

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop, Piotr Wygonik
Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

BADANIA LABORATORYJNE GENERATORÓW PRZEZNACZONYCH DO SZEREGOWEGO NAPĘDU HYBRYDOWEGO BEZZAŁOGOWEGO APARATU LATAJĄCEGO

LABORATORY TESTS OF THE BLDC GENERATORS FOR SERIES HYBRID DRIVES UNMANNED AERIAL VEHICLE

Abstract: The paper presents the research results of two generators with permanent magnets. The generators have been tested from the point of view of their application in series hybrid propulsion for unmanned flying device. The external characteristics, performance and efficiency of the generators working with rectifiers were measured. The research was performed for three different types of diodes used in rectifiers.

1. Wstęp

Maszyny z magnesami trwałymi zdobyły znaczną popularność ze względu na duże gęstości mocy uzyskiwane z jednostki masy. Zasadniczym problemem w budowie tych maszyn jest jakość magnesów trwałych. W ostatnich latach na rynku pojawiły się magnesy trwale zawierające pierwiastki ziem rzadkich, charakteryzujące się znacznie lepszymi parametrami niż magnesy ferrytowe. Magnesy te posiadają nie tylko bardzo dobre parametry magnetyczne, np. indukcję remanentu B_r , ale też umożliwiają pracę przy wyższych temperaturach [1]. Obecnie maszyny z magnesami trwałymi budowane są głównie, jako maszyny bezszczotkowe. Znajdują powszechne zastosowanie w motoryzacji oraz w przemyśle jako serwonapędy, gdyż charakteryzują się wysoką sprawnością oraz bardzo dobrą dynamiką. Ze względu na trudności w regulowaniu strumienia maszyny z magnesami trwałymi znacznie rzadziej pracują jako generatory [1]-[3]. W ostatnim czasie bardzo popularne stają się napędy hybrydowe, w których maszyna elektryczna pracuje zarówno jako silnik, jak i prądnicą. Tego typu napędy z powodzeniem są stosowane w samochodach hybrydowych. Prowadzone są również próby zastosowania tego typu napędów w bezzałogowych aparatach latających (BAL) [4]. Celem niniejszej pracy jest wykonanie badań laboratoryjnych oraz przeprowadzenie analizy porównawczej dwóch generatorów z magnesami trwałymi pod kątem możliwości zastosowania w szeregowym, hybrydowym układzie napędowym przeznaczonym do bezzałogowego aparatu latającego.

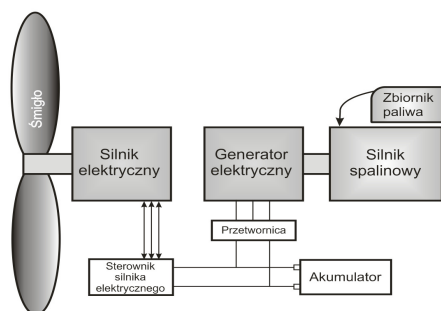
W tym celu zaprojektowano i zbudowano stanowisko pomiarowe umożliwiające wykonanie założonych badań. Badania wykonano w warunkach:

- stałej prędkości obrotowej ($n=\text{const}$),
- stałego napięcia wyjściowego ($U_L=\text{const}$).

Analizie poddano również wpływ zastosowanych elementów w układzie prostownikowym na sprawność wypadkową układu. Na podstawie uzyskanych wyników badań laboratoryjnych zamieszczono wnioski.

2. Struktura szeregowego hybrydowego układu napędowego

Szeregowy hybrydowy układ napędowy składa się z silnika spalinowego napędzającego generator elektryczny, który zasila silnik elektryczny napędzający śmigło oraz baterię akumulatorów. Cechą charakterystyczną tego napędu jest brak połączenia mechanicznego pomiędzy silnikiem spalinowym, a silnikiem elektrycznym napędzającym śmigło. Zasadniczą zaletą tego typu systemu jest możliwość chwilowej pracy napędu bez włączonego silnika spalinowego. Czas pracy jest wówczas zależny od pojemności zastosowanych akumulatorów. Strukturę napędu szeregowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy szeregowego napędu hybrydowego

3. Obiekty badań

Bezzałogowe aparaty latające wymagają możliwie lekkich oraz gabarytowo małych napędów.

Tabela 1. Parametry badanych maszyn BLDC

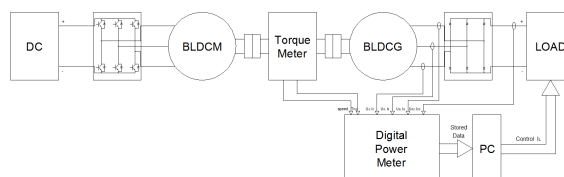
	Generator I	Generator II
Liczba pasm	3	3
Liczba biegunów stojana	12	12
Liczba biegunów wirnika	14	14
Stała napięciowa k_v [obr/V]	171	225
Maksymalna sprawność maszyny [%]	94	93
Maksymalna wartość prądu I_{dc} [A]	75/30s	110A/20s
Rezystancja R [Ω]	0.042	0.027
Liczba zwojów na biegun N_b	18	14
Długość pakietu stojana l_{Fe} [mm]	45	45
Średnica zewnętrzna d_{re} [mm]	63	63
Waga z przewodami [kg]	0.995	0.995

Z tego względu logicznym rozwiązaniem jest zastosowanie maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, zarówno do napędu śmigła (silnik), jak i do wytwarzania energii elektrycznej (generator), charakteryzujących się małą masą i gabarytami oraz bardzo dobrymi osiąganiami w porównaniu do innych typów maszyn. Badania symulacyjne tego typu maszyn wraz z wynikami przedstawiono w pracach [5]-[6].

Obiektem badań prowadzonych przez autorów w niniejszej pracy były dwie różne maszyny BLDC przeznaczone do pracy generatorowej. Parametry i wymiary badanych maszyn zestawiono w tabeli 1.

4. Stanowisko badawcze

Wybrane maszyny zostały przebadane na specjalnie zbudowanym do tego celu stanowisku. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2. Aby z generatora BLDC uzyskać napięcie stałe zastosowano trójfazowy mostek diodowy. Do regulacji napięcia wyjściowego w układzie docelowym przewidziano zastosowanie przetwornicy impulsowej.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego



Rys. 3. Stanowisko do badania generatorów

W celu precyzyjnej regulacji prędkości do napędu generatora zastosowano silnik elektryczny typu BLDC. W układzie docelowym przewidziano zastosowanie silnika spalinowego. Moc dostarczoną do generatora wyznaczono na podstawie pomiaru momentu na wale generatora oraz jego prędkości obrotowej. Na rysunku 3 przedstawiono stanowisko do badań generatorów. Stanowisko to wyposażono w wysokoprądowy zasilacz stabilizowany (zasilający silnik napędowy). Do pomiaru mocy oddawanej, prędkości i innych parametrów zastosowano analizator mocy. Do obciążenia generatora zastosowano programowalne obciążenie prądu stałego (rys.4) umożliwiające pracę w czterech trybach:

- ze stałym prądem obciążenia $I_L = \text{const}$,
- ze stałym napięciem obciążenia $U_L = \text{const}$,
- ze stałą wartością rezystancji $R_L = \text{const}$,
- ze stałą mocą obciążenia $P_L = \text{const}$.



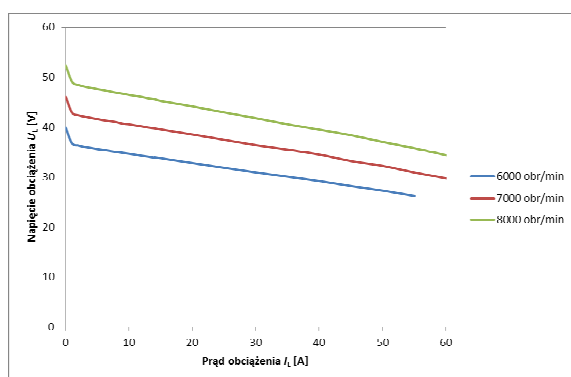
Rys. 4. Widok programowalnego obciążenia prądu stałego

5. Wyznaczenie charakterystyk zewnętrznych oraz sprawności

W celu określenia parametrów generatorów przeznaczonych do badań należy określić ich charakterystyki zewnętrzne. Charakterystyki te należy wyznaczyć przy stałej prędkości obrotowej ($n = \text{const}$). Założono, że generatory będą obciążane prądem w zakresie od 0 do 60A.

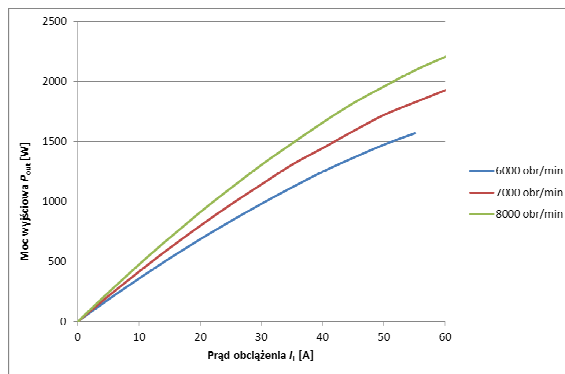
5.1. Generator I

W przypadku generatora oznaczonego jako I, badania przeprowadzono dla następujących prędkości obrotowych n : 6000, 6500, 7000, 7500, 8000 obr/min. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki zewnętrzne $U_L = f(I_L)$ dla wybranych prędkości obrotowych $n = 6000, 7000$ i 8000 obr/min określające zmienność napięcia wyjściowego w funkcji prądu obciążenia.



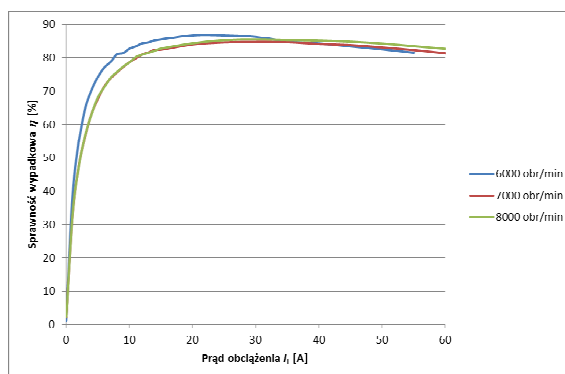
Rys. 5. Zależność napięcia obciążenia U_L w funkcji prądu obciążenia I_L generatora I

Dla identycznych przypadków, jak poprzednio na rysunku 6 przedstawiono zależność mocy wyjściowej generatora P_{out} w funkcji prądu obciążenia I_L .



Rys. 6. Zależność mocy wyjściowej P_{out} w funkcji prądu obciążenia I_L generatora I

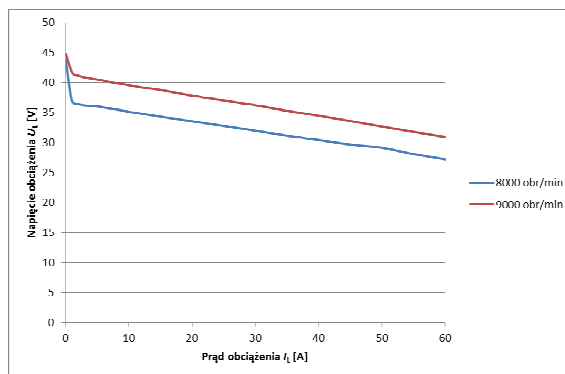
Uzyskaną sprawność wypadkową η układu generatora (generator+układ prostownikowy) w funkcji prądu obciążenia przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zależność sprawności wypadkowej η w funkcji prądu obciążenia I_L generatora I

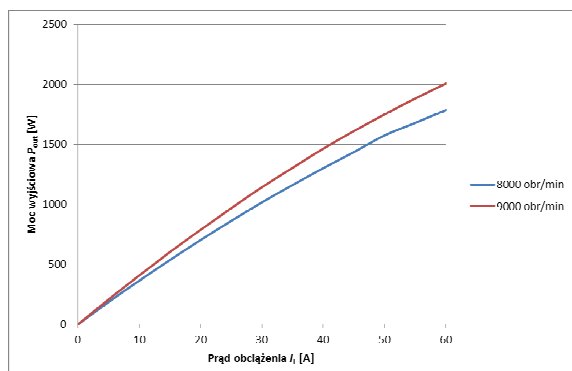
5.2. Generator II

Dla generatora II badania przeprowadzono dla następujących prędkości obrotowych n : 8000 oraz 9000 obr/min. Na rysunku 8 przedstawiono charakterystyki zewnętrzne $U_L = f(I_L)$ dla prędkości obrotowych $n = 8000$ i 9000 obr/min.

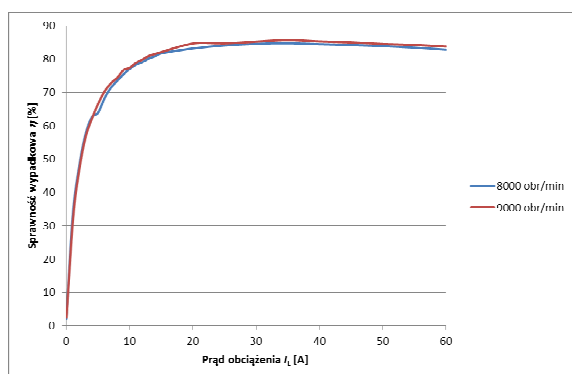


Rys. 8. Zależność napięcia obciążenia U_L w funkcji prądu obciążenia I_L generatora II

Dla identycznych przypadków jak na rysunku 8, na rysunku 9 przedstawiono zależność mocy wyjściowej generatora P_{out} w funkcji prądu obciążenia I_L .



Rys. 9. Zależność mocy wyjściowej P_{out} w funkcji prądu obciążenia I_L generatora II



Rys. 10. Zależność sprawności wypadkowej η w funkcji prądu obciążenia I_L generatora II

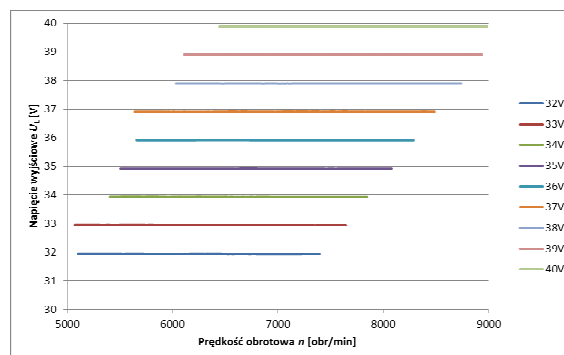
Uzyskaną sprawność wypadkową η układu generator-układ prostownikowy w funkcji prądu obciążenia przedstawiono na rysunku 10.

5.3. Porównanie badanych generatorów

W projektowanym hybrydowym szeregowym układzie napędowym na wyjściu generatora wymagane jest napięcie 36V. Jednocześnie maksymalna prędkość silnika spalinowego nie powinna przekraczać 10000 obr/min. Ze względu na wymagane osiągi, przy niższej prędkości obrotowej zastosowanie generatora I w projektowanym układzie hybrydowym jest korzystniejsze. Zarówno w przypadku generatora I jak i II uzyskana maksymalna sprawność wypadkowa wynosiła około 86%. Zakres optymalnej pracy uzyskano przy prądzie obciążenia większym niż 20A (sprawność większa niż 84%). Dalsze badania laboratoryjne ograniczono do modelu generatora I.

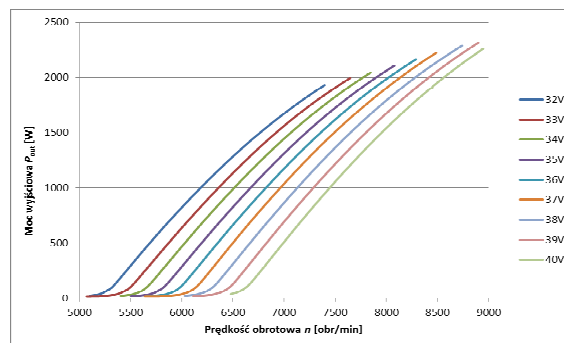
6. Wyznaczenie mocy wyjściowej i sprawności

Ponieważ napęd hybrydowy szeregowy współpracuje z baterią akumulatorów napięcie wyjściowe nie może przekroczyć dopuszczalnej dla nich wartości. Generator z magnesami trwałymi posiada stały strumień wzbudzenia i w układzie z diodowym mostkiem prostowniczym jedynym parametrem wpływającym na regulację mocy oddawanej jest prędkość wirowania wirnika. Zakresy zmian prędkości wirowania wirnika, gdzie jest możliwość oddawania energii przez generator dla poszczególnych napięć wyjściowych obrazuje rodzina charakterystyk przedstawiona na rysunku 11.



Rys. 11. Zależność napięcia obciążenia U_L w funkcji prędkości obrotowej n generatora

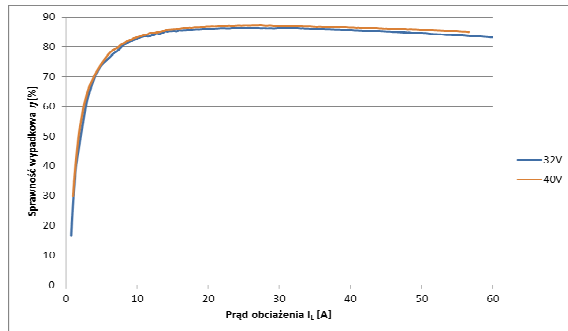
Charakterystyki te wyznaczono dla zmieniającego się prądu obciążenia w zakresie od 0 do 60A. Na rysunku 12 przedstawiono zależność mocy wyjściowej P_{out} w funkcji prędkości obrotowej n . Można zauważyć, że oddawanie energii przy napięciu 32V odbywa się już przy prędkości nieco większej od 5000 obr/min. Maksymalną moc, jaką można uzyskać z tego generatora to około 2300W.



Rys. 12. Zależność mocy wyjściowej P_{out} w funkcji prędkości obrotowej n generatora

Na rysunku 13 przedstawiono zależność sprawności wypadkowej η w funkcji prądu obciążenia

nia I_L , dla dwóch wartości napięć wyjściowych (32V i 40V).



Rys. 13. Zależność sprawności wypadkowej η w funkcji prądu obciążenia I_L

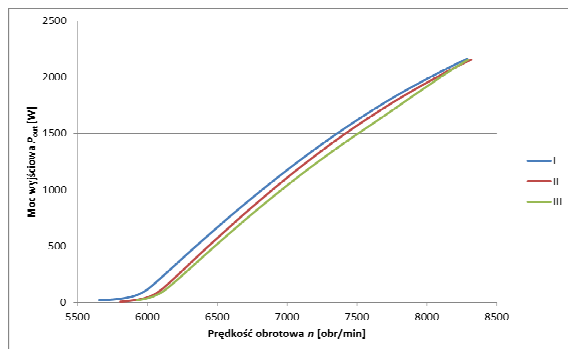
Wraz ze wzrostem napięcia na wyjściu generatora uzyskano nieznaczny wzrost sprawności wypadkowej. Uległ poszerzeniu również zakres pracy ze sprawnością przekraczającą 84% (od około 12A).

7. Wpływ elementów układu prostownikowego

Dla określenia wpływu rodzaju elementów zastosowanych w układzie prostownikowym na sprawność wypadkową generatora przeprowadzono badania dla następujących przypadków:

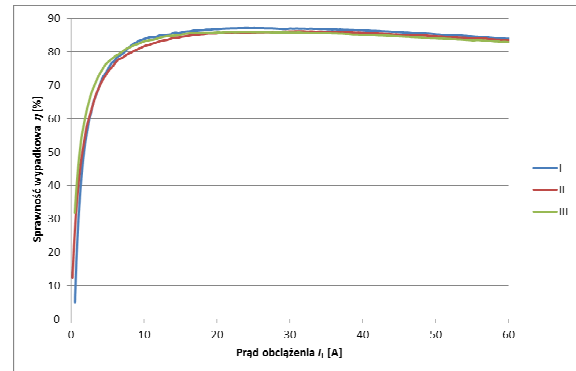
- układ prostownikowy wykonany z diod szybkich typu Schottky, oznaczony jako I,
- układ prostownikowy oparty o układ mocy silnika BLDC, oznaczony jako II,
- układ prostownikowy wykonany ze zwykłych diod prostownikowych, oznaczony jako III.

Na rysunku 14 przedstawiono zależność mocy wyjściowej P_{out} w funkcji prędkości obrotowej n w przypadku pracy ze stałym napięciem wyjściowym $U_L=36V$.



Rys. 14. Zależność mocy wyjściowej P_{out} w funkcji prędkości obrotowej n w przypadku pracy ze stałym napięciem wyjściowym $U_L=36V$

Sprawność wypadkową generatora dla tego przypadku przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Zależność sprawności wypadkowej η w funkcji prądu obciążenia I_L przy napięciu $U_L=36V$

Jak można zauważyć, zastosowanie w układzie prostownikowym diod szybkich typu Schottky jest w pełni uzasadnione. Dla tego przypadku uzyskano większą sprawność wypadkową większą o ponad 1% od pozostałych przypadków. To przekłada się w sposób zauważalny na większą wartość mocy wyjściowej uzyskiwaną przy tej samej prędkości obrotowej (rys.14).

8. Wnioski

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych maszyny z magnesami trwałymi przeznaczonej do napędu hybrydowego szeregowego bezałogowego aparatu latającego. Na podstawie analizy uzyskanych charakterystyk zewnętrznych wybrano jeden z generatorów do zastosowania w projektowanym układzie hybrydowym. Uzyskana sztywność charakterystyk zewnętrznych jest niezadawalająca. Uzyskana maksymalna sprawność wypadkowa badanego generatora przy pracy ze stałą prędkością obrotową wynosiła około 86%. Zakres pracy generatora ze sprawnością wypadkową przekraczającą 84% uzyskiwano przy prądzie przekraczającym około 20A. Wyznaczono charakterystyki mocy wyjściowej w funkcji prędkości przy stałym napięciu wyjściowym oraz charakterystyki sprawności. Dokonano również analizy wpływu rodzaju zastosowanych diod na sprawność wypadkową generatora. Najlepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu w układzie prostownikowym diod typu Schottky.

9. Literatura

- [1]. Zhuoran Zhang; Yangguang Yan; Shanshui Yang; Zhou Bo; *Development of a New Permanent-Magnet BLDC Generator Using 12-Phase Half-Wave Rectifier*, IEEE Transactions Industrial Electronics, Vol. 56 , No. 6, 2009, pp. 2023 – 2029.
- [2]. Hyung-Woo Lee; Tae-Hyung Kim; Ehsani, M.; *Practical control for improving power density and efficiency of the BLDC generator*, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 20, No. 1, January 2005, pp. 192-199.
- [3]. Bajec, P.; Pevec, B.; Voncina, D.; Miljavec, D.; Nastran, J.; *Novel AC-DC converter control principle for automotive BLDC generator in low-speed range*, Advanced Motion Control, 2004, pp. 105-110
- [4]. Glassock, Richard R. and Hung, Jane Y. and Gonzalez, Luis F. and Walker, Rodney A.: *Multi-modal hybrid powerplant for unmanned aerial systems (UAS) Robotics*, In: Twenty-Fourth Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems Conference, March 30th to April 1st 2009, Bristol United Kingdom.
- [5]. Bogusz P., Korkosz M., Mazurkiewicz A., Prokop J.: *Badania symulacyjne silnika BLDC przeznaczonego do lotniczego napędu hybrydowego*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 86, 2010, wyd. BOBRME KOMEL, s. 79-82.
- [6]. Bogusz P., Korkosz M., Mazurkiewicz A., Prokop J.: *Analiza pracy generatorowej maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 91, 2011, wyd. BOBRME KOMEL, s. 21-25.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NR10 0026 06.

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.

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 *

dr inż. Piotr Wygonik piowyg@prz.edu.pl **

Politechnika Rzeszowska
ul. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

* Wydział Elektrotechniki i Informatyki

** Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa