

**Krzysztof Krykowski, , Roman Mikiewicz, Zbigniew Gałuszkiewicz,
Janusz Hetmańczyk, Dawid Makiela
Politechnika Śląska, Gliwice**

PROJEKT I BADANIA WYSOKOOBROTOWEGO SILNIKA BLDC Z RDZENIEM AMORFICZNYM

DESIGN AND INVESTIGATIONS OF HIGH SPEED BRUSHLESS DC MOTOR WITH AMORPHOUS CORE

Abstract: The paper presents analysis of simulation results of a high speed brushless motor for different kinds of the motor magnetic circuit. There are considered four constructions of the stator core: with open slots, half-open slots, closed slots and a slotless core. The design criteria are: the waveforms of phase voltages, amplitude and frequency of cogging torques, the winding inductance values and the frequency of magnetizing the core. A prototype of the motor with amorphous core and half-open slots was designed and realised. The investigation results of the motor are given in a form of the waveforms.

1. Wstęp

Silniki bezszczotkowe prądu stałego wzbudzone magnesami trwałymi PMBLDC charakteryzują się małym momentem bezwładności [3], mogą więc być stosowane w napędach wysokoobrotowych.

W wysokoobrotowym silniku PMBLDC występuje szereg zjawisk, na które należy zwrócić szczególną uwagę przy ich konstrukcji. Najważniejsze spośród nich to:

- wzrost strat w obwodach magnetycznych i elektrycznych spowodowany znacznie wyższą częstotliwością prądów niż w typowych maszynach,
- występowanie momentów zaczepowych,
- duże siły odśrodkowe i konieczność bardzo dokładnego wyważenia wirnika,
- konieczność zastosowania specjalnych łożysk.

W silnikach typu BLDC o wysokich prędkościach obrotowych można spotkać różne rozwiązania obwodu magnetycznego: z rdzeniem stojana żłobkowym [2], jak i bezżłobkowym [1], [4], z uzwojeniem skupionym, jak i rozłożonym. Każde z tych rozwiązań ma swoje zalety i wady, związane z właściwościami elektromagnetycznymi oraz technologią wytwarzania.

Celem pracy było zbadanie wpływu rodzaju rdzenia stojana na właściwości silnika. Na podstawie tych badań opracowano projekt i wykonano prototyp silnika wysokoobrotowego.

2. Projekt silnika

Przy projektowaniu silnika wzięto pod uwagę następujące kryteria:

- straty w żelazie,
- momenty zaczepowe,
- przebiegi i wartości napięć indukowanych,
- wartości indukcyjności uzwojenia,
- możliwości technologiczne wykonania.

Rozważono cztery konstrukcje obwodu magnetycznego stojana: ze żłobkami otwartymi, półotwartymi, zamkniętymi oraz ze stojaniem bezżłobkowym. Po wstępnych obliczeniach obwodowych wykonywano obliczenia polowe wykorzystując MES i na tej podstawie opracowano projekt silnika prototypowego. Obliczenia polowe 2D wykonywano w module Transient dla pracy generatorowej i silnikowej maszyny oraz w module Magnetostatic celem wyznaczenia indukcyjności uzwojeń.

2.1. Obwód elektromagnetyczny

Przyjęto następujące dane znamionowe silnika:
 $U_{DC} = 24 \text{ V}$, $n = 70\,000 \text{ obr/min}$,
 $M_N = 100 \text{ mN}\cdot\text{m}$. Docelowo przewiduje się zwiększenie prędkości obrotowej tego silnika do $100\,000 \text{ obr/min}$.

Wysokie częstotliwości zmian strumienia magnetycznego w stojanie (przy liczbie par biegunów $p=1$, dla prędkości $100\,000 \text{ obr/min}$ częstotliwość wynosi 1666 Hz) uniemożliwiają zastosowanie tradycyjnych blach magnetycznych. Podjęto próbę zastosowania do tego celu taśmy amorficznej o znacznie mniejszej

stratności lecz trudniejszej obróbce i niekorzystnych właściwościach mechanicznych (twarde, kruche, nie przenoszą sił i są kłopotliwe w obróbce). W projekcie wzięto pod uwagę również możliwości technologiczne wykonania rdzenia. Innym czynnikiem związanym z częstotliwością jest wzrost strat również w przewodach nawojowych, zaproponowano więc uzwojenie z przewodem licowym.

Obwód magnetyczny wirnika stanowią magnesy segmentowe o przekroju prostokątnym, częściowo wpuszczone do rdzenia wirnika.

Ważnym czynnikiem wpływającym na właściwości silnika jest moment zaczepowy i jego udział w momencie wypadkowym. Duża składowa pulsująca tego momentu może mieć znaczący udział w momencie wypadkowym i być źródłem drgań, co szczególnie przy dużych prędkościach stanowi ważny problem.

Wielkość momentu zaczepowego zależy głównie od otwarcia żłobków, ukształtowania i sposobu magnesowania magnesów trwałych oraz od grubości szczeliny powietrznej. Dla żłobków zamkniętych i dla konstrukcji bezżłobkowej moment zaczepowy nie powstaje. Krotność częstotliwości pulsacji momentu n_h (w stosunku do częstotliwości wynikającej z prędkości wirowania) zależy od liczby żłobków stojana i liczby biegunów, zgodnie z zależnością (1):

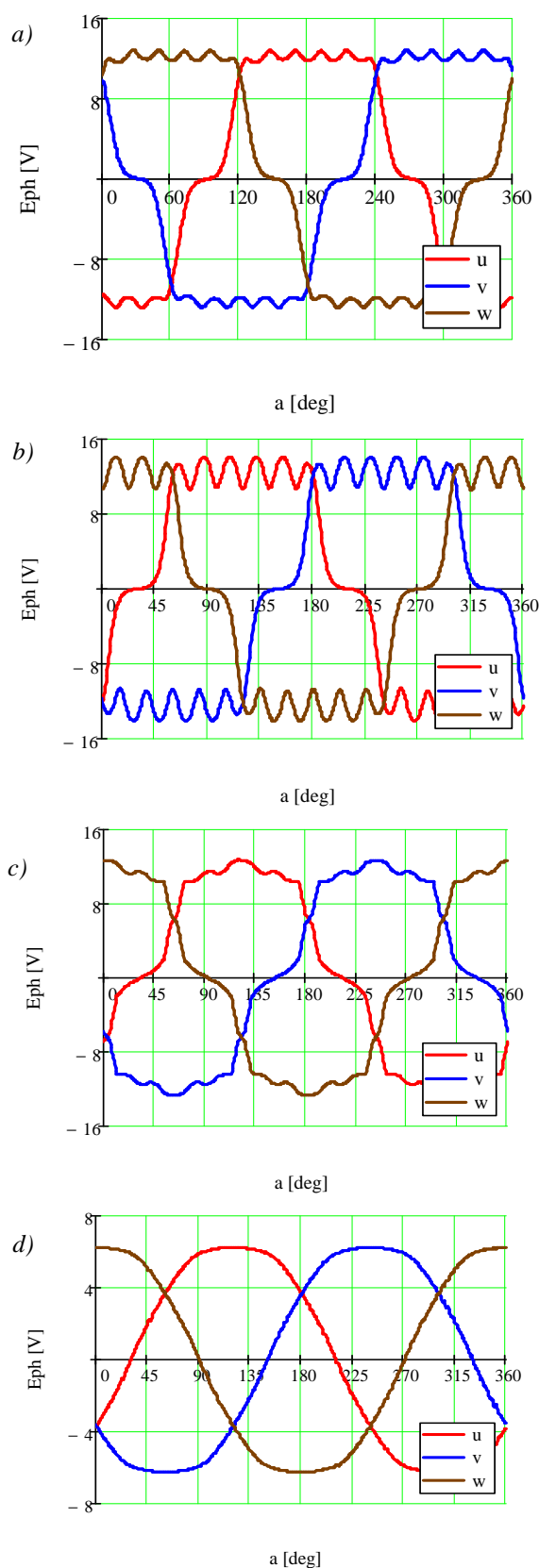
$$n_h = \frac{2p}{NWW\{Q, 2p\}} Q \quad (1)$$

Aby dobrać odpowiednio otwarcie żłobka oraz wielkość szczeliny powietrznej przeprowadzono badania, w których korzystano z wyników obliczeń połowych.

2.2. Wyniki obliczeń połowych

Dla zadanej prędkości obrotowej, przy pracy generatorowej, wyznaczano przebiegi czasowe napięć oraz momentu zaczepowego. Obliczenia połowe pozwalają również na wyznaczenie strat mocy w wirniku (magnesach i rdzeniu).

Przykładowe wyniki obliczeń napięć fazowych zamieszczono na rys. 1. Dla porównania, wszystkie wyniki podano dla tej samej długości maszyny, tej samej liczby zwojów oraz prędkości obrotowej $n=70000$ obr/min.



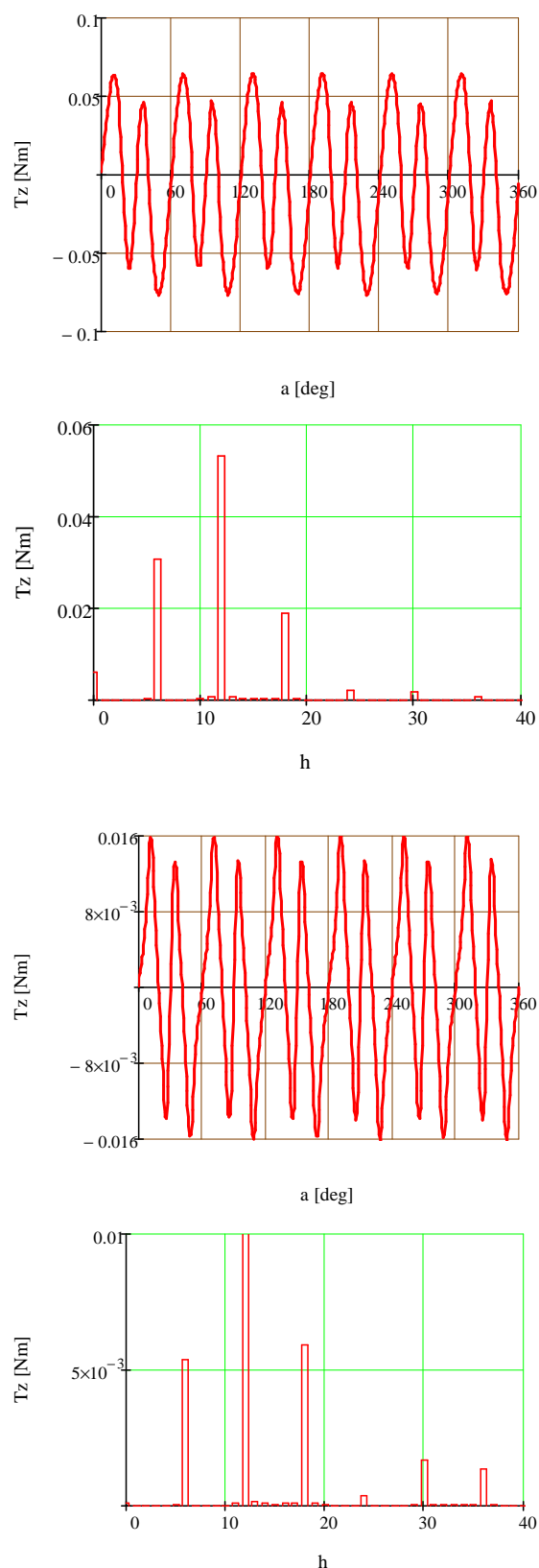
Rys. 1. Przebiegi napięć fazowych dla różnych obwodów magnetycznych: a) żłobki otwarte, b) żłobki półotwarte, c) żłobki zamknięte, d) stojan bezżłobkowy

Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 1 stwierdzono, że zbliżone wartości napięć uzyskuje się dla stojana ze żłobkami otwartymi i półotwartymi, przy czym nieco mniejsze pulsacje napięć uzyskuje się przy żłobkach otwartych. W przypadku stojana bezżłobkowego maksymalna wartość napięcia jest około dwa razy mniejsza od pozostałych przypadków. To oznacza, że należałoby odpowiednio zwiększyć długość maszyny, liczbę zwojów, grubość magnesów lub wszystkie te wielkości dostosować do tego rozwiązania projektowego. W przebiegach napięcia, szczególnie dla żłobków półotwartych, widoczne są pulsacje wynikające z liczby zastosowanych magnesów segmentowych. Zwiększając liczbę segmentów, można uzyskać mniejszy udział pulsacji w napięciu.

Oprócz przebiegów napięć indukowanych, ważnym czynnikiem konstrukcyjnym jest wartość i częstotliwość momentu zaczepowego. Przebiegi momentu zaczepowego wraz z ich widmami harmonicznymi dla żłobka otwartego oraz półotwartego, przedstawiono na rys. 2.

W silnikach ze żłobkami zamkniętymi lub ze stojanem bezżłobkowym momenty zaczepowe nie powstają, co stanowi dużą zaletę takiego rozwiązania. Dla rozwiązania kompromisowego ze żłobkami półotwartymi powstaje moment zaczepowy o sześciokrotnej (i jej krotnościach) częstotliwości obrotowej, zgodnie z zależnością (1). W przypadku żłobków otwartych amplituda momentu zaczepowego jest ponad 4 razy większa niż przy żłobkach półotwartych. Dla żłobków półotwartych amplituda momentu zaczepowego stanowi około 10% średniej wartości momentu znamionowego i takie rozwiązanie zastosowano w silniku prototypowym.

Przy dużych prędkościach obrotowych (wysokich częstotliwości przełączenia), ważnym czynnikiem jest indukcyjność uzwojenia. W wyniku magnetostatycznych obliczeń połowych wyznaczono indukcyjności pojedynczego uzwojenia fazowego oraz dwóch szeregowo połączonych uzwojeń fazowych. Obliczone indukcyjności uwzględniają indukcyjności czoł uzwojeń wyznaczone obwodowo. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 1.



Rys.2. Przebiegi momentów zaczepowych oraz ich widma harmonicznymi dla żłobków: a) otwartych, b) półotwartych

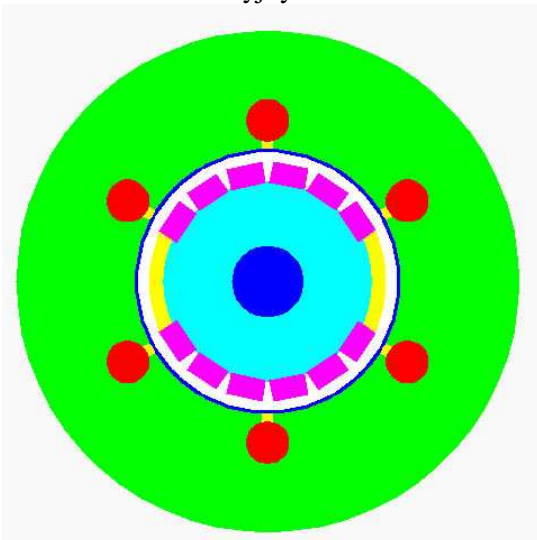
Tabela 1. Indukcyjności uzwojeń stojana

Rodzaj uzłobkowania	Indukcyjność jednej fazy, μH	Indukcyjność dwóch faz, μH
otwarte	3,62	8,57
półotwarte	4,38	10,1
zamknięte	26,5	54,4
bezzłobkowy	1,95	4,49

Z tabeli 1 wynika, że najbardziej korzystne (najmniejsza indukcyjność) jest rozwiązanie ze stojanem bezzłobkowym. Należy również zwrócić uwagę, że sprzężenia między uzwojeniami w tego typu konstrukcjach są niewielkie. Dla silnika ze złołkami zamkniętymi praktycznie sprzężenie nie istnieje. Indukcyjność dwóch faz bowiem jest niewiele większa od podwojonej indukcyjności jednej fazy.

2.3. Prototyp silnika

Korzystając z wyników analizy wybrano konstrukcję (rys.3 i rys.4) z 6 złołkami półotwartymi, uzwojeniem średnicowym i rdzeniem amorficznym. Konstrukcja ta umożliwia uzyskanie dużych sił elektromotorycznych przy stosunkowo małych momentach reluktancyjnych.

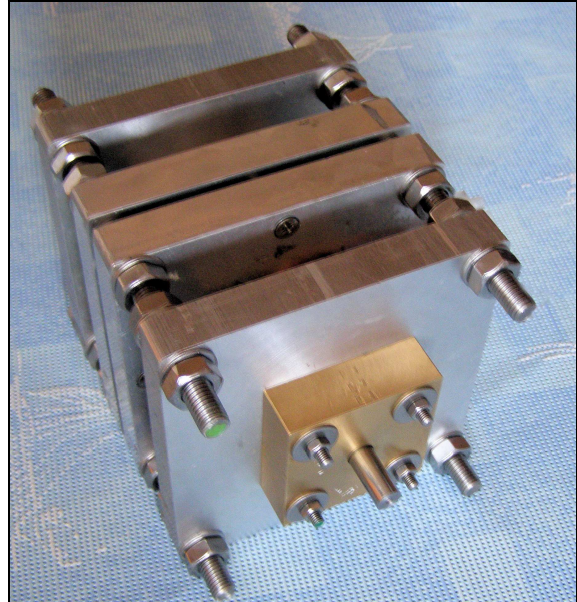


Rys.3. Obwód magnetyczny silnika

Do określania położenia wirnika w torze synchronizacji komutatora elektronicznego użyto czujników Halla.

Dla przyjętego rozwiązania zastosowano łożyska ceramiczne wysokoobrotowe o dopuszczalnej prędkości obrotowej 98000 obr/min.

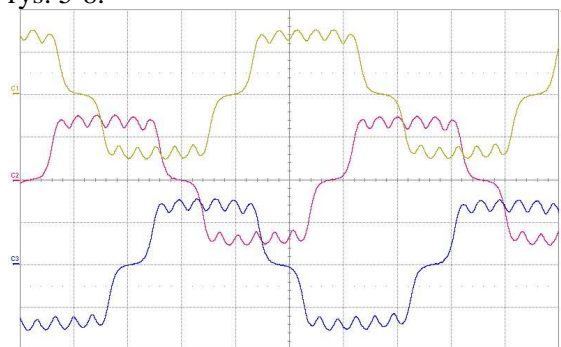
Ponieważ duże prędkości wirowania powodują powstawanie dużych sił odśrodkowych, zalecono dokładne wyważenie wirnika (dokładność 3 mg). Dzięki tak dokładnemu wyważeniu wirnika udało się wyeliminować wpływ tych sił na pracę silnika. Wygląd zewnętrzny silnika prototypowego przedstawiono na rysunku 4.



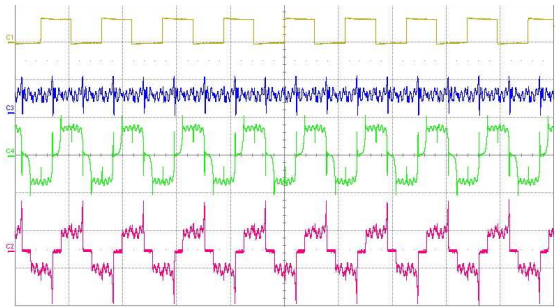
Rys.4. Prototyp wysokoobrotowego silnika bezszczotkowego prądu stałego PM BLDC

3. Wyniki badań silnika prototypowego

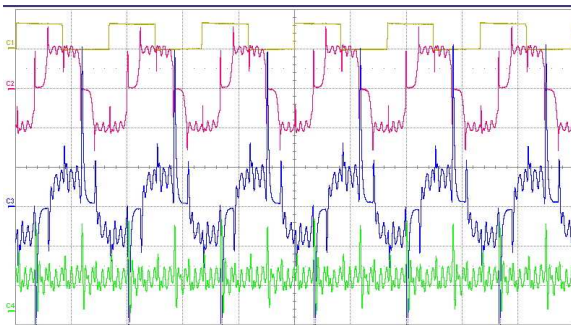
Dla wykonanego silnika przeprowadzono badania. Uzyskane przebiegi przedstawiono na rys. 5-8.



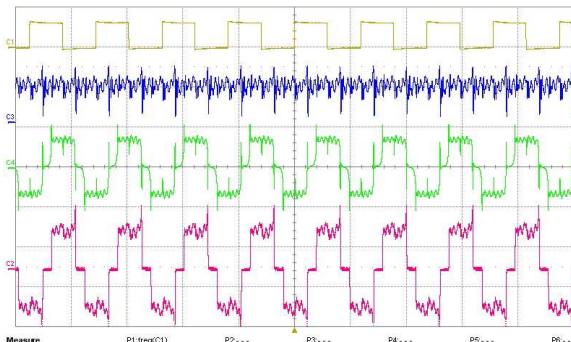
Rys. 5. Przebiegi czasowe napięć fazowych dla pracy generatorowej silnika



Rys. 6. Przebiegi napięcia z hallotronu, prądu źródła oraz napięcia i prądu fazowego nieobciążonego silnika wirującego z prędkością 53092 obr/min



Rys. 7. Przebiegi napięcia z hallotronu, prądu źródła oraz napięcia i prądu fazowego nieobciążonego silnika wirującego z prędkością 72240 obr/min



Rys. 8. Przebiegi napięcia z hallotronu, prądu źródła oraz napięcia i prądu fazowego dla silnika obciążonego wirującego z prędkością 50584 obr/min

4. Wnioski

Biorąc pod uwagę wartości momentu zaczepowego, wartości i przebiegi czasowe napięć indukowanych oraz technologię wykonania uzwojenia, przyjęto rozwiązanie ze żłobkami półotwartymi.

Ze względu na wysokie częstotliwości przemagnesowania rdzenia zastosowano taśmę amorficzną. Takie rozwiązanie wiąże się jednak z dużymi trudnościami technologicznymi wykonania.

Analiza teoretyczna i badania laboratoryjne wykazały, że istnieje możliwość zwiększenia prędkości obrotowej tego silnika i można się spodziewać, że po niewielkich zmianach konstrukcyjnych silnik osiągnie prędkość obrotową rzędu 100 000 obr/min.

Przy produkcji seryjnej tego typu silników należałoby dopracować technologię wykonania.

Literatura

- [1] Bianchi N., Bolognani S., Luise F.: *High Speed Drive Using a Slotless PM Motor*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 21, No 4, July 2006, pp.1083-1090
- [2] Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Miksiewicz R., Hetmańczyk J.: *Koncepcja budowy i realizacja wysokoobrotowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi*. Postępy w elektrotechnice stosowanej - PES-7, Kościelisko 2009
- [3] Krishnan R.: *Electric Motor Drives, Modelling, Analysis and Control*. Prentice Hall, New Jersey 2001.
- [4] Zwysig, C.; Kolar, J.W.; Thaler, W.; Vohrer, M.: *Design of a 100 W, 500000 rpm permanent-magnet generator for mesoscale gas turbines*. Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005, Vol 1, pp. 253 - 260

Autorzy

dr hab. inż. Krzysztof Krykowski, prof. Pol. Śl. Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Krzysztof.Krykowski@polsl.pl

dr inż. Roman Miksiewicz. Politechnika Śląska. Instytut Elektrotechniki i Informatyki. Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie. Gliwice, ul. Akademicka 10a, tel.322372844, e-mail: Roman.Miksiewicz@polsl.pl

mgr inż. Zbigniew Gałuszkiewicz Megatech, ul. ks. P. Drozdka 25, 42-660 Kalety e-mail: megatech@megatech.org.pl

dr inż. Janusz Hetmańczyk Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Janusz.Hetmanczyk @polsl.pl

mgr inż. Dawid Makiela Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Dawid.Makiela@polsl.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski