

BEZSZCZOTKOWY SILNIK PRĄDU STAŁEGO O WZBUDZENIU MAGNESAMI TRWAŁYMI PRZEZNACZONY DO NAPĘDU WÓZKÓW AKUMULATOROWYCH***

STRESZCZENIE

W produkowanych obecnie wózkach akumulatorowych stosowane są silniki komutatorowe w wykonaniu szeregowym. Bezszcotkowe silniki prądu stałego zapewniają większą sprawność, trwałość i cichobieżność. Celem prowadzonych prac jest opracowanie, wykonanie i wdrożenie do produkcji bezszczotkowego silnika prądu stałego o mocy 8 kW przeznaczonego do wózków akumulatorowych produkowanych przez Fabrykę Maszyn w Leżajsku. W referacie przedstawiono zarysy projektu silnika wraz z układem sterowania o mocy 8 kW oraz wyniki badań wykonanego modelu silnika.

Słowa kluczowe: silniki bezszczotkowe, komutator elektroniczny, magnesy Nd-Fe-B

BRUSHLESS DC MOTOR EXCITED BY PERMANENT MAGNETS FOR BATTERY-ELECTRIC TRUCKS

This paper deals with design, assembling and measurements of 8kW brushless DC motor for battery-electric trucks. The paper contains of measurements of flux density in air gap, load and efficiency curves. It contains also measured currents and voltages in windings of motor.

Keywords: permanent magnet brushless motor, electronic commutator, Nd-Fe-B permanent magnets

1. WSTĘP

W produkowanych obecnie pojazdach trakcyjnych, do których należą wózki akumulatorowe, stosowane są najczęściej silniki komutatorowe w wykonaniu szeregowym. Wadą tych silników są zbyt duże gabaryty, zbyt wysoki poziom hałasu oraz zużywanie szczotek. Odbiorcy wózków akumulatorowych potrzebują wózków o lepszych parametrach technicznych, mniejszej uciążliwości eksploatacji. Zapewnienie takich parametrów umożliwiają nowe generacje bezszczotkowych silników prądu stałego o wzbudzeniu magnesami trwałymi. Takie silniki zapewniają większą sprawność, większą trwałość oraz cichobieżność. Im większa sprawność silnika elektrycznego, tym mniejsze zużycie pobieranej energii. Źródłem energii elektrycznej w tego typu pojazdach są akumulatory. Sprawność silników wpływa, między innymi, na pojemność i masę koniecznych do zastosowania akumulatorów.

Ostatnie lata przyniosły gwałtowny rozwój maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, który wynika z postępu dotyczącego technologii materiałów na magnesy trwałe. Nowe materiały magnetycznie twarde charakteryzują się bardzo korzystnymi, z punktu widzenia konstruktora maszyn elektrycznych, właściwościami magnetycznymi. Umożliwia to, między innymi, poprawę parametrów eksploatacyjnych silnika, np. większą sprawność oraz moc osiąganą z jednostki masy czy objętości maszyny.

Idea bezszczotkowego silnika polega na zastosowaniu jako źródła strumienia magnetycznego magnesów trwałych umieszczonych na wirniku. W ułożonym stojanie znajdują się pasma zasilane niezależnie ze sterownika.

Przebiegi pasmowej sem indukowanej w uzwojeniach silnika mają kształt trapezowy, a przebiegi prądów pasmowych twornika mają kształt prostokątny. Trapezowe przebiegi sem uzyskuje się przez odpowiednie rozłożenie uzwojeń na obwodzie stojana. Komutacja prądów w uzwojeniach jest zsynchronizowana z położeniem wirnika dzięki czujnikowi śledzącemu jego chwilowe położenie.

W artykule przedstawiono wyniki prac mających na celu opracowanie i wykonanie bezszczotkowego magnetoelektrycznego silnika prądu stałego o mocy 8 kW, przeznaczonego do napędu wózka akumulatorowego o ładowności 2000 kg produkowanego przez Fabrykę Maszyn w Leżajsku sp. z o.o.

2. PROJEKT SILNIKA

Celem prowadzonych prac było opracowanie bezszczotkowego sześciobiegunowego silnika prądu stałego magnetoelektrycznego o mocy 8 kW, $n = 2200$ obr./min. Producent wózków akumulatorowych przedstawił szereg ograniczeń dotyczących, między innymi, zasilania silnika z dotychczas wykorzystywanych akumulatorów o napięciu $U_n = 80$ V. Także gabaryty silnika muszą być dostosowane do konstrukcji produkowanego obecnie wózka akumulatorowego.

Wykorzystując klasyczny obwodowy model zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych, zaprojektowano silnik o założonych parametrach funkcjonalnych [1]. Następnie, wykorzystując polowo-obwodowy model zjawisk oraz opracowane na jego podstawie oprogramowanie do symulacji stanów pracy silników bezszczotkowych, przeprowadzono analizę obciążenia obwodu magnetycznego i elek-

* Instytut Tele- i Radiotechniczny, Warszawa

** Student trzeciego roku, Politechnika Warszawska, Wydział Matematyki i Nauk Informacyjnych

*** Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

trycznego silnika [2]. W opracowanym algorytmie i programie rozkład pola magnetycznego wyznacza się za pomocą elementów skończonych, a jego czasowy przebieg uzyskuje się, wykorzystując metodę kolejnych kroków czasowych. W rozważaniach uwzględniono nieliniowe właściwości materiałów magnetycznych, prądy wirowe indukowane w masywnych elementach przewodzących oraz dynamiczne odmagnesowanie magnesów trwałych [3]. Ponadto w programie obliczeniowym odwzorowano w sposób przybliżony półprzewodnikowy układ zasilający silnik [4]. Elementy półprzewodnikowe modelowano za pomocą nieliniowych rezystorów o rezystancji zależnej od prądu i czasu. Układ sterujący pracą układu zasilającego odwzorowywał klasyczny algorytm sterowania silnika bezszczotkowego [1, 5].

Magnes Nd-Fe-B charakteryzują się dużą koercją, która decyduje o ich odporności na rozmagnesowanie. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wersji silnika o wzbudzeniu spiekami magnesami Nd-Fe-B oraz diektromagnesami Nd-Fe-B. Właściwości magnetyczne magnesów przeznaczonych do projektowanego silnika przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Właściwości magnesów do projektowanego silnika

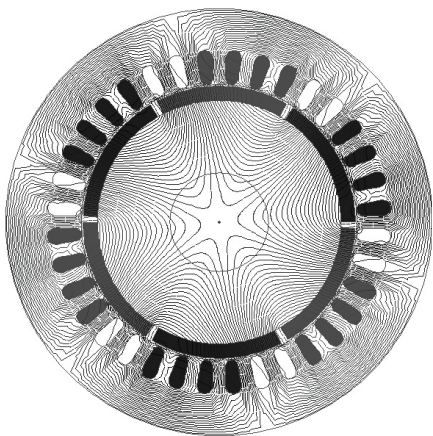
Table 1

Properties of magnets used in designed motor

Rodzaj magnesu	B_r [T]	H_{CB} [kA/m]	H_{CJ} [kA/m]	BH_{max} [kJ/m ³]
Magnes spiekany	1,00	750	1900	195
Diektromagnes	0,71	475	899	85

Analizowano wpływ prądu w uzwojeniach na rozkład indukcji w jarzmach stojana i wirnika, zębach, szczelinie powietrznej, magnesach oraz wpływ prądu na uzyskiwany moment elektromagnetyczny [6].

Rozkłady linii sił pola magnetycznego i rozkłady indukcji magnetycznej w szczelinie silnika pokazano dla silnika o wzbudzeniu spiekami magnesami Nd-Fe-B. Przykładowy rozkład pola uzyskany dla wybranej wartości I_m prądu w uzwojeniach przedstawiono na rysunku 1. Jak widać

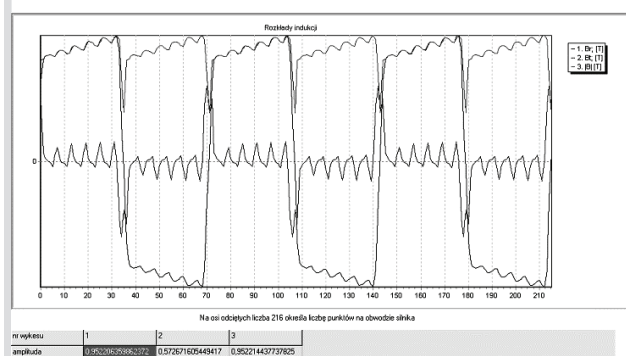


Rys. 1. Rozkład linii sił pola magnetycznego dla $I_m = 1820$ A

Fig. 1. Magnetic field force lines distribution, $I_m = 1820$ A

na rysunku, dla dużych wartości prądu I_m obserwuje się silne oddziaływanie twornika objawiające się dużą niejednorodnością rozkładu pola w obrębie krawędzi magnesów.

Przeprowadzono analizę rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej silnika. Rozpatrywano rozkład modułu $|B|$ wektora indukcji oraz składowych: radialnej B_r i stycznej B_t . Na biegu jałowym ($I_m = 0$) rozkład indukcji w szczelinie powietrznej wzdłuż obwodu wirnika jest zbliżony do prostokątnego, a wartość maksymalnej indukcji wynosi około 0,88 T. W miarę wzrostu obciążenia zmienia się rozkład indukcji w szczelinie (rys. 2). Pulsacje w rozkładzie indukcji spowodowane są zębami stojana, a odkształcenia rozkładu – oddziaływaniem twornika i zwiększa się ono ze wzrostem prądu.



Rys. 2. Rozkład indukcji w szczelinie powietrznej silnika dla $I_m = 132$ A

Fig. 2. Induction distribution inside motor air gap, $I_m = 132$ A

Wpływ oddziaływania twornika na magnesy pokazuje rozkład indukcji w magnesie. Na biegu jałowym, podobnie jak w szczelinie powietrznej rozkład indukcji zbliżony jest do rozkładu prostokątnego. Ze wzrostem prądu twornika rozkład ten coraz bardziej deformuje się. Z rozkładu indukcji w połowie wysokości magnesu dla $I_m = 1820$ A wynika, że jeden kraniec magnesu jest silnie odmagnesowany – indukcja ma wartość ujemną, a drugi kraniec magnesu jest domagnesowany – maksymalna indukcja wynosi około 2,06 T. Tak duże oddziaływanie twornika w sposób trwały zmniejsza strumień magnetyczny wytwarzany przez magnes. Zatem prąd w uzwojeniach nie może osiągać tak dużych wartości, ale zgodnie z założeniami związanymi z rodzajem stosowanych akumulatorów maksymalna wartość prądu pobieranego z nich wynosi 500 A [6].

Uzyskane rezultaty symulacji komputerowej potwierdzają obliczenia przeprowadzone za pomocą modelu obwodowego. Z wykonanych obliczeń wynika, że obwód magnetyczny zaprojektowano poprawnie – jest on nienasycony, tj. indukcje magnetyczne w elementach obwodu magnetycznego nie mają dużych wartości. Niska jest także gęstość prądu w uzwojeniach przy obciążeniu znamionowym ($j = 4$ A/mm²). Z przeprowadzonych obliczeń wynika ponadto, że w przypadku przyjętych materiałów magnetycznie twardych, dopuszczalny udarowy prąd wirnika nie spowoduje trwałego odmagnesowania magnesów [6].

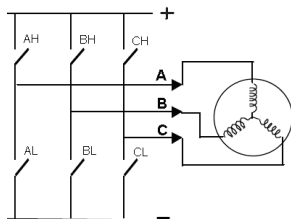
3. STEROWANIE SILNIKIEM

Dla właściwego sterowania silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi wymagane jest zastosowanie komutatora elektronicznego. Jest to urządzenie energoelektroniczne służące do przełączania faz silnika umożliwiając jego kontrolowaną pracę. Aby sterownik pracował prawidłowo, silnik musi zostać wyposażony w czujnik położenia wału.

Sterownik silnika – komutator elektroniczny składa się z dwóch głównych podzespołów:

- 1) części sterującej wyposażonej w procesor sterujący,
- 2) końcówki mocy, która składa się z łączników tranzystorowych oraz ich sterowników.

Schemat blokowy stopnia mocy w regulatorach silników bezszczotkowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy stopnia mocy silnika bezszczotkowego
Objaśnienia w tekście

Fig. 3. Block diagram of power stage of brushless DC motor
Explanations in the text

Na rysunku 3 literami A, B, C oznaczono wyjscia faz silnika, natomiast symbolami AH, AL, BH, BL, CH, CL – tranzystory stopnia mocy.

Sterowanie pracą silnika polega na odpowiednim otwieraniu i zamykaniu tranzystorów mocy, co zmienia przepływ prądu w uzwojeniach silnika w zależności od sygnału otrzymanego z czujnika położenia wału. Czujnik położenia składa się z trzech hallotronów i wielobiegunowego magnesu trwałego umieszczonego na wale silnika. Hallotrony wytwarzają sygnały elektryczne w postaci binarnej. Czujnik umożliwia pomiar położenia wału silnika z dokładnością do 20 stopni mechanicznych.

Algorytm sterowania tranzystorami mocy przedstawiony jest w tabeli 2. Cyfra 1 w tabeli oznacza stan wysoki hallotronu, a cyfra 0 stan niski. W przypadku tranzystorów mocy cyfra 1 oznacza, że tranzystor przewodzi prąd, a cyfra 0 że nie przewodzi.

Tabela 2

Algorytm sterowania tranzystorami mocy
Objaśnienia w tekście

Table 2

Algorithm of controlling the power transistors
Explanations in the text

HALOTRONY								
A	B	C	AH	BH	CH	AL	BL	CL
1	0	1	1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	1	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	0	1	0	1	0

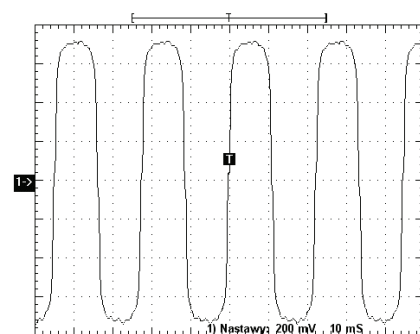
Zmiana kierunku wirowania wirnika wymaga zamiany sterowania tranzystorów oznaczonych literą H z tranzy-

storami oznaczonymi literami L. Sterowanie obrotami i momentem silnika odbywa się przez regulację natężenia prądu płynącego przez uzwojenia.

4. BADANIA SILNIKÓW

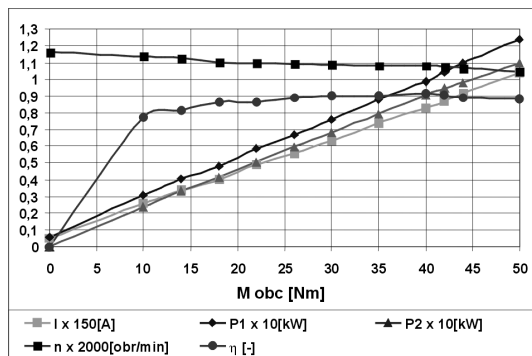
Na podstawie uzyskanych danych obliczeniowych wykonano modele silników. Podstawowe wymiary silnika są następujące: średnica zewnętrzna stojana – 208 mm, średnica wirnika wraz z magnesami – 132,6 mm, długość szczeliny powietrznej – 0,7 mm. Długość pakietu stojana oraz wirnika – 114 mm. Uzwojenie silnika jest trójfazowe, połączone w gwiazdę. Na wirniku naklejono magnesy spiekane ze stopu Nd-Fe-B o następujących parametrach: $B_r = 1,08$ T, $H_{CB} = 808$ kA/m, $H_{CJ} = 1989$ kA/m, $BH_{max} = 218$ kJ/m³. Wykonano też model silnika z diektromagnesami Nd-Fe-B o parametrach przedstawionych w tabeli 1.

Przeprowadzono badania modeli silników. Pomiary wykonywano w fabryce maszyn elektrycznych Wamel na przygotowanym stanowisku pomiarowym. Zmierzono charakterystykę mechaniczną silnika, wykonano próbę nagrzewania maszyny. Zarejestrowano przebiegi rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie silnika, przebiegi prądów i napięć fazowych (pasmowych). Określono także sprawność maszyny. Do obciążania bezszczotkowego silnika zastosowano prądnice prądu stałego wraz z rezystorami mocy na jej wyjściu. Do pomiaru momentu silnika stosowano momentomierz indukcyjny o zakresie do 200 N·m. Prędkość obrotową mierzono elektronicznym miernikiem prędkości obrotowej. Pomiar rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie silnika, bez uwzględnienia jej pulsacji spowodowanych występowaniem zębów w silniku, zarejestrowano przy użyciu oscyloskopu Tektronix TDS 210. W tym celu w szczelinie powietrznej silnika umieszczono przewód pomiarowy o długości równej długości wirnika i stojana. Zmierzono rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie poprzez pomiar i rejestrację siły elektromotorycznej zaindukowanej w pomiarowym przewodzie umieszczonym w szczelinie powietrznej silnika. Pomiarów dokonano dla dwóch prędkości wirowania wirnika silnika bezszczotkowego napędzanego zewnętrznym silnikiem prądu stałego o regulowanej prędkości obrotowej. Przykładowy rozkład indukcji w szczelinie silnika przedstawiono na rysunku 4 dla prędkości wirowania wirnika $n = 894$ obr./min.



Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie bezszczotkowego silnika magnetoelektrycznego;
1 dz = 200 mV, 1 dz = 10 ms

Fig. 4. Magnetic induction distribution in the brushless DC motor air gap, 1 div = 200 mV, 1 div = 200 ms



Rys. 5. Charakterystyki modelu bezszczotkowego silnika magnetoelektrycznego; P1 – moc pobierana przez silnik, P2 – moc oddawana do obciążenia

Fig. 5. Characteristics of brushless DC motor model; P1 – power taken by motor, P2 – power delivered to load

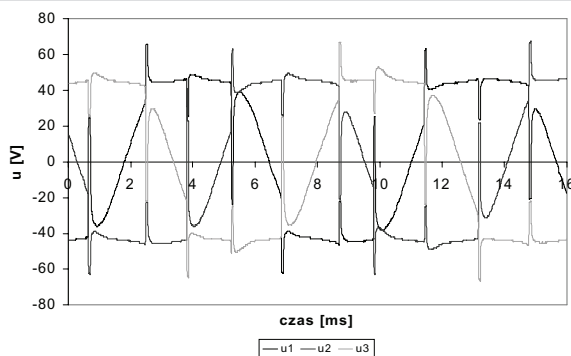
Wartość maksymalna zaindukowanej sem wynosi 720 mV, co przy stałych: długości przewodu pomiarowego, prędkości kątowej wirnika, średnicy wirnika, odpowiada maksymalnej indukcji magnetycznej w szczeliny równej ok. 1 T. Taką samą wartość maksymalną indukcji magnetycznej w szczeliny zmierzono za pomocą sondy pomiarowej gaussomierza. Na rysunku 5 przedstawiono zmierzone charakterystyki silnika.

Jak widać z rysunku 5, zmiana prędkości wirowania wraz ze wzrostem momentu obciążenia jest niewielka. Sprawność silnika wynosi ok. 90% dla prawie całego zakresu obciążeń.

Silnik przeznaczony jest do pracy przerywanej S2 60 min. W związku z tym wykonano próbę nagrzewania silnika. Silnik pozytywnie przeszedł próbę nagrzewania trwającą 1 godz. przy obciążeniu momentem 35 N·m przy prędkości wirowania wirnika ok. 2150 obr./min. Przyrost temperatury uzwojenia wyniósł 61,3°C. Jest on niewielki z uwagi na małą gęstość prądu w uzwojeniach. Dla tego punktu pracy silnika prąd wynosił 110 A przy zakładanym 118 A. Dokonano też pomiaru temperatury magnesów po próbie termoelementem i wyniosła ona 80°C.

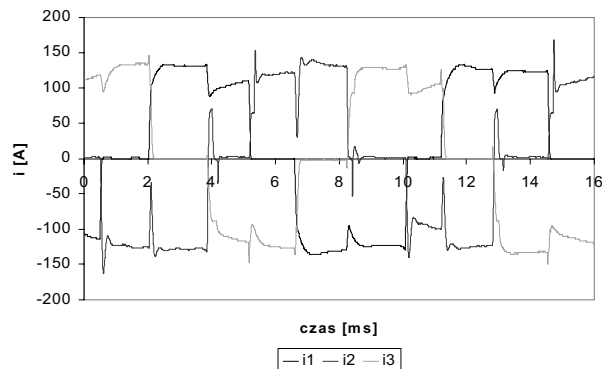
Zmierzono także moment rozruchowy silnika i wyniósł on 130 N·m, przy poborze prądu wynoszącym 400 A. Zatem jest większy od zakładanego, wynoszącego 95 N·m.

Za pomocą ośmiokanałowego oscyloskopu z sondami prądowymi i napięciowymi zarejestrowano przebiegi napięć i prądów pasmowych silnika. Przykładowe przebiegi pokazano na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Przebiegi napięć pasmowych silnika bezszczotkowego; $M_{obc} = 35 \text{ N}\cdot\text{m}$, $n = 2168 \text{ obr./min}$

Fig. 6. Phase voltages characteristic in brushless motor; $T_{load} = 35 \text{ N}\cdot\text{m}$, $n = 2168 \text{ round/min}$



Rys. 7. Przebiegi prądów pasmowych silnika bezszczotkowego; $M_{obc} = 35 \text{ N}\cdot\text{m}$, $n = 2168 \text{ obr./min}$

Fig. 7. Phase currents characteristics in brushless motor; $T_{load} = 35 \text{ N}\cdot\text{m}$, $n = 2168 \text{ round/min}$

Odchylenia od teoretycznych przebiegów prądów i napięć związane są m.in. z wykonaniem czujnika położenia wału silnika.

Obecnie trwają badania silnika bezszczotkowego o wzbudzeniu diektromagnesami Nd-Fe-B.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że silnik spełnia wymagane parametry techniczne. Z przebiegu charakterystyki mechanicznej silnika wynika, że silnik osiągnął moc około 8 kW przy obciążeniu go momentem 35 N·m. Prąd pobierany przez silnik wynosi 110 A i jest mniejszy niż zakładany w stanie znamionowym 118 A. Sprawność silnika mieści się w przedziale zakładanym przez producenta wózków akumulatorowych i wynosi ok. 90% dla obciążenia znamionowego, natomiast moment rozruchowy jest większy od zakładanego o 37%.

Badania wykonano w ramach projektu celowego nr 6 T10 2003C/6269 finansowanego przez Fabrykę Maszyn w Leżajsku sp. z o.o i Ministerstwo Edukacji i Nauki.

Literatura

- [1] Gieras J., Wing M.: *Permanent magnet motor technology*. New York, Marcel Dekker, Inc., 2002
- [2] Ślusarek B., Szeląg W., Długiewicz L., Gromek J.: *Application of dielectromagnetics and dielectromagnets in high speed electric motors*. XII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Baiona, Spati, September 15–17 2005
- [3] Szeląg W.: *Demagnetization effects due to armature transient currents in the permanent magnet self starting synchronous motor*. EMF'2000, Gent (Belgia), 17–19 May 2000, 93–94
- [4] Piriou F., Razeq A.: *Finite element analysis in electromagnetic systems accounting for electric circuits*. IEEE Trans. Magn., 1993, Vol. 29, No. 2, 1669–1675
- [5] Demenko A.: *Time stepping FE analysis of electric motor drives with semiconductor converter*. IEEE Trans. Mag., 1994, Vol. 30, No. 5, 3264–3267
- [6] Ślusarek B., Szeląg W.: *Brushless DC motor for battery-electric trucks*. Six International Conference on Computational Electromagnetics CEM 2006, Aachen 4–6 April 2006

Wpłynęło: 26.09.2006



Barbara ŚLUSAREK

Absolwentka Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej. Pracę doktorską obroniła na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, a w roku 2002 uzyskała stopień naukowy doktora habilitowanego nauk technicznych w zakresie elektrotechniki –

materiałoznawstwa elektrotechnicznego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Obecnie pracuje na stanowisku docenta w Instytucie Tele- i Radiotechnicznym w Warszawie. Głównym obszarem zainteresowań naukowych są materiały magnetyczne i technologie wytwarzania magnesów trwałych z szybko chłodzonej taśmy Nd-Fe-B oraz kształtowania ich właściwości magnetycznych, mechanicznych, termicznych i elektrycznych. Ostatnie badania koncentrują się na wytwarzaniu magnesów wielobiegunowych oraz zastosowaniu proszkowych obwodów magnetycznych w maszynach elektrycznych. Jest autorką lub współautorką około 150 publikacji naukowych w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych krajowych i zagranicznych.

e-mail: barbara@itr.org.p



Piotr GAWRYS

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, gdzie w roku 2004 uzyskał tytuł mgr. inż. na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn w zakresie mikromechaniki. Obecnie pracuje na stanowisku asystenta w Instytucie Tele- i Radiotechnicznym w War-

szawie. Główne zainteresowania związane są z technologią wytwarzania oraz magnesowania magnesów trwałych ze stopów Nd-Fe-B polem impulsowym. Jest autorem lub współautorem 10 publikacji naukowych w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych krajowych i zagranicznych.

e-mail: pgawrys@itr.org.pl



Marek PRZYBYLSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, gdzie w roku 2004 uzyskał tytuł mgr. inż. elektryka w zakresie maszyn elektrycznych i układów wykonawczych automatyki. Obecnie pracuje na stanowisku asystenta w Instytucie Tele- i Radiotechnicznym w Warszawie. Zain-

teresowania naukowe związane są z obliczeniami elektromagnetycznymi maszyn elektrycznych z zastosowaniem proszkowych obwodów magnetycznych. Jest autorem lub współautorem siedmiu publikacji naukowych w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych krajowych i zagranicznych.

e-mail: mprzybyl@itr.org.pl



Tomasz CZEKAŁA

Student III roku Informatyki na Wydziale Matematyki i Nauk Informatycznych Politechniki Warszawskiej. W roku 2003 Laureat Turnieju Młodych Fizyków.

e-mail: czekalat@student.mini.pw.edu.pl