

Janusz Hetmańczyk¹, Krzysztof Krykowski¹,
Zbigniew Gałuszkiewicz³, Roman Miksiewicz², Dawid Makiela¹

¹ Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

² Politechnika Śląska, Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

³ Megatech Kalety

WYSOKOOBROTOWY SILNIK WZBUDZANY MAGNESAMI TRWAŁYMI

HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR

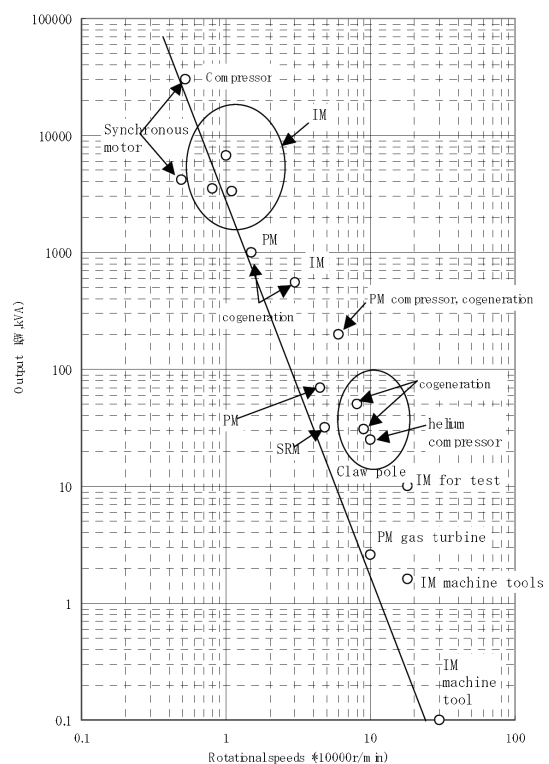
Abstract: The prototype of high-speed permanent brushless DC motor is presented in the paper. The principle of operation, control method and construction of high-speed motor are described. Disadvantageous phenomena appearing in high-speed PM BLDC motor and their methods of limitation during design process are considered. Selected cases of computer analyses and results of laboratory tests are presented in final part of paper.

1. Wprowadzenie

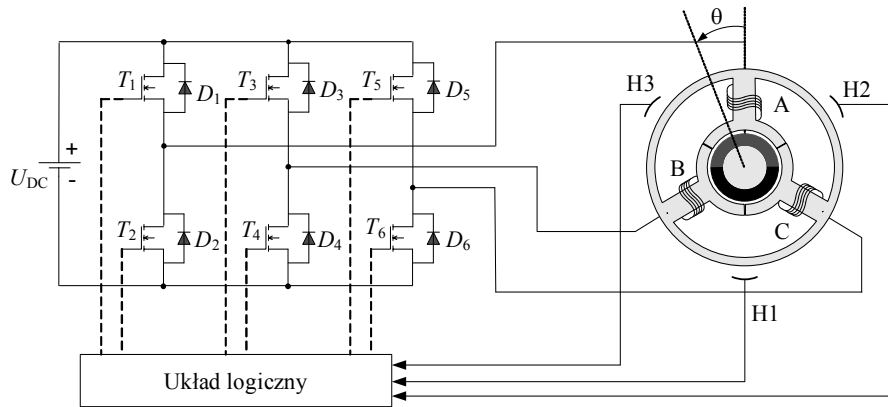
Silniki wysokoobrotowe są wykorzystywane w przemyśle samochodowym i wojskowym, w modelarstwie, stomatologii oraz w wielu urządzeniach jak sprężarki, obrabiarki i innych. Za maszyny wysokoobrotowe uważa się maszyny pracujące z prędkościami znacznie przekraczającymi typowe prędkości obrotowe. Dla silników wysokoobrotowych o najwyższych prędkościach obrotowych stosuje się nazwę silniki ultrawysokoobrotowe. Na rys. 1 przedstawiono podział silników na silniki wysokoobrotowe i ultrawysokoobrotowe [8].

Obecnie najczęściej stosowanymi silnikami elektrycznymi są silniki indukcyjne klatkowe (zwane również asynchronicznymi) oraz bezszczotkowe silniki o wzbudzeniu magnetoelektrycznym [2, 9]. Silniki wzbudzone magnesami trwałymi charakteryzują się stosunkowo prostą konstrukcją oraz dużą pewnością działania i są szczególnie korzystne w przypadku małych mocy. Podobnie jak silniki indukcyjne klatkowe wymagają zasilania z przekształtnika energoelektronicznego (komutatora elektronicznego). Ze względu na mały moment bezwładności, dużą sprawność oraz dużą gęstość mocy, silniki bezszczotkowe wzbudzone magnesami trwałymi są szczególnie predysponowane do zastosowania w napędach wysokoobrotowych. W ostatnich latach prowadzi się intensywne badania zarówno nad synchronicznymi silnikami z magnesami trwałymi PMSM [7] oraz nad bezszczotkowymi silnikami prądu stałego PM BLDC [3, 6, 10].

Dalsza część artykułu będzie poświęcona budowie wysokoobrotowego bezszczotkowego silnika prądu stałego o znamionowej prędkości obrotowej przekraczającej 50 000 obr/min, przy czym docelowo planuje się przekroczyć prędkość 100 000 obr/min.



Rys. 1. Podział silników wysokoobrotowych [8]



Rys. 2. Klasyczna struktura układu sterowania napędem elektrycznym

2. Zasada działania idealnego wysokoobrotowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi

Zasada działania wysokoobrotowego silnika wzbudzanego magnesami jest taka sama jak innych rodzajów silników PM BLDC i została ona przedstawiona schematycznie na rysunkach 2 oraz 3 [4, 5]. Poszczególne uzwojenia fazowe są przełączane sekwencyjnie przez tranzystory mostka na podstawie informacji z czujników położenia wirnika (najczęściej są to czujniki Halla), w skrócie CPW. Sygnały uzyskane z czujników położenia po przetworzeniu w układzie logicznym wyznaczają obszary załączania zaworów komutatora elektronicznego. Przebiegi strumieni skojarzonych z poszczególnymi uzwojeniami fazowymi, odpowiadających im sygnałom z czujników położenia, fazowych prądów oraz sił elektromotorycznych dla silnika o jednej parze biegunów przedstawiono na rysunku 3.

Przebiegi przedstawione na rysunku 3 odpowiadają sytuacji, gdy hallotrony są umieszczone w osiach poszczególnych faz. Przyjmując, że dla analizowanego przedziału czasowego (punktu) prąd i fazowa SEM silnika są stałe uzyska się wyrażenia:

$$M_{ek} = \frac{e_k i_k}{\omega} \quad (1)$$

oraz

$$M_e = \sum_{k=1}^3 M_{ek} \quad (2)$$

opisujące składową momentu elektromagnetycznego wytwarzaną przez uzwojenie k -tej fa-

zy oraz całkowity moment elektromagnetyczny wytwarzany przez silnik. Wprowadzając dla k -tej fazy współczynnik wzbudzenia $K_{fk}(\theta_{ek})$ i względny współczynnik wzbudzenia $k_{fk}(\theta_{ek})$ w funkcji elektrycznego kąta obrotu, zdefiniowane jako:

$$K_{fk}(\theta_{ek}) = \frac{e_k}{\omega_m} = p_b \frac{e_k}{\omega_e} = \Phi_m k_{fk}(\theta_{ek}) \quad (3)$$

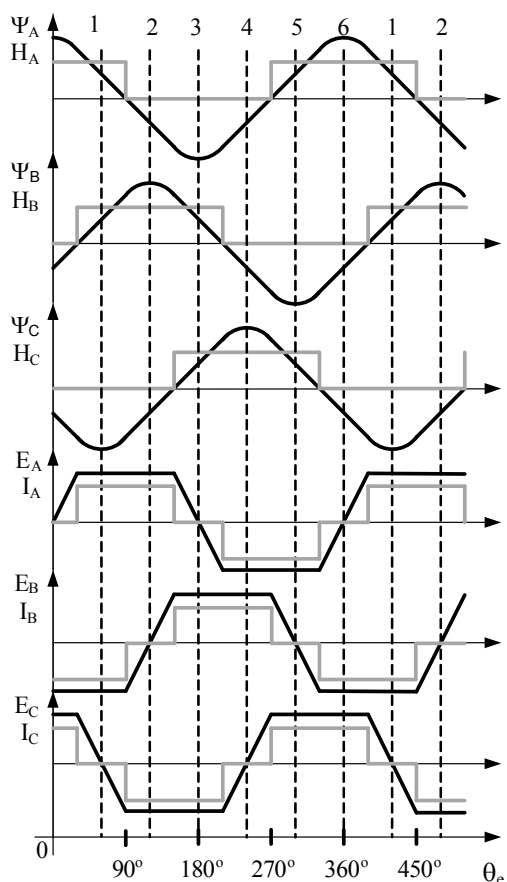
i zauważając, że w obszarze pracy zaworów współczynnik wzbudzenia dla silnika idealnego jest stały, można zależności wiążące prąd i moment elektromagnetyczny k -tej fazy oraz prędkość i SEM zapisać w postaci:

$$M_{ek} = i_k K_{fk}(\theta_{ek}) = i_k \Phi_m k_{fk}(\theta_{ek}) \quad (4)$$

oraz

$$e_k = \omega_m K_{fk}(\theta_{ek}) = \omega_m \Phi_m k_{fk}(\theta_{ek}) \quad (5)$$

Regulacje napięcia można realizować na wejściu komutatora elektronicznego stosując dodatkowy regulator napięcia lub stosować regulację w komutatorze stosując np. modulację szerokości impulsów (PWM). W tym drugim przypadku sygnały bramkowe zaworów energoelektronicznych są iloczynem sygnałów bramkowych w układzie o nieregulowanym napięciu i impulsowego sygnału sterującego wypełnieniem pulsu napięcia wyjściowego komutatora elektronicznego.



Rys. 3. Przebiegi napięć prądów i strumieni w idealnym wysokoobrotowym silniku PM BLDC

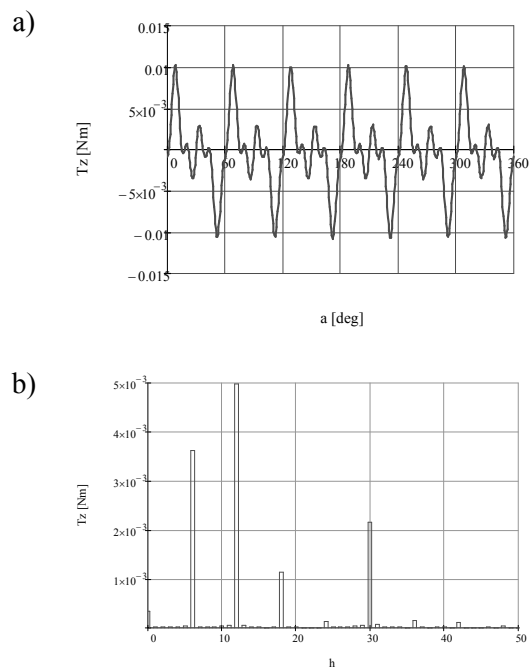
3. Silnik wysokoobrotowy – budowa oraz problemy przy projektowaniu silnika

Przy projektowaniu wysokoobrotowego bezszczotkowego silnika prądu stałego postępuje się podobnie jak w przypadku innych silników PM BLDC. W silniku tym pojawia się szereg niekorzystnych zjawisk, które znacznie komplikują konstrukcję silnika [1, 2, 9], a mianowicie:

- następuje wzrost strat w obwodach magnetycznych i elektrycznych, spowodowanych wyższą częstotliwością prądów, niż w typowych konstrukcjach,
- występują momenty zaczepowe o charakterze reluktancyjnym,
- pojawia się wpływ histerezy czujników położenia wirnika,
- na wirnik działają duże siły odśrodkowe .

W projekcie wykonanego prototypu wysokoobrotowego bezszczotkowego silnika prądu stałego przyjęto konstrukcję 3 - fazową z uzwoje-

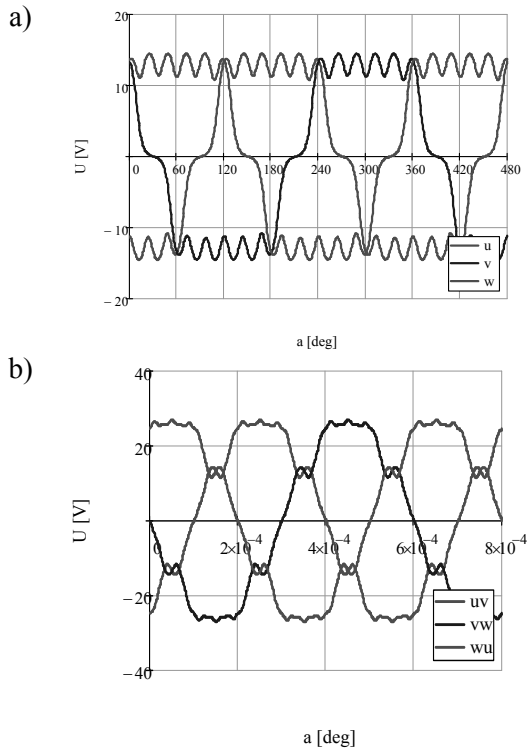
niami połączonymi w gwiazdę. W celu zmniejszenia strat w obwodach magnetycznych zdecydowano się zastosować blachy z materiałów amorficznych. Blachy te cechują się nieco gorszymi właściwościami magnetycznymi ze względu na większą rezystywność i wąską pętlę histerezy, ale posiadają zdecydowanie mniejszą stratność, również przy wyższych częstotliwościach. Takie rozwiązanie polepszyło istotnie właściwości silnika, ale utrudniło proces obróbki (blachy amorficzne są twarde i kruche). Wybór rodzaju uzwojenia głównie związany jest z technologią wykonania, długością czół, liczbą i przekrojem przewodów, ale z uwagi na wysoką częstotliwość przełączeń i ograniczenie strat dodatkowych, uzwojenia nawinięto licą. Ze względu na dużą prędkość obrotową (mała liczba zwojów) uzyskano jednocześnie zwiększenie gęstości prądu w uzwojeniach.



Rys. 4. Przebieg momentu zaczepowego a); oraz b) widmo harmonicznych momentu zaczepowego

W zależności od kształtu żłobka oraz od wielkości szczeliny powietrznej w projektowanym silniku wystąpią lub zostaną znacznie zredukowane momenty zaczepowe. Aby dobrać odpowiednio kształt żłobka oraz wielkość szczeliny powietrznej przeprowadzono badania symulacyjne komputerowe przy zastosowaniu metody elementów skończonych (rys. 4). Badania symulacyjne wykazały, że niski poziom momentu

zaczepowego poniżej 10% momentu znamionowego można uzyskać stosując żłobki półotwarte i szczelinę powietrzną rzędu 2 mm. Takie rozwiązanie zastosowano w przygotowywanym modelu silnika.

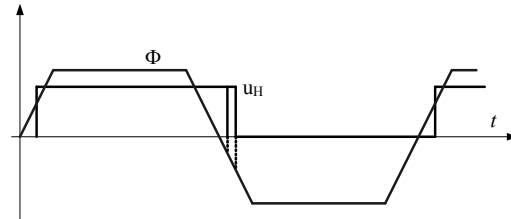


Rys. 5. Przebiegi napięć: a) fazowych, b) międzyfazowych wysokoobrotowego silnika

Na właściwości ruchowe silnika mają również wpływ zastosowane w silniku magnesy trwałe (najczęściej neodymowe). Przy doborze kształtów magnesów i kierunku magnesowania kierowano się kształtem przebiegu czasowego napięcia indukowanego oraz wartością momentu zaczepowego silnika. Dążono, aby napięcie indukowane w silniku było przedziałami stałe, co skutkuje zmniejszeniem pulsacji momentu (rys. 5).

Warunkiem poprawnej pracy silnika PM BLDC jest dokładne wyznaczenie chwil przełączania zaworów. W przypadku typowych silników wirujących z prędkościami rzędu kilku tysięcy obrotów na minutę za najkorzystniejsze rozwiązanie uważa się na ogół układy wykorzystujące czujniki Halla umieszczone na czołach uzwojeń silnika. W przypadku silnika wirującego z prędkością rzędu kilkudziesięciu tysięcy obr/min okazało się, że zjawisko histerezy pomijalne w typowych silnikach fałszuje pomiar (rys. 6). W celu eliminacji tego zjawiska prze-

sunięto czujniki Halla o dodatkowy kąt w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania oraz zastosowano dodatkowy elektroniczny układ korygujący sygnały z czujników Halla.

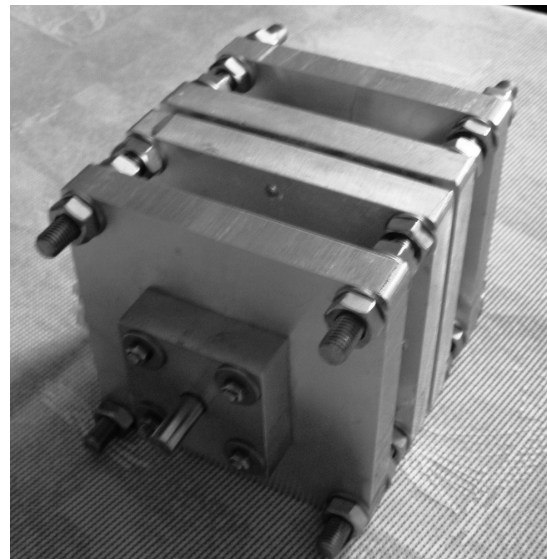


Rys. 6. Wpływ histerezy na sygnał wyjściowy hallotronowego czujnika położenia

4. Badania laboratoryjne

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i symulacji komputerowej wykonano prototypowy silnik o parametrach: $U_{DC} = 24 \text{ V}$, $n = 70\,000 \text{ obr/min}$, $M = 100 \text{ mNm}$. Wygląd zewnętrzny silnika przedstawiono na rysunku 7, zaś przebiegi zarejestrowanych wielkości przedstawiono na rys. 9-11.

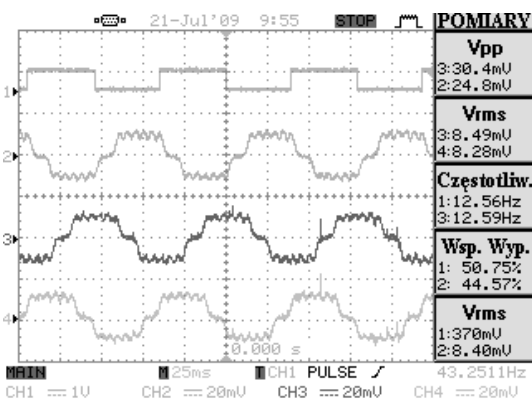
Na rysunku 8 przedstawiono przebieg z czujnika położenia wirnika oraz przebiegi napięć fazowych. Zarejestrowane przebiegi są podobne do przebiegów uzyskanych na drodze analizy komputerowej (rys. 5).



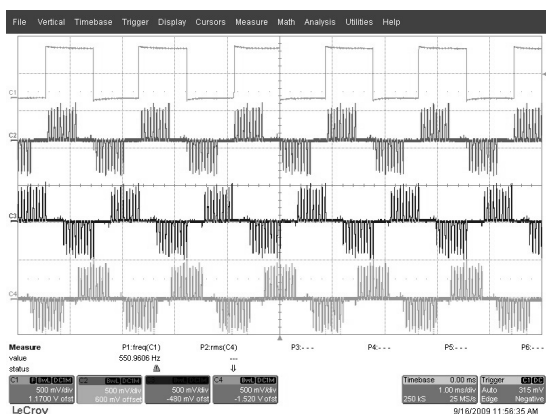
Rys. 7. Prototyp wysokoobrotowego silnika bezszczotkowego prądu stałego PM BLDC

Na rysunkach 9, 10, 11 – na których przedstawiono przebiegi sygnałów z czujnika położenia wirnika oraz dwóch prądów fazowych oraz sygnału z czujnika drgań dla wybranych wartości prędkości obrotowej wirnika. Jednym z kilku

problemów, które pojawiły się podczas uruchamiania silnika był rezonans mechaniczny. Zagadnienia rezonansu mechanicznego oraz sposoby jego eliminacji został zaprezentowany w innym artykule zamieszczonym w materiałach konferencyjnych pt.: „Rezonans mechaniczny w wysokoobrotowym silniku PM BLDC”

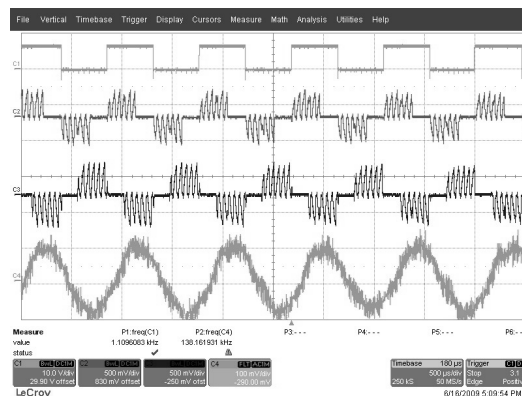


Rys. 8. Przebieg z czujnika położenia wirnika oraz przebiegi fazowych sił elektromotorycznych

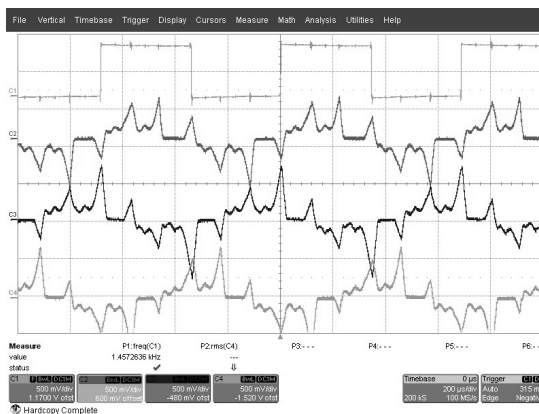


Rys. 9. Przebieg z czujnika położenia wirnika oraz przebiegi prądów fazowych nieobciążonego silnika wirującego z prędkością 33 060 obr/min

W trakcie dotychczasowych prób uzyskano prędkość maksymalną przekraczającą 80 000 obr/min. Przewiduje się zwiększenie prędkości obrotowej tego silnika do 100 000 obr/min i więcej.



Rys. 10. Przebieg z czujnika położenia wirnika oraz przebiegi prądów fazowych nieobciążonego silnika wirującego z prędkością 56 500 obr/min



Rys. 11. Przebieg z czujnika położenia wirnika oraz przebiegi prądów fazowych nieobciążonego silnika wirującego z prędkością 87 420 obr/min

5. Podsumowanie

Przeprowadzone rozważania i badania laboratoryjne i symulacyjne wykazały że:

1. Zaprezentowany wysokoobrotowy silnik PM BLDC zasilany napięciem $U_{DC} = 24$ V osiąga prędkość 70 000 obr/min przy obciążeniu 100 mNm.
2. Na biegu jałowym prędkość silnika przekroczyła 80 000 obr/min.
3. Analiza teoretyczna i badania laboratoryjne wykazały, że istnieje możliwość poszerzenia zakresu prędkości obrotowej tego silnika i należy się spodziewać, że po drobnych korektach silnik osiągnie prędkość obrotową rzędu 100 000 obr/min.
4. W związku z licznymi zaletami i zapotrzebowaniem na ten typ silników należałoby zalecić dalsze badania nad silnikami wysokoobrotowymi PM BLDC.

6. Literatura

- [1]. Bianchi N., Bolognani S., Lusi F.: *Analysis and Design of a PM Brushless Motor for High-Speed Operations*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.20, No 3, September 2005, 629-637
- [2]. Buczek K.: *Examination of high-speed induction motor fed by voltage inverter*. Archives of Electrical Engineering, rok: 2005, Vol. 54, nr 3, s. 361—378
- [3]. 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
- [4]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2002.
- [5]. Krishnan R.: *Electric Motor Drives, Modelling, Analysis and Control*. Prentice Hall, New Jersey 2001.
- [6]. Model Motors - <http://www.modelmotors.cz>.
- [7]. Noguchi T., Kano M.: *Development of 150000 r/min, 1.5 kW Permanent Magnet Motor for Automotive Supercharger*. PEDS2007-Bangkok, 2A-03 (2007)
- [8]. Rahman M.A., Chiba A., Fukao T., *Super high speed electrical machines – summary*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 6-10, 2004, vol. 2, 1272-1275
- [9]. Sobczyński D.: *Wysokoobrotowy układ napędowy z silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika*. Przegląd Elektrotechniczny 7/8 (2006), 24-31
- [10]. Zwyssig C., Duerr M., Hassler D., Kolar J.W.: *An Ultra-High-Speed, 500000 rpm, 1 kW Electrical Drive System*. Power Conversion Conference - PC-C'07, Nagoya 2007, 1577 – 1583

Praca została wykonana w ramach projektu MNiSW - Fundusze Strukturalne nr POIG.01.03.01-00-058/08

Autorzy

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

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, Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych, ul. Akademicka 10a,
44-100 Gliwice,
E-mail: Roman.Miksiewicz@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