznaczone przy $U_{dc} = 36\text{ V}$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$ i $\theta_{on} = [-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ]$



Rys. 6. Sprawność napędu SRM wyznaczone przy $U_{dc} = 36\text{ V}$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$ i $\theta_{on} = [-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ]$



Rys. 7. Charakterystyki mechaniczne czteropasmowej maszyny SRM 8/6 dla różnych przedziałów zasilania θ_{dwell} i kąta załączenia rownego $\theta_{on} = -5^\circ$, $U_{dc} = 36\text{ V}$



Rys. 8. Charakterystyki sprawności czteropasmowej maszyny SRM 8/6 dla różnych przedziałów zasilania θ_{dwell} i kąta załączenia rownego $\theta_{on} = -5^\circ$, $U_{dc} = 36\text{ V}$

wpływa na wzrost prędkości. Sprawność napędu dla badanych przypadków była najwyższa przy kącie załączenia $\theta_{on} = -5^\circ$. Drugim parametrem sterującym, który testowano, był kąt przedziału zasilania (θ_{dwell}).

Na rysunku 7 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych silnika SRM wyznaczonych przy stałym kącie załączenia ($\theta_{on} = -5^\circ$) i różnych przedziałach zasilania mieszczących się w przedziale od 18° do 22° . Z rysunku tego wynika, że zmiana przedziału zasilania nie wpływa zasadniczo na zmianę wytwarzanego przez silnik momentu, ale wpływa istotnie na jego sprawność, co można zauważyć, obserwując charakterystyki sprawności zamieszczone na rysunku 8.

Jak wynika z rysunku 8, zwiększenie przedziału zasilania powyżej 20° powoduje znaczące obniżenie się sprawności napędu.

Badania przy zasilaniu napięciem $U_{dc} = 48\text{ V}$

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono odpowiednio charakterystyki mechaniczne oraz sprawności napędu wykonane przy zasilaniu napięciem znamionowym ($U_{dc} = 48\text{ V}$) dla następujących przypadków parametrów sterowania:

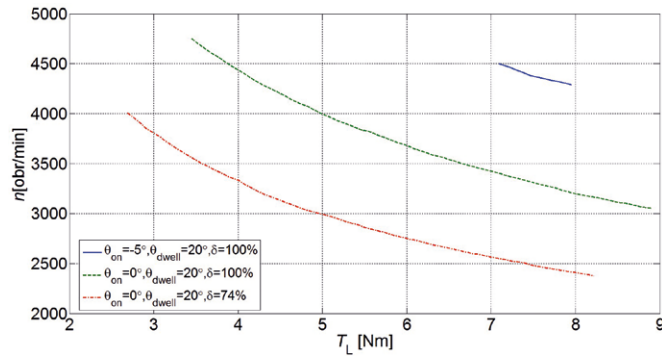
- $\theta_{on} = -5^\circ$, $\delta = 100\%$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$;
- $\theta_{on} = 0^\circ$, $\delta = 100\%$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$;
- $\theta_{on} = 0^\circ$, $\delta = 74\%$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$;

przy czym δ jest współczynnikiem wypełnienia sygnału PWM (ang. *Pulse Width Modulation*) sterującego tranzystorami układu zasilania. Niestety ze względu na ograniczenia prędkościowe stanowiska badawczego oraz dopuszczalny prąd zasilacza pomiary dla pierwszego przypadku przeprowadzono w niewielkim zakresie zmian momentu obciążenia. Pozostałe przypadki wyznaczono w znacznie szerszym zakresie zmian momentu obciążenia.

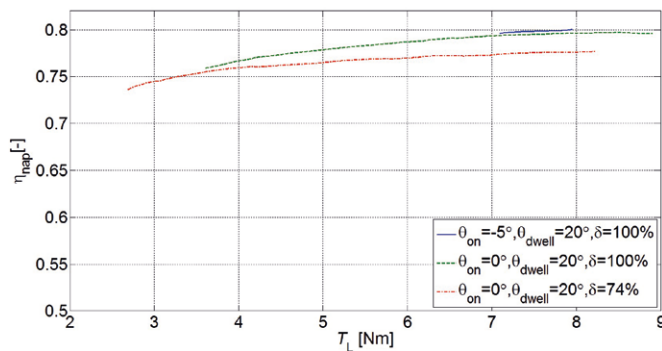
Jak wynika z przedstawionych rysunków, sprawność napędu osiągnęła 80% przy kącie załączenia $\theta_{on} = -5^\circ$ i współczynniku wypełnienia $\delta = 100\%$. Znaczne obniżenie sprawności napędu jest zauważalne w przypadku, gdy współczynnik wypełnienia wynosił $\delta = 74\%$, co jest zrozumiałe ze względu na wzrost strat w układzie przekształtnikowym.

4.2. Rejestracja przebiegów prądów i napięć

Podczas badań napędu zarejestrowano również przebiegi prądów pasmowych (i_{ph}) prądu źródła (i_{dc}) oraz napięcia



Rys. 9. Charakterystyki mechaniczne SRM wyznaczone przy napięciu $U_{dc} = 48 \text{ V}$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$, dla przypadków, gdy: $\theta_{on} = -5^\circ$, $\theta_{on} = 0^\circ$ i $\delta = 100\%$ oraz $\theta_{on} = 0^\circ$ i $\delta = 74\%$



Rys. 10. Charakterystyki sprawności SRM wyznaczone przy napięciu $U_{dc} = 48 \text{ V}$, $\theta_{dwell} = 20^\circ$, dla przypadków, gdy: $\theta_{on} = -5^\circ$, $\theta_{on} = 0^\circ$ i $\delta = 100\%$ oraz $\theta_{on} = 0^\circ$ i $\delta = 74\%$

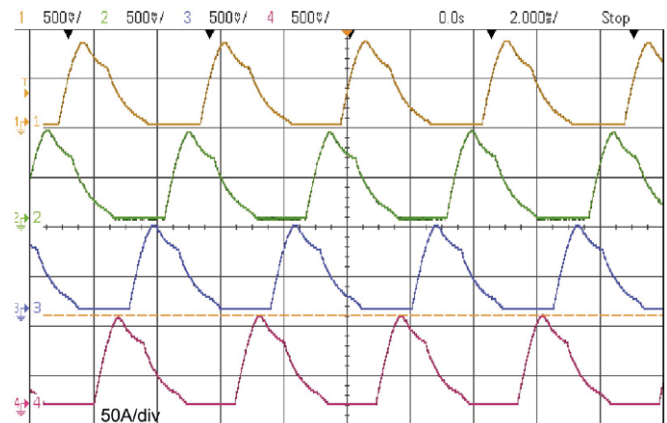
pasmowego (u_{ph}). Na rysunku 11 przedstawiono oscylogram prądów pasmowych badanej maszyny zarejestrowany przy prędkości $n = 2250 \text{ obr./min}$ przy sterowaniu jednopulsowym.

Na rysunku 12 przedstawiono oscylogram prądu źródła (i_{dc}), prądu pasmowego (i_{ph}) oraz napięcia pasmowego (u_{ph}) dla sterowania jednopulsowego zarejestrowany przy prędkości $n = 1890 \text{ obr./min}$.

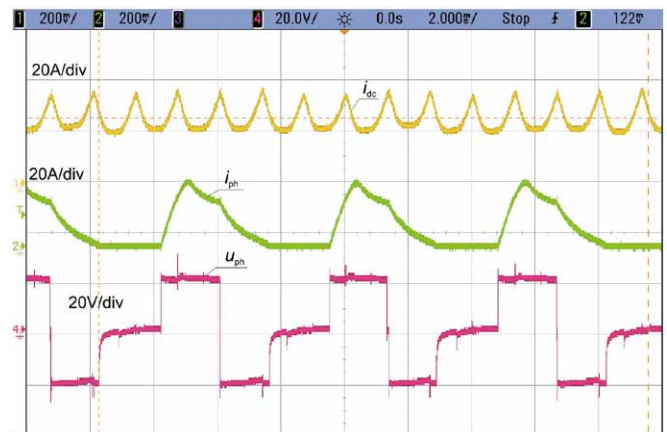
Na rysunku 13 przedstawiono oscylogram prądu źródła (i_{dc}), prądu pasmowego (i_{ph}) oraz napięcia pasmowego (u_{ph}) dla sterowania PWM zarejestrowany przy prędkości $n = 1750 \text{ obr./min}$. Na rysunkach 12 i 13 można zauważyć znaczne pulsacje prądu źródła (i_{dc}), co jest zjawiskiem niepożądanym.

5. Podsumowanie

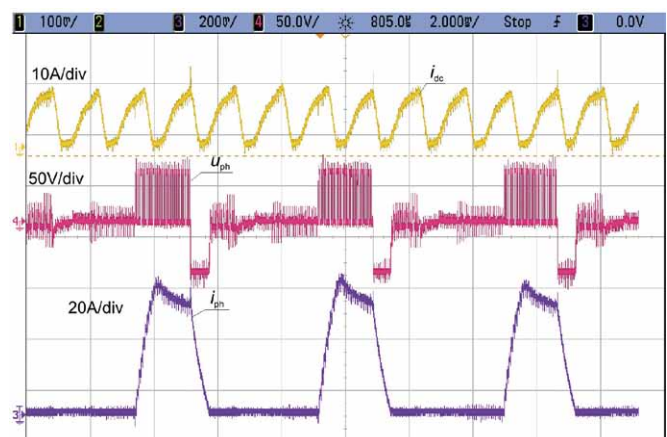
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych maszyny SRM o konfiguracji 8/6, przeznaczonej do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego zaprojektowanej i wykonanej w Zakładzie Elektrodynamiki i Układów Elektromaszynowych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Badania przeprowadzono na stanowisku umożliwiającym realizację badań maszyn elektrycznych w stanach



Rys. 11. Oscylogram prądów pasmowych (i_{ph}) badanej maszyny SRM zarejestrowany przy prędkości $n = 2250 \text{ obr./min}$



Rys. 12. Oscylogram prądu źródła (i_{dc}), prądu pasmowego (i_{ph}) oraz napięcia pasmowego (u_{ph}) zarejestrowany przy prędkości $n = 1890 \text{ obr./min}$ dla sterowania jednopulsowego




Rys. 13. Oscylogram prądu źródła (i_{dc}), prądu pasmowego (i_{ph}) oraz napięcia pasmowego (u_{ph}) zarejestrowany dla sterowania PWM $\delta = 50\%$, przy prędkości $n = 1750 \text{ obr./min}$

statycznych i dynamicznych. W ramach prowadzonych prac wyznaczono charakterystyki mechaniczne oraz sprawności badanego napędu w stanach statycznych dla pracy silnikowej. Zarejestrowano również oscylogramy prądów i napięć dla podstawowych metod sterowania maszyny SRM. Obserwując wyniki badań, widać, że najwyższą sprawność napęd uzyskał przy kącie załączenia równym $\theta_{on} = -5^\circ$ i napięciu zasilającym $U_{dc} = 48$ V. Przejście sterownika w tryb PWM powoduje znaczące ograniczenie sprawności.

Literatura

- [1] KRISHNAN R.: *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. CRC Press 2001.
- [2] BOGUSZ P.: *Projekt i realizacja stanowiska do badań napędów dla lekkich pojazdów elektrycznych*. „Przegląd Elektrotechniczny” 1/2014.

- [3] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Projekt silnika reluktancyjnego przełączalnego 8/6, przeznaczonego do napędu małego mobilnego pojazdu elektrycznego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 66, 2012.

 dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.edu.pl
dr hab. inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.edu.pl
dr hab. inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

artykuł recenzowany