

Implementacja algorytmów regulacji silnika PMSM rowerowego napędu elektrycznego

Karol Tatar

1. Wstęp

Rower ze wspomaganie elektrycznym posiada wiele zalet, które sprawiają, że staje się coraz popularniejszy. Jest niezwykle pożyteczny dla osób starszych, którym sprawia ogromny kłopot pokonywanie na zwykłym rowerze nawet niewielkich wzniesień. Dla ludzi młodszych „e-bike” przedstawia sobą zupełnie inną wartość – daje poczucie bycia nowoczesnym, lepszym od innych. Starsi oczekują przede wszystkim prostoty użytkowania i niezawodności. Młodzież lepiej odbiera urządzenia, które dają się indywidualizować, dostosowywać do potrzeb i posiadają maksymalnie dużą ilość gadżetów. Obie wymienione grupy klientów łączy właściwie tylko jedna wspólna cecha: rower powinien być dla nich dostępny cenowo. Oczekiwania tych grup klientów spełniają często rowery używane, przywożone zza zachodniej granicy oraz tanie „chińczyki”, które nie są zbyt dobrej jakości. Stworzenie konkurencji dla tych dwu dróg nabywania rowerów, czyli wyprodukowanie porównywalnego cenowo produktu pochodzącego od polskiego producenta, nie jest łatwe. Jedną z istotnych barier jest wielkość grupy potencjalnych klientów, która ma zasadnicze znaczenie dla zastosowanych rozwiązań technologicznych. Nie jest na przykład opłacalne produkowanie czujników, wyświetlaczy czy drobnych elementów oprzyrządowania, jeśli ich wolumen nie przekracza kilkudziesięciu lub często kilkuset tysięcy sztuk rocznie. Na naszym rynku te wielkości są na razie nieosiągalne. Sprostanie konkurencji w przypadku silników i ich sterowników nie jest już takie trudne. Zarówno najpopularniejsze tanie silniki, jak i sterowniki nie są wykonywane w niedostępnych u nas technologiach.

2. Budowa rowerowego napędu elektrycznego

Typowy rowerowy napęd elektryczny składa się z następujących podzespołów:

- trójfazowego silnika z magnesami trwałymi;
- baterii wraz z systemem BMS (z ang. *Battery Management System*);
- czujników, zadajników wyświetlacza;
- modułu sterująco-wykonawczego zawierającego mikrokontroler wraz z falownikiem 6T.

Ideowy schemat takiego rozwiązania prezentuje rysunek 1.

Szczegółowe informacje dotyczące budowy systemu rowerowego napędu elektrycznego zawarto w pracach [6, 7, 8].

3. Ograniczenia technologiczne rowerowych silników elektrycznych

Wymaganie stosunkowo niskiej ceny całego roweru elektrycznego sprawia, że jego silnik musi być budowany w oparciu o tanie rozwiązania materiałowe i technologiczne.

Schemat części silnoprądowej rowerowego napędu elektrycznego przedstawiono na rysunku 2.

W porównaniu z kilkudziesięciokilowatowymi silnikami skuterów czy gokartów, motor e-bike wygląda bardzo kiepsko pod względem gęstości mocy czy osiąganych prędkości. Silnik rowerowy wcale nie musi się jednak tym martwić, ponieważ w rowerze elektrycznym istnieje ograniczenie mocy wynikające z uregulowań prawnych, które obecnie jest na poziomie 250 W. Ograniczona jest również prędkość maksymalna, przy której rower może być wspomagany elektrycznie. Zgodnie z przepisami powyżej 25 km/h sterownik nie ma prawa napędzać silnika. Tak niskie wymagania spełnia się więc za pomocą tanich rdzeni, wykonanych z pakietowanej blachy

Streszczenie: W artykule została przedstawiona koncepcja oraz implementacja struktur regulacji silnika PMSM umieszczonego w rowerze o napędzie elektrycznym. Autorzy zaprezentowali struktury układów napędowych, urządzenie pomocnicze, układy pomiarowe sygnałów analogowych oraz zastosowane algorytmy sterowania. W pracy zostały zamieszczone wyniki pomiarów napięć i prądów płynących w elementach układu napędowego.

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

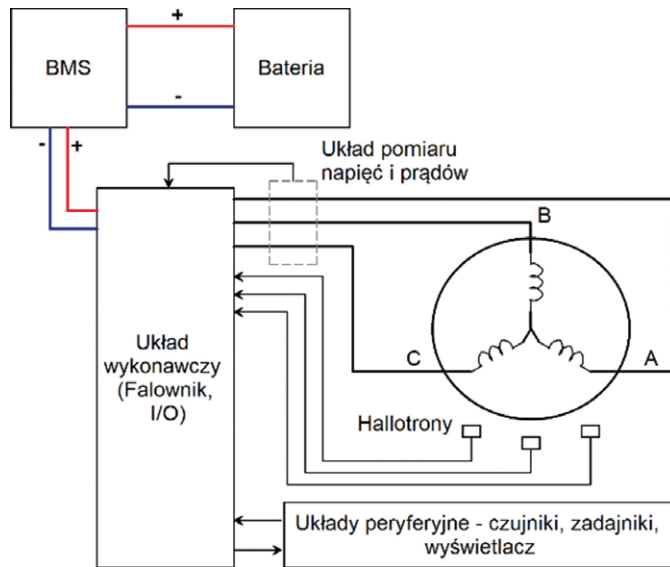
🇬🇧 CONTROL ALGORITHM IMPLEMENTATION OF PMSM INVERTER FED E-BIKE DRIVE

Abstract: The following article depicts the concept and implementation of control algorithm dedicated to PMSM drive of e-bike. 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

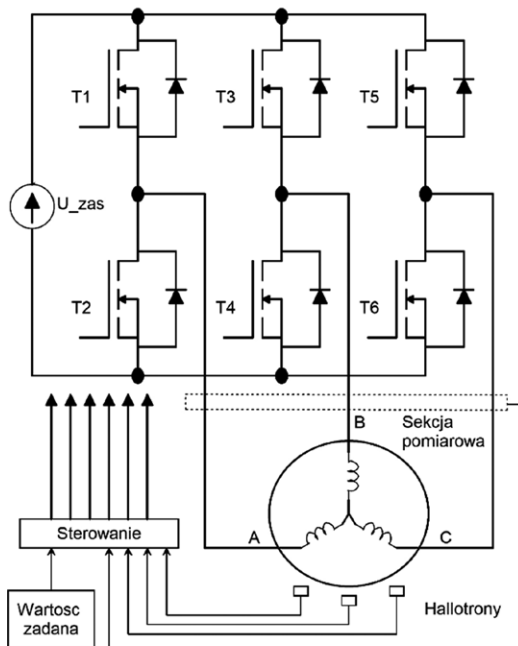
i stosunkowo tanich, masowo produkowanych magnesów neodymowych, które przykleja się do obudowy silnika z ograniczoną precyzją. Konsekwencją niskiego poziomu stosowanych technologii są:

- niedokładność zamontowania czujników Halla;



reklama

Rys. 1. Ideowy schemat rowerowego napędu elektrycznego



Rys. 2. Schemat części silnoprądowej rowerowego napędu elektrycznego

- odbiegający od ideału kształt siły elektromotorycznej i niesymetria obwodu magnetycznego dla kolejnych biegów tej samej fazy;
- występowanie znacznego momentu zaczepowego.
Każde z tych zjawisk niekorzystnie wpływa na działanie napędu.

3.1. Montaż czujników Halla

Innym z podstawowych problemów technologicznych związanych z produkcją napędów elektrycznych dla e-bików

jest niedokładność związana zarówno z umiejscowieniem (wklejeniem, zamocowaniem), jak i samą budową czujników Halla. Ich funkcja związana jest bezpośrednio z procesem sterowania napędami, tak więc każda niedokładność związana z informacją o aktualnym kącie elektrycznym przekłada się bezpośrednio na kulturę pracy napędu oraz komfort użytkownika końcowego roweru. Do najczęstszych niedogodności związanych z nieprecyzyjnym oszacowaniem kąta elektrycznego należy zaliczyć

reklama

tętnienia momentu i skrócenie czasu pracy napędu na jednym cyklu ładowania. Należy przy tym zauważyć, że niedogodności te występują niezależnie od wybranej strategii sterowania.

Rysunek 3 prezentuje przebieg siły elektromotorycznej jednej z faz oraz przebieg sygnału pochodzącego z jednego z czujników Halla. Powiększone fragmenty ilustrują niedokładność pomiaru kąta elektrycznego maszyny.

3.2. Niesinusoidalny kształt siły elektromotorycznej

Równie często spotykanym problemem technologicznym – związanym zarówno z projektowaniem, jak i z procesem produkcji – jest uzyskanie odpowiedniego kształtu siły elektromotorycznej. Problem ten ilustrują rysunki 4 oraz 5.

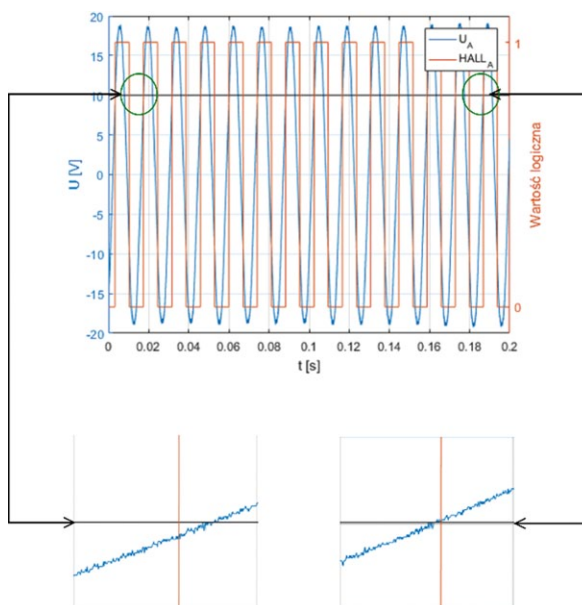
3.3. Moment zaczepowy

W najpopularniejszych silnikach dla koła przedniego, ze względu na to, że muszą osiągać odpowiednią moc, a nie mogą być zbyt ciężkie, niezbędne jest stosowanie przekładni planetarnej. Wysokoobrotowy silnik po redukcji prędkości obraca kołem i napędza pojazd z właściwym, bo przemnożonym przez przekładnię momentem. O wiele gorzej ma się sprawa z jazdą bez wspomagania. Występujący moment zaczepowy, po przemnożeniu przez przekładnię, ma wartość nieakceptowalną przez rowerzystę. Niezbędne jest więc zastosowanie „wolnego koła” dla jazdy bez wspomagania. Silnik tego typu całkowicie uniemożliwia więc oddawanie energii do baterii podczas hamowania. Szczególnie odczuwa się brak takiej funkcji podczas długich zjazdów.

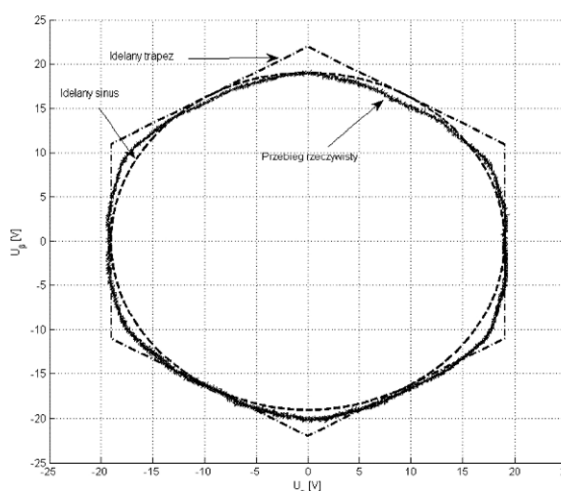
4. Implementacja wybranych algorytmów sterowania

Literatura przedstawia kilka kryteriów podziału metod sterowania silnikami z magnesami trwałymi [4, 6].

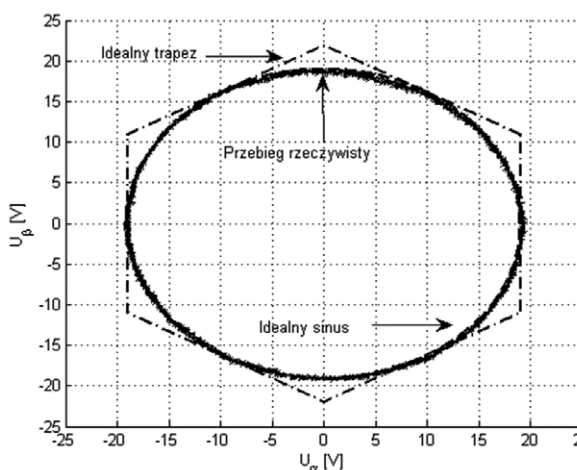
Najbardziej podstawową metodą podziału jest podział na metody klasyczne, w których nie kontrolujemy położenia wektora strumienia i prądu, oraz metody połowo zorientowane (FOC z ang. *Field Oriented Control*). Kolejnym kryterium podziału jest dywersyfikacja metod ze względu na sposób, w jaki uzyskujemy informację o aktualnym



Rys. 3. Przebieg siły elektromotorycznej jednej z faz oraz sygnału pochodzącego z czujnika Halla



Rys. 4. Przebieg sinusoidalnej, trapezoidalnej oraz rzeczywistej siły elektromotorycznej w układzie α-β dla rowerowego silnika bezprzekładniowego



Rys. 5. Przebieg sinusoidalnej, trapezoidalnej oraz rzeczywistej siły elektromotorycznej w układzie α-β dla rowerowego silnika przekładniowego

kącie elektrycznym. Najbardziej ogólnie można przyjąć, że rozróżniamy metody sterowania oparte o czujnikowy pomiar kąta (czujniki Halla, enkodery) oraz metody bezczujnikowe, w których wykorzystuje się BEMF (z ang. *Back Electromotive Force*) lub obserwatory kąta elektrycznego [9].

4.1. Sterowanie trapezoidalne z czujnikami Halla

Najbardziej trywialnym sposobem sterowania rowerowego napędu elektrycznego z silnikiem trójfazowym z magnesami trwałymi jest sterowanie trapezoidalne. W tej metodzie sterowania kombinacja załączenia kluczy falownika 6T ulega zmianie co 60° stopni elektrycznych. W każdym z sześciu cykli, na które możemy podzielić proces sterowania, przewodzi zawsze tylko jeden tranzystor górny oraz jeden tranzystor dolny. Klucze w obrębie jednego sektora mogą być załączane na stałe, lecz zdecydowanie częściej spotykamy się ze strategią sterowania, w której chociaż jeden z kluczy jest modulowany poprzez PWM. Rysunek 6 prezentuje przebieg napięcia i prądu jednej fazy na tle prądu pobieranego z baterii.

4.2. Sterowanie polowo zorientowane

Jednymi z bardziej zaawansowanych metod sterowania napędami elektrycznymi z silnikami z magnesami trwałymi są metody polowo zorientowane. W metodach tych wymagana jest precyzyjna informacja o aktualnym kącie elektrycznym.

W przypadku wykorzystania enkoderów, w napędach przemysłowych, precyzję zapewnia duża rozdzielczość enkodera. W przypadku urządzeń, w których wykorzystuje się czujniki Halla, jakim są rowerowe napędy elektryczne, informacje o kącie uzyskujemy co 60° elektrycznych. Niestety dla sterowania polowo zorientowanego wymagana jest ciągła informacja o aktualnym kącie. Dlatego wartość kąta pomiędzy sektorami jest zwykle aproksymowana na podstawie szybkości zmian kąta w poprzedzającym sektorze. Taki sposób aproksymacji kąta odwzorowuje rzeczywisty kąt w sposób idealny tylko w przypadku stanów statycznych. W przypadku dynamicznych zmian prędkości kąt wyliczony za pomocą aproksymacji poprzednich sektorów może się różnić od rzeczywistego, co obrazuje rysunek 7.

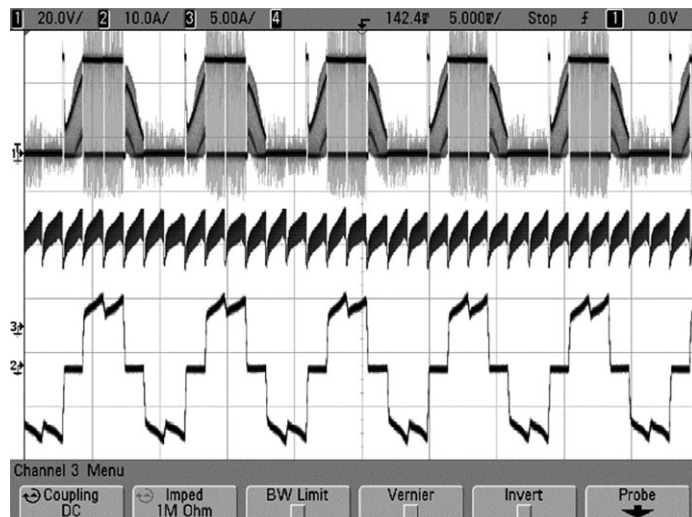
Schemat polowo zorientowanego układu regulacji silnikiem PMSM prezentuje rysunek 8.

Przebieg prądu oraz napięcia jednej fazy silnika PMSM sterowanego polowo rowerowego napędu elektrycznego prezentuje rysunek 9.

5. Podsumowanie

Tanie, przeznaczone dla masowego odbiorcy silniki do rowerów elektrycznych nie prezentują sobą wysokich walorów technologicznych. Producenci rowerów muszą więc podejmować próby eliminacji niekorzystnych zjawisk za pomocą odpowiednich algorytmów regulacji, implementowanych w sterownikach silników. Niektóre z tych zjawisk

Rys. 6. Przebieg napięcia prądu jednej fazy silnika rowerowego napędu elektrycznego na tle prądu pobieranego z baterii. Sterowanie trapezoidalne ze stałym współczynnikiem modulacji w obrębie sektora

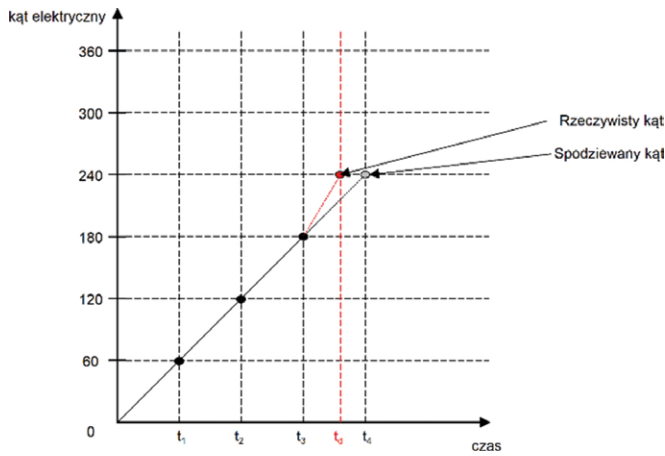


reklama

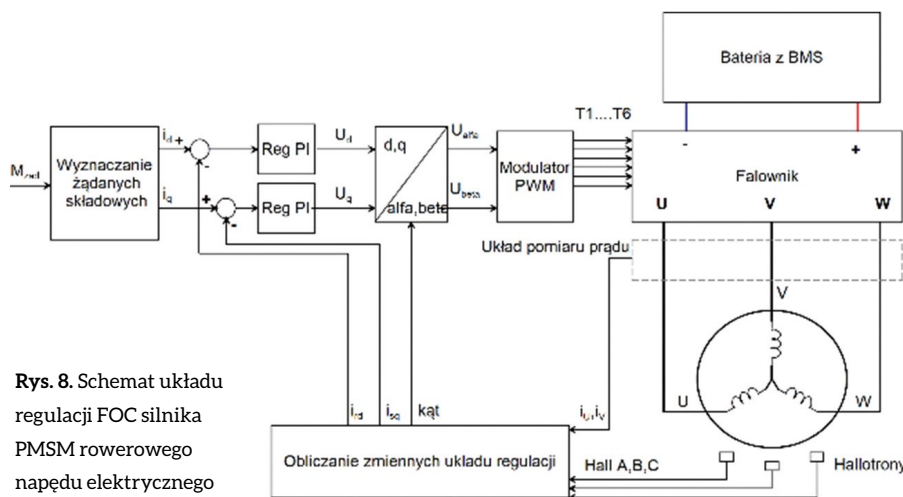
reklama

(niewłaściwy kształt siły elektromotorycznej, brak precyzji montażu czy niesymetrii obwodu magnetycznego) dają się

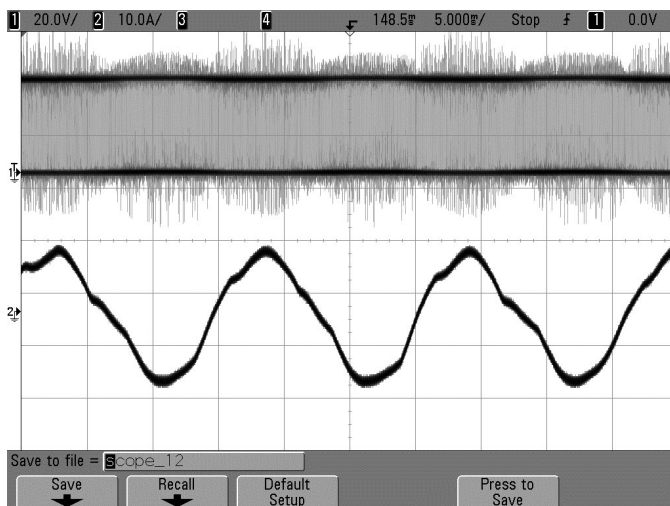
z powodzeniem ograniczać. Inne, takie jak moment zaczepowy, są niestety niezależne od sterownika.



Rys. 7. Aproxymacja kąta na podstawie poprzednich sektorów. Przedziały czasowe t_1, t_2, t_3 – stan statyczny; t_4 – stan dynamiczny



Rys. 8. Schemat układu regulacji FOC silnika PMSM rowerowego napędu elektrycznego



Rys. 9. Przebieg napięcia i prądu fazy silnika sterowanego metodą polowo zorientowaną

Literatura

- [1] ADAMCZYK D., MICHNA M.: *Przegląd i analiza układów napędowych stosowanych w rowerach elektrycznych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 88(114)/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] NOWAK R.: *Wybrane algorytmy sterowania silnikami z magnesami trwałymi*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2(114)/2017.
- [5] RUDNICKI T., CZERWIŃSKI R., FRĘCHOWICZ A.: *Układy sterowania silnikiem PMSM*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 90/2011.
- [6] TATAR K., CHUDZIK P.: *Algorytmy sterowania rowerowych napędów elektrycznych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2(114)/2017.
- [7] TATAR K., CHUDZIK P., NOWAK R., LISOWSKI G.: *Projekt wielomodułowego sterownika elektrycznego napędu rowerowego – układ napędowy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 3(118)/2018.
- [8] TATAR K., CHUDZIK P., NOWAK R., LISOWSKI G.: *Projekt wielomodułowego sterownika elektrycznego napędu rowerowego – moduł komunikacyjny*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 3(118)/2018.
- [9] ZHAWEI QIAO, TINGNA SHI, YINDONG WANG, YAN YAN, CHANGLIANG XIA, XIANGING HE: *New Sliding-Mode Observer for Position Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 2, Luty 2013.

dr inż. Karol Tatar – Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki Elektroniki Informatyki i Automatyki, Instytut Automatyki, Zakład Techniki Sterowania, e-mail: karol.tatar@p.lodz.pl