

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop
Politechnika Rzeszowska

ANALIZA KONSTRUKCJI TRÓJPASMOWEJ SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO 6/4 O NIESYMETRYCZNYM OBWODZIE STOJANA – WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH

ANALYSIS OF THREE-PHASE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR 6/4 WITH ASYMMETRICAL STATOR CIRCUIT – STATIC CHARACTERISTIC DETERMINATION

STRESZCZENIE: Niesymetria obwodu magnetycznego stojana czy też wirnika prowadzi do zmiany kształtu charakterystyk statycznych silnika reluktancyjnego przełączalnego. W danym przypadku dokonano analizy wpływu niesymetrii obwodu magnetycznego stojana na charakterystyki statyczne projektowanego silnika. Niesymetria obwodu magnetycznego została wymuszona ograniczeniami gabarytowymi projektowanego napędu. Na bazie modelu symulacyjnego zostały wyznaczone charakterystyki statyczne silnika. Z uwagi na niesymetrię obwodu magnetycznego stojana wyznaczono charakterystyki dla dwóch różnych pasm silnika. W warunkach laboratoryjnych dokonano weryfikacji pomiarowej. Zamieszczono wnioski dotyczące wpływu niesymetrii obwodu magnetycznego stojana na charakterystyki statyczne silnika.

Abstract: Asymmetry of magnetic circuit of stator or motor leads to changes in static characteristics shape of switched reluctance motor. Analysis of influence of a stator magnetic circuit asymmetry on static characteristics of designed motor was achieved. The asymmetry of magnetic circuit was forced by overall dimensions of designed motor. Static characteristics were determined based on simulation model. Due to asymmetry of a stator magnetic circuit, characteristics were determined for two various phases of motor. Measurement verification was achieved in laboratory conditions. Conclusions concerning the influence of stator magnetic circuit on static characteristics of motor were placed.

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny przełączalny, niesymetria stojana, charakterystyki statyczne
Keywords: switched reluctance motor, asymmetrical stator, static characteristics

1. Wstęp

Silniki reluktancyjne przełączalne dedykowane są do napędów o regulowanej prędkości obrotowej. Jednym z obszarów potencjalnych zastosowań jest sprzęt AGD. Od dłuższego czasu są podejmowane próby wprowadzania do sprzętu AGD silników z komutacją elektroniczną gdzie dotychczas bardzo mocną pozycję posiadają silniki komutatorowe. Przewidywane wprowadzenie ograniczeń co do wartości pobieranej mocy z sieci zasilającej może pomóc w rozwoju silników z komutacją elektroniczną do których zaliczane są silniki reluktancyjne przełączalne.

Silniki reluktancyjne przełączalne charakteryzują się zazwyczaj symetrią budowy

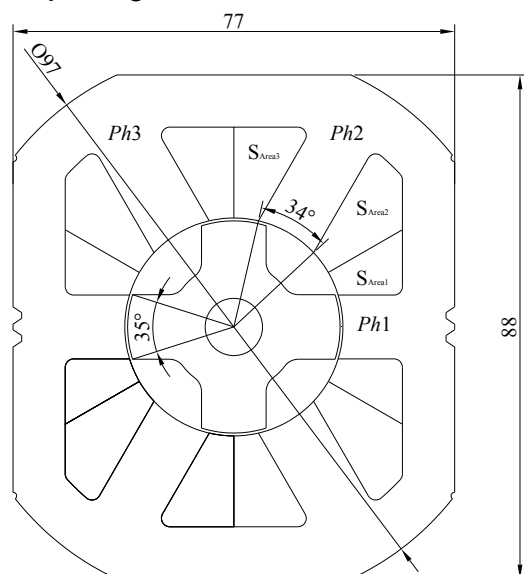
stojana i wirnika. W konstrukcjach o minimalnej liczbie biegunów wirnika wprowadza się w sposób celowy i zamierzony deformację kształtu wirnika [1]. Jest to podyktowane koniecznością zapewnienia rozruchu silnika z każdego położenia wirnika. W przypadku stojana w literaturze z wyjątkiem pozycji [2-3] nie były analizowane przypadki jego niesymetrii. W [2] analizowano wpływ profilowania bieguna stojana na charakterystykę momentową silnika. Nieco inne podejście zastosowano w [3], gdzie rozważano różne szerokości biegunów stojana dla uzyskania szerszego zakresu stałej mocy silnika.

Celem niniejszej pracy była analiza właściwości silnika SRM o niesymetrycznej

budowie stojana. Z uwagi na ograniczenia gabarytowe w zaprojektowanej konstrukcji silnika 6/4 jeden z biegunów stojana posiada inną wysokość. Na podstawie obliczeń symulacyjnych zostały wyznaczone charakterystyki statyczne w dwóch różnych pasmach silnika. W warunkach laboratoryjnych dokonano praktycznej weryfikacji wyznaczonych charakterystyk statycznych. Wyciągnięto wnioski odnośnie wpływu tego typu niesymetrii na charakterystyki i właściwości silnika reluktancyjnego przełączalnego.

2. Model silnika z niesymetrycznym wykresem stojana

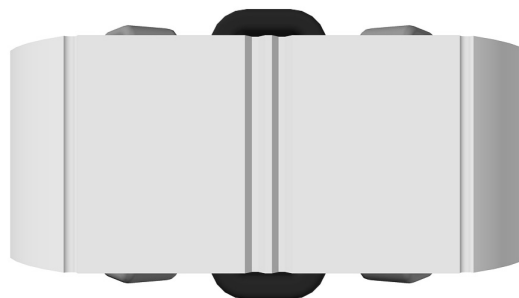
W trakcie projektowania silnika reluktancyjnego przełączalnego do napędu robota kuchennego istotne ograniczenia gabarytowe wymusiły zastosowanie nietypowego wykreju blachy stojana. Na rysunku 1 pokazano zaprojektowany wykrój blachy stojana i wirnika reluktancyjnego przełączalnego 6/4.



Rys.1. Widok zaprojektowanego wykreju blachy stojana i wirnika silnika reluktancyjnego przełączalnego przewidzianego do napędu robota kuchennego

Jak widać na rysunku 1 pasmo oznaczone jako $Ph1$ posiada inną wysokość bieguna stojana w odniesieniu do dwóch pozostałych pasm ($Ph2$, $Ph3$). Powstały też trzy przestrzenie przeznaczone do umieszczenia uzwojeń biegunów (S_{Area1} , S_{Area2} , S_{Area3}). Bieguny pasma $Ph1$ posiadają nieco inny kształt w odróżnieniu

od biegunów pozostałych pasm. Z tym również związany jest inny kształt uzwojeń tych biegunów, które posiadają wydłużone połączenia czołowe. Na rysunku 2 pokazano widok modelu 3D stojana z utworzonymi uzwojeniami.



Rys.2. Widok połączeń czołowych modelu stojana silnika SRM

Pasmo $Ph1$ posiada wyraźnie dłuższe połączenia czołowe. Silnik został wykonany praktycznie. W trakcie wstępnych badań stwierdzono wzmożone drgania silnika spowodowane brakiem dostatecznej sztywności oryginalnych tarcz łożyskowych [4]. Wymusiło to konieczność zaprojektowania i wykonania nowych tarcz łożyskowych. Na rysunku 3 pokazano silnik z nowymi tarczami łożyskowymi oraz zdemonstrowanym wirnikiem.



Rys.3. Widok modelu silnika z nowymi tarczami łożyskowymi i zdemonstrowanym wirnikiem

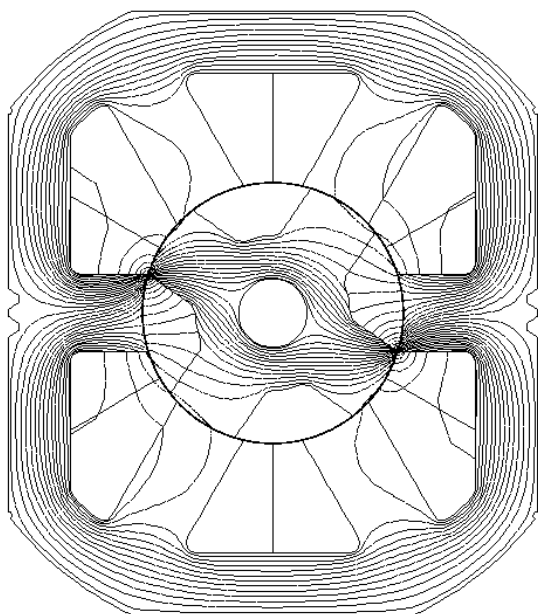
3. Badania symulacyjne

Na bazie modelu symulacyjnego zostały wyznaczone charakterystyki statyczne badanego silnika reluktancyjnego przełączalnego z niesymetrycznym wykresem blachy stojana. W obliczeniach zastosowano

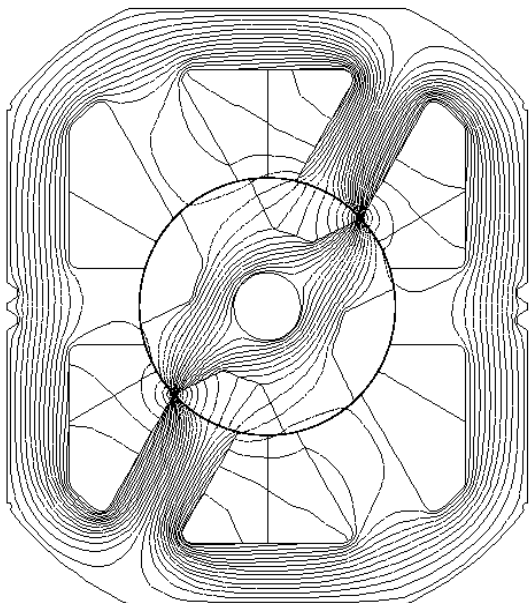
metodę elementów skończonych (FEM) w oparciu o analizę stałoprądową w przestrzeni 2D.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład linii strumienia dla zasilania umownych pasm *Ph1* (rys.4a) i *Ph2* (rys.4b) dla pierwszego położenia brzegowego wirnika (θ_1). Położenie to określają kąty szerokości biegunów stojana ($\beta_s=34^\circ$) i wirnika ($\beta_r=35^\circ$). Dla podanych wartości kątów stojana i wirnika kąt położenia brzegowego wynosi $\theta_1=10.5^\circ$ (w odniesieniu do położenia niewspółosiowego θ_u danego pasma).

a)



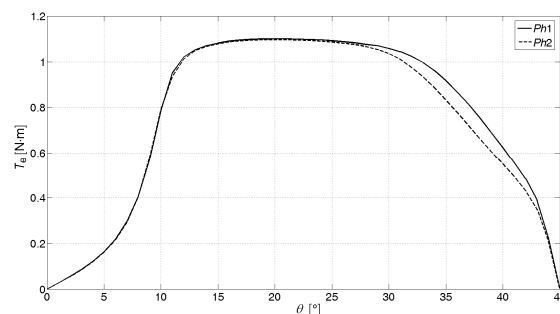
b)



Rys.4. Rozkład linii strumienia w pierwszym położeniu brzegowym wirnika dla pasm: a) *Ph1*, b) *Ph2*

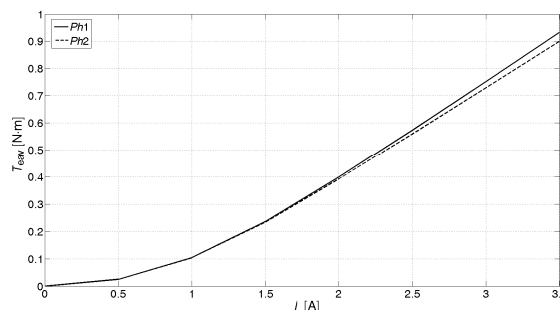
Wykorzystując symetrię budowy wirnika zakres zmian kąta ograniczono do 45 stopni mechanicznych ze skokiem co jeden stopień mechaniczny. Zakres zmian wymuszenia prądowego określono od wartości 0.001 A do 3.5 A z krokiem 0.25 A. Obliczenia przeprowadzono oddzielnie dla pasma *Ph1* oraz pasma *Ph2* z uwagi na niesymetrię modelu.

Na rysunku 5 pokazano zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prądzie pasma $I=3A$ dla pasm *Ph1* i *Ph2*.



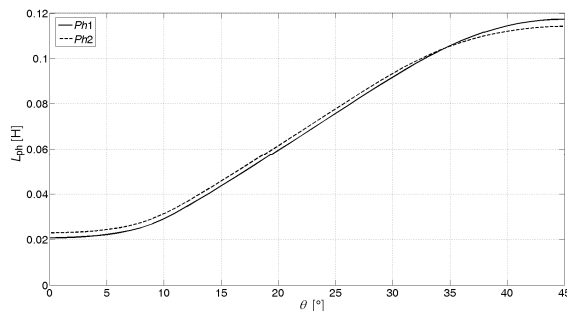
Rys.5. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ pasm *Ph1* i *Ph2* przy prądzie $I=3A$

Jak można zauważyć na rysunku 5 umowne pasmo *Ph1* posiada nieznacznie korzystniejszy przebieg momentu elektromagnetycznego. Na rysunku 6 pokazano wyznaczoną wartość średnią momentu elektromagnetycznego T_{eav} w funkcji prądu I pasm *Ph1* i *Ph2*.



Rys.6. Zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego T_{eav} w funkcji prądu I pasm *Ph1* i *Ph2*

Umowne pasmo $Ph1$ wytwarza większą wartość średnią momentu elektromagnetycznego T_{eav} w całym zakresie zmiany prądu pasma I . W warunkach symulacyjnych analizowany wpływ niesymetrii wykroju blachy stojana na charakterystyki momentowe jest jednak nieznaczny. Zależność indukcyjności własnej L_{ph} pasm $Ph1$ i $Ph2$ w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prądzie pasma $I=3A$ pokazano na rysunku 7.



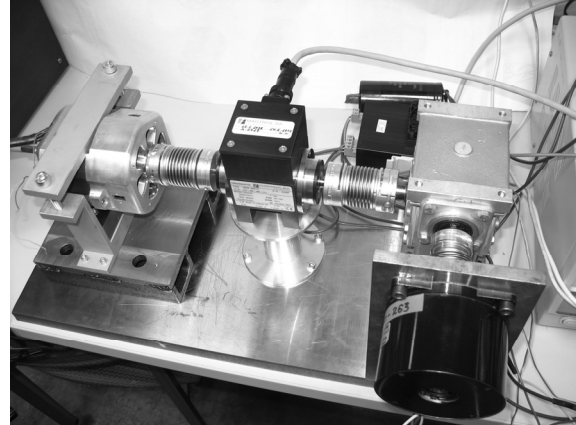
Rys.7. Zależność indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ pasm $Ph1$ i $Ph2$ przy prądzie $I=3A$

Wpływ niesymetrycznego wykroju blachy stojana ma znacznie większy wpływ na indukcyjność własną pasma L_{ph} . Szczególnie istotny jest wpływ na indukcyjność w położeniu niewspółosiowym (minimalną wartość indukcyjności L_u). Pasma $Ph1$ posiada wyraźnie mniejszą wartość indukcyjności w położeniu niewspółosiowym L_u . Indukcyjność L_u ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia sterowania pracą silnika i wpływa ona bezpośrednio na wartość amplitudy prądu płynącego I_{phmax} w danym pasmie silnika. Wartość maksymalna prądu pasma I_{phmax} ma wpływ na wartość wytworzonego momentu przez dane pasmo. Można zatem założyć, że przy identycznych parametrach sterowania w pasmie $Ph1$ będzie zauważalnie większa wartość maksymalna płynącego prądu.

W paśmie $Ph1$ odnotowano również większą wartość indukcyjności w położeniu współosiowym (indukcyjność maksymalna L_a). Nie ma to jednak tak dużego znaczenia jak zmiana indukcyjności w położeniu niewspółosiowym L_u . Przy większej wartości indukcyjności L_a pasmo $Ph1$ będzie wytwarzało większą wartość napięcia rotacji.

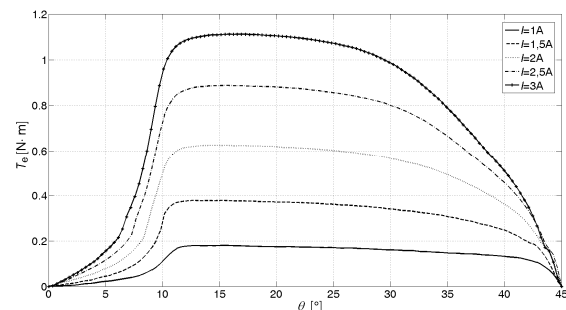
4. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym pokazanym na rysunku 8.

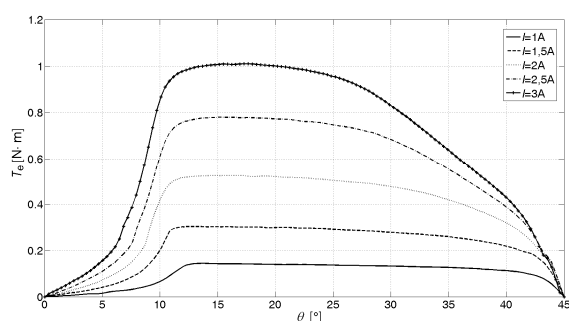


Rys.8. Stanowisko laboratoryjne do wyznaczania charakterystyk statycznych

W skład stanowiska wchodzi silnik skokowy który poprzez przekładnię ustala położenie wirnika badanej maszyny. Pomiędzy badanym silnikiem a przekładnią jest umieszczony przetwornik do pomiaru wytwarzanego momentu. W trakcie pomiarów zmieniano położenie wirnika θ badanego silnika przy stałej wartości prądu pasma I . Z uwagi na niesymetrię wykroju blachy stojana badania przeprowadzono dla dwóch pasm tj. $Ph1$ i $Ph2$. Wyznaczone w warunkach laboratoryjnych zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika, dla różnych wartości prądów pasma I , pokazano dla pasma $Ph1$ na rysunku 9 oraz dla pasma $Ph2$ na rysunku 10.

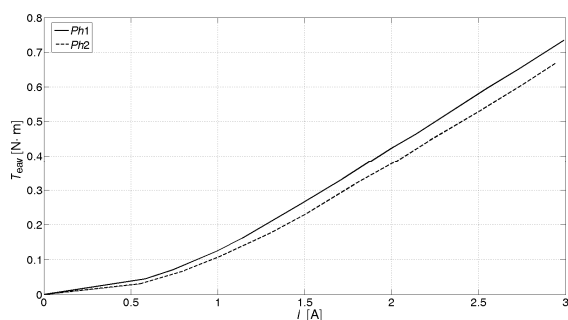


Rys.9. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e silnika pasma $Ph1$ w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prądzie pasma $I=var$



Rys.10. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e silnika pasma Ph2 w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prądzie pasma $I=var$

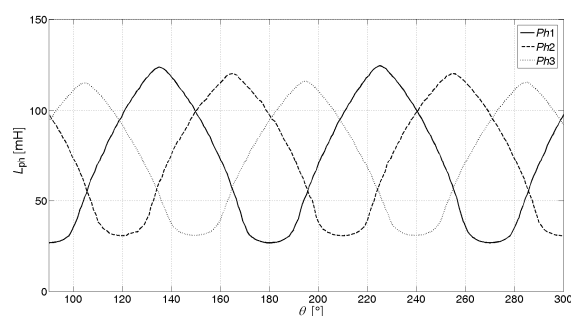
Wytwarzany moment elektromagnetyczny przez pasmo Ph1 jest znacznie większy niż w paśmie Ph2 przy identycznej wartości prądu I . Pasma Ph1 wytwarza moment porównywalny z uzyskanymi wynikami badań symulacyjnych (rys.5). W przypadku pasma Ph2 uzyskano mniejszą wartość wytwarzanego momentu elektromagnetycznego niż w przypadku badań symulacyjnych (rys.5). Na rysunku 11 pokazano wyznaczoną wartość średnią T_{eav} momentu elektromagnetycznego wyznaczone na podstawie badań laboratoryjnych.



Rys.11. Zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego T_{eav} w funkcji wartości prądu I pasm Ph1 i Ph2

Badania laboratoryjne wykazały, że wpływ niesymetrii wykroju blachy stojana na charakterystyki momentowe jest nieco większy niż wynikało to z otrzymanych wyników na podstawie badań symulacyjnych.

Zmierzone w warunkach laboratoryjnych wartości indukcyjności własnych L_{ph} w poszczególnych pasmach silnika pokazano na rysunku 12.



Rys.12. Zależność indukcyjności własnych L_{ph} poszczególnych pasm silnika w funkcji kąta położenia wirnika θ

Uzyskane w warunkach laboratoryjnych zależności indukcyjności własnych L_{ph} potwierdziły wpływ niesymetrii wykroju blachy stojana. Podobnie jak w przypadku badań symulacyjnych indukcyjność położenia niewspółosiowego L_u w paśmie Ph1 jest mniejsza niż pasmach Ph2 i Ph3.

5. Wnioski

Analiza trójpasmowej konstrukcji silnika reluktancyjnego przełączalnego z niesymetrycznym wykrojem blachy stojana w odniesieniu do charakterystyk statycznych wykazała, że:

- umowne pasmo Ph1 posiada inny kształt uzwojenia,
- wytwarzany moment elektromagnetyczny przez pasmo Ph1 jest większy niż w dwóch pozostałych pasmach,
- indukcyjność pasma Ph1 w położeniu niewspółosiowym L_u jest mniejsza niż w pozostałych dwóch pasmach,
- indukcyjność pasma Ph1 w położeniu współosiowym L_a jest większa niż w pozostałych dwóch pasmach,
- wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły charakter wpływu niesymetrii wykroju blachy stojana na charakterystyki statyczne silnika.

Wpływ niesymetrii na charakterystyki momentowe jest stosunkowo niewielki. Największe znacznie ma zmiana wartości indukcyjności własnej w położeniu niewspółosiowym L_u . Indukcyjność własna w położeniu niewspółosiowym L_u ma istotny wpływ na wartość wytwarzanego momentu elektromagnetycznego w trakcie pracy silnika.

6. Literatura

- [1] Khater M.M., Afifi W.A., Ei-Khazendar M.A.: *Operating performances of a two-phase switched reluctance motor*, 11-th International Power Systems Conference, MEPCON 2006, Vol. 2, pp. 636-642.
- [2] Sheth N. K. and Rajagopal K. R.: *Torque profiles of a switched reluctance motor having special pole face shapes and asymmetric stator poles*, IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 4, Jul. 2004, pp. 2035–2037.
- [3] Vujičić V.P., Vukosavić S.N., Jovanović M.B.: *Asymmetrical switched reluctance motor for a wide constant power range*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume: 21, Issue:1, Publication Year: 2006, pp. 44 – 51.
- [4] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Badania drgań napędu z silnikiem reluktancyjnym przelączalnym z zastosowaniem analizy modalnej*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010,86,9, pp.266-271.

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 wykona w ramach projektu badawczego
NN511 312 440

Badania przeprowadzono z 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