

Projekt wielomodułowego sterownika elektrycznego napędu rowerowego – układ napędowy

Karol Tatar, Piotr Chudzik, Rafał Nowak, Grzegorz Lisowski

1. Wielomodułowy sterownik rowerowego napędu elektrycznego

Współczesne rozwiązania napędów samochodów elektrycznych mają zwykle charakter modułowy. Typowe falowniki zasilające silniki w samochodach osobowych czy autobusach elektrycznych sterowane są za pośrednictwem magistrali CAN. Za pomocą tej magistrali sterownik nadrzędny wydaje komendy momentu zadawanego, steruje ograniczeniami wartości prądów i napięć, jakie powinien realizować falownik, oraz wydaje falownikowi polecenia realizacji określonego trybu jazdy. Bardzo ważne, ze względu na współpracę z systemem bateryjnym, jest również utrzymywanie ciągłej komunikacji sterownika napędu z systemem zarządzania baterią (BMS z ang. *Battery Management System*). W przypadku rozwiązań tanich sterowników niewielkich napędów rowerów elektrycznych, produkowanych masowo na Dalekim Wschodzie, ze względu na konieczność minimalizacji kosztów, zwykle struktura systemu sterowania ogranicza się do pojedynczego mikrokontrolera, pełniącego rolę sterownika pojazdu, falownika napięcia i układu odczytującego informację z panelu użytkownika. Takie rozwiązanie niestety nie pozwala na pełne wykorzystanie możliwości napędu oraz ogranicza jego funkcjonalność do określonych ustawień fabrycznych. Prezentowane w niniejszym artykule rozwiązanie o charakterze modułowym jest próbą poprawienia możliwości użytkowych napędu rowerowego poprzez „otwarcie” systemu sterującego silnikiem, dokonane za pomocą magistrali CAN, łączącej sterownik napędu z modulem komunikacyjnym, pozwalającym na utrzymywanie ciągłej łączności (Bluetooth) z aplikacją w urządzeniu mobilnym użytkownika oraz korzystanie z telefonii komórkowej GPRS czy możliwości systemu GPS.

2. Sterownik silnika z falownikiem napędowym

2.1. Część silnopiędowa

Napięcie na zaciskach trójfazowego silnika napędu rowerowego pochodzi z falownika tranzystorowego, składającego się z sześciu tranzystorów MOSFET typu N sterowanych za pośrednictwem driverów (typu „bootstrap”) z portów mikrokontrolera. Część silnopiędowa została wyposażona w układy pomiaru dwóch prądów fazowych oraz prądu zasilającego falownik.

Model 3D części silnopiędowej falownika prezentuje fotografia 1.

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję oraz realizację wielomodułowego sterownika dedykowanego do rowerowych napędów elektrycznych. Autorzy zaprezentowali struktury układów napędowych, urządzenie pomocnicze, układy pomiarowe sygnałów analogowych oraz zastosowane algorytmy sterowania. W pracy zamieszczono wyniki pomiarów napięć i prądów płynących w elementach układu napędowego.

Słowa kluczowe: silniki PMSM, silniki BLDC, algorytmy sterowania napędami elektrycznymi

DESIGN OF MULTI-MODULE INVERTER FED DRIVER FOR E-BIKE – ELECTRICAL DRIVE MODULE

Abstract: The following article depicts the concept and implementation of multi – module driver for e-bike system. Authors presented the structures of drive systems, auxiliary devices, analog signal measurement circuits, and the control algorithms used. The paper presents results of measurements of currents and voltages going through the drive system elements.

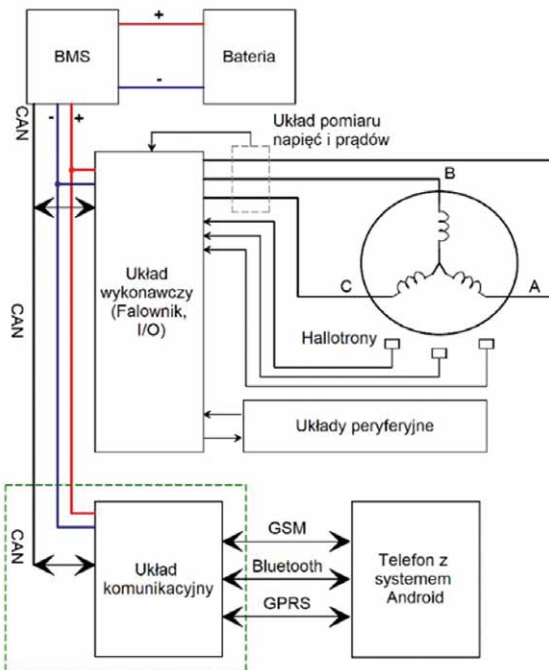
Keywords: PMSM drive, BLDC drive, e-bike, electrical drive control algorithms

2.2. System mikroprocesorowy

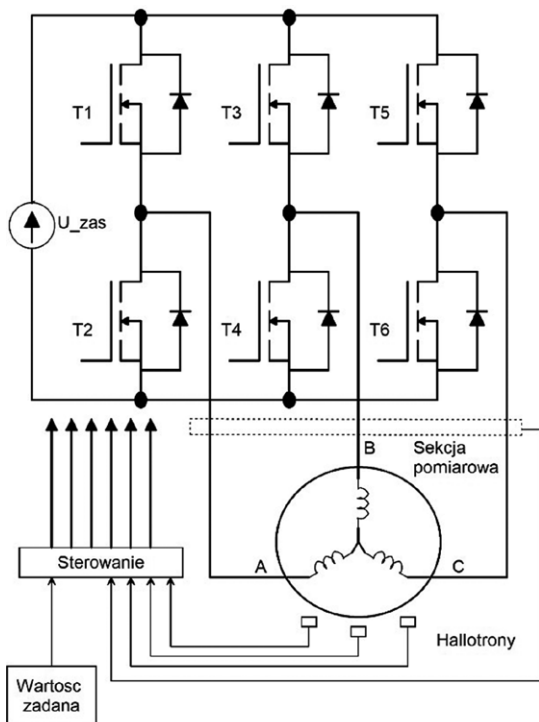
Uniwersalność sterownika napędu rowerowego wymaga jego dostosowania do współpracy z silnikami różnych typów i producentów. W zależności od typu silnika występują zróżnicowane elementy wyposażenia, związane z zakładanym przez producenta przeznaczeniem silnika. Budowa sterownika uniwersalnego jest pomysłem mającym na celu obniżenie kosztów produkcji oraz umożliwienie uzyskania zwiększonej niezawodności układu w przypadku awarii czujników. Projektowany sterownik, dzięki „otwarciu” architektury, nie tylko pozwala na modyfikowanie przez użytkownika parametrów jazdy, ale umożliwia zmianę trybu pracy na tryb „awaryjny” o nieco gorszych parametrach, lecz zapewniający możliwość dojechania do celu podróży.

2.3. Algorytmy sterowania

W rowerowych napędach elektrycznych najczęściej spotykamy silniki BLDC. Literatura [1, 2, 3, 4, 5, 8] w sposób przejrzysty opisuje kryteria podziału metod sterowania typowymi

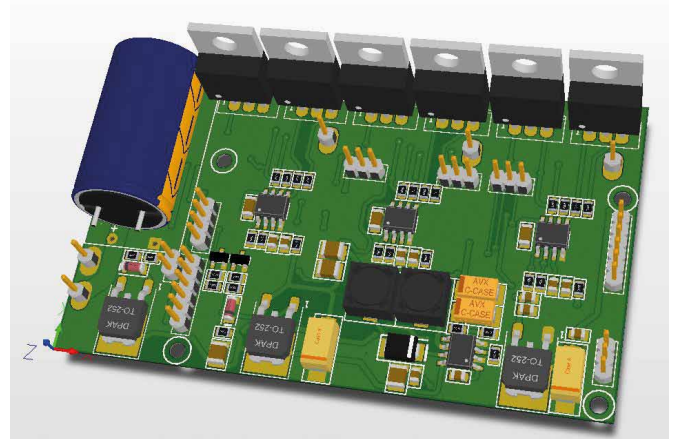


Rys. 1. Schemat blokowy modułowego sterownika roweru elektrycznego

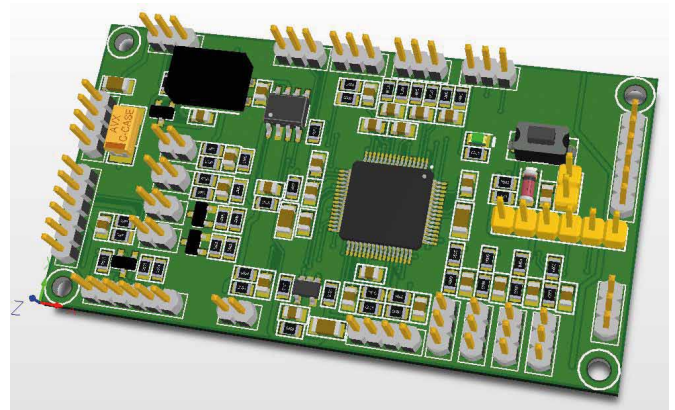


Rys. 2. Uproszczony schemat ideowy części silnoprądowej układu napędowego

napędami tej klasy. Podstawowy podział dzieli metody sterowania na klasyczne, w których nie kontrolujemy położenia wektora strumienia wirnika, oraz polowo zorientowane (FOC z ang. *Field Oriented Control*) [6, 7], w których taka kontrola występuje. Kolejnym elementem różnicującym metody sterowania jest sposób, w jaki uzyskuje się informację o aktualnym



Fot. 1. Model 3D układu elektronicznego odpowiadającego za część silnoprądową falownika



Fot. 2. Model 3D układu elektronicznego odpowiadającego za część mikroprocesorową falownika

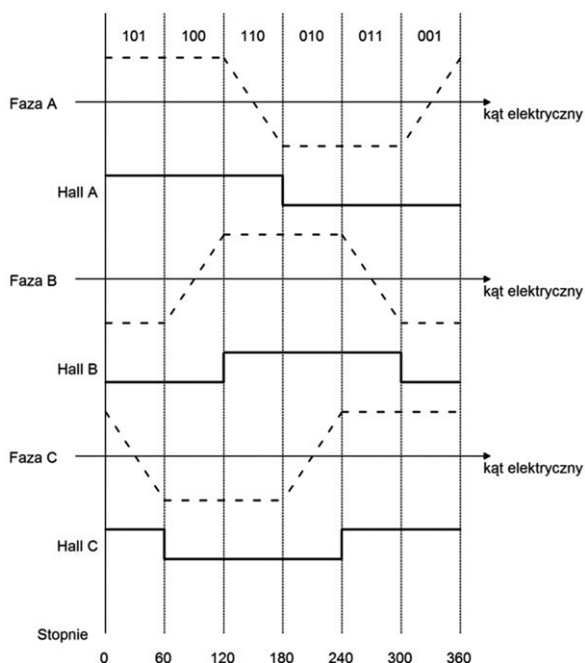
ciągnię elektrycznym. Tutaj można wykorzystywać metody czujnikowe bazujące na czujnikach Halla, enkoderach oraz metody bezczujnikowe, wykorzystujące obserwatory kąta elektrycznego lub BEMF (z ang. *Back Electromotive Force*) [7].

Najprostszą z metod sterowania silnikiem BLDC jest załączanie odpowiedniej pary kluczy tranzystorowych w oparciu o uzyskiwaną na podstawie czujników Halla informację o kącie elektrycznym oraz znajomości kształtu siły elektromotorycznej. Idealny przebieg siły elektromotorycznej indukowanej w silniku BLDC na tle sygnałów z hallotronów prezentuje rysunek 3.

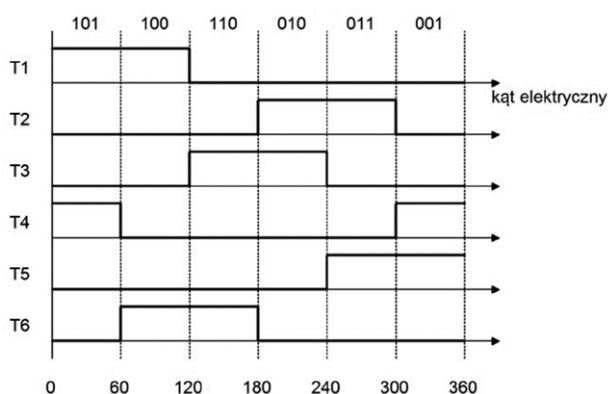
Sekwencję sterowania kluczy w zależności od wartości sygnałów logicznych z hallotronów zaprezentowano na rysunku 4.

Funkcje regulacyjne mogą pełnić zarówno tranzystory grupy górnej (T1, T3, T5), jak i grupy dolnej (T2, T4, T6). Okres pełnienia funkcji regulacyjnej może wynosić zarówno 60, jak i 120 stopni elektrycznych.

Wykorzystanie czujników Halla w konstrukcji rowerowych napędów elektrycznych może przysparzać problemy natury technologicznej. Jednym z problemów jest dokładność, z jaką umieszcza się czujniki w silniku. Kolejnymi problemami są warunki, w jakich pracują czujniki (częste udary cieplne oraz wibracje), oraz konieczność wyprowadzenia przewodów



Rys. 3. Wyidealizowane przebiegi siły elektromotorycznej w silniku BLDC



Rys. 4. Sekwencja załączania kluczy w silniku BLDC ze sterowaniem za pomocą czujników Halla

zapewniających połączenie elektryczne z czujnikami. Jednym z częściej stosowanych rozwiązań, pozwalającym na ominięcie powyższych niedogodności, jest wykorzystanie siły elektromotorycznej (BEMF) indukowanej w aktualnie niewysterowanej fazie silnika. Do wyznaczania chwili, w której powinna wystąpić komutacja tranzystorów, używa się następujących metod:

- porównania siły elektromotorycznej BEMF z połową napięcia DC zasilającego falownik. Ta metoda wymaga 3 komparatorów;
- porównania siły elektromotorycznej BEMF z potencjałem punktu zerowego silnika. Ta metoda wymaga 3 komparatorów;
- porównywania siły elektromotorycznej BEMF z punktem zerowym silnika na podstawie pomiarów z przetwornika A/D.

Ta metoda wymaga toru kondycjonującego napięcia każdej z faz oraz wykorzystuje 3 kanały przodownika A/D.

Wszystkie opisane metody posiadają swoje wady, do których należą:

- przesunięcie o 30 stopni między sygnałem komutacji wyliczonym na podstawie BEMF a rzeczywistą komutacją;
- niejednoznaczność przejścia BEMF przez zero;
- słaba jakość generowanego momentu;
- nietrapezoidalny kształt siły elektromotorycznej, na którą wpływ ma konstrukcja obwodu magnetycznego.

Przykładowy przebieg napięcia i prądu w jednej fazie silnika BLDC przy sterowaniu wykorzystującym BEMF prezentuje rysunek 5.

Kształt rzeczywistej siły elektromotorycznej jest w dużej mierze uzależniony od konkretnej konstrukcji napędu. Przykładowy przebieg siły elektromotorycznej w układzie α - β dla dwóch wybranych napędów przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Jak wynika z rysunków, żadna z przedstawionych sił elektromotorycznych nie jest trapezoidalna, a jedna jest wręcz sinusoidalna. Biorąc to pod uwagę, należałoby zrezygnować z klasycznych metod sterowania sześciostrefowego i wykorzystać pełne możliwości mostka trójfazowego, używając do tego modulacji sinusoidalnej. W takim wypadku nie ma możliwości pomiaru kąta elektrycznego na podstawie BEMF, gdyż w każdym cyklu działają 3 tranzystory i każda z faz jest zasilona. Pomiar kąta elektrycznego można zatem zrealizować na dwa sposoby:

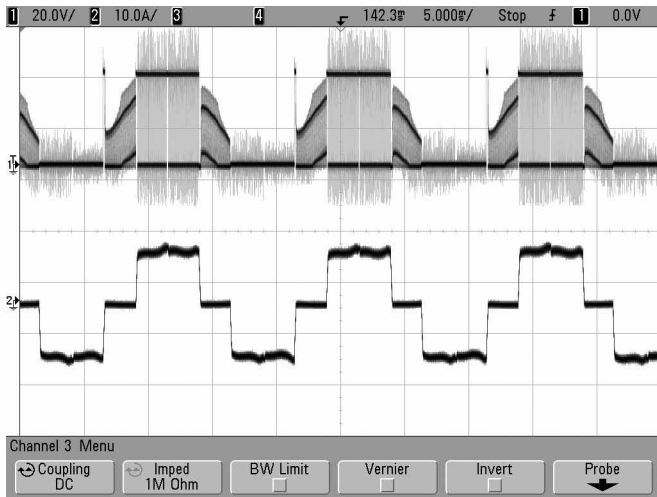
- wykorzystując czujniki Halla – przewidując kąt elektryczny oraz wprowadzając korektę w każdej ze stref;
- wykorzystując obserwator kąta elektrycznego oparty o aktualne wartości zmiennych stanu oraz model matematyczny silnika.

Na rysunku 8 pokazano przebieg napięć i prądów w silniku sterowanym metodą modulacji sinusoidalnej.

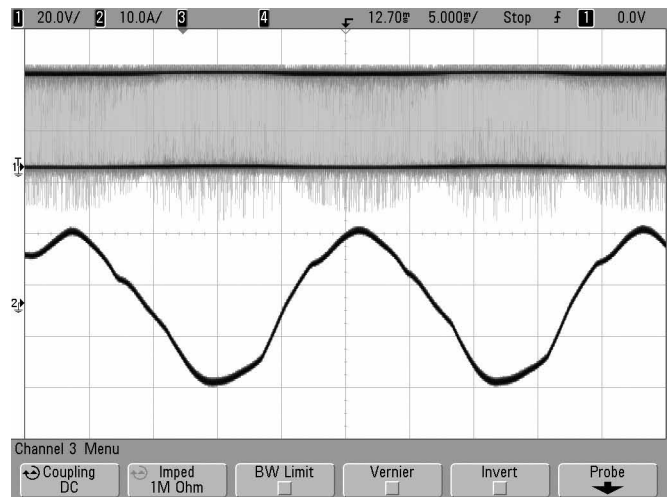
Osiągnięcie przebiegów prądu w silniku zbliżonych do przebiegów sinusoidalnych zdecydowanie poprawia zachowanie silnika rowerowego pod względem akustycznym i całkowicie eliminuje niekomfortowe drżenie pojazdu. Sterowanie z regulacją prądu zapewnia również bardzo korzystne zachowanie silnika w stanach nagłego przeciążenia momentem, dzięki czemu w napędzie nie występują wyłączenia awaryjne.

3. System BMS

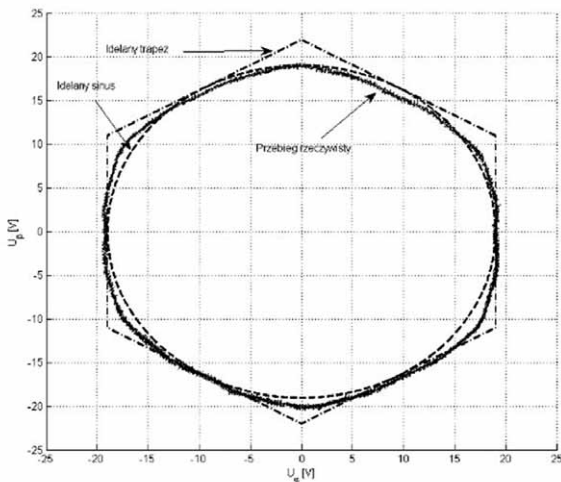
Zestawy bateryjne w samochodach elektrycznych stanowią znaczący koszt całego systemu napędowego. Podobnie jest w przypadku napędów rowerowych. Ze względu na konieczność ograniczania ceny przeważnie stosowane są zestawy ogniw wyposażone jedynie w wymagane przez przepisy zabezpieczenia nadprądowe, nadnapięciowe i podnapięciowe. Eliminacja systemów precyzyjnej kontroli stanu pracy baterii ogniw prowadzi do zjawisk niekorzystnych dla samych ogniw, jak też uniemożliwia uzyskanie rzetelnej informacji o stanie naładowania baterii, która z punktu widzenia użytkownika często ma znaczenie kluczowe. Brak pewności co do wskazań stanu naładowania nie pozwala bowiem na uzyskanie świadomości użytkownika o rzeczywistym zasięgu pojazdu. Powszechnie stosowane w napędach rowerowych tanie sterowniki spowodowane



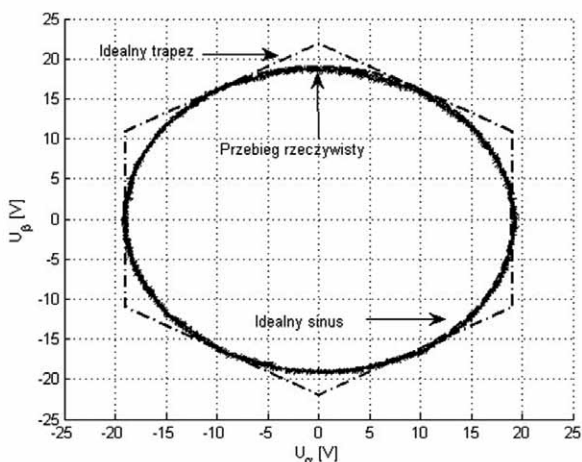
Rys. 5. Rzeczywiste przebiegi napięć i prądów w silniku BLDC ze sterowaniem metodą BEMF



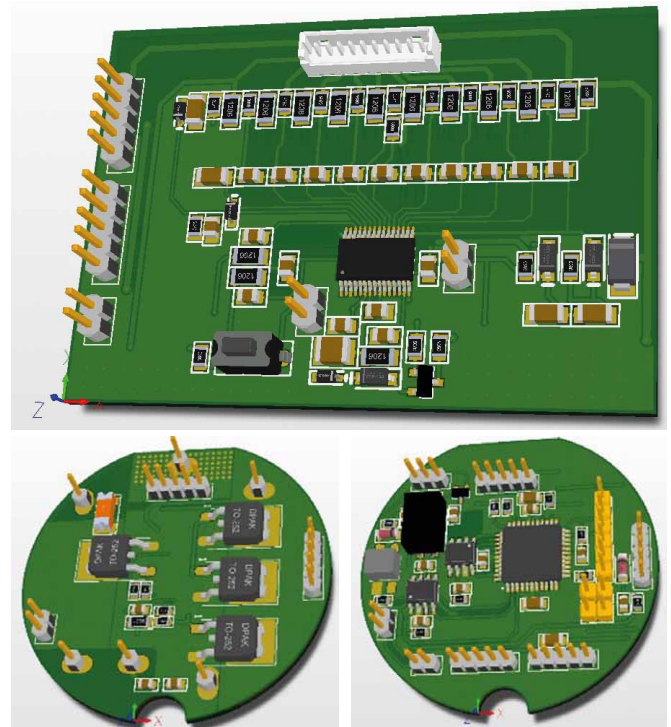
Rys. 8. Przebieg napięcia i prądu na jednej z faz silnika sterowanego metodą modulacji sinusoidalnej



Rys. 6. Przebieg sinusoidalnej, trapezoidalnej oraz rzeczywistej siły elektromotorycznej w układzie α - β dla rowerowego silnika bezprzekładniowego



Rys. 7. Przebieg sinusoidalnej, trapezoidalnej oraz rzeczywistej siły elektromotorycznej w układzie α - β dla rowerowego silnika przekładniowego



Fot. 3. Modele 3D układów elektronicznych składających się na system BMS

z Dalekiego Wschodu do oceny stanu naładowania korzystają jedynie z bieżącej informacji o napięciu. W przypadku ogniw litowo-jonowych wskazania oparte o tę metodę są niestety bardzo mało wiarygodne. W zaprojektowanym systemie napędowym postanowiono więc wprowadzić specjalizowany system nadzoru i pomiaru stanu baterii, który poprzez magistralę CAN dostarcza do sterownika przede wszystkim rzetelną, bo obliczoną precyzyjnie, informację o stanie energetycznym ogniw. Dodatkową zaletą systemu BMS jest również zdolność do informowania użytkownika o stanie zużycia poszczególnych ogniw

oraz do przekazywania systemowi napędowemu informacji o możliwym w danej chwili maksymalnym poborze prądu. Takie dane pozwalają na szersze wykorzystanie ogniw poprzez zezwolenie na pracę w stanach naładowania niedostępnych dla zwykłych, tanich sterowników oraz umożliwiają przedłużenie żywotności ogniw. W ramach projektu zostały wprowadzone również nowe funkcjonalności związane z zapewnieniem możliwości informowania użytkownika za pomocą wiadomości SMS o zagrożeniach baterii podczas odstawienia roweru na czas jesienno-zimowy.


4. Podsumowanie

Rozbudowa sterownika napędu rowerowego o moduł komunikacyjny i specjalizowany sterownik systemu baterijnego niestety wiąże się ze wzrostem ceny całego systemu. Aby koszty nie stanowiły bariery handlowej nowego produktu, wprowadzone ulepszenia powinny być atrakcyjne dla użytkownika. Projektanci urządzenia przyjęli, że zaproponowane rozwiązania takie będą. Ze względu na grupę docelową, jaką są młodzi ludzie powszechnie korzystający ze smartfonów, sposób sterowania rowerem został dostosowany do zwyczajów użytkowników tego typu urządzeń. Zaproponowano również możliwość kształtowania charakterystyk mechanicznych roweru, dzięki czemu istnieje szansa na zainteresowanie tego typu rozwiązaniami grupy osób ceniących sobie oryginalność i indywidualność.

Projekt badawczo-rozwojowy „Opracowanie i wdrożenie innowacyjnego sterownika dla poprawienia obecnych funkcji użytkowych oraz uzyskania nowych cech i funkcjonalności roweru ze wspomaganie elektrycznym napędem” realizowany dla Biura Ekonomiczno-Handlowego Jan Zasada. Źródło finansowania: Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, współfinansowana z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Poddziałania 2.3.2 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój „Bony na innowacje dla MŚP”. Okres realizacji 01.05 2017–1.04.2018.

Literatura

- [1] ADAMCZYK D., MICHNA M.: *Przegląd i analiza układów napędowych stosowanych w rowerach elektrycznych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 88/2010.
- [2] DUKALSKI P.: *Silnik BLDC z magnesami trwałymi jako napęd wózka inwalidzkiego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 86/2010.
- [3] DOMARACKI A., KRYKOWSKI K.: *Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 72/2005.
- [4] HETMAŃCZYK J., KRYKOWSKI K.: *Badania symulacyjne i laboratoryjne silnika PM BLDC wykorzystującego czujniki położenia wirnika w obwodzie regulacji prędkości*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 72/2005.
- [5] ŁEBOWSKI A.: *Badania eksploatacyjne elektrycznego układu napędowego motocykla*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2016.
- [6] NOWAK R.: *Wybrane algorytmy sterowania silnikami z magnesami trwałymi*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2017.
- [7] RUDNICKI T., CZERWIŃSKI R., FRĘCHOWICZ A.: *Układy sterowania silnikiem PMSM*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 90/2011.
- [8] TATAR K., CHUDZIK P.: *Algorytmy sterowania rowerowych napędów elektrycznych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2017.

 mgr inż. Karol Tatar, e-mail: karol.tatar@p.lodz.pl
dr inż. Piotr Chudzik, e-mail: piotr.chudzik@p.lodz.pl
dr inż. Rafał Nowak, e-mail: rafal.nowak@p.lodz.pl
mgr inż. Grzegorz Lisowski, e-mail: grzegorz.lisowski@p.lodz.pl
Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki, Instytut Automatyki,
Zakład Techniki Sterowania

artykuł recenzowany