

Karol Tatar, Piotr Chudzik, Rafał Nowak, Grzegorz Lisowski
Politechnika Łódzka, Łódź

PROJEKT WIELOMODUŁOWEGO STEROWNIKA ELEKTRYCZNEGO NAPĘDU ROWEROWEGO – UKŁAD NAPĘDOWY

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

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

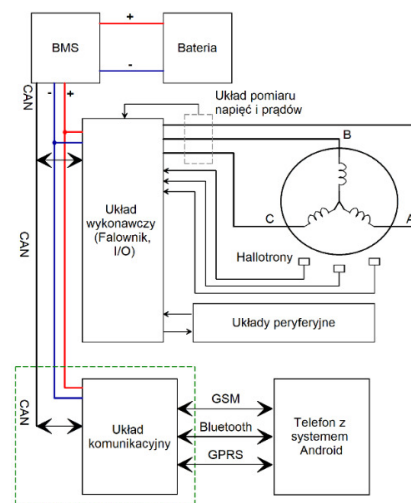
Abstract: The following article depicts the concept and implementation of multi – module driver for e-bike system. Authors presented the structures of drive systems, auxiliary devices, analog signal measurement circuits, and the control algorithms used. The paper presents results of measurements of currents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

Słowa kluczowe: silniki PMSM, silniki BLDC, algorytmy sterowania napędami elektrycznymi
Keywords: PMSM drive, BLDC drive, e-bike, electrical drive control algorithms

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 niniej-

szym 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 modułem komunikacyjnym, pozwalającym na utrzymywanie ciągłej łączności (Bluetooth) z aplikacją w urządzeniu mobilnym użytkownika oraz korzystanie z telefonii komórkowej GPRS czy możliwości systemu GPS.

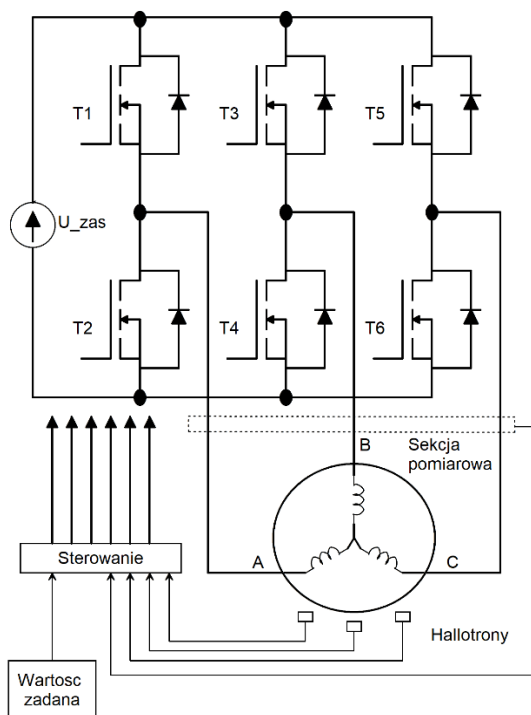


Rys. 1. Schemat blokowy modułowego sterownika roweru elektrycznego

2. Sterownik silnika z falownikiem napędowym

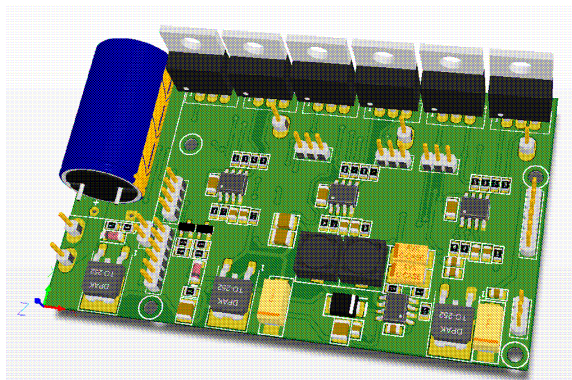
2.1. Część silnopiędowa

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



Rys. 2. Uproszczony schemat ideowy części silnopiędowej układu napędowego

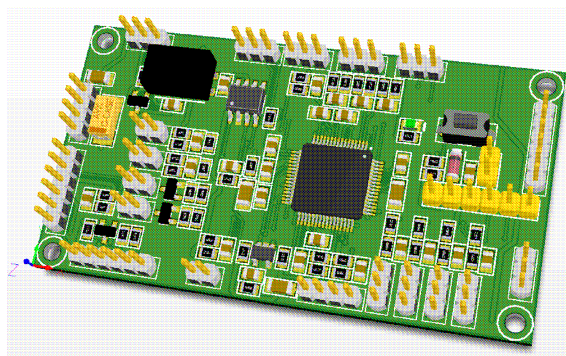
Model 3D części silnopiędowej falownika prezentuje fotografia 1.



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

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 „otwarcie” architektury, pozwala na modyfikowanie przez użytkownika nie tylko parametrów jazdy, ale umożliwia zmianę trybu pracy na tryb „awaryjny” o nieco gorszych parametrach, ale zapewniający możliwość dojeżdżania do celu podróży.

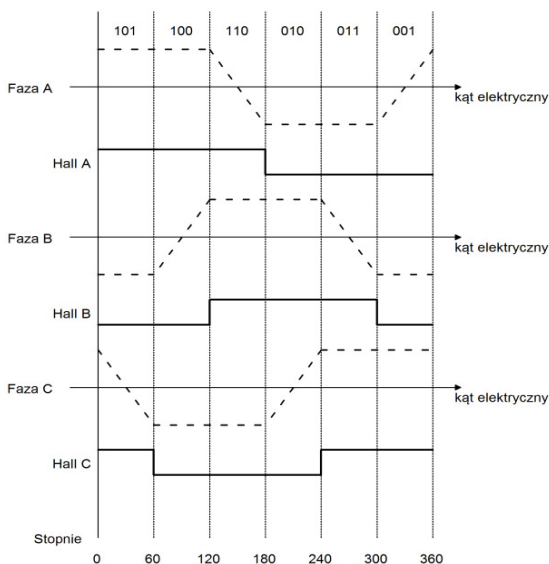


Fot. 2. Model 3D układu elektronicznego odpowiadającego za część mikroprocesorową falownika.

2.3. Algorytm sterowania

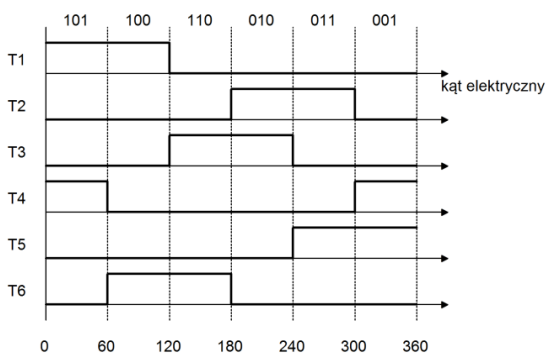
W rowerowych napędach elektrycznych najczęściej spotykamy silniki BLDC. Literatura [1,2,3,4,5,8] w sposób przejrzysty opisuje kryteria podziału metod sterowania typowymi napędami tej klasy. Podstawowy podział dzieli metody sterowania na klasyczne, w których nie kontrolujemy położenia wektora strumienia 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 kącie 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.



Rys. 3. Wyidealizowane przebiegi siły elektromotorycznej w silniku BLDC

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



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

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.

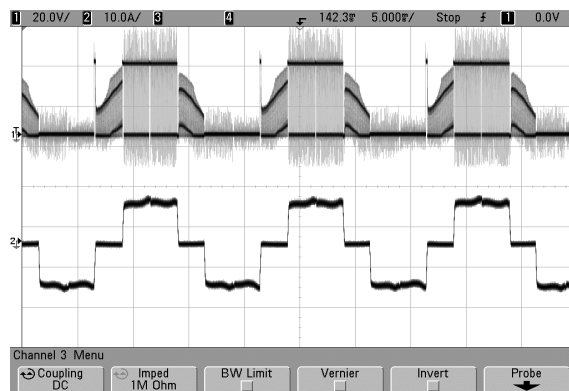
Jednym z problemów jest dokładność z jaką umieszcza się czujniki w silniku. Kolejnymi problemami są warunki w jakich pracują czujniki (częste udary cieplne oraz wibracje), oraz konieczność wyprowadzenia przewodów zapewniających połączenie elektryczne z czujnikami. Jednym z częściej stosowanych rozwiązań pozwalającym na ominięcie powyższych niedogodności jest wykorzystanie siły elektromotorycznej (BEMF) indukowanej w aktualnie niewysterowanej fazie silnika. Do wyznaczania chwili, 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 nad 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:

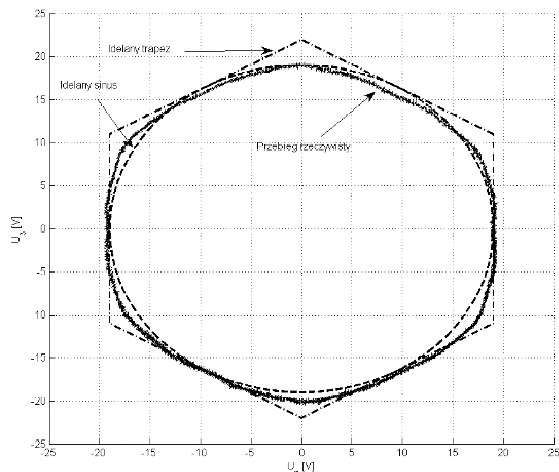
- przesunięcie o 30 stopni między sygnałem komutacji wyliczonym na podstawie BEMF, a rzeczywistą komutacją,
- niejednoznaczność przejścia BEMF przez zero,
- słaba jakość generowanego momentu,
- nietrapezoidalny kształt siły elektromotorycznej, na którą wpływ ma konstrukcja obwodu magnetycznego.

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

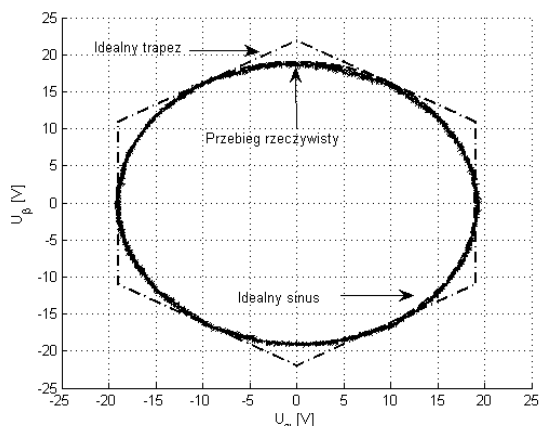


Rys. 5. Rzeczywiste przebiegi napięć i prądów w silniku BLDC ze sterowaniem metodą BEMF

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.



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



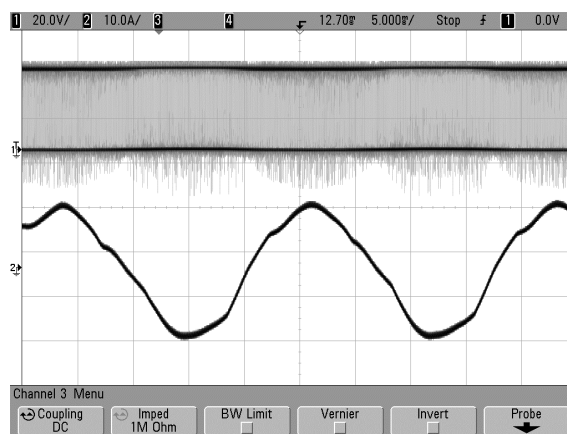
Rys. 7. Przebieg sinusoidalnej, trapezoidalnej oraz rzeczywistej siły elektromotorycznej w układzie α - β dla rowerowego silnika przekładniowego

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.



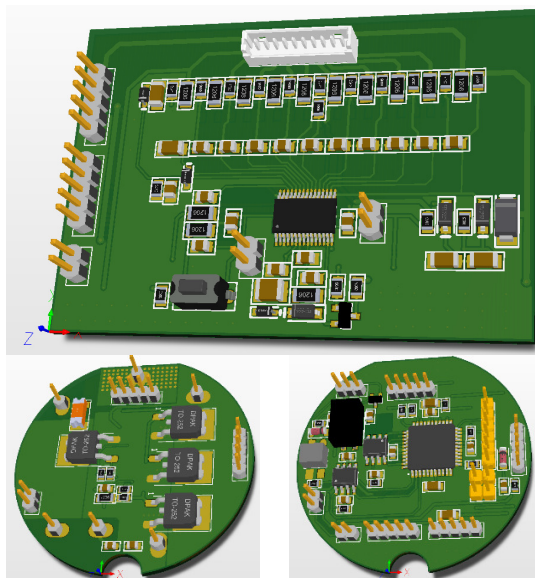
Rys. 8. Przebieg napięcia i prądu na jednej z faz silnika sterowanego metodą modulacji sinusoidalnej

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 i 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 bo-

wiem na uzyskanie świadomości użytkownika o rzeczywistym zasięgu pojazdu. Powszechnie stosowane w napędach rowerowych tanie sterowniki sprowadzane 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.



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

4. Podsumowanie

Rozbudowa sterownika napędu rowerowego o moduł komunikacyjny i specjalizowany ste-

rownik 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 Podziałania 2.3.2 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój „Bony na innowacje dla MŚP”. Okres realizacji 01.05 2017 – 1.04.2018

Bibliografia

- [1]. Adamczyk D., Michna M., *Przegląd i analiza układów napędowych stosowanych w rowerach Elektrycznych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe - Nr 88/2010 (114), Komel Katowice 2010.
- [2]. Dukalski P., *Silnik BLDC z magnesami trwałymi, jako napęd wózka inwalidzkiego*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 86/2010, Komel Katowice 2010.
- [3]. Domaracki A., Krykowski K., *Silniki BLDC - klasyczne metody sterowania*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 72/2005, Komel Katowice 2005.
- [4]. Hetmańczyk J., Krykowski K., *Badania symulacyjne i laboratoryjne silnika PM BLDC wykorzystującego czujniki położenia wirnika w obwodzie regulacji prędkości*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 72/2005, Komel Katowice 2005.
- [5]. Łebowski A., *Badania eksploatacyjne elektrycznego układu napędowego motocykla*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2016 (110), Komel Katowice 2016.
- [6]. Nowak R., *Wybrane algorytmy sterowania silnikami z magnesami trwałymi*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2017(114), Komel Katowice 2017.

[7]. Rudnicki T., Czerwiński R., Fręchowiec A., *Układy sterowania silnikiem PMSM*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 90/2011, Komel Katowice 2011.

[8]. Tatar K., Chudzik P., *Algorytmy sterowania rowerowych napędów elektrycznych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2017(114), Komel Katowice 2017.

Autorzy



mgr inż. Karol Tatar



dr inż. Piotr Chudzik



dr inż. Rafał Nowak



mgr inż. Grzegorz Lisowski

Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki
Elektroniki Informatyki i Automatyki, Instytut
Automatyki, Zakład Techniki Sterowania.

ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

e-mail:

karol.tatar@p.lodz.pl

piotr.chudzik@p.lodz.pl

rafal.nowak@p.lodz.pl

grzegorz.lisowski@p.lodz.pl