

Piotr Bogusz
Mariusz Korkosz
Jan Prokop
Politechnika Rzeszowska

PROJEKT SILNIKA PRĄDU STAŁEGO Z KOMUTACJĄ ELEKTRONICZNĄ PRZEZNACZONEGO DO NAPĘDU LEKKIEGO POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

PROJECT OF BRUSHLESS DC MOTOR TO DRIVE OF LIGHT ELECTRIC VEHICLE

STRESZCZENIE: W ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie pojazdami elektrycznymi. Dotychczas jako napęd stosowano silniki komutatorowe prądu stałego. W ostatnim czasie prowadzone są próby zastąpienia dotychczasowego napędu szczotkowego napędem bezszczotkowym. Autorzy w ramach realizowanego projektu badawczego zaproponowali rozwiązania alternatywne w postaci silników z komutacją elektroniczną. Jednym z takich silników jest bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi. Na podstawie modelu polowego określono rozmiary geometryczne projektowanych magnesów pod kątem ograniczenia amplitudy momentu zaczepowego przy jednocześnie dużej wartości momentu elektromagnetycznego. Przebiegi czasowe i charakterystyki ruchowe projektowanego silnika wyznaczono na bazie modelu polowo-obwodowego. Wyznaczono możliwy do uzyskania zakres pracy ze stałą mocą uzyskany poprzez adaptację metody sterowania silnika BLDC. Na podstawie wyników obliczeń wykonano dokumentację projektową silnika. Silnik aktualnie znajduje się w fazie wykonawczej.

Abstract: An interest in electric vehicles increased significantly in recent years. The commutator DC motors were used so far. The attempts to replace brush drive with brushless drive were recently made. Authors within a framework of research project proposed motors with an electronic commutation as alternative solution. One such motor is brushless DC motor with permanent magnets. Geometrical sizes of designed magnets were specified on the base of a field model to limit an amplitude of cogging torque while maintaining a large value of an electromagnetic torque. Timing and motion characteristics of designed motor were designed on the base of a field-circuit model. A possible to realize range of work with constant power was determined. It was achieved by adaptation the a control method of BLDC motor. The project documentation was done on the base of calculations results. The motor is actually in the final phase of executive.

Słowa kluczowe: lekki pojazd elektryczny, bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi
Keywords: light electric vehicle, brushless DC motor with permanent magnet

1. Wstęp

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie pojazdami elektrycznymi. Przykładami lekkich pojazdów elektrycznych są, np. wózki golfowe lub wózki do przewozu osób w strefach, gdzie istnieje zakaz wjazdu pojazdów z silnikami spalinowymi. Dotychczas jako napęd powszechnie stosowano silniki komutatorowe prądu stałego. W ostatnim czasie do napędu pojazdów elektrycznych wprowadzane są silniki indukcyjne [1]-[2], silniki z magnesami trwałymi [3]-[5] oraz reluktancyjne przełączalne [6]-[8].

Autorzy w ramach realizowanego projektu badawczego zaproponowali własne rozwiązania maszyn z komutacją elektroniczną typu SRM i BLDC. Niniejsza praca dotyczy jednego z proponowanych rozwiązań, tj. silnika prądu stałego z magnesami trwałymi. W celu ograniczenia kosztów wykonania silnika autorzy zaproponowali zastosowanie obwodu magnetycznego stojana z seryjnie produkowanego silnika indukcyjnego. Z tego też względu prace projektowe ograniczyły się do doboru odpowiedniego uzwojenia stojana, a na wirniku doboru liczby par magnesów, ich wymiarów geometrycznych oraz parametrów

magnetycznych. Na podstawie modelu polowego określono wymiary geometryczne projektowanych magnesów pod kątem ograniczenia amplitudy momentu zaczepowego przy jednocześnie dużej wartości momentu elektromagnetycznego. Przebiegi czasowe i charakterystyki ruchowe projektowanego silnika wyznaczono na bazie modelu polowo-obwodowego. Wyznaczono możliwy do uzyskania zakres pracy ze stałą mocą uzyskany poprzez adaptację metody sterowania silnika BLDC zaprezentowanej w [9]. Na podstawie wyników obliczeń wykonano dokumentację projektową silnika. Silnik aktualnie znajduje się w fazie wykonawczej.

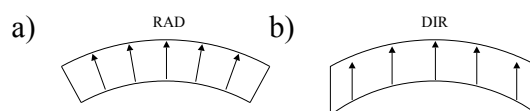
2. Wymagania układu napędowego i dobór wymiarów geometrycznych projektowanego silnika

Projektowany silnik o 36 żłobkach stojana jest przeznaczony do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego. Projektowanemu silnikowi postawiono następujące wymagania:

- napięcie zasilające silnik 48 V,
- moc na wale silnika przy prędkości 4500 obr/min równa 3.3 kW,
- wartość średnia prądu pobieranego ze źródła nie większa niż 130A,
- minimalny moment rozruchowy nie mniejszy niż 13 Nm bez przekraczania dopuszczalnej wartości prądu źródła,
- sprawność wypadkowa dla pracy z mocą znamionową przy prędkości 4500 obr/min nie mniejsza niż 82%.

Założono również, że zastosowane zostaną magnesy neodymowe klasy N42SH montowane powierzchniowo. Uwzględniając wymagania co do sposobu montażu wirnika założono, że minimalna wartość szczeliny powietrznej nie powinna być mniejsza niż $g=1.0$ mm. Z uwagi na ograniczanie częstotliwości przełączeń zdecydowano się zastosować dwie pary magnesów ($p=2$). W projekcie silnika rozpatrywano możliwość zastosowania dwóch kształtów magnesów trwałych (rys.1) oznaczonych jako:

- RAD – magnesowane promieniowo (rys.1a),
- DIR – magnesowane polem równoległym (rys.1b).



Rys. 1. Analizowane kształty magnesów trwałych

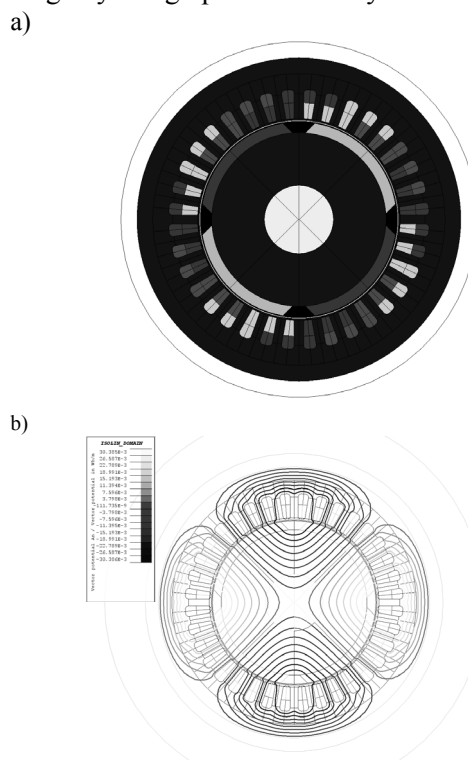
Prace projektowe prowadzono pod kątem dobrania wymiarów geometrycznych magnesów (grubość i rozpiętość kątowna) oraz doboru odpowiedniego uzwojenia. Rozpatrywano trzy warianty możliwych do zastosowania uzwojeń [10]:

- jednowarstwowe,
- dwuwarstwowe,
- jedno-dwuwarstwowe.

Po dokonaniu wstępnej analizy poszczególnych rozwiązań zdecydowano się zastosować uzwojenie dwuwarstwowe o poskoiku $y=7$ z czterema gałęziami równoległymi ($a=4$).

3. Obliczenia polowe

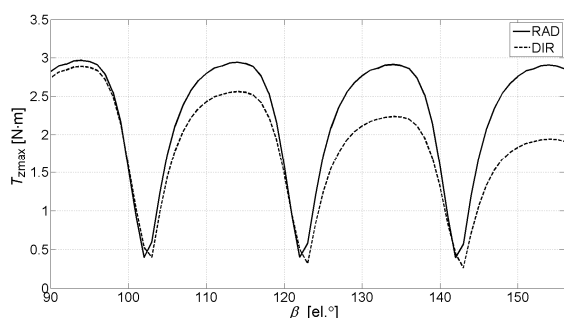
Na rysunku 2a pokazano geometrię projektowanego silnika utworzoną w programie FEM. Przykładowy rozkład izolinii strumienia magnetycznego pokazano na rysunku 2.b.



Rys. 2. Geometria silnika BLDC (a) oraz przykładowy rozkład izolinii strumienia magnetycznego (b)

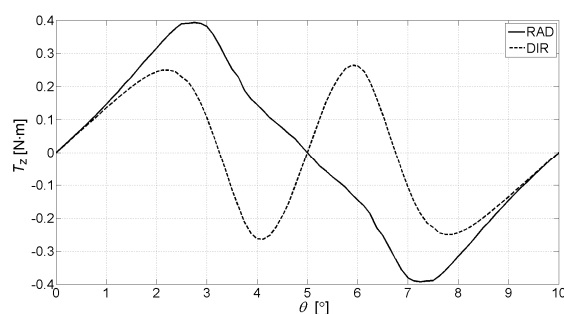
Na rysunku 3 pokazano zależności wartości maksymalnych momentu zaczepowego T_{zmax} w

funkcji kąta elektrycznego rozpiętości magnesu trwałego β dla dwóch analizowanych kształtów magnesów trwałych.



Rys.3. Zależności wartości maksymalnych momentu zaczepowego T_{zmax} w funkcji elektrycznego kąta rozpiętości magnesu trwałego β

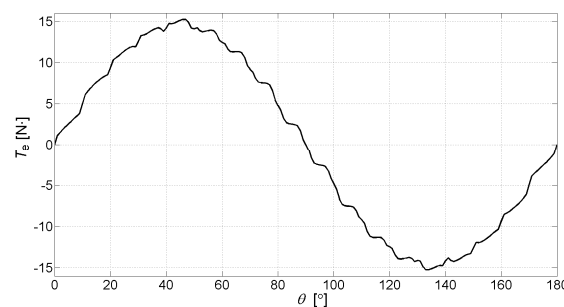
Najmniejszą wartość amplitudy momentu zaczepowego uzyskano dla magnesów z polem równoległym DIR przy kącie $\beta=143^\circ$. Nieznacznie większą amplitudę momentu zaczepowego uzyskano w przypadku magnesów namagnesowanych promieniowo (RAD) przy kącie $\beta=142^\circ$. W obu przypadkach można stwierdzić bardzo dużą czułość amplitudy momentu zaczepowego na zmianę wartości kąta rozpiętości magnesu trwałego β . Na rysunku 4 pokazano zależności momentu zaczepowego w funkcji kąta położenia wirnika θ dla przypadków optymalnych z punktu widzenia minimalnej wartości amplitudy momentu zaczepowego T_{zmax} oraz przy zachowaniu możliwie jak największej wartości momentu elektromagnetycznego T_e .



Rys.4. Zależność momentu zaczepowego T_z w funkcji kąta położenia wirnika θ dla wybranych kątów rozpiętości magnesu trwałego

Do dalszej analizy wybrano magnes namagnesowany polem równoległym (DIR) o kącie $\beta=143^\circ$.

Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ silnika z magnesem typu DIR o kącie $\beta=143^\circ$ przy prądzie $I=130A$ pokazano na rysunku 5.

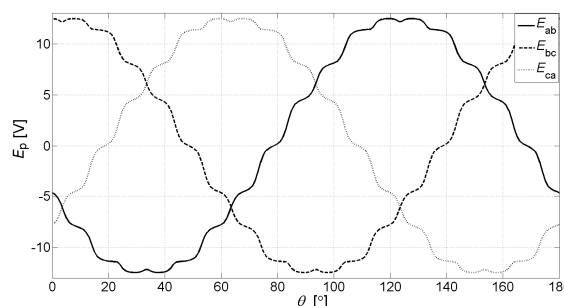


Rys.5. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla $I=130A$

Stała momentowa silnika k_T wynosi 0,107831 Nm/A.

4. Wyznaczanie napięć indukowanych

Na podstawie modelu połowo-obwodowego wyznaczono zależności napięć indukowanych stałą napięciową silnika k_V . Zależności przewodowych napięć indukowanych w funkcji kąta położenia wirnika θ pokazano na rysunku 6.



Rys.6. Zależności przewodowych napięć indukowanych E_p w funkcji kąta położenia wirnika θ projektowanego silnika BLDC przy prędkości $n=1000\text{obr/min}$

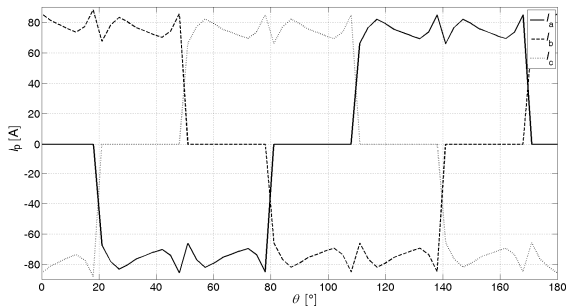
Na podstawie wyznaczonych zależności napięć indukowanych pokazanych na rysunku 6 określono stałą napięciową silnika k_V , która wynosi 11.98 V/1000 obr/min.

5. Wyznaczanie prądów i momentu elektromagnetycznego

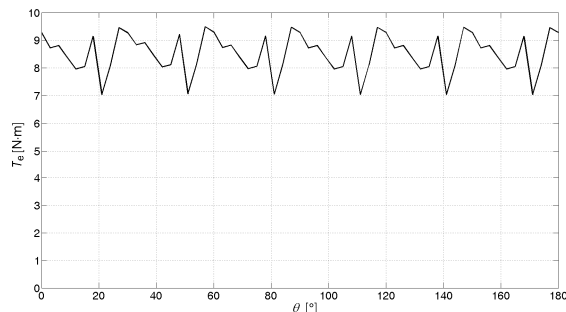
Uzyskana stała napięciowa silnika k_V nie pozwala na osiągnięcie zakładanej prędkości maksymalnej silnika równej 4500 obr/min. Wymaganą moc na wale równą 3.3kW silnik uzyskuje przy prędkości $n=3800$ obr/min.

Na rysunkach 7 - 8 pokazano zależności prądów przewodowych I_p (rys.7) oraz momentu elektromagnetycznego T_e (rys.8) w funkcji kąta

położenia wirnika θ przy prędkości obrotowej $n=3800$ obr/min.

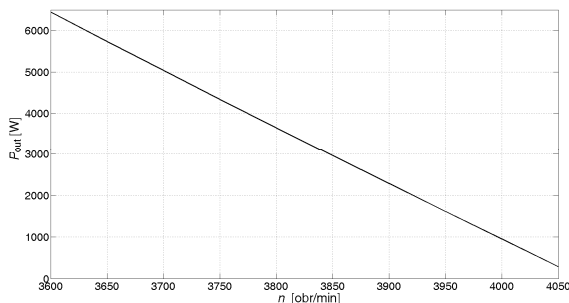


Rys. 7. Zależności prądów przewodowych I_p w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prędkości obrotowej $n=3800$ obr/min

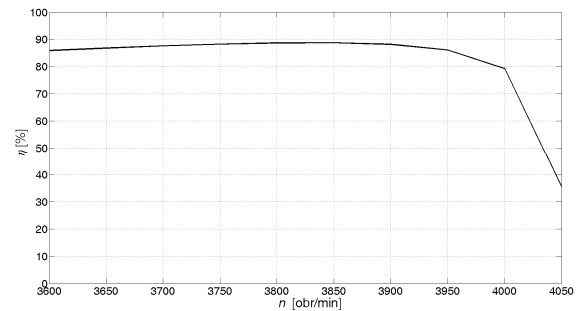


Rys. 8. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prędkości obrotowej $n=3800$ obr/min

Na rysunku 9 pokazano zależność mocy wyjściowej P_{out} silnika, natomiast na rysunku 10 pokazano sprawność wypadkową w funkcji prędkości obrotowej n (charakterystyka naturalna silnika). Zależności wyznaczone dla standardowych parametrów sterowania konfiguracji 36/4, tj. kąta załączenia $\theta_{on}=0^\circ$ i kąta przewodzenia $\Delta\theta=30^\circ$.



Rys. 9. Zależność mocy wyjściowej P_{out} w funkcji prędkości obrotowej n

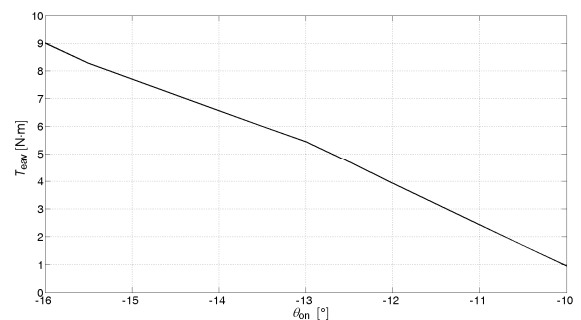


Rys. 10. Zależność sprawności wypadkowej η w funkcji prędkości obrotowej n

Prędkość $n=3600$ obr/min jest prędkością graniczną przy której na wale silnika można uzyskać krótkotrwale dwukrotne zwiększenie mocy wyjściowej. Maksymalna sprawność wypadkowa silnika wynosi 89%.

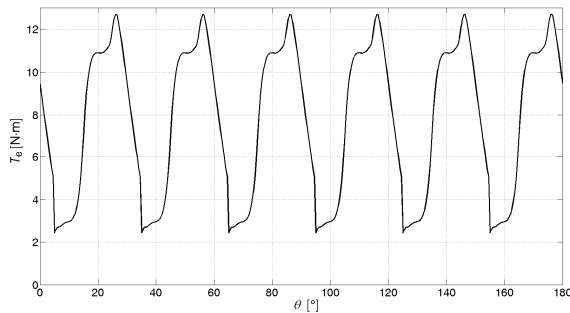
6. Zmiana kąta załączenia jako metoda poszerzania zakresu stałej mocy

W silnikach reluktancyjnych przełączalnych zakres stałej mocy silnika reguluje się poprzez zmianę kąta załączenia θ_{on} . Ma ona na celu utrzymanie amplitudy prądu na określonym poziomie, co zapewnia stałą moc na wale silnika. Zmiana kąta załączenia θ_{on} może zostać zaimplementowana również w silniku BLDC. Autorzy stosowali tę metodę w silniku BLDC w celu utrzymania wymaganej mocy na wale silnika przy zmieniającej się wartości napięcia zasilającego (zasilanie bateryjne) [9]. W analizowanym przypadku kąt załączenia θ_{on} zmieniano w taki sposób aby utrzymać stałą wartość mocy wyjściowej przy prędkości wyższej niż $n=3800$ obr/min. Na rysunku 11 pokazano wpływ kąta załączenia θ_{on} na wartość średnią wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_{eav} przy prędkości $n=4300$ obr/min.



Rys. 11. Zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego T_{eav} w funkcji kąta załączenia θ_{on} przy prędkości $n=4300$ obr/min

Wymaganą moc na wale silnik osiąga przy kącie załączenia $\theta_{on}=-15^{\circ}$. Zależność wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta załączenia wirnika θ przy kącie załączenia $\theta_{on}=-15^{\circ}$ pokazano na rysunku 12.



Rys.12. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prędkości $n=4300\text{obr/min}$ oraz kącie załączenia $\theta_{on}=-15^{\circ}$

Porównując zależność momentu elektromagnetycznego uzyskanego przy zerowym kącie załączenia ($\theta_{on}=0^{\circ}$) w warunkach znamionowych (rys.8) z momentem uzyskanym przy zastosowaniu zmiany kąta załączenia ($\theta_{on}=-15^{\circ}$) pokazanym na rysunku 12 widać znaczący wzrost tętnień momentu. Następuje też zmniejszenie sprawności wypadkowej do wartości 80% (redukcja o 9%).

7. Prototyp silnika

Na rysunkach 13-14 pokazano wykonany wirnik silnika (rys.13) oraz uzwojony stojan silnika (rys.14).



Rys.13. Widok wykonanego wirnika silnika BLDC



Rys.14. Widok uzwojonego stojana silnika BLDC

Dalsze prace badawcze będą prowadzone w warunkach laboratoryjnych. Będą miały one na celu weryfikację założeń projektowych. Dodatkowo zostaną przeprowadzone badania porównawcze pomiędzy trzema silnikami, tj. silnikiem indukcyjnym, silnikiem reluktancyjnym przełączalnym oraz silnikiem prądu stałego z magnesami trwałymi.

8. Wnioski

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań silnika prądu stałego z magnesami trwałymi przeznaczonego do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego. Zaprojektowany silnik ma być docelowo zamontowany w miejsce dotychczasowego silnika indukcyjnego napędzającego lekki pojazd elektryczny. Wymusiło to konieczność uwzględnienia sposobu montażu samego silnika oraz konieczność zabezpieczenia montowanych powierzchniowo magnesów trwałych. W silniku został zastosowany stojan maszyny indukcyjnej. Na bazie obliczeń polowych i polowo-obwodowych wyznaczono stałą prądową i napięciową silnika. Określona została prędkość silnika przy której jest osiągana wymagana moc na wale. Jest to prędkość niższa niż wymagana przez układ napędowy. Zaproponowana została metoda zmiany kąta załączenia poszczególnych łączników w układzie energoelektronicznym dla uzyskania pracy silnika ze stałą mocą. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie wymaganej mocy na wale silnika przy prędkości 4500 obr/min. Jednak okupione jest to znacznym wzrostem tętnień momentu elektromagnetycznego oraz pogorszeniem sprawności wypadkowej układu napędowego.

8. Literatura

- [1] Pellegrino, G. ; Vagati, A. ; Boazzo, B. ; Guglielmi, P.: *Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.: 48 , Issue: 6, 2012, pp. 2322 – 2332
- [2] Tabbache, B. ; Kheloui, A. ; Benbouzid, M.E.H.: *An Adaptive Electric Differential for Electric Vehicles Motion Stabilization*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.: 60 , Issue: 1, 2011, pp. 104 - 110
- [3] Lee B.K., Ehsani M.S.: *Advanced BLDC motor drive for low cost and high performance propulsion system in electric and hybrid vehicles*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2001, pp.246-251
- [4] Bai L.: *Electric drive system with BLDC motor*, International Conference on Electric Information and Control, 2011, pp.359-363
- [5] Tuncay N.N., Ustun O., Yilmaz M., Gokce C., Karakaya U.: *Design and implementation of an electric drive system for in-wheel motor electric vehicle applications*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011, pp.1-6
- [6] Nikam S.P., Raddabandi V., Fernandes B.G.: *A high-torque-density permanent-magnet free motor for in-wheel electric vehicle application*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.48, no.6, 2012, pp. 2287-2295
- [7] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *A Study on Design Process of BLDC Motor for Aircraft Hybrid Drive*, Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdańsk, Poland, pp. 508-513
- [8] 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
- [9] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J, Powrózek A.: *Modelowanie pracy silnikowo-prądnicowej napędu z maszyną reluktancyjną przelączalną*, Przegląd Elektrotechniczny, 12a/2012, ISSN 0033-2097, R. 88, s. 56-61
- [10] Zembrzuski J.; *Atlas uzwojeń silników indukcyjnych*, WNT Warszawa 1988

Autorzy

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

Informacje dodatkowe

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.

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. Zbigniew Goryca