

Projekt i realizacja stanowiska do badań napędów dla lekkich pojazdów elektrycznych

Streszczenie. W niniejszej pracy przedstawiono strukturę zaprojektowanego i wykonanego stanowiska do badań maszyn elektrycznych przeznaczonych do napędu lekkich pojazdów elektrycznych. Celem budowy tego stanowiska była możliwość wyznaczenia charakterystyk statycznych badanych maszyn oraz testowanie algorytmów sterowania. Wykonane stanowisko umożliwia również zadawanie na wał maszyny momentu symulującego jazdę samochodem. Zaproponowano również algorytm zautomatyzowanego wyznaczania charakterystyk statycznych badanych maszyn. Zamieszczono przykładowe wyniki badań eksperymentalnych w postaci charakterystyk mechanicznych i sprawności napędów oraz oscylogramów prądów i prędkości.

Abstract. In paper was presented a test stand designed and made to testing of electric drives intended to light electric vehicles. The possibility of static characteristics determining and control algorithms testing was the aim of this stand construction. The made test stand allows simulate a car running. An algorithm of automated static characteristics designation of tested electric drives was proposed. Exemplary results of studies (mechanical and efficiency characteristics) and waveforms of currents and speed of tested drive were presented. (**The laboratory stand for testing of light electric vehicles drives - design and implementation**).

Słowa kluczowe: stanowisko badawcze, maszyna reluktancyjna przełączalna, bezszczotkowa maszyna prądu stałego, pojazd elektryczny
Keywords: test stand, switched reluctance machine, brushless dc machine, electric vehicle.

doi:10.12915/pe.2014.01.05

Wstęp

Obecnie wielu producentów samochodów wprowadziło do sprzedaży pojazdy z napędem hybrydowym lub elektrycznym. Pomimo tego prowadzone są intensywne prace nad rozwojem tego typu napędów. Badania polegają między innymi na zastosowaniu nowych konstrukcji maszyn elektrycznych, układów wielomaszynowych, układów zasilających, algorytmów sterowania czy źródeł zasilania [1]-[3]. Zaletą pojazdów o napędzie elektrycznym jest brak emisji spalin, dlatego mogą się one poruszać po centrach miast nie zanieczyszczając środowiska naturalnego. W celu testowania nowo zaprojektowanych układów napędowych, konieczne jest zastosowanie stanowiska badawczego [4], [5]. W Katedrze Elektrodynamiki i Układów Elektromaszynowych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej w ramach realizowanego projektu badawczego zaprojektowano i wykonano dwa różne napędy przeznaczone dla lekkich pojazdów elektrycznych o mocy 3,3kW i napięciu 48V. Jeden z maszyną reluktancyjną przełączalną (Switched Reluctance Machine - SRM) natomiast drugi z maszyną bezszczotkową prądu stałego z magnesami trwałymi (Brushless DC Machine - BLDC). W celu sprawdzenia osiągniętych wyników wykonanych napędów, konieczne stało się zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego. Wymogi jakie powinno spełniać takie stanowisko, oprócz możliwości wyznaczenia charakterystyk napędu w stanie ustalonym, to możliwość pracy czterokwadrantowej, która pozwala na symulację rzeczywistej jazdy (przyspieszanie, jazda ze stałą prędkością, hamowanie odzyskowe).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie struktury i zasady działania zaprojektowanego i wykonanego stanowiska badawczego przeznaczonego do badań napędów elektrycznych lekkich pojazdów elektrycznych oraz przedstawienie wybranych wyników badań laboratoryjnych.

Model matematyczny ruchu pojazdu

Ogólne równanie dynamiki układu napędowego można zapisać w postaci:

$$(1) \quad T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega$$

gdzie: T_e – moment wytwarzany przez maszynę elektryczną, T_L – moment obciążenia, ω – prędkość kątowna wirowania wału, J – moment bezwładności pojazdu sprowadzony na wał silnika napędowego, D – współczynnik tarcia lepkiego w ruchu obrotowym.

Pojazd elektryczny jest złożoną strukturą napędową, a moment obciążenia zależy od wielu czynników. Przykładowe równania siły statycznej działającej na koło przy ustalonej prędkości oraz momentu obciążenia reprezentują zależności:

$$(2) \quad F_L = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 + C_r m_v g + m_v g \sin \beta$$

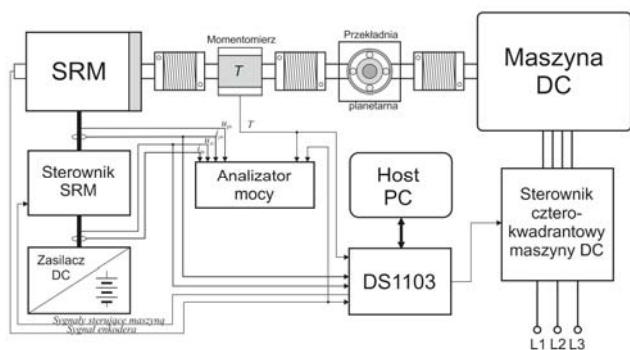
$$(3) \quad T_L = \frac{F_L r_d}{i \eta}$$

przy czym: m_v – masa pojazdu, g – przyspieszenie ziemskie, A – powierzchnia czołowa pojazdu, C_d – współczynnik oporu powietrza, C_r – współczynnik oporu tocznienia, ρ – gęstość powietrza, v – prędkość pojazdu, r_d – promień dynamiczny koła, β – kąt nachylenia drogi, η – sprawność układu przeniesienia napędu, i – przekładnia układu przeniesienia napędu.

Struktura blokowa stanowiska

Schemat blokowy opracowanego stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko to składa się z: badanej maszyny, momentomierza, przekładni planetarnej, maszyny prądu stałego, sterownika badanej maszyny, źródła zasilania badanej maszyny, czterokwadrantowego sterownika maszyny prądu stałego, karty prototypującej DS1103, komputera PC, analizatora mocy. W celu dostosowania prędkości obrotowych badanej maszyny do maszyny DC zastosowano przekładnię planetarną o przełożeniu 1:3. Sygnał z momentomierza podawany jest zarówno do analizatora mocy, jak i do przetwornika analogowo-cyfrowego karty DS1103. Zastosowanie analizatora mocy typu Yokogawa WT1800 posiadającego sześć izolowanych modułów pomiarowych oraz moduł silnikowy daje możliwość jednoczesnego pomiaru wszystkich prądów i napięć badanej maszyny oraz jej momentu i prędkości. Dzięki takiemu zestawieniu możliwy jest pomiar mocy wejściowej i wyjściowej zarówno samego silnika jak i sterownika. Przedstawiona na rysunku 1 konfiguracja stanowiska daje możliwość wyznaczenia

charakterystyk statycznych badanego napędu, jak również samej maszyny elektrycznej oraz sterownika. Zastępując analizator mocy oscyloskopem lub rejestratorem oscyloskopowym oraz zmieniając algorytm sterowania stanowiskiem możliwa jest symulacja pracy napędu w stanach dynamicznych.



Rys.1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Charakterystyka techniczna stanowiska

Głównym modulem sterującym stanowiska jest karta DS1103 zawierająca między innymi: trzy procesory sygnałowe (zmiennoprzecinkowy PowerPC 750GX taktowany zegarem 1GHz oraz stałoprzecinkowe TMS320F240 i SAB80C164), trzydzieści sześć wejść analogowo-cyfrowych (w tym 20 szesnastobitowych i 16 dziesięciobitowych), osiem wyjść cyfrowo-analogowych (16-bitowych), siedem wejść enkoderowych, trzydzieści dwie cyfrowe linie wejścia/wyjścia oraz moduł komunikacji CAN.

Sterownikiem wykonawczym maszyny DC jest cyfrowy czterokwadrantowy układ Mentor zasilany z sieci trójfazowej prądu przemiennego o napięciu 400V. Sterownik ten posiada wewnętrznie zaimplementowane algorytmy zadawania i stabilizacji prędkości lub momentu zasilanej maszyny. Ponadto wyposażony jest w programowalny sterownik logiczny (PLC - Programmable Logic Controller) umożliwiający automatyzację procesu sterowania, a w przypadku opisywanego stanowiska daje możliwość sterowania momentem lub prędkością z karty DS1103. Funkcjonalność karty DS1103 wykorzystano również do sterowania badanymi silnikami SRM i BLDC implementując algorytmy sterowania ich pracą.

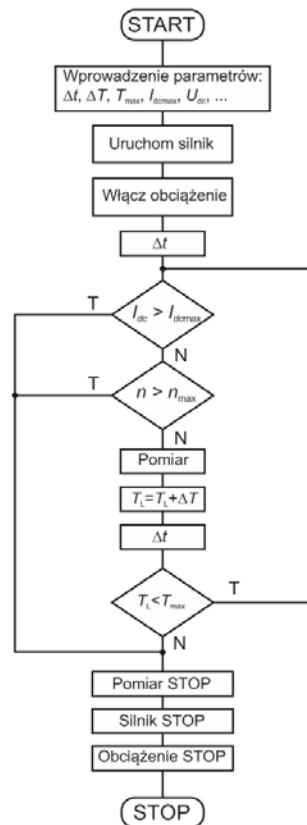
Algorytmy sterowania pracą stanowiska

Sterowanie w stanach statycznych

Ponieważ maszyna SRM pracująca jako silnik posiada charakterystykę mechaniczną zbliżoną do silnika szeregowego prądu stałego, nagłe odciążenie wału maszyny powoduje gwałtowny wzrost prędkości. Ze względu na ograniczenia prędkości maksymalnej maszyny obcowzbudnej prądu stałego jak również przekładni planetarnej, konieczne jest zastosowanie ograniczenia prędkości maksymalnej napędu n_{max} . Źródło zasilania badanego napędu również ma ograniczoną obciążalność, dlatego należy wprowadzić zabezpieczenie przed nadmiernym poborem prądu. W przypadku badanego napędu z silnikiem SRM wprowadzono dwa zabezpieczenia: od przekroczenia maksymalnego prądu źródła zasilania oraz od przekroczenia maksymalnej prędkości. Podczas pomiaru charakterystyk mechanicznych badanego silnika zakłada się, że moment obciążenia będzie zwiększany lub zmniejszany w stałych odstępach czasowych Δt o wartość ΔT , aż do osiągnięcia wartości nastawionej T_{max} lub przekroczenia maksymalnej wartości prądu źródła I_{dcmax} .

W celu zautomatyzowania pomiaru charakterystyk mechanicznych napędu, opracowano algorytm ich

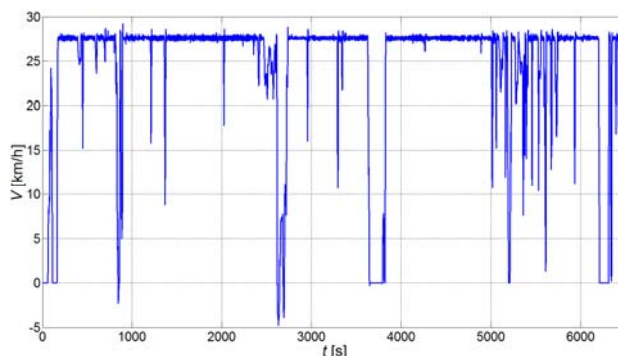
wyznaczania. Strukturę tego algorytmu przedstawiono na rysunku 3. Przed rozpoczęciem pomiaru należy ustawić parametry sterujące silnikiem (np. napięcie zasilające U_{dc}) oraz parametry sterujące procesem obciążania (przyrost momentu obciążenia ΔT , krok czasowy Δt pomiędzy inkrementacją lub dekrementacją momentu). Wartość czasu Δt zależna jest od mechanicznej stałej czasowej napędu oraz od przyrostu momentu ΔT . Czas Δt należy ustawić tak, aby po zmianie momentu obciążenia prędkość badanego napędu ustaliła się przed wykonaniem pomiaru. Im będzie mniejszy przyrost momentu ΔT , tym krok czasowy Δt może być krótszy.



Rys.2. Algorytm wyznaczania charakterystyk mechanicznych SRM na proponowanym stanowisku badawczym

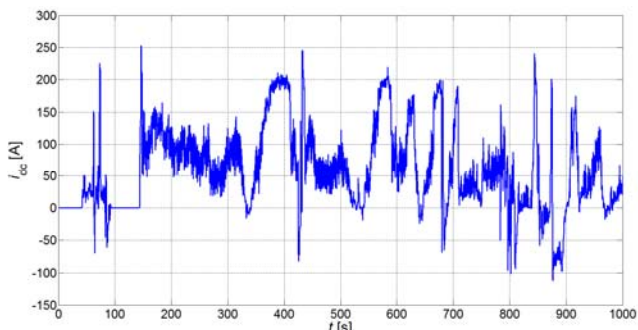
Sterowanie w stanach dynamicznych

Praca napędu w pojeździe elektrycznym charakteryzuje się dużą zmianą prędkości obrotowej silnika napędowego. Przykładowy wykres zmian prędkości zarejestrowany w warunkach rzeczywistych dla lekkiego pojazdu elektrycznego przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Przykładowy przebieg prędkości dla ruchu lekkiego pojazdu elektrycznego

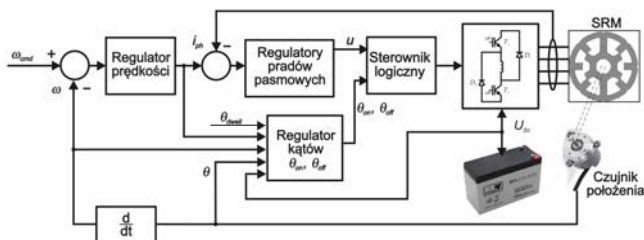
W celu zwiększenia zasięgu pojazdu, standardem jest odzyskiwanie energii podczas jego hamowania. Dlatego maszyna elektryczna musi również pracować jako prądnica. Przykładowy przebieg prądu płynącego pomiędzy akumulatorem, a napędem podczas jazdy pojazdu elektrycznego z funkcją odzyskiwania energii przedstawiono na rysunku 4. W przedziałach, w których prąd przyjmuje wartość ujemną następuje hamowanie odzyskowe.



Rys.4. Przykładowy przebieg prądu akumulatora podczas jazdy pojazdem elektrycznym

Aby zasymulować na stanowisku badawczym stan jazdy samochodem, można do tego celu wykorzystać przebiegi prędkości zarejestrowane w pojeździe rzeczywistym. Sterownik napędu pojazdu elektrycznego posiada zewnętrzną pętlę sprzężenia zwrotnego od prędkości pojazdu, a także wewnętrzne pętle prądów pasmowych od których zależy wytwarzany moment.

Strukturę blokową napędu pojazdu elektrycznego z maszyną SRM przedstawiono na rysunku 5. Sterownik maszyny napędzającej musi posiadać możliwość pracy czterokwadrantowej, aby możliwe było również hamowanie ze zwrotem energii.



Rys.5. Schemat blokowy napędu pojazdu elektrycznego z maszyną SRM

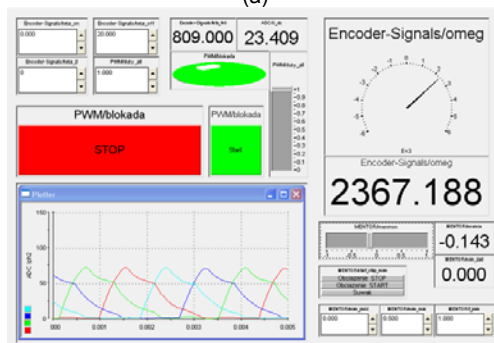
Moment obciążenia T_L można zadać korzystając z zależności (3). W przypadku, gdy znane są dokładne modele matematyczne maszyny napędzającej i pojazdu oraz zarejestrowane są przebiegi prędkości pojazdu i prądu pobieranego z akumulatorów - możliwe jest przybliżone estymowanie momentu obciążenia.

Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla maszyn: czteropasmowej SRM o konfiguracji 8/6 oraz trójpasmowej BLDC. Maszyny posiadały następujące parametry: napięcie zasilające $U_N=48V$, moc $P_N=3,3kW$ przy $n_N=4500obr/min$ (SRM) i $n=4300obr/min$ (BLDC). Widok stanowiska laboratoryjnego i pulpitu sterowniczego przedstawiono na rysunku 6. Oprogramowanie realizujące algorytmy sterujące na karcie DS1103 zostały napisane w języku C. Przykładowy pulpit sterowniczy przedstawiony na rysunku 6b zawiera elementy sterujące pracą napędu SRM (lewa strona) oraz momentu obciążenia (prawa strona).



(a)

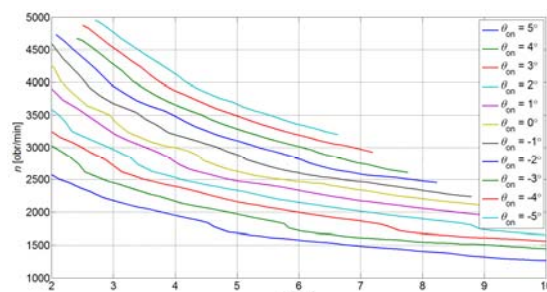


(b)

Rys.6. Stanowisko badawcze: a) zestaw maszynowy, b) ekran pulpitu sterowniczego karty DS1103

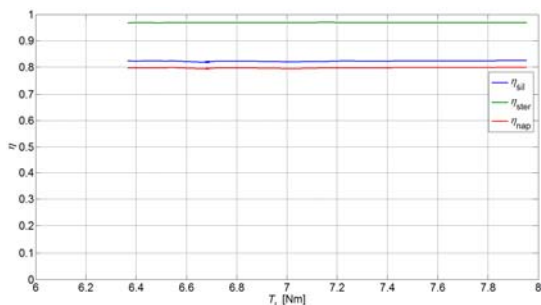
Charakterystyki statyczne

Do wyznaczenia charakterystyk sprawności silnika, sterownika i napędu oraz charakterystyk mechanicznych zastosowano algorytm przedstawiony na rysunku 2. Charakterystyki napędu SRM wyznaczono dla pracy w układzie otwartym przy różnych kątach załączenia θ_{on} zmieniających się w zakresie od 5° do -5° z krokiem co jeden stopień oraz przedziale zasilania $\theta_{dwell}=20^\circ$.



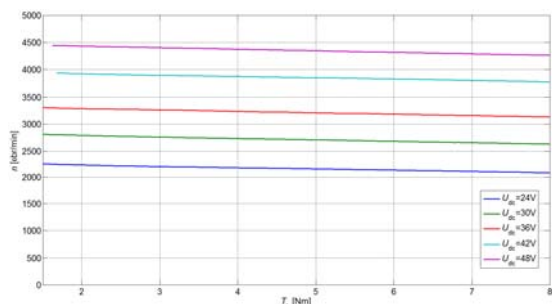
Rys.7. Charakterystyki mechaniczne SRM 8/6 dla różnych kątów załączenia ($\theta_{on} = \text{var}$) i przedziale przewodzenia $\theta_{dwell}=20^\circ$

Napięcie zasilania obniżono do $U_{dc}=36V$, gdyż przy pracy napędu w układzie otwartym wyższe napięcie powodowało wzrost prędkości powyżej dopuszczalnej prędkości przekładni i maszyny prądu stałego. Na rysunku 7 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych SRM zarejestrowanych dla różnych kątów załączenia. Wyraźny wzrost prędkości napędu występuje wraz z wyprzedzeniem załączenia zasilania uzwojenia. Przy kącie $\theta_{on}=-5^\circ$ osiągnięto najwyższą moc na wale przy założeniu, że wartość maksymalna prądu źródła nie przekroczy $I_{dcmax}=110A$. Dalsze wyprzedzanie kąta załączenia powoduje przekroczenie tej wartości. Na rysunku 8 przedstawiono charakterystyki sprawności silnika SRM 8/6 (η_{sil}), sterownika (η_{ster}) i sprawności napędu (η_{nap}) dla kąta załączenia $\theta_{on}=-5^\circ$ i przedziału zasilania $\theta_{dwell}=20^\circ$, przy napięciu zasilającym $U_{dc}=48V$ w wąskim zakresie zmian momentu obciążenia (co wynikało z ograniczeń stanowiska i właściwości SRM).

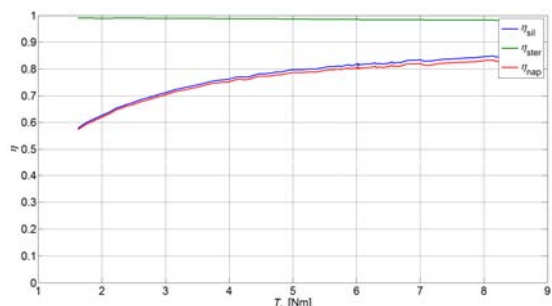


Rys.8. Charakterystyki sprawności SRM, sterownika i napędu dla $U_{dc}=48V$, kąta załączenia $\theta_{on} = -5^\circ$ i przedziale przewodzenia $\theta_{dwell}=20^\circ$

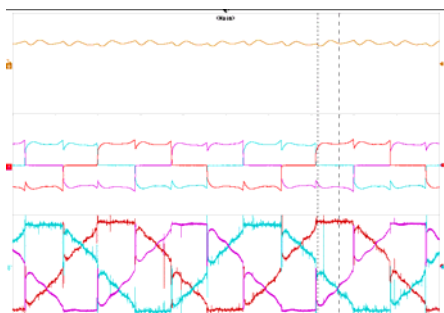
Na rysunku 9 przedstawiono charakterystyki mechaniczne silnika BLDC zarejestrowane dla różnych napięć zasilających. Natomiast na rysunku 10 przedstawiono zależności sprawności sterownika (η_{ster}), silnika (η_{sil}) i całego napędu (η_{nap}) od momentu obciążenia zarejestrowane przy napięciu $U_{dc}=48V$. Przykładowy oscylogram przebiegów prądu źródła, prądów pasmowych oraz napięć międzypasmowych silnika BLDC przedstawiono na rysunku 11.



Rys.9. Charakterystyki mechaniczne silnika BLDC dla różnych napięć zasilających



Rys.10. Charakterystyki sprawności silnika BLDC, sterownika i napędu wyznaczona przy napięciu $U_{dc}=48V$

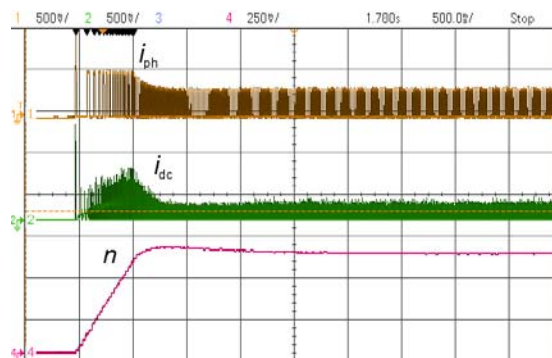


Rys.11. Przebiegi: prądu źródła (górny), prądów pasmowych (środkowe), napięć międzypasmowych (dolne) silnika BLDC przy $U_{dc}=48V$

Stany dynamiczne

Implementując w sterowniku SRM strukturę sterowania przedstawioną na rysunku 5 wykonano rejestracje stanów

dynamicznych napędu. Na rysunku 12 przedstawiono przykładowy oscylogram prądu pasmowego (i_{ph}), prądu źródła (i_{dc}) oraz prędkości (n) zarejestrowane podczas rozruchu maszyny SRM dla prędkości zadanej $n_{ref}=1500\text{obr/min}$.



Rys.12. Oscylogram prądu pasmowego (i_{ph}), prądu źródła (i_{dc}) i prędkości (n) podczas rozruchu SRM

Wnioski

Przedstawione w niniejszej pracy stanowisko umożliwia badanie napędów elektrycznych o mocy do 4kW i prędkości do 4500obr/min. W celu zautomatyzowania badań opracowano algorytm wyznaczania charakterystyk mechanicznych statycznych badanych napędów. Stanowisko umożliwia również badanie napędów ze zwrotem energii do źródła zasilania (praca prądnicowa). Struktura stanowiska, które zawiera między innymi kartę DS1103 (sterującą badanym silnikiem oraz jego momentem obciążenia) oraz po stronie maszyny prądu stałego sterownik czterokwadrantowy Mentor umożliwia symulację obciążenia napędu zbliżoną do jazdy w warunkach rzeczywistych.

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] R. Hodkinson, J. Fenton,.: *Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design*, Butterworth-Heinemann 2001
- [2] I. Husain: *Electric and hybrid vehicles - design fundamentals*, CRC 2003
- [3] Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop: *Praca prądnicowa maszyny reluktancyjnej przełączalnej w zakresie sterowania prądowego*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10/2005, str. 35-40
- [4] R. Pałka, S. Szkolny: *Stanowisko do badania napędów elektrycznych z komputerowym systemem pomiarowym*, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 100/2013 cz. I, str. 83-88
- [5] D. Adamczyk, M. Michna, M. Ronkowski: *Uniwersalny model symulacyjny układu napędowego prototypu samochodu elektrycznego „ELV001”*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 66, 2012, str. 321-325

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