

Jakub ŻREBIEC, Adam PIŁAT
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

IDENTYFIKACJA SIŁY ELEKTROMOTORYCZNEJ W SILNIKU BLDC

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań identyfikacyjnych siły elektromotorycznej silnika BLDC (ang. brushless dc motor) przeznaczonego do autonomicznych aparatów latających (ang. UAV – unmanned aerial vehicle). Siła elektromotoryczna jest powszechnie uwzględniana w równaniach matematycznych opisujących modele silników BLDC. Ponadto jest źródłem informacji dla realizacji zadań identyfikacji orientacji wirnika względem stojana, procedury startowej i procedur sterowania. Z dotychczasowej analizy literatury wynika, że podczas projektowania algorytmów sterowania często zakłada się idealny kształt back-EMF. Niniejsza praca przedstawia wyniki badań identyfikacyjnych siły elektromotorycznej podczas pracy generatorowej jak i indukowanej w trakcie normalnego działania dla różnych prędkości obrotowych.

Słowa kluczowe: Silnik BLDC, Identyfikacja, siła elektromotoryczna

IDENTIFICATION OF ELECTROMOTIVE FORCE IN BLDC DRIVE

Summary: This paper shows results of identification experiments of electromotive force in BLDC motor, which is typically used in unmanned aerial vehicles - UAV. Electromotive force is commonly included in equations of mathematical model of BLDC drives. Moreover, it is source of information for identification of orientation of the rotor relative to the stator, start-up procedure and control algorithms. The literature analysis shows, that during development of control algorithms, the back electromotive is often assumed to be ideally shaped. This paper shows results of identification of electromotive force during normal and generator work for different angular speeds.

Keywords: BLDC, Identification, EMF

1. WSTĘP

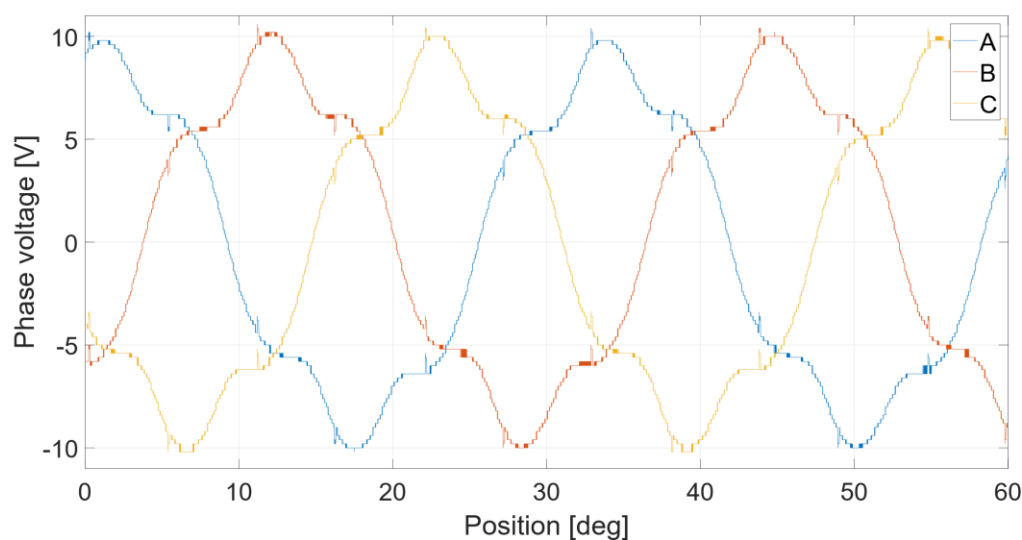
Siła elektromotoryczna jest powszechnie uwzględniana w równaniach matematycznych opisujących modele silników BLDC [1], [3], [8], [9]. Ponadto jest źródłem informacji dla realizacji zadań identyfikacji orientacji wirnika względem stojana, procedury startowej [2], [5] i procedur sterowania [1], [3], [4], [7]. W pracy [5] można znaleźć informacje o zależności indukowanej siły elektromotorycznej od ułożenia magnesów. Z punktu widzenia automatyki

i celu jakim jest opracowywanie nowych metod sterowania, poznanie obiektu stanowi podstawowy element w badaniach. Niniejsza praca ma na celu identyfikację napędu oraz pozyskanie danych eksperymentalnych do dalszych prac związanych z opracowaniem modelu matematycznego silnika BLDC.

Pomysł badawczy polega na zastosowaniu dwóch silników BLDC sprzężonych sprzęgłem i wyposażenie jednego z nich w enkoder analogowy do absolutnego pomiaru położenia kąowego wirnika. Sterowanie silnikiem napędowym z zadaną prędkością obrotową będzie skutkowało rotacją drugiego silnika i jego pracą w trybie generatorowym. Obserwacja napięcia w funkcji czasu i położenia kąowego wirnika będzie podstawą do prowadzenia analiz.

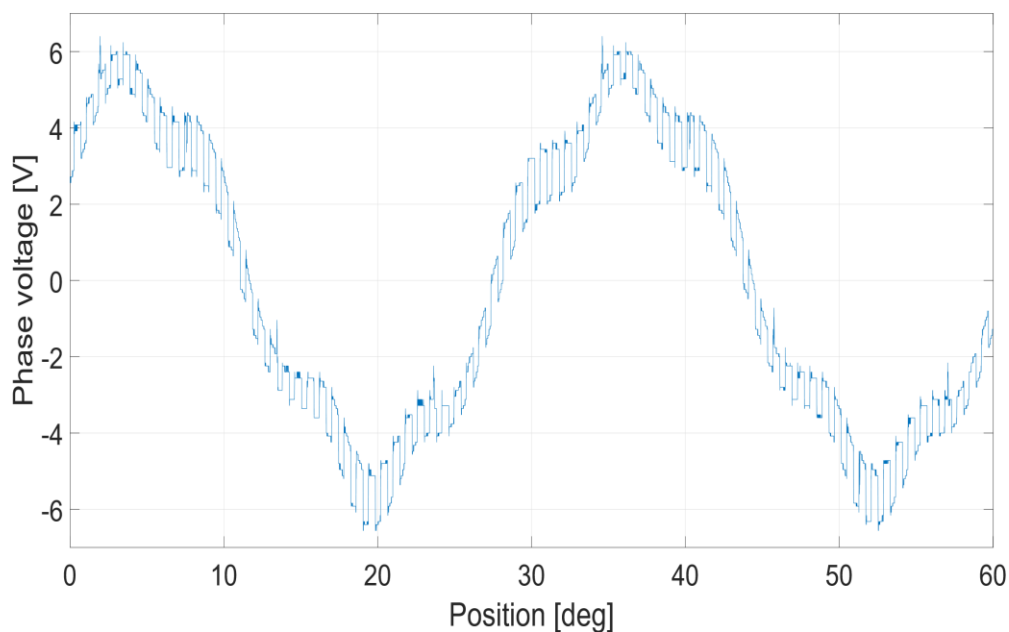
2. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko badawcze składa się z dwóch silników TAROT 4108 380KV, sprzęgła, enkodera analogowego RM08 firmy RLS, karty pomiarowo-sterującej RT-DAC PCI, oscyloskopu RIGOL DS1104Z. Komputer jest wyposażony w oprogramowanie MATLAB/Simulink, w którym generowano sygnał PWM odpowiadający zadanej prędkości obrotowej silnika napędowego. Pomiarów wykonywano oscyloskopem w następujących konfiguracjach: K1 – pomiar napięcia indukowanego przez generator i kąt położenia wirnika, K2 – pomiar napięcia występującego na fazach silnika i kąt położenia wirnika.



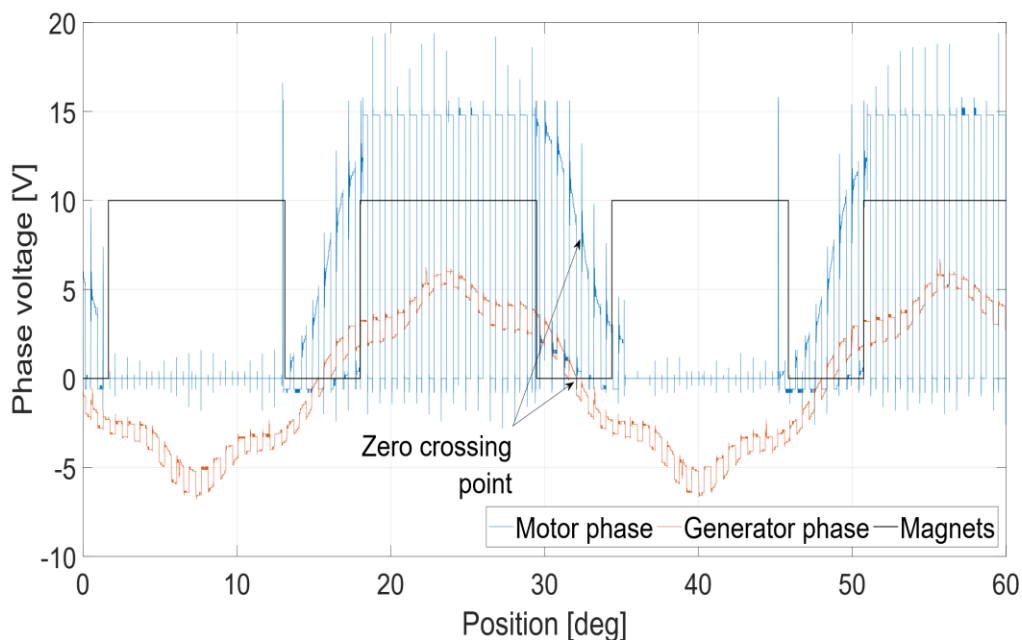
Rys. 1. Napięcie generowane na poszczególnych fazach generatora przy maksymalnej prędkości obrotowej (5695 RPM) w funkcji położenia

Fig. 1. Voltage generated on individual phases of the generator at maximum angular speed (5695 RPM) as a function of position



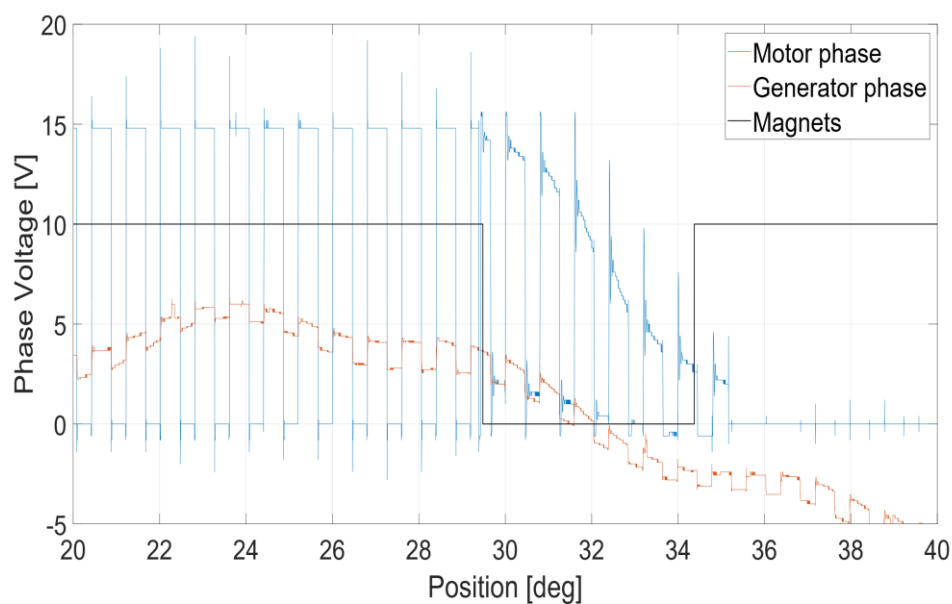
Rys. 2. Napięcie wyindukowane w generatorze na jednej z faz przy prędkości obrotowej 3187 RPM w funkcji położenia kąowego

Fig. 2. Voltage induced in the generator on one of the phases at a rotational speed of 3187 RPM as a function of the angular position

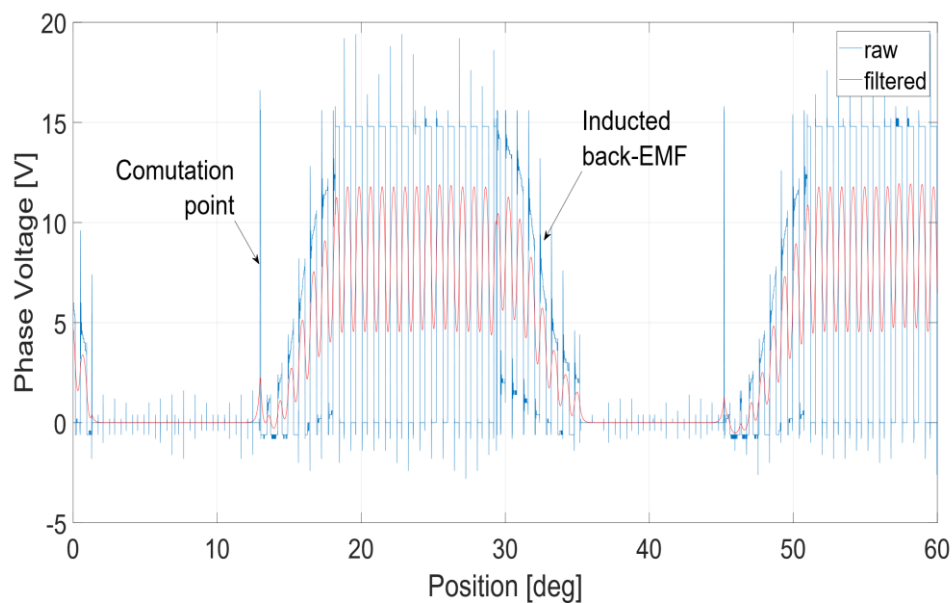


Rys. 3. Napięcie silnika i generatora oraz rozmieszczenie magnesów w funkcji położenia kąowego

Fig. 3. Motor and generator voltage and magnet placement as a function of angular position

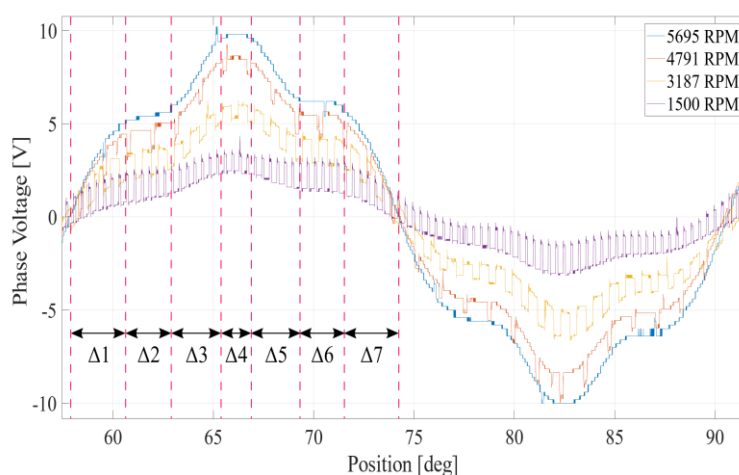


Rys. 4. Powiększenie wykresu z rysunku 3
 Fig. 4. Details of the chart from Fig. 3



Rys. 5. Napięcie na jednej z faz silnika przy prędkości obrotowej 3187 RPM w funkcji położenia kąowego, z zaznaczonym punktem zmiany kroku komutacji i indukowanym napięciem back-EMF

Fig. 5. Voltage at one of the motor phases at a rotational speed of 3187 RPM as a function of the angular position, with the commutation step change point and back-EMF induced voltage being marked



Rys. 6. Amplituda indukowanego napięcia dla różnych prędkości obrotowych
Fig. 6. Amplitude of induced voltage for various rotational speeds

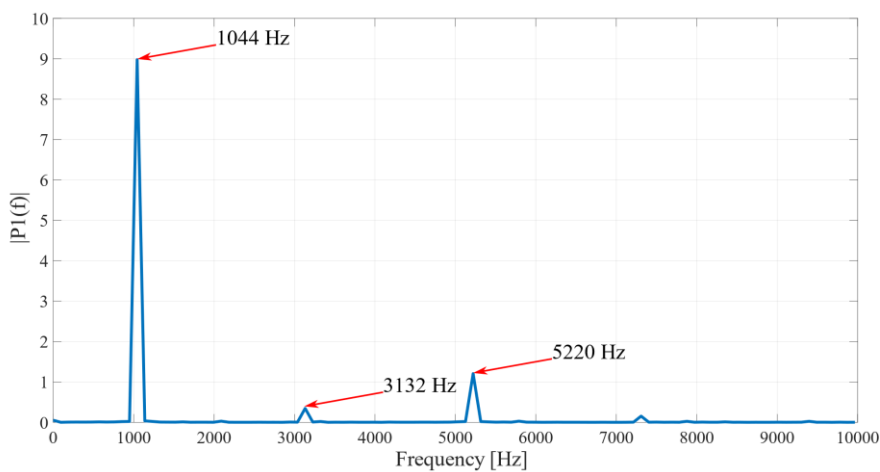
3. WYNIKI IDENTYFIKACJI

Na rys. 1 przedstawiono napięcie indukowane przez silnik pracujący w trybie generatora przy maksymalnej prędkości obrotowej. Analizując zarejestrowane sygnały można zauważyć, że przebiegi napięcia odbiegają od idealnego kształtu - trapezoidalnego, który przytaczany jest przez wielu autorów. Interesujący jest drugi wzrost (spadek) napięcia od $\sim 5V$ do $\sim 10V$ ($-5V$ ÷ $-10V$), który powstaje w wyniku oddziaływania magnesów trwałych ze stojanem o przewodności magnetycznej zależnej od kąta obrotu. Na rys. 2 pokazano napięcie indukowane na jednej z faz generatora przy prędkości obrotowej 3187 RPM. Widoczne na wykresie fluktuacje napięcia są wynikiem mikro-szarpnięć momentu obrotowego silnika napędzającego generator. Aby wykluczyć, że jest to jedynie zakłócenie wynikające z indukcji sygnału PWM w drugim silniku, rozprzęgnięto silniki i zmierzono indukowane napięcie na jednym z silników, podczas gdy drugi był zasilany tym samym sygnałem co wcześniej. Stwierdzono, iż amplituda indukowanego sygnału PWM wynosiła około 100mV. Natomiast amplituda, gdy silniki były połączone ze sobą było to $\sim 1V$. Na rys. 3 zaprezentowano napięcie zasilania jednej z faz silnika oraz indukowane napięcie na jednej fazie generatora w funkcji położenia. Dodatkowo naszkicowano hipotetyczną lokalizację magnesów, na podstawie analizy ich wymiarów geometrycznych, szczeliny między nimi oraz przebiegu napięcia. Precyzyjne zlokalizowanie magnesów wymaga rozbudowy stanowiska badawczego. Analiza wykazuje, że częstotliwość i wypełnienie sygnału PWM oraz oscylacje wygenerowanego napięcia są sobie równe. Ponadto stwierdzono, że 120 stopni elektrycznych odpowiada szerokości magnesu. Rys. 4 to powiększenie rys. 3. Na rys. 5 przedstawiono napięcie na jednej z faz silnika oraz przefiltrowaną jego wartość. Ponadto zaznaczono moment przejścia do następnego kroku komutacji oraz indukowane napięcie back-EMF. Na rys. 6 zaprezentowano różnice w amplitudzie indukowanego napięcia dla różnych prędkości obrotowych. Dane zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości sygnałów z rys. 6

Przedział	Szerokość [°]	Prędkość obrotowa [RPM]	Przedział napięcia [V]	Wypełnienie sygnału [%]
Δ_1	2,8	5695	0 – 5,2	100 %
		4791	0 – 4	86 %
		3187	0 – 2,5	57 %
		1500	0 – 1,2	31 %
Δ_2	2,3	5695	5,2 – 5,6	100 %
		4791	4 – 4,8	86 %
		3187	2,5 – 3,6	57 %
		1500	1,2 – 2,1	31 %
Δ_3	2,5	5695	5,6 – 9,6	100 %
		4791	4,8 – 8	86 %
		3187	3,6 – 5,4	57 %
		1500	2,1 – 3,2	31 %
Δ_4	1,5	5695	9,6 – 9,6	100 %
		4791	8 – 8	86 %
		3187	5,4 – 5,4	57 %
		1500	3,2 – 3,2	31 %
Δ_5	2,5	5695	9,6 – 6,2	100 %
		4791	8 – 5,4	86 %
		3187	5,4 – 4,3	57 %
		1500	3,2 – 2,8	31 %
Δ_6	2,3	5695	6,2 – 6,2	100 %
		4791	5,4 – 5,4	86 %
		3187	4,3 – 4,3	57 %
		1500	2,8 – 2,8	31 %
Δ_7	2,8	5695	6,2 – 0	100 %
		4791	5,4 – 0	86 %
		3187	4,3 – 0	57 %
		1500	2,8 – 0	31 %

Na rys. 7 przedstawiono analizę Fouriera zgromadzonych danych.



Rys. 7. Wykres Fouriera dla prędkości obrotowej równej 5695 RPM

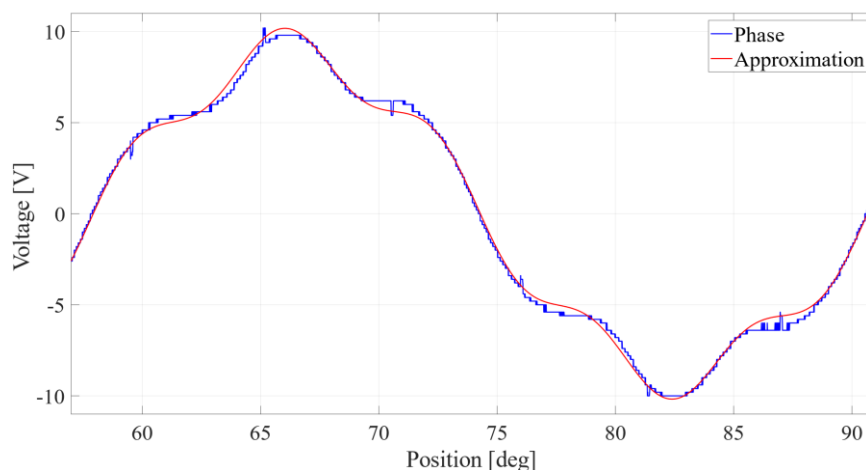
Fig. 7. Fourier plot for rotational speed of 5695 RPM

Pierwsza, dominująca szpilka (1044 Hz) jest główną częstotliwością generowanego sygnału, druga (3132 Hz) powstaje w wyniku komutacji (zmian zasilania faz silnika), natomiast ostatnia (5220 Hz) to składowa harmoniczna głównej częstotliwości, która przejawia się jako spłaszczenie widoczne w Δ_2 na rys. 6.

Na podstawie zebranych danych i analizy Fouriera wyznaczono analityczną postać równania opisującego kształt indukowanej siły elektromotorycznej.

$$f(\omega_e) = \lambda \omega_e (\cos(\omega_e t) + 0.12 \cos(5\omega_e t) - 0.15 \sin(\omega_e t)) ,$$

gdzie: λ – wartość strumienia indukcji magnetycznej, ω_e – elektryczna prędkość obrotowa. Porównanie sygnału zmierzonego i aproksymowanego dla prędkości 5695 RPM pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Napięcie zmierzone i aproksymowane dla prędkości obrotowej równej 5696 RPM.

Fig. 8. Phase voltage and its approximation for rotational speed of 5696 RPM.

4. WNIOSKI

Wnioskami z badań identyfikacyjnych są: kształt rzeczywistej, indukowanej siły elektromotorycznej odbiega od, często zakładanego, idealnego kształtu typu trapezoidalnego. Ponadto, wpływ modulacji napięcia zasilania sygnałem PWM na pracę silnika jest znaczący i powoduje drgania konstrukcji. Dlatego też dalsze prace badawcze będą ukierunkowane na opracowanie sterowania minimalizującego wibracje oraz optymalizującego pracę silnika przy uwzględnieniu rzeczywistych charakterystyk siły elektromotorycznej.

BIBLIOGRAFIA

1. Concari C., Troni F.: Sensorless control of BLDC motors at low speed based on differential BEMF measurement. "IEEE Energy Conversion Congress and Exposition" 2010.
2. Damodharan P., Sandeep R, Vasudevan K.: Simple position sensorless starting method for brushless DC motor. "IET Electric Power Applications" 2008, tom 2, nr 1, pp. 49-55.
3. Damodharan P., Vasudevan K.: Sensorless brushless DC motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (EMF) from the line voltage difference. "IEEE Transactions on Energy Conversion" 2010, tom 25, nr 3, pp. 661-668.
4. Domoracki A., Krykowski K.: Silniki BLDC - klasyczne metody sterowania. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 2005, tom 72, nr 49, pp. 155-159.
5. Korkosz M., Młot A., Łukaniszyn M.: Analiza wpływu kąta przesunięcia segmentów magnesów trwałych na parametry silnika BLDC małej mocy. Zeszyty Problemowe - „Maszyny Elektryczne” 2011, tom 5, nr 93, pp. 93-98.
6. Knypiński Ł, Nowak L., Radziuk K., Yvonnick L.: The field-circuit analysis of the start-up operation of the brushless DC motor. "Computer Applications in Electrical Engineering" 2010, tom 8, nr 10, pp. 93-104.
7. Li H., Zheng S., Ren H.: Self-Correction of Commutation Point for High-Speed Sensorless BLDC Motor With Low Inductance and Nonideal Back EMF. "IEEE Transactions on Power Electronics" 2017, tom 32, nr 1, pp. 642-651.
8. Pillay P., Krishnan R.: Modelling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. II. The brushless DC motor drive. "IEEE Transactions on Industry Applications" 1989, tom 25, nr 2, pp. 274-279.
9. Stępień S., Stranz A.: Back EMF Computation of BLDC Motor. "Przegląd Elektrotechniczny" 2013, nr 12, pp. 79-81.

Mgr. inż. Jakub ŻREBIEC

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Katedra Automatyki i Robotyki

Al. A. Mickiewicza 30-B1

30-059 Kraków

e-mail: jzrebiec@agh.edu.pl

Dr hab. inż. Adam PIŁAT

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Katedra Automatyki i Robotyki

Al. A. Mickiewicza 30-B1

30-059 Kraków

e-mail: ap@agh.edu.pl