

Aleksander Fręchowicz, Politechnika Śląska, Gliwice  
Piotr Dukalski, Andrzej Białas, BOBRME KOMEL, Katowice

## PROJEKT NAPIĘDU SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO Z DWUSTREFOWYM UKŁADEM STEROWANIA WSPÓLPRACUJĄCYM Z SILNIKIEM PMBLDC

### THE PROJECT OF ELECTRIC CAR DRIVE WITH AN DUAL-ZONE SPEED CONTROL SYSTEM COOPERATING WITH PMBLDC MOTOR

**Abstract:** The article presents the concept of electric drive for the car, powered with innovative engine speed regulation system of brushless motor with permanent magnets. The project of the drive is realized by Silesian University of Technology and Research and Development Centre of Electrical Machines KOMEL. Described inverter circuit equipped with additional electronic key system is able to regulate the number of turns of the engine by switching power supply between the end of the armature windings and detach derived from winding. Such regulation of the number of turns in the machine makes possible to control motor speed directly and proportionately. In the following sections, authors describe the capabilities of using new innovative control system for drives with BLDC motor. In this paper some results of design calculation are shown. Authors present a 3D model of designed BLDC motor.

#### 1. Wstęp

We współczesnych napędach elektrycznych często stosuje się silniki z magnesami trwałymi. Dodatkowo, jeśli silniki mają napędzać pojazd elektryczny, wykorzystuje się zasadę pracy w dwóch strefach regulacji prędkości obrotowej. W strefie pierwszej zwanej strefą „stałego momentu” (przy mniejszych prędkościach) silniki pracują przy stałym momencie maksymalnym, natomiast w strefie drugiej zwanej strefą „stałej mocy” (przy większych prędkościach) powiększaniu prędkości obrotowej towarzyszy zmniejszanie wartości momentu maksymalnego silnika. Zmianę prędkości obrotowej w strefie stałego momentu we wszystkich silnikach z magnesami trwałymi uzyskuje się przez nastawianie amplitudy napięcia zasilającego uzwojenie twornika. Zmianę prędkości obrotowej w strefie stałej mocy uzyskuje się przez osłabianie pola magnesów (w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi), bądź przez stopniowe odłączanie (bocznikowanie) części uzwojenia za pomocą kluczy elektronicznych (w silnikach BLDC). Do tego celu wykorzystuje się połączone w gwiazdy tranzystory IGBT.

Według klasycznego podejścia, do nastawiania prędkości można wykorzystać jedynie napięcie  $U$  i strumień  $\Phi$ , bowiem prąd twornika  $I$  zależy od obciążenia silnika (wzór 1.1), a wszystkie pozostałe wielkości znajdujące się po prawej stronie wzoru są wielkościami stałymi.

O możliwościach regulacyjnych silnika prądu stałego decyduje wzór:

$$\omega = \frac{(U/2 - I \cdot R_{tw}) \cdot \pi \cdot m \cdot q}{N_1 \cdot k_u \cdot \dot{z} \cdot \Phi} \quad (1.1)$$

gdzie:

$U$  - napięcie zasilania,

$I$  - prąd płynący w uzwojeniu stojana,

$R_{tw}$  - rezystancja fazowa twornika,

$m$  - liczba faz,

$q$  - liczba zębów na biegun i fazę,

$N_1$  - liczba zwojów szeregowych w fazie uzwojenia,

$k_u$  - współczynnik uzwojenia,

$\dot{z}$  - liczba zębów,

$\Phi$  - strumień wzbudzenia.

Energoelektroniczny układ sterowania oraz silnik elektryczny ze specjalnie wykonanymi wprowadzeniami uzwojenia, umożliwiające zmianę liczby zwojów mogłyby pozwolić na regulację prędkości obrotowej silnika w inny sposób. Zmniejszanie liczby zwojów spowoduje proporcjonalne zmniejszenie maksymalnego momentu elektromagnetycznego silnika oraz zwiększenie jego prędkości obrotowej. Jest to więc typowa praca „przy stałej mocy”. Koncepcję takiego rozwiązania zarejestrowano w Urzędzie Patentowym.

Politechnika Śląska oraz Instytut BOBRME KOMEL w ramach współpracy nad projektem

rozwojowym podjęli się zaprojektowania napędu samochodu elektrycznego z zastosowaniem silnika BLDC z przełączalną liczbą zwojów. W ramach projektu planowane jest również zabudowanie nowopowstałego napędu w samochodzie i wykonanie jego testów ruchowych.

## 2. Założenia projektowe rozpatrywanego napędu elektrycznego

Opracowany układ napędowy samochodu elektrycznego, napędzanego bezszczotkowym silnikiem prądu stałego BLDC przeznaczony do pracy w dwóch zakresach regulacji (stałego momentu i stałej mocy), ma spełniać następujące założenia:

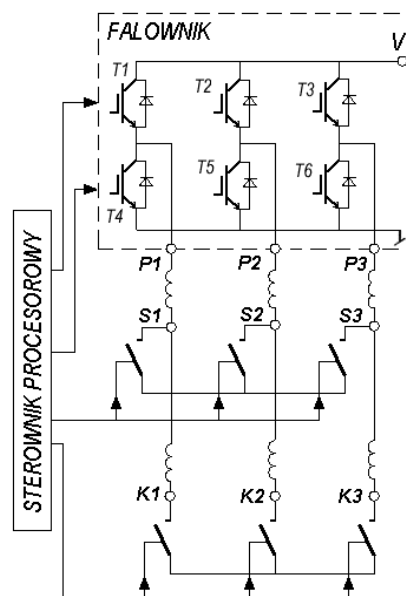
- napęd samochodu będzie się składać z falownika z wbudowanym dodatkowo zespołem kluczy elektrycznych bocznikujących część uzwojenia twornika, z baterii zasilającej oraz z silnika BLDC z magnesami trwałymi,
- samochód ma osiągać prędkość około 40km/godz. podczas pracy ze stałym momentem (I zakres regulacji) natomiast po przejściu do pracy w II zakresie regulacji (stałej mocy) powinien osiągać prędkość dwukrotnie większą, równą ok. 80 km/godz.,
- napęd zostanie zabudowany w samochodzie klasy mini,
- silnik samochodu będzie zasilany z baterii litowo jonowej.

## 3. Topologia falownika z możliwością dwustrefowej regulacji prędkości obrotowej silnika BLDC

Ideę silnika BLDC z bocznikowaną częścią uzwojenia pokazano na rys. 1, na którym środki uzwojenia (zaciski S1 do S3) są zwierane przez jeden zespół kluczy tranzystorowych, a końce uzwojeń (zaciski K1 do K3) przez drugi zespół. Działanie układu jest następujące. Podczas rozruchu i przy małej prędkości wirowania, na stałe zwarte są końce uzwojeń (zaciski K1 do K3), a rozwarne środki (zaciski S1 do S3). Wzrost prędkości odbywa się poprzez odpowiednie sterowanie szerokością impulsów tranzystorów falownika tak, by silnik zasilany był napięciem trójfazowym o coraz większej wartości skutecznej i częstotliwości. Jest to pierwszy etap pracy (praca w zakresie „stałego momentu”), w którym sterowanie jest takie same jak stosowane powszechnie w układach tego typu. Po osiągnięciu maksymalnej wartości skutecznej napięcia, gdy falownik pracuje przy

współczynnika wypełnienia zbliżonym do jedności, w sterowniku procesorowym pracę rozpoczyna drugi układ generowania impulsów. Dalszy wzrost prędkości obrotowej (już przy stałej wartości skutecznej napięcia) odbywa się poprzez zmianę współczynnika wypełnienia impulsów sterujących kluczami (tranzystorami IGBT) zwierającymi środki trzech faz stojana. Zmiana współczynnika wypełnienia prowadzona jest w ten sposób, by coraz większej prędkości odpowiadał coraz większy średni czas zwierania środków pasm (zacisków S1 do S3). Po osiągnięciu maksymalnej prędkości, łączniki zostają na stałe zwarte. W tym trybie silnik pracuje w strefie „stałej mocy”.

Przedstawiona wyżej zasada działania została podana w sposób mocno uproszczony. W rzeczywistym układzie regulacji prędkości uwzględnić należy jeszcze działanie kluczy zwierających końce uzwojeń (zaciski K1 do K3). Zadaniem tych kluczy jest zapobieganie powstawaniu prądów hamujących w dolnych cewkach uzwojenia. W najprostszym przypadku, podczas pracy silnikowej, bramki tranzystorów, z których zbudowane są klucze sterowane są tymi samymi impulsami co „górne” tranzystory falownika (T1 do T3). Podczas pracy z hamowaniem odzyskowym działanie kluczy jest bardziej skomplikowane.



Rys. 1. Schemat układu dwustrefowej regulacji prędkości silnika PMBLDC

Ponadto, klucze tranzystorowe muszą być wyposażone w diody zabezpieczające przed przepięciami powstającymi podczas odłączania czę-

ści uzwojenia. W niektórych stanach pracy te diody przejmują przewodzenie prądu elektrycznego. Dokładniejsze informacje o pracy silnika BLDC z bocznikowaną częścią uzwojenia twornika można znaleźć w [1] i [2]. Opisany sposób regulacji prędkości zastosowany do napędu pojazdu elektrycznego może również być stosowany w innych napędach wyposażonych w silniki z magnesami trwałymi, szczególnie w tych, w których wymagany jest mały moment bezwładności lub w których zastosowanie wirników typu IPM (czyli magnesów umieszczonych wewnątrz żelaza wirnika) jest trudne w realizacji (silniki tarczowe, silniki z wirującym zewnętrznym wzbudzeniem). W takich maszynach zastosowanie magnesów klejonych do powierzchni wirnika w połączeniu z techniką sterowania prędkości przez odzwabianie, powoduje niekorzystne szybkie zmniejszenie momentu silnika podczas powiększania jego prędkości.

#### 4. Samochód przeznaczony do elektryfikacji

W ramach projektu został zaprojektowany silnik przeznaczony do zastosowania w napędzie elektrycznego samochodu osobowego klasy mini. W celu przetestowania zaprojektowanego napędu Politechnika Śląska zakupiła samochód Renault Twingo. Pojazd zostanie wyposażony w napęd elektryczny opisany w tym artykule. Na przedstawionym rysunku 2 widać wspomniany samochód przeznaczony do elektryfikacji. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że we wnętrzu samochodu z powodzeniem zmieści się dedykowana przekładnia napędu oraz silnik elektryczny o mocy 25 kW z magnesami trwałymi o wzniosie wału 132.



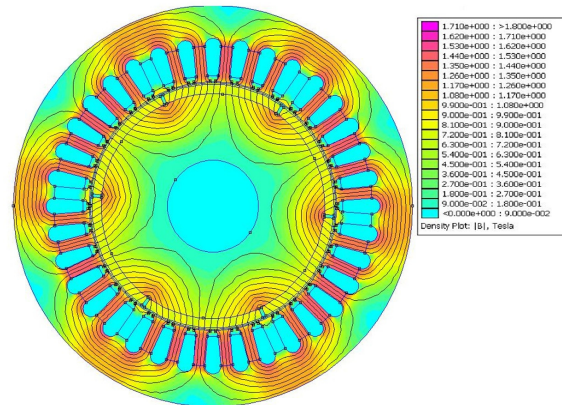
Rys.2. Widok samochodu, w którym zostanie zamontowany napęd elektryczny.

#### 5. Parametry silnika

Samochód będzie napędzany silnikiem BLDC (BrushLess Direct- Current motor). Silniki tego typu charakteryzują się stosunkowo dużą trwałością i niezawodnością dzięki wyeliminowaniu z ich konstrukcji szczotek.

Dzięki swojej niezawodności oraz możliwości sterowania prędkością obrotową są stosowane w różnych gałęziach przemysłu [4, 5, 6].

Silnik opisywanego w artykule napędu został zaprojektowany tak, aby osiągał wymagane parametry przy pracy z czynną pełną liczbą zwojów oraz przy pracy ze zwiększonym zakresem prędkości obrotowej z czynną połową liczby zwojów. Na rysunku 3 został przedstawiony rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu silnika.



Rys.3. Obliczony rozkład indukcji pola magnetycznego pochodzący od magnesów trwałych

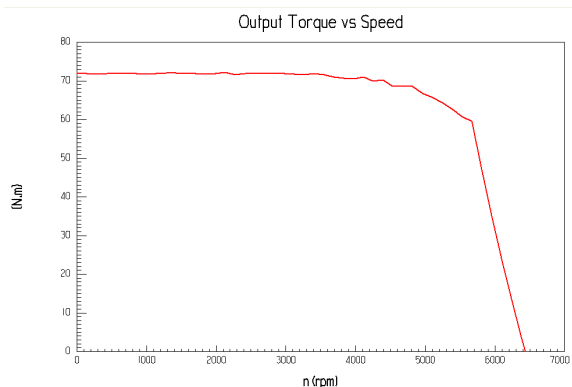
W tabelach 1 i 2 znajdują się zestawienia podstawowych parametrów zaprojektowanej maszyny.

Tab.1. Obliczone parametry silnika BLDC

Maksymalna liczba zwojów silnika	
Moc znamionowa $P_n$	25 kW
Napięcie znamionowe $U_n$	250 V <sub>DC</sub>
Prąd znamionowy $I_{rms N}$	160 A
Moment znamionowy	71 Nm
Znamionowa prędkość obrotowa $n_n$	3320 obr./min. (prędkość samochodu 40 km/h)
Sprawność	92 %

Na rysunku 4 przedstawiony został obliczony wykres momentu w funkcji prędkości obrotowej silnika na podstawie obliczeń obwodowych silnika.

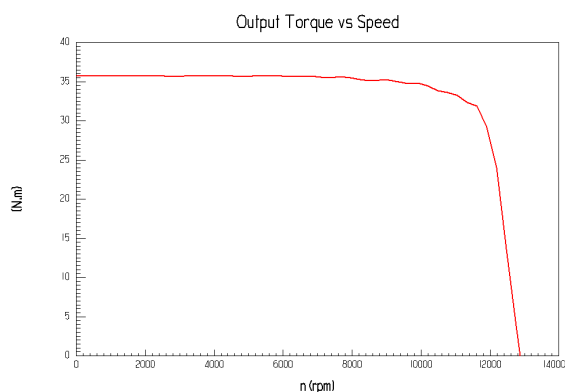
Można zauważyć, że silnik przy znamionowym zasilaniu będzie w stanie utrzymać stały moment równy 71 Nm w zakresie prędkości od 0 do 3320 obr/min. (prędkość samochodu w zakresie od 0 do 40 km/h).



Rys.4. Obliczony wykres momentu w funkcji prędkości obrotowej silnika BLDC przy maksymalnej liczbie zwojów

Tab.2. Obliczone parametry silnika BLDC

Liczba zwojów zmniejszona o połowę	
Moc znamionowa $P_n$	25 kW
Napięcie znamionowe $U_n$	250 V <sub>DC</sub>
Prąd znamionowy $I_{rms N}$	160 A
Moment znamionowy	36 Nm
Znamionowa prędkość obrotowa $n_n$	6690 obr./min. (prędkość samochodu 40 km/h)
Sprawność	86 %



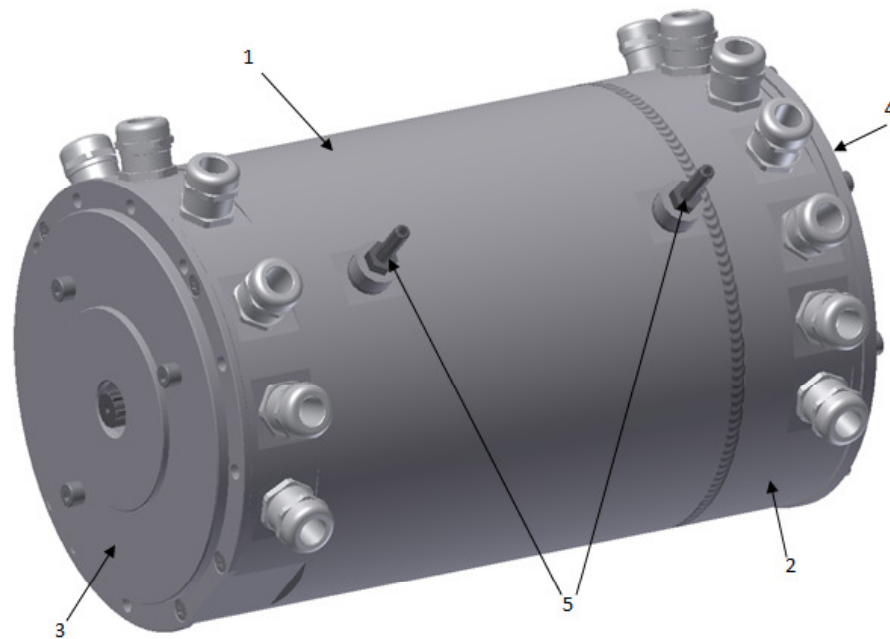
Rys.5. Obliczony wykres momentu w funkcji prędkości obrotowej silnika BLDC przy czynnej połowie liczby zwojów

Rysunek 5 przedstawia analogiczny wykres dla tego samego silnika po zmniejszeniu liczby zwojów o połowę. W tym przypadku według

przeprowadzonych obliczeń silnik uzyskiwałby moment obrotowy 36 Nm przy poszerzonym zakresie prędkości do około 6690 obrotów na minutę, co jest równoważne z prędkością całego napędu równą około 82 km/h.

## 6. Konstrukcja silnika PMSBLDC z przełączalną liczbą zwojów

Na podstawie przedstawionych obliczeń oraz założeń zaprojektowany został silnik typu SMztPA132M6 z magnesami trwałymi, przeznaczony do napędu samochodu osobowego. Model 3D silnika został przedstawiony na rysunku nr 6. Głównymi warunkami jakie zostały postawione konstruktorom silnika były jak najniższa masa, wymiary gabarytowe umożliwiające jego zamontowanie w samochodzie oraz zapewnienie odpowiedniego układu chłodzenia silnika. Aby silnik mógł być zastosowany w napędzie z układem regulującym liczbę zwojów należało w jego konstrukcji uwzględnić wyprowadzenie z kadłuba dwunastu przewodów zasilających uzwojenie stojana. Przewody te będą doprowadzone bezpośrednio do energoelektronicznego układu sterowania napędem. Takie rozwiązanie konstrukcyjne pozwoli falownikowi na pracę w różnych układach połączenia poszczególnych pasm uzwojenia. Na przedstawionym rysunku można zauważyć, że dławnice, przez które będą wyprowadzone przewody znajdują się zarówno po stronie napędowej, jak również po stronie przeciwnapędowej. Jest to rozwiązanie konieczne, ponieważ umieszczenie wyprowadzeń po jednej stronie znacznie osłabiłoby konstrukcję kadłuba maszyny. Dodatkowo mogłoby to stanowić utrudnienie podczas montowania silnika w samochodzie ze względu na rozmieszczenie przewodów oraz problem podłączenia tych przewodów, które znajdowałyby się pod silnikiem. W kadłubie zabudowany jest system chłodzenia w postaci spirali, przez którą przeprowadzane będzie chłodziwo. Zgodnie z przedstawionym modelem 3D po obu stronach zostały rozmieszczone dławnice po 6 na wyprowadzenia przewodów i jeden na wyprowadzenie przewodu sterowniczego - czujników temperatury oraz czujników Halla. W celu zmniejszenia masy silnika tarcze łożyskowe od strony napędowej (3) i przeciwnapędowej (4) oraz kadłub zostały wykonane ze stopu aluminium o odpowiednich właściwościach wytrzymałościowych oraz odpornych na korozję [8].



Rys. 6. Model 3D silnika PMBLDC

Kadłub składa się z płaszcza zewnętrznego (1) oraz płaszcza wewnętrznego (2), pomiędzy którymi przepływa czynnik chłodzący kadłuba podczas pracy silnika. Środek ten doprowadzony oraz odprowadzony jest przez złączki (5) zamontowane na płaszczu zewnętrznym kadłuba. Silnik zaprojektowany został tak, aby po zmontowaniu go z przekładnią pojazdu zachowany był stopień ochrony silnika IP55.

## 7. Bateria zasilająca napęd samochodu

Silnik zasilany będzie poprzez falownik z baterii litowo-jonowej.

W tabeli 3 przedstawiono szacowane parametry baterii, przeznaczonej do zasilania opisywanego w artykule napędu.

Tab.3.

*Szacowane parametry baterii litowo-polimerowej przeznaczonej do rozpatrywanego napędu*

Parametry baterii litowo-polimerowej	
$E_{\text{nominalna}}$	14 kWh
$U_{\text{nominalne}}$	250 VDC
$U_{\text{minimalne}}$	215 VDC
$U_{\text{maksymalne}}$	Ok. 300 VDC
Zakres temperatury pracy	Od -20° do + 40 ° C

Baterie tego typu są powszechnie stosowane w różnego rodzaju napędach elektrycznych w tym również w samochodach [3]. Przykładem może być trójkołowy samochód elektryczny polskiej produkcji SAM [9].

W napędach samochodów elektrycznych oraz hybrydowych często stosowane są akumulatory niklowo-metalowo-wodorowe jednak są one wypierane przez baterie litowo-jonowe, które należą do jednych z najłżejszych i do niedawna były stosowane powszechnie jedynie w sprzęcie elektronicznym. Wraz z pojawianiem się coraz to większej ilości samochodów z napędami hybrydowymi oraz elektrycznymi wzrasta zapotrzebowanie na stosunkowo duże pakiety akumulatorów zapewniających jak największy zasięg pojazdu.

Główne zalety baterii litowo-jonowych, dzięki którym zyskują one przewagę nad alternatywnymi bateriami stosowanymi w pojazdach elektrycznych to [3, 9]:

- wysoka gęstość energii,
- możliwość uzyskania wysokiego napięcia nominalnego,
- duża odporność na większą liczbę cykli rozładowań,
- stosunkowo niski stopień samoczynnego rozładowywania.

Baterie tego typu stosowane w napędach pojazdów są wyposażone w system BMS (Battery

Management System) stanowiący układ sterowania i bezpieczeństwa baterii.

Instytut BOBRME KOMEL ma doświadczenie w stosowaniu napędów złożonych z maszyn z magnesami trwałymi zasilanymi z baterii litowo-polimerowych wykorzystanych w różnych typach pojazdów. Przykładami projektów ukończonych oraz trwających są:

- samochód elektryczny Re-Volt (SAM),
- zelektryfikowany samochód Peugeot Partner,
- quad elektryczny,
- paralotnia elektryczna,
- samochód dostawczy o napędzie elektrycznym Pasagon,
- kolejka górnicza GAD-1 przeznaczona do pracy w strefach zagrożonych wybuchem pyłu i metanu.

## 8. Podsumowanie

Politechnika Śląska oraz Instytut BOBRME KOMEL opracowują napęd samochodu elektrycznego klasy mini. Napęd będzie wyposażony w innowacyjny układ sterowania współpracujący z silnikiem PMBLDC z przełączalną liczbą zwojów. Projekt obejmujący badania laboratoryjne, proces elektryfikacji samochodu oraz jego testy ruchowe, pozwoli na zbadanie działania układu energoelektronicznego sterującego napędem oraz da konstruktorom możliwość praktycznego zbadania efektywności i dynamiki jazdy pojazdu.

Zaprojektowany silnik oraz opisany w artykule układ sterowania mogą w przyszłości stanowić alternatywne rozwiązanie dla stosowanych w napędach elektrycznych silników synchronicznych z magnesami trwałymi.

## Literatura

- [1]. DUKALSKI P., FRĘCHOWICZ A.: *Napęd pojazdu elektrycznego z dwustrefowym silnikiem BLDC*, Śląskie Wiadomości Elektryczne, nr 6'2011, Katowice 2011.
- [2]. FRĘCHOWICZ A.: *Dobór diod zabezpieczających w falownikach silników BLDC z elektronicznym bocznikowaniem części uzwojenia*, referat na XXI Seminarium Techniczne BOBRME KOMEL „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Rytro, 23-25.05.2012.
- [3]. WEN XUHUI: *Research and Development of Electric Vehicle Key Technology in China*, International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics & Electromotion materials - Istanbul Turkey 2011.

[4]. PRZEPIÓRKOWSKI J.: *Silniki elektryczne w praktyce elektronika, cz2*. Elektronika Praktyczna 1/2004, str.95.

[5]. TARIMER I., SJUPNAR A., GUBUZ R.: *Design of a Direct Sliding Gearless Electrical Motor for a Ergonomic Electrical Wheelchair*. Electronics and Electrical Engineering, No. 3(83) / 2008, s. 75 - 80. ISSN 1392 - 1215.

[6]. GLINKA T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2002, ISBN 83-7335-087-X.

[7]. DĄBROWSKI Z.: *Wały napędowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999,

[8]. DOBRZAŃSKI L.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Wydawnictwo naukowo-techniczne 2003

[9]. <http://www.komel.katowice.pl>

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2011-2013 jako projekt rozwojowy.