

Dariusz SOBCZYŃSKI¹
Tomasz BINKOWSKI²

PRZEKSZTAŁTNIK W UKŁADZIE NAPĘDOWYM Z SILNIKIEM BLDC DLA BEZZAŁOGOWEJ PLATFORMY LATAJĄCEJ

W przypadku bezzałogowych platform latających, podobnie jak i innych pojazdów zasilanych energią elektryczną, problemem jest kompromis pomiędzy zasięgiem a ciężarem baterii akumulatorów. Aby wykorzystać energię elektryczną, a dzięki temu zwiększyć zasięg lub zmniejszyć ciężar statku powietrznego, konieczne jest zastosowanie do napędu śmigła wydajnych układów napędowych o wysokiej sprawności i małej wadze. Silnikami elektrycznymi, które charakteryzują się najkorzystniejszym stosunkiem mocy do ciężaru i które jednocześnie posiadają wysoką sprawność, są silniki bezszczotkowe prądu stałego BLDC. Silniki te są wystarczająco lekkie i wydajne, by można je stosować również w samolotach. W pracy przedstawiono projekt przekształtnika energoelektronicznego przeznaczonego do napędu elektrycznego z silnikiem BLDC, możliwego do zastosowania w bezzałogowej maszynie latającej. Układ napędowy składa się z silnika BLDC o mocy 0,5 kW, przekształtnika energoelektronicznego i układu sterowania. Pracą przekształtnika steruje układ mikroprocesorowy z układem logiki programowalnej FPGA rodziny Cyclone III – EP3C40 firmy Altera. Karta z wymienionym układem DBM3Cxx była osadzana na gotowej karcie bazowej DBM_CIII_Base, zawierającej interfejs JTAG oraz trzy bloki wejść/wyjść binarnych wykorzystywane do sterowania i pomiarów. Przedstawiono metodę doboru elementu układu oraz wykonania obwodu drukowanego.

Słowa kluczowe: bezzałogowy statek powietrzny, przekształtnik, silnik bezszczotkowy

1. Wprowadzenie

Problemem pojazdów zasilanych energią elektryczną jest kompromis pomiędzy zasięgiem a ciężarem baterii akumulatorów. W przypadku platform latających jest to czynnik krytyczny, lecz dzięki postępowi, jaki dokonał się w dziedzinie akumulatorów, możliwe jest wykonanie konstrukcji wykorzystujących ten rodzaj energii. Aby efektywnie wykorzystać energię elektryczną,

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Dariusz Sobczyński, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel. (17) 8651974, e-mail: dsobczyn@prz.edu.pl

² Tomasz Binkowski, tbinkow@prz.edu.pl

a dzięki temu zwiększyć zasięg lub zmniejszyć ciężar statku powietrznego, konieczne jest wykorzystanie do napędu śmigła wydajnych układów napędowych o wysokiej sprawności i małej wadze [1-4]. W wielu przypadkach są wykorzystywane konstrukcje oparte na układach hybrydowych, gdzie do dyspozycji ma się zarówno silnik elektryczny, jak i silnik spalinowy. Rola poszczególnych silników jest różna, np. samolot wznosi się i lata dzięki energii z akumulatorów, przy czym na pokładzie ma również silnik benzynowy jako dodatkowy, awaryjny napęd (lub odwrotnie napęd elektryczny pełni funkcje pomocnicze). Silnikami elektrycznymi, które charakteryzują się najkorzystniejszym stosunkiem mocy do ciężaru i jednocześnie posiadają wysoką sprawność, są silniki bezszczotkowe prądu stałego BLDC. Silniki te są wystarczająco lekkie i wydajne, by można je stosować również w samolotach. Zastosowanie energii elektrycznej do zasilania platform latających, podobnie jak w przypadku samochodów, jest związane poza kwestiami ekologicznymi z kosztami eksploatacji, które są około czterokrotnie niższe od rozwiązań konwencjonalnych. Napęd elektryczny jest bardziej niezawodnym rozwiązaniem od spalinowego. Również serwisowanie i obsługa takiego napędu jest prostsze i mniej kłopotliwe.

2. Układ napędowy z silnikiem BLDC

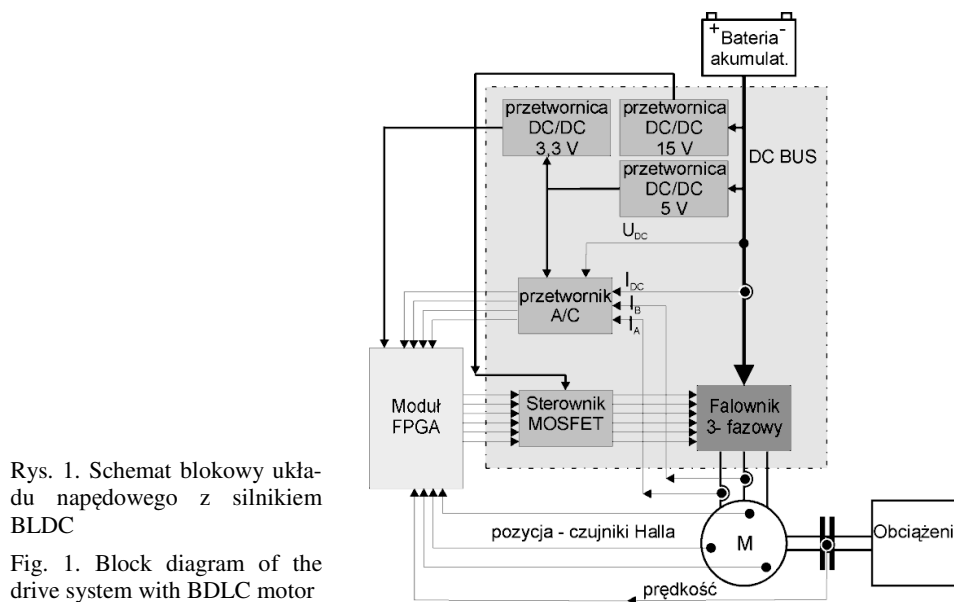
We wstępie przeprowadzono analizę wyboru rodzaju układu napędowego z uwzględnieniem zagadnień związanych z napędami wykorzystującymi silnik BLDC. Układ napędowy składa się zwykle ze źródła zasilającego, przekształtnika, silnika, przekładni i obciążenia. Przekształtnik elektroniczny pełni rolę komutatora elektronicznego, pozwalając na kontrolę prędkości obrotowej napędu. Zwiększenie znamionowej prędkości obrotowej silnika o magnesach trwałych pozwala na zmniejszenie jego wymiarów geometrycznych w stosunku do rozwiązań o mniejszej prędkości obrotowej o tej samej mocy wyjściowej, dzięki czemu zmniejsza się również masa maszyny prądu stałego. Silnik bezszczotkowy prądu stałego BLDC posiada trapezoidalny rozkład pola magnetycznego w szczelinie. Przy trapezoidalnym rozkładzie siły elektromotorycznej silnik jest najczęściej zasilany z trójfazowego falownika napięcia, w którym tranzystory są przełączane sześciokrotnie w ciągu okresu. Każda z faz jest załączona przez okres 120 stopni elektrycznych. W danej chwili w przewodzeniu prądu biorą udział dwie fazy silnika, natomiast trzecia pozostaje wyłączona. Zasilane są te fazy, które wytwarzają największy moment. W silniku BLDC moment elektromagnetyczny jest równy sumie momentów generowanych w poszczególnych fazach. Moment elektromagnetyczny m_e silnika BLDC określa zależność:

$$m_e = \frac{1}{\omega_r} (i_a e_a + i_b e_b + i_c e_c) \quad (1)$$

gdzie: i_a, i_b, i_c – prądy w poszczególnych fazach silnika,

e_a, e_b, e_c – siły elektromotoryczne pasm silnika,
 ω_r – prędkość wirnika.

Zasilanie silników elektrycznych z przemienników częstotliwości wymaga nowych rozwiązań w konstrukcji samych silników. Również zasilanie przekształtnika ze źródła niskonapięciowego charakteryzuje się specyficzną konstrukcją, porównując ją do klasycznych rozwiązań wysokonapięciowych, gdzie źródłem napięcia dla przekształtnika jest linia zasilająca. Do sterowania przekształtników są stosowane różne techniki modulacji zmniejszające odkształcenie przebiegów napięciowych i prądowych. Ogólny schemat układu przekształtnika dla silnika BLDC przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu napędowego z silnikiem BLDC

Fig. 1. Block diagram of the drive system with BDLC motor

Przedstawiono rozwiązanie przekształtnika energoelektronicznego do zasilania niskonapięciowego silnika BLDC. Założono, że w napędzie zostanie wykorzystany silnik BLDC trójfazowy o następujących parametrach eksploatacyjnych:

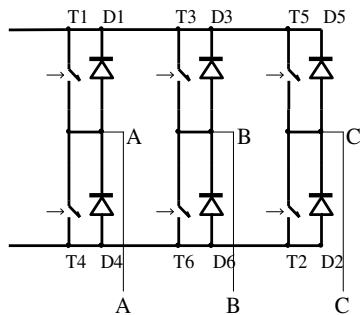
- trzy pasma stojana,
- minimalne napięcie zasilające – 24 V,
- maksymalne napięcie zasilające – 29,6 V,
- maksymalny prąd źródła – 63 A,
- prędkość robocza – 40 000 obr/min,
- minimalna moc przy prędkości roboczej – 500 W.

Na rysunku 2. przedstawiono obwód mocy zawierający trójfazowy falownik napięcia. Ze względu na konieczność ograniczenia spadków napięć na przewodzącym tranzystorze zdecydowano się na wybór tranzystorów typu

MOSFET, które dla małych napięć zasilających charakteryzują się niewielką rezystancją drenu podczas załączenia tranzystora $R_{DS(ON)}$. Dobór napięciowy tranzystorów falownika dokonano w odniesieniu do maksymalnej wartości napięcia obwodu pośredniczącego. Napięcie dren–źródło U_{DS} obliczono na podstawie zależności:

$$U_{DS} \geq k_U U_{d \max} \quad (2)$$

gdzie k_U – współczynnik napięciowy, który przyjmuje wartość $1,5 \div 2,5$; wybrano większą wartość zakresu i w obliczeniach przyjęto współczynnik na poziomie 2,5.



Rys. 2. Schemat falownika trójfazowego

Fig. 2. Scheme of three-phase inverter

Przyjęto maksymalną wartość prądu obwodu zasilania na podstawie projektu. Wartość ta jest określona dla źródła zasilającego na poziomie $I_{d \max} = 63$ A. Przekroczenie tej wartości skutkuje przyspieszonym zużyciem baterii akumulatorów. Z tego względu wymagany prąd tranzystora I_D przy przeciążeniu I_d przyjęto na podstawie zależności:

$$\left. \begin{array}{l} I_D \geq I_{d \max} \\ I_D \geq 63 \text{ A} \end{array} \right\} \quad (3)$$

Dobrano moduł firmy SEMIKRON SK 70 MD 075 w obudowie T47 o parametrach: $I_D = 70$ A przy $T = 80^\circ\text{C}$, $U_{DSS} = 75$ V, $R_{DS(on)} = 10$ m Ω , $T_{j \max} = 150^\circ\text{C}$.

Element półprzewodnikowy do poprawnej pracy wymaga odprowadzenia ciepła powstającego w strukturze półprzewodnika, tak aby nie przekroczyć dopuszczalnej temperatury złącza $T_{j \max}$. Dlatego konieczny jest właściwy dobór radiatora, który przy określonych parametrach elektrycznych zapewni odpowiednie chłodzenie tranzystorów przekształtnika. Aby można było dokonać doboru radiatora, należy obliczyć straty mocy na elementach półprzewodnikowych. Straty mocy tranzystora można podzielić na straty podczas przewodzenia oraz straty podczas przełączania. Straty mocy przewodzenia oblicza się z zależności:

$$\Delta P_{ON} = I_{d\max}^2 \cdot R_{DSon} = 63^2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 39,69 \text{ W} \quad (4)$$

natomiast straty mocy przełączania, wykorzystując dane katalogowe energii załączania E_{on} i wyłączenia E_{off} tranzystora i założoną wartość częstotliwości impulsowania f_{imp} :

$$\Delta P_{sw} = f_{imp} \cdot (E_{on} + E_{off}) = 8 \cdot 10^3 \cdot (3 + 1) \cdot 10^{-3} = 32 \text{ W} \quad (5)$$

Całkowite straty tranzystora to suma strat przewodzenia i łączeniowych:

$$\Delta P_{Tot} = \Delta P_{on} + \Delta P_{sw} = 39,69 + 32 = 71,69 \text{ W} \quad (6)$$

Dopuszczalna temperatura radiatora ze względu na straty mocy tranzystora:

$$T_{rT} = 0,8 \cdot 150 - (R_{thjs}) \cdot \Delta P_{Tot} = 0,8 \cdot 150 - (1,1) \cdot 71,69 = 41,2^\circ\text{C} \quad (7)$$

gdzie R_{thjs} jest katalogową wartością rezystancji termicznej tranzystora – złącze-obudowa.

Należy pamiętać, że w strukturze łącznika półprzewodnikowego oprócz tranzystora występuje również dioda zwrotna, której straty mocy należy również uwzględnić, analizując bilans cieplny przyrządu:

$$\Delta P_{DZ} = U_{T(T0)} \cdot I_{DZn} + r_t \cdot I_{RM}^2 = 0,9 \cdot 63 = 56,7 \text{ W} \quad (8)$$

gdzie: $U_{T(T0)}$ – napięcie progowe diody,

I_{DZn} – znamionowy prąd diody,

r_t – rezystancja dynamiczna diody,

I_{RM} – maksymalna chwilowa wartość prądu diody.

Dopuszczalna temperatura radiatora ze względu na straty mocy diody zwrotnej przy określonej wartości rezystancji termicznej diody złącze-obudowa R_{thjsDZ} :

$$T_{rDZ} = 0,8 \cdot 150 - (R_{thjsDZ}) \cdot \Delta P_{DZ} = 0,8 \cdot 150 - 1,1 \cdot 56,7 = 57^\circ\text{C} \quad (9)$$

Znając temperaturę złącza podczas pracy z określonymi parametrami elektrycznymi, należy dobrać radiator. Na początku oblicza się wymaganą rezystancję termiczną:

$$R_{thrad} < \frac{T_{rmin} - T_0}{\Sigma \Delta P_{tot}} = \frac{57 - 40}{128,39} = 0,132 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (10)$$

gdzie: T_0 – temperatura otoczenia,
 T_{rmin} – temperatura złącza półprzewodnikowego

$$T_{rmin} = T_{rDZ} \quad (11)$$

Całkowite straty mocy elementu półprzewodnikowego są sumą całkowitych strat mocy tranzystora i diody zwrotnej:

$$\Sigma \Delta P_{tot} = \Delta P_{Tot} + \Delta P_{DZ} + \Delta P_{ONMP} = 71,69 + 56,7 = 128,39 \text{ W} \quad (12)$$

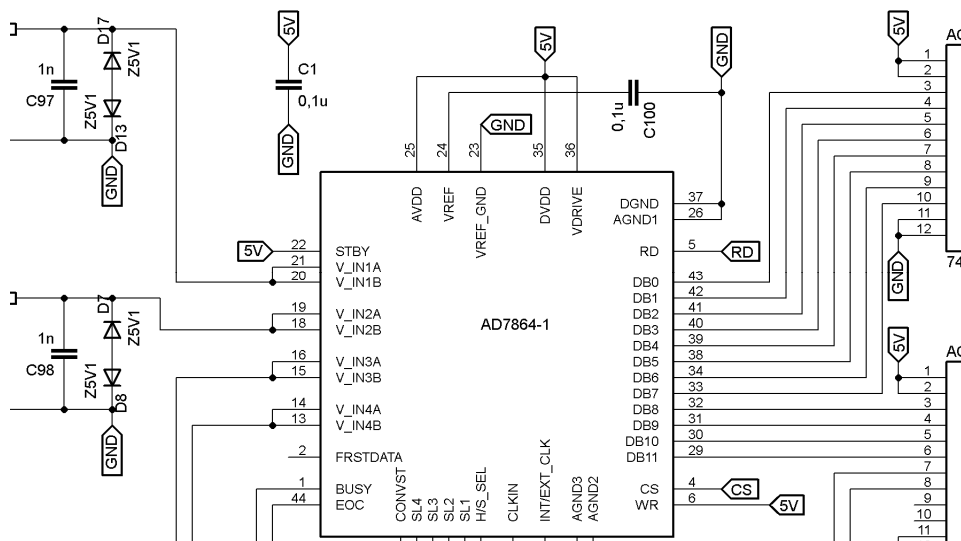
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń dobrano blok radiatorowy LK55 – 200 A, dla którego rezystancja termiczna $R_{th} = 0,12 \text{ K/W}$ w temperaturze $T_0 = 40^\circ\text{C}$.

3. Projekt elektryczny przekształtnika

Koncepcja rozwiązania układowego przekształtnika energoelektronicznego jest oparta na schemacie blokowym przedstawionym na rys. 3. Podstawowym komponentem jest układ falownika trójfazowego składający się z modułu zawierającego w swojej strukturze sześć niskosprężnych tranzystorów MOSFET, połączonych w klasyczną strukturę mostkową (rys. 4.). Napięcie stałe DC jest podawane na tranzystory MOSFET. Napięcie U_{DSS} tranzystorów wynosi 75 V. Tranzystory charakteryzują się małą rezystancją kanału wynoszącą $R_{DS(on)} = 10 \text{ m}\Omega$ przy prądzie drenu $I_D = 80 \text{ A}$. Jest to szczególnie istotne ze względu na stosunkowo niskie napięcie zasilające przekształtnik. Moduł tranzystorowy jest wystawiany z układu FPGA za pośrednictwem sterowników, które dopasowują sygnał wyjściowy z mikroprocesora do poziomu koniecznego do wystawiania bramek tranzystorów MOSFET. Sterowniki dodatkowo separują sygnały sterujące w układzie mikroprocesorowym od strony silnopiędowej. Zabezpiecza to układ sterowania przed zniszczeniem w razie awarii po stronie silnopiędowej. Sygnały napięciowe na wyjściu układu FPGA mają wartość 3,3 V, z kolei sygnał wejściowy sterowników tranzystorów MOSFET – 5 V. W takiej sytuacji, aby wystawiać sterowniki tranzystorowe, zastosowano bufory dopasowujące napięcia do wymaganych poziomów. Napięcie sterujące podawane na bramki tranzystorów powinno się zawierać w granicach od +15 V do –8 V. Zapewnia to załączanie i wyłączanie tranzystorów w deklarowanym przez producenta w karcie katalogowej czasie.

Topologia przekształtnika wymaga, aby napięcia zasilające tranzystory górnej gałęzi mostka były odseparowane galwanicznie. Tranzystory dolnych gałęzi mostka mogą pozostawać na wspólnym potencjale. Aby napęd został prawidłowo wystawiany, konieczna jest informacja o położeniu wirnika silnika BLDC. Informację tę uzyskuje się na podstawie prędkości obrotowej, wartości prądu w poszczególnych fazach oraz sygnałów sterujących. Pomiar prądów są

wykonywane w dwóch fazach wyjściowych falownika. Dodatkowo w układzie napędowym istotna jest informacja o wartości napięcia obwodu pośredniczącego (baterii). Analogowe sygnały pomiarowe z przetworników LEM są wprowadzane do 4-kanalowego przetwornika A/C, a z wyjścia przetwornika do modułu FPGA. Do konwersji analogowych sygnałów pomiarowych na ich ekwiwalent cyfrowy zastosowano 4-kanalowy przetwornik A/C firmy Maxim o symbolu MAX1305. Jest to układ o czterech unipolarnych kanałach pomiarowych (sygnał wejściowy od 0 V do 5 V z tolerancją napięć wejściowych ± 6 V) z równoległym 12-bitowym wyjściem. Na rysunku 3. przedstawiono schemat aplikacji przetwornika A/C. Użyty przetwornik A/C pozwala na pomiar wszystkich czterech kanałów z maksymalną częstotliwością 680 kHz, na stanowisku laboratoryjnym pomiar danych analogowych był realizowany z częstotliwością 665 kHz. Prąd falownika może zmieniać kierunek przy przejściu do pracy ze zwrotem energii z masy wirującej silnika do baterii akumulatorów, dlatego w tym przypadku na jedno z wejść przetwornika pomiarowego wprowadzono sygnał pozwalający na uzyskanie sygnału pomiarowego o wartości większej od zera.

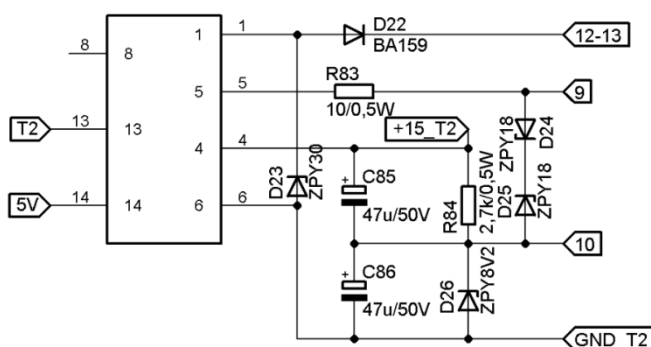


Rys. 3. Schemat elektryczny przetwornika A/C, buforów dopasowujących poziomy napięć oraz zasilaczy i układów stabilizujących

Fig. 3. Electric circuit of A/C converter, buffers conditioning the voltage level, feeders and stabilizing circuits

Jako moduł FPGA wykorzystano układ programowalny z rodziny Cyclone II (EP2C20F484C7), który posiada techniczne możliwości obsługi algorytmów sterowania falownikiem oraz interfejsem użytkownika. W zależności od położenia wirnika przełączanie tranzystorów falownika odbywa się sześć razy na okres.

Silnik jest sterowany tak, że jednocześnie są włączane dwie fazy, trzecia pozostaje niezłączona – w podstawowym stanie pracy silnika prąd w tej fazie nie płynie. Wymagania odnośnie poziomów napięć zasilających i separacji galwanicznej spowodowały, że zdecydowano się wykorzystać w projekcie przetwornice scalone DC/DC. Przetwornice w projektowanym przekształtniku są zasilane z baterii o napięciu o dopuszczalnych zmianach w zakresie od 24 V do 29,6 V. Układ wykonawczy jest dostosowany do pracy przy napięciu 29,5 V, 63 A, maksymalna częstotliwość przełączania wynosi 8 kHz. Na podstawie schematów elektrycznych wykonano projekt płytki drukowanej. Ze względu na charakter zadania i przeprowadzenie prób wyłącznie w warunkach laboratoryjnych wykonano moduł przekształtnika w postaci płytki jednostronnej. W przyszłości jest możliwe zastosowanie techniki wielowarstwowej, co wiąże się ze znacznym zredukowaniem gabarytów przekształtnika o kształcie pozwalającym na zamontowania w kadłubie pojazdu latającego.



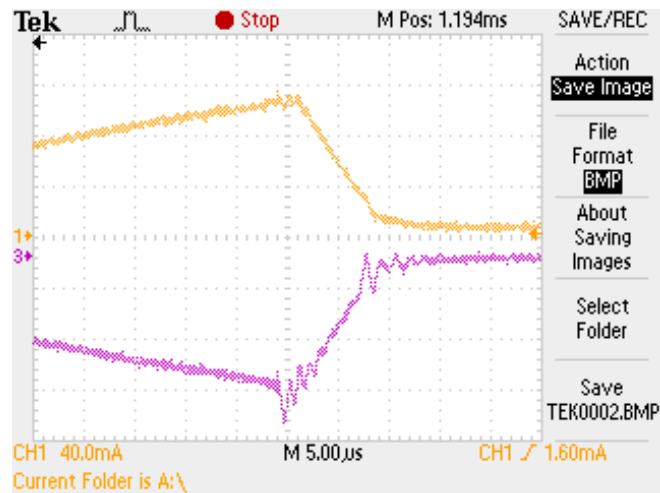
Rys. 4. Schemat elektryczny driverów tranzystorów oraz przetwornic DC/DC

Fig. 4. Electric circuit of transistors drivers and DC/DC converters

4. Badania laboratoryjne

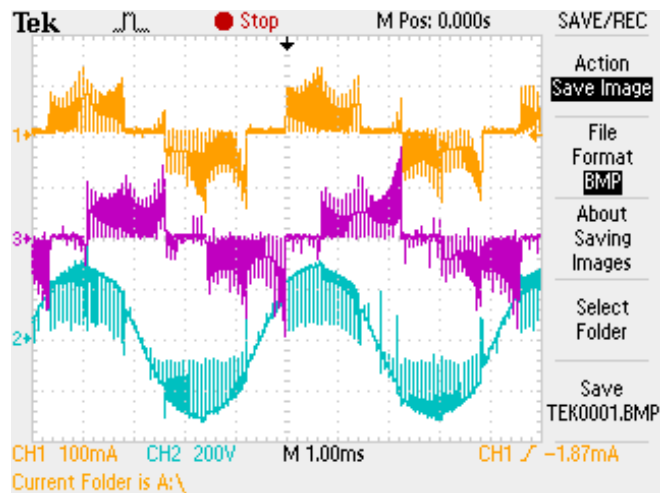
W laboratorium energoelektroniki Katedry Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej na podstawie zaprezentowanego projektu wykonano moduł przekształtnika energoelektronicznego. Przeprowadzono wstępne badania laboratoryjne układu z wykorzystaniem zaprezentowanego w pracy algorytmu sterowania. Rysunek 5. przedstawia komutację łączników półprzewodnikowych podczas pracy układu. Wyłączenie jednego z kluczy tranzystorowych następuje wcześniej niż załączenie tranzystora drugiego w tej samej gałęzi, a więc nie będzie występowało zjawisko zwarcia. Jest to zjawisko, które często powoduje uszkodzenie łączników, jeśli przy wybranej częstotliwości łączeń tranzystorów zostanie źle zaimplementowany tzw. czas martwy, czyli czas opóźnienia pomiędzy załączeniem tranzystora a wyłączeniem tranzystora

poprzednio przewodzącego. Natomiast na rys. 6. przedstawiono wybrane przebiegi prądu i napięć fazowych zasilanego silnika. Napięcie fazowe jest odkształcone (obwiednia napięcia ma kształt prostokąta), ale prąd fazowy ma kształt zbliżony do sinusoidy. Wynika to z dużej indukcyjności uzwojeń silnika BLDC,



Rys. 5. Komutacja łączników w układzie laboratoryjnym

Fig. 5. Circuit switching in the laboratory integrated circuit



Rys. 6. Przebiegi prądów (1, 3) i napięcia fazowego (2) przy modulacji bipolarnej

Fig. 6. Current waveforms (1, 3) and phase voltage (2) at the bipolar modulation

która w naturalny sposób zapewnia filtrację składowych harmoniczných prądu o wysokiej częstotliwości (wzrost reaktancji indukcyjnej przy wzroście częstotliwości składowych odkształcenia).

5. Podsumowanie

W pracy została przeprowadzona analiza możliwości stosowania układów napędowych wysokoobrotowych małych mocy w bezzałogowej platformie latającej. W wyniku analizy do wykonania napędu wytypowano trójfazowy bezszczotkowy silnik BLDC. Przeznaczenie układów napędowych do napędu platformy latającej determinuje ich zasilanie z baterii akumulatorów. Dodatkowo układy powinny charakteryzować się dużą sprawnością i małymi gabarytami. Na podstawie przeprowadzonej analizy został wykonany projekt zintegrowanego przekształtnika energoelektronicznego do zasilania 3-fazowych silników BLDC. W pierwszym etapie wykonano przekształtnik uniwersalny o budowie modułowej, który zawiera moduły: falownika, przetworników pomiarowych i układu sterowania. Zmodyfikowano topologie przekształtników w celu minimalizacji ich gabarytów. Zostały opracowane algorytmy sterowania dla wykonanej topologii układu przekształtnikowego.

Literatura

- [1] Binkowski T., Buczek K., Sobczyński D.: Sterowanie silnikiem BLDC pracującym jako element hybrydowej platformy latającej. *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), 30-33.
- [2] Luongo C.A., Masson J.P., Nam T., Mavris D., Kim H.D., Brown G.V., Waters M., Hall D.: Next generation more-electric aircraft: A potential application for HTS superconductors. *IEEE Super Transaction on Applied Superconductivity*, 19 (2006), 1055-1068.
- [3] Sobczyński D.: Przekształtniki energoelektroniczne do zasilania wysokoobrotowych silników małej mocy. IX Konf. Naukowa „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE”, Łódź 2009.
- [4] Sobczyński D.: Badania symulacyjne wybranych przekształtników przeznaczonych do stosowania w układach napędowych o podwyższonej prędkości obrotowej. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 11, 2012.

CONVERTER IN A POWER TRANSMISSION SYSTEM WITH BLDC MOTOR FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

Abstract

In the case of unmanned aerial vehicles, like other vehicles powered by electric energy, the problem is a compromise between the travel range and the weight of the accumulator batteries. To use electricity, and thus to increase the travel range and reduce the weight of the aircraft, it is necessary to use for drive the propeller efficient drive systems with high efficiency and low

weight. Electric motors that have the most favorable power to weight ratio and having a high efficiency are the brushless BLDC motors. These engines are sufficiently lightweight and efficient. They also can be used in aircrafts. In the paper the design of power electronics converter destined for electric drive of BLDC motor, which may be used in an unmanned aerial vehicle was presented. The drive system consists of a BLDC motor with a power of 0.5 kW, power electronic converter and control system. Converter is controlled by the microprocessor with programmable logic Cyclone III FPGA – Altera EP3C40 card. Card with DBM3Cxx replaceable integrated circuit was settled on the final DBM_CIII_Base base card contains JTAG interface and three binary input/output blocks used for control and measurements. The selection method of integrated circuit element and performance of printed circuit board has also been described.

Keywords: unmanned aerial vehicle, power converter, brushless motor

DOI:10.7862/rm.2013.48

Otrzymano/received: 15.09.2013 r.

Zaakceptowano/accepted: 22.11.2013 r.