

## Napęd elektryczny i sterowanie trójkołowego roweru bez przekładni mechanicznej

**Streszczenie.** W referacie omówiono koncepcję pojazdu napędzanego pedałami (roweru) ze wspomaganie elektrycznym. Każde z trzech kół pojazdu napędzane jest silnikiem elektrycznym (BLDC) sterowanym przez centralny układ rozdziału mocy. Prędkość ruchu pojazdu oraz moc podawana na silniki są proporcjonalne (z nastawianym przełożeniem) odpowiednio do prędkości i mocy pedałowania. Bateria akumulatorów ładowana jest poprzez napędzaną pedałami prądnicę. Opis i analiza wybranych układów pojazdu udokumentowane są wynikami badań prototypu.

**Abstract.** In this paper the idea of an electrically aided pedal-driven vehicle (bicycle) is described. Each of three wheels of the vehicle is driven by electric motor (BLDC) controlled by the central system of power distribution. Velocity of the vehicle and motors power are proportional (with adjustable ratio) to pedaling speed and power respectively. The battery pack is charged by the pedal-driven generator. Description and analysis of the vehicle subsystems are documented with the prototype research results. (**Electric drive and control of three-wheel bicycle without mechanical gear**).

**Słowa kluczowe:** rower elektryczny, silnik BLDC, pojazd elektryczny, wspomaganie elektryczne

**Keywords:** electric bicycle, BLDC motor, electric vehicle, electric aid

doi:10.12915/pe.2014.06.04

### Wstęp

Napęd elektryczny pojazdów różnego przeznaczenia staje się alternatywą dla napędu z silnikami spalinowymi. Wynika to z wielu szeroko znanych jego zalet, z których warto przypomnieć: mniej szkodliwe oddziaływanie na środowisko, oszczędność energii dzięki możliwości hamowania odzyskowego czy łatwość sterowania. Wśród wielu rozwijanych koncepcji pojazdów z napędem elektrycznym znajduje się rower ze wspomaganie elektrycznym. Przepisy różnych krajów definiują jaki pojazd może być uważany za rower ze wspomaganie elektrycznym. Istotną cechą takiego pojazdu jest konieczność wprawiania w ruch za pomocą pedałów, dla których napęd elektryczny o mocy nie przekraczającej 200 W stanowi jedynie wspomaganie. Kierując się tymi ograniczeniami opracowano koncepcję i skonstruowano prototyp trójkołowego pojazdu napędzanego pedałami ze wspomaganie elektrycznym. Konstrukcję i badania wykonano w ramach projektu finansowanego przez PARP. Określono następujące cele projektu:

- stworzenie ekologicznego, trzykołowego pojazdu do poruszania się po mieście zgodnego z definicją roweru elektrycznego,
- w pełni elektryczny napęd bez sprzężenia mechanicznego (np. wału, łańcucha) między pedałami a kołami, zamontowany w kołach pojazdu,
- możliwość ładowania akumulatorów pracą mięśni
- przeznaczenie do transportu 1 - 3 osób lub przewożenia niewielkiego ładunku.

W referacie opisano koncepcję pojazdu, budowę jego głównych podzespołów oraz wyniki badań i testów prototypu.

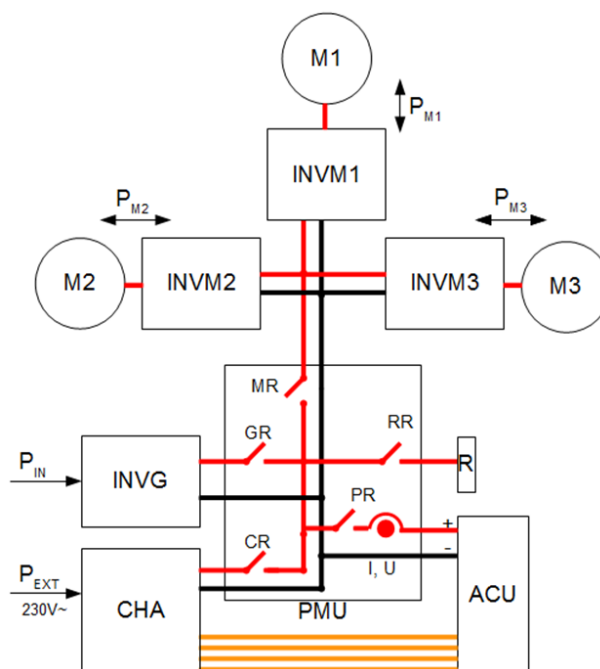
### Koncepcja układu napędowego i sterowania

Pojazd wyposażony jest w trzy koła napędzane niezależnie, za pomocą silników (BLDC). Moc pedałowania jest wzmacniana (przy czym współczynnik wzmocnienia wynika z przyjętego przełożenia) i podawana za pośrednictwem centralnego układu sterowania na silniki. Za pomocą pedałów napędza się prądnicę doładowującą baterię akumulatorów. Prędkość ruchu pojazdu jest proporcjonalna do prędkości pedałowania z możliwością ustawiania różnych wartości przełożenia (przekładnia elektroniczna). Moc generowana przez prądnicę decyduje o

mocy podawanej na silniki napędzające koła, przy czym stopień jej zwiększania (wspomaganie) wynika z wybranego biegu ustawionego w przekładni elektronicznej. Układ napędu i sterowania pojazdu podzielono na następujące moduły składowe (podsystemy):

- 3 napędy indywidualne kół, zawierające przekształtniki i silniki BLDC oraz układ sterowania,
- moduł prądnicy napędzanej pedałami z przekształtnikiem i układem sterowania, pozwalający na ładowanie baterii akumulatorów,
- moduł centralny sterowania i zarządzania mocą,
- bateria akumulatorów Li-Fe z zestawem ładowarek.

Przyjęto połączenie układów sterowania napędów silników oraz układu generatora z modułem centralnego sterowania za pomocą sieci komunikacyjnej CAN.



Rys. 1. Schemat sieci przetwarzania energii zasilającej

Rysunek 1 przedstawia strukturę układu, w skład którego wchodzi: PMU – jednostka nadrzędna oraz zarządzania mocą, INVM1(2,3) – przekształtniki silnikowe, INVG – przekształtnik generatora zasilanego poprzez pedały rowerowe, CHA – blok ładowarki akumulatorów. Odpowiednia logika rozpraszania linii zasilających umożliwia monitorowanie napięcia i prądu całkowitego akumulatorów w punkcie rozgałęzienia oraz niezależne przyłączanie systemów do sieci silnopiękowej (odłączanie od sieci w przypadku wykrycia błędnego działania poprzez łączniki MR, GR, RR, CR, PR). Łącznik PR (Power Relay) jest łącznikiem typu przekaźnik elektromagnetyczny, w którego obwodzie cewki w szereg włączony jest wyłącznik awaryjny. Wszystkie systemy przetwarzania energii potrafią kontrolować prąd w obwodzie silnopiękowym, a więc reagować na żądanie zmiany jego wartości. Dopuszcza się możliwość wytracania energii na rezystancji zewnętrznej stanowiącej także część systemu bezpieczeństwa oraz jako element wytracania energii awaryjnego hamowania dynamicznego. Każdy z przekształtników komunikuje się z jednostką główną (PMU, MCPU) za pośrednictwem rozproszonej sieci CAN. PMU umożliwia realizację złożonych algorytmów sterowania ruchem, jak np. ograniczanie wartości działających sił odśrodkowych, różnicowanie momentu napędowego oraz prędkości obrotowej. Z uwagi na zapewnienie bezawaryjnej pracy układów przyjęto separację galwaniczną całego systemu mikroprocesorowego od części silnopiękowej (GI).



Rys. 2. Widok prototypu pojazdu przeznaczonego do testów trakcyjnych

Na rysunku 2 pokazano wygląd pierwszego prototypu pojazdu.

### Centralny moduł sterowania i rozdziału mocy

Podstawowe zadanie jednostki nadrzędnej (PMU) obejmują:

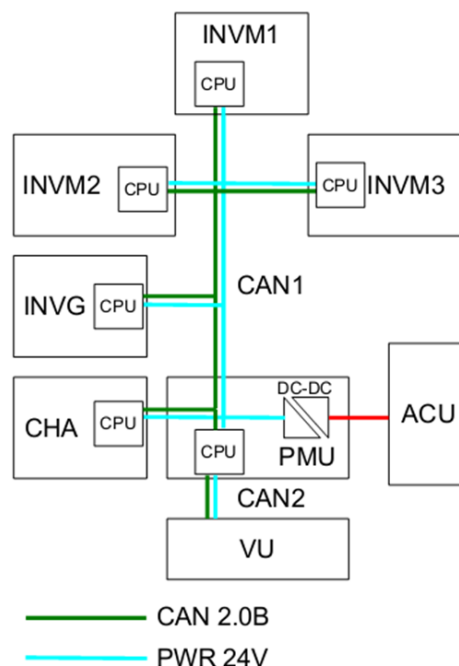
- nadzór nad pracą systemu – komunikacja w sieci rozproszonej,
- dostarczenie redundantnych mechanizmów bezpieczeństwa wraz z interfejsem wyłącznika awaryjnego
- pośrednictwo między napędem elektrycznym a jednostką VU,
- nadzór nad stanem akumulatorów (napięcie, prąd),
- dystrybucja zasilania dla elektroniki niskich prądów,
- zarządzanie dystrybucją energii wysokich prądów (dla części wykonawczych podsystemów).

Postawione zadania realizowane są w blokach: mikroprocesorowym z separacją galwaniczną oraz wykonawczą (mocy). Zastosowaną jednostką sterującą jest nowoczesny układ STM32F407, który pełni rolę sterownika we wszystkich podsystemach niniejszego projektu [1, 2].

W [3] przedstawiono implementację popularnych protokołów komunikacyjnych oraz algorytmy kontroli spójności sieci rozproszonych w innowacyjnym systemie propagacji informacji krytycznej. System ten oparto na wspomnianym mikrokontrolerze z rodziny STM32F4, a wybrane mechanizmy kontroli integralności sieci CAN, opisane szerzej w [3], zastosowano w rowerze elektrycznym.

Jak zostało przedstawione na schemacie z rysunku 3, sterownik centralny (PMU) stanowi jednostkę master sieci CAN1 (główna sieć systemu napędowego) oraz CAN2 (wydzielona sieć dla celów integracji z elementami HMI). Dzięki izolacji sieci komunikacyjnej systemu napędowego (CAN1) wykluczono możliwość zakłócenia jej pracy przez zewnętrzne urządzenie VU (jednostkę wizualizacji). W warstwie aplikacji zdecydowano się na implementację protokołu CANopen, scharakteryzowanego w [4, 5], często wykorzystywanego w pojazdach. Dopasowanie do specyfikacji pozwala na wykorzystanie gotowych mechanizmów logiki zarządzania stanem węzłów sieci, detekcji błędów, kontroli spójności sieci czy też schematów komunikacji przewidzianych do różnych sytuacji oraz wymogów systemu.

Na rysunku 3 zaprezentowano także równoległą do sieci CAN magistralę zasilającą sterowniki poszczególnych węzłów. Unifikacja źródła energii (przetwornicy DC/DC o szerokim zakresie napięć wejściowych) pozwala na redukcję kosztów oraz możliwość odłączenia zasilania części mikroprocesorowej w jednym punkcie. Separacja galwaniczna w zaproponowanej topologii zwiększa bezpieczeństwo pracy systemu ze względu na odsprężenie awarii części mocy od sterowników.



Rys. 3. Schemat topologii sieci komunikacji CAN oraz sekcji zasilania niskoprądowego (PWR 24V).

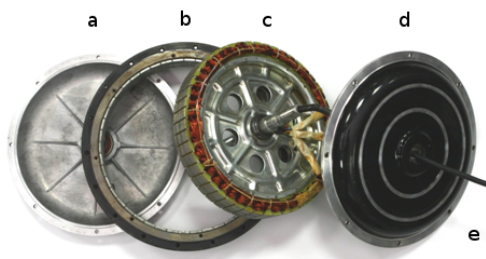
W zakresie sygnałów logicznych jednostka centralna steruje modułem zarządzania mocą, który pośredniczy w przepływie energii z i do akumulatorów (moduł mocy jest jedynym elementem systemu bezpośrednio połączonym z akumulatorami).

Powyższa funkcjonalność pozwala na implementację systemu bezpieczeństwa pracy, ponieważ zgromadzona w akumulatorach energia stanowi potencjalne zagrożenie dla użytkownika pojazdu. Podstawowym mechanizmem

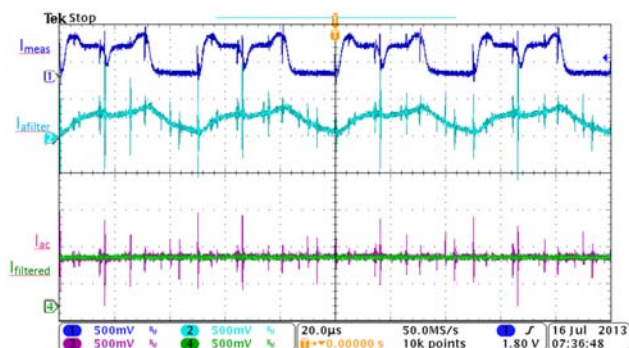
systemu bezpieczeństwa jest sprzężenie cewki przekątnika elektromagnetycznego z wyłącznikiem awaryjnym. Ponadto przekątnik sterowany jest elektronicznie, tak jak kontrolowany jest jego stan – wyłączenie awaryjne powoduje automatyczne załączenie rezystora mocy w obwód zasilania napędów (bez ingerencji systemu mikroprocesorowego). Elementem systemu bezpieczeństwa jest także logika przełączeń torów zasilania poszczególnych podsystemów (napędów silników, prądnicy, ładowarki, rezystora mocy do akumulatora) w zależności od stanu pojazdu (np. niedopuszczalny jest mimowolny ruch pojazdu podczas ładowania stacjonarnego). Poza głównym przekątnikiem elektromagnetycznym logika formująca tor przekazywania energii steruje tranzystorowymi, półprzewodnikowymi przekątnikami mocy (SSR). Umożliwia to pełną sterowalność, przy czym zasilanie dla sterowników bramek dostarcza zasilacz impulsowy flyback z wieloma odseparowanymi gałęziami strony wtórnej. Wyłączenie awaryjne na poziomie sygnałów sterujących, dzięki zastosowaniu odpowiedniej logiki TTL niezależnie od systemu mikroprocesorowego powoduje automatyczne załączenie rezystora w obwód zasilania napędów umożliwiając tym samym wspomaganie hamulca mechanicznego.

### Moduły napędu kół

Do napędu każdego z kół wykorzystano wielobiegunowe momentowe bezszczotkowe silniki prądu stałego (ang. *Brushless DC* - BLDC), dedykowane do napędu pomocniczego rowerów, zamontowane w piaście kół ze szprychami (patrz rysunek 2). Budowę wewnętrzną silników przedstawiono na rysunku 4. Zamknięta, kompaktowa konstrukcja, bez żadnych elementów mechanicznych w postaci przekładni, czyni tą konstrukcję trwałą i o niskiej awaryjności mechanicznej [6, 7].



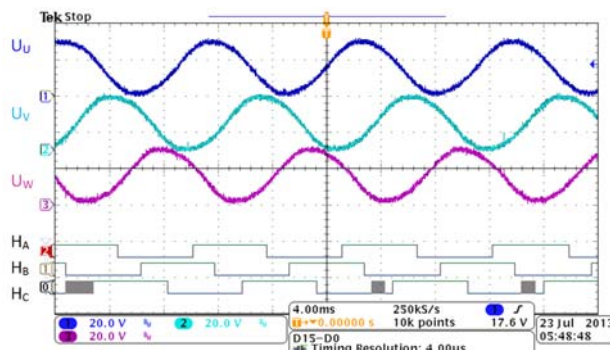
Rys. 4. Budowa wewnętrzna silnika: a, d – pokrywy silnika, b – wirnik z magnesami trwałymi, c – stojan z uzwojeniem, e – przewód zasilający i pomiarowy



Rys. 5. Ilustracje pomiaru prądu:  $I_{meas}$  – rzeczywisty prąd zmierzony (skala 500mV → 16,5A),  $I_{filtered}$  – prąd za filtrem analogowym (skala 500mV → 16,5A),  $I_{ac}$  – sygnał prąd z przetwornika AC (próbkowany co 50µs, skala 500mV → 8A),  $I_{filtered}$  – sygnał prądu wyfiltrowany filtrem cyfrowym pierwszego rzędu typu IIR ze stałą czasową 400µs (skala 500mV → 8A).

Są to jednostki napędowe o mocy około 1kW, w zupełności wystarczającej do przemieszczenia pojazdu wraz kompletem akumulatorów i pasażerem lub pasażerami z zachowaniem zadowalających właściwości dynamicznych. Stwierdzona podczas badań bardzo mała indukcyjność uzwojeń stojana (rzędu 50 µH) sprawia, że nawet przy dużych częstotliwościach nośnych modulacji PWM ( $f_c = 20$  kHz) prąd uzwojeń stojana ma charakter przerywany, co pokazano na rysunku 5. Ten przerywany charakter prądu wymaga silnego filtrowania (filtr analogowy i cyfrowy) dla uzyskania prostego pomiaru jego wartości średniej. Filtr taki wprowadza jednak znaczne opóźnienie, co w praktyce uniemożliwia zastosowanie pętli regulacji prądu o dobrej dynamice, a w konsekwencji utrudniona jest poprawna regulacja prędkości, konieczna do zapewnienia odpowiedniej dynamiki przy napędzie trójkołowym [8].

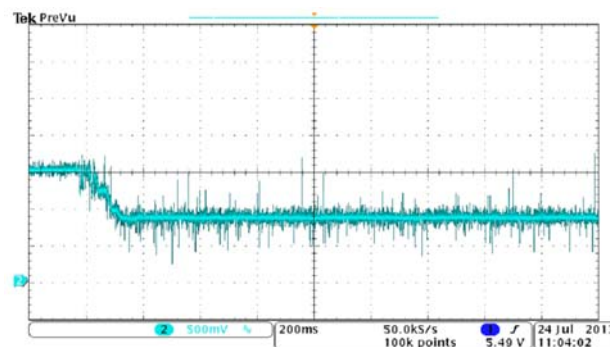
Podczas prowadzonych badań zauważono, że przebieg siły elektromotorycznej stojana jest bliższy kształtowi sinusoidalnemu aniżeli trapezoidalnemu, co ilustruje rysunek 6.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi SEM uzwojeń stojana silnika i sygnały z przetworników położenia

W związku z tym podjęto decyzję, aby zaimplementować w przekształtniku sterowanie sinusoidalne. Idea sterowania z wymuszeniem trójfazowego napięcia sinusoidalnego polega na kształtowaniu napięć zbliżonych do sinusoidy, przesuniętych w fazie o 120 i 240 stopni elektrycznych. Możliwe jest takie kształtowanie sygnałów napięć fazowych, aby rzeczywiste napięcia międzyfazowe miały kształt sinusoidy.

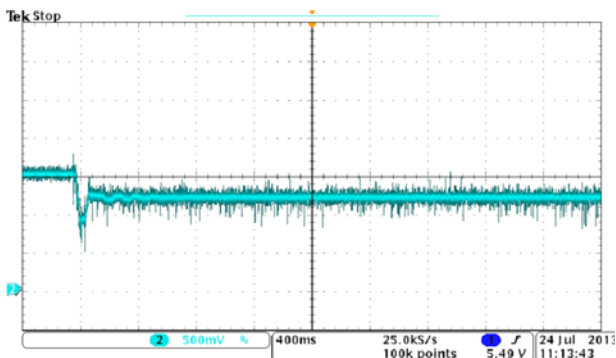
Sterowanie napięciem sinusoidalnym z powodzeniem przetestowano w zakresie małych prędkości, zarówno na hamowni obciążającej, jak i podczas prób trakcyjnych pojazdu. Główną zaletą zastosowania tego algorytmu sterowania jest wygładzenie nierównomierności momentu elektromagnetycznego, występujących w ramach jednego obrotu wału silnika. Posiada on ponadto inną ważną właściwość, polegającą na znaczącej redukcji poziomu hałasu napędu względem klasycznego sterowania silnika BLDC, który ujawnia się zwłaszcza podczas forsowania momentu, czy pracy z małą prędkością.



Rys. 7. Rozruch do prędkości 150 obr/min z regulatorem prędkości.

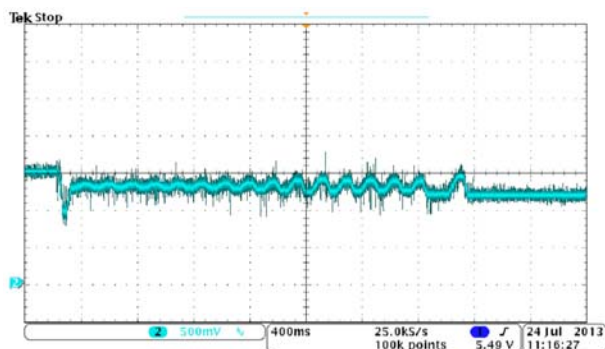


Ze względu na wspomniane trudności z konstrukcją regulatora prądu w klasycznym kaskadowym schemacie regulacji (opisywanym w [8, 9]), zastosowano rozwiązanie zastępcze. Polega ono na zbudowaniu regulatora prędkości, którego wyjściem jest wartość zadanej napięcia. W celu realizacji tego zadania posłużono się prostym regulatorem o strukturze PI, działającym w dziedzinie czasu dyskretnie z częstotliwością 1kHz. Poniżej przedstawiono wyniki badania rozruchu napędu dla różnych wartości zadanej prędkości 150 obr./min i 75 obr./min, odpowiednio na rysunkach 7 i 8.

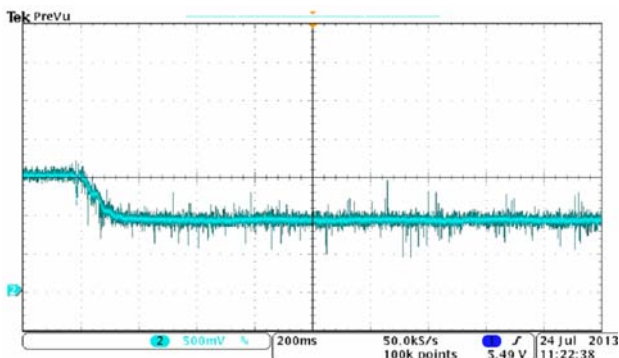


Rys. 8. Rozruch do prędkości 75 obr./min z regulatorem prędkości.

Z powodu pomiaru położenia (sygnały z czujników Halla) o dość niskiej rozdzielczości (1/6 obrotu elektrycznego wału) oraz stwierdzonych różnic w długości impulsów rzędu 10-15% wystąpiły trudności z uzyskaniem poprawnej pracy regulatora prędkości poniżej prędkości 70 obr./min. Wynik taki przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Rozruch do prędkości 60 obr./min z regulatorem prędkości – niepoprawne działanie regulatora



Rys. 10. Rozruch napięciowy do prędkości 120 obr./min

Ze względu na trudności z pracą przy niskiej prędkości pojazdu zdecydowano się na rozwiązanie alternatywne,

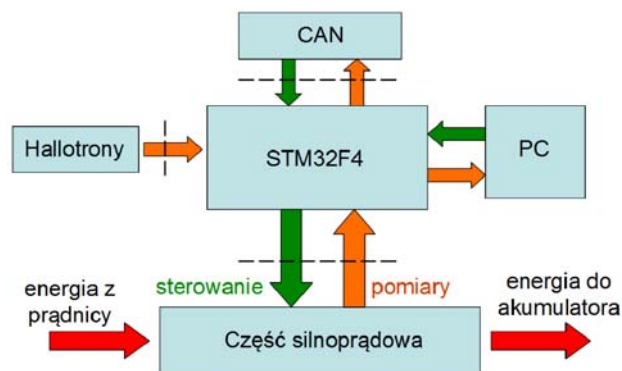
polegające na sterowaniu wartością siły elektromotorycznej silnika z wprowadzeniem kompensacji spadku napięcia na rezystancji obwodu stojana i obwodu zasilającego, co zdecydowanie poprawiło jakość sterowania. Dodatkowo zaimplementowano ograniczenie wartości prądu obwodu napięcia stałego poszczególnych przekształtników do wartości maksymalnej 45A. Przebieg ilustrujący rozruch przy zastosowaniu takiego rozwiązania pokazuje rysunek 10.

### Moduł prądniczy

Moduł prądniczy realizuje następujące zadania:

- przetwarza energię elektryczną wygenerowaną przez napęd pedałów w sposób umożliwiający jej przekazanie do akumulatorów,
- dokonuje pomiaru bieżącej wartości prędkości obrotowej prądniczy,
- wytwarza opór mechaniczny na pedałach pojazdu, zgodnie z wybranym algorytmem sterowania,
- zapewnia komunikację z pozostałymi modułami i modulem centralnym (sieć CAN).

Jako prądnicę użyto silnik BLDC z wbudowanymi czujnikami Halla, napędzany za pośrednictwem łańcucha i pedałów. Na rysunku 11 przedstawiono schemat blokowy układu prądniczy.

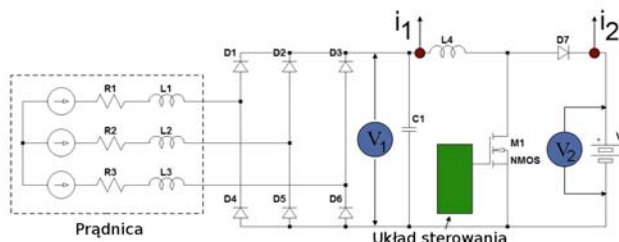


Rys. 11. Schemat blokowy modułu prądniczy.

Zaznaczono na nim podstawowe bloki funkcjonalne, a także przepływ energii elektrycznej i informacji.

Centralną częścią urządzenia jest mikrokontroler STM32F407. Odpowiada on za:

- sterowanie kluczami części silnopiędowej,
- rejestrację i przetwarzanie sygnałów pomiarowych (prądów oraz napięć),
- realizację algorytmów sterowania, uwzględniających korekty ergonomiczne,
- komunikację z pozostałymi modułami pojazdu za pomocą sieci CAN,
- rejestrację i przetwarzanie sygnałów z czujników Halla,
- wymianę informacji z komputerem PC (w trakcie testów układu).



Rys. 12. Schemat ideowy części silnopiędowej modułu prądniczy.

Na rysunku 11 przedstawiono schemat blokowy modułu prądniczy. Linia przerywaną zaznaczono separację galwaniczną, zrealizowaną w oparciu o transoptory. Zaznaczyć należy, iż komputer PC jest elementem pomocniczym, nie występującym w trakcie normalnej pracy układu, niezbędnym jednak podczas testów laboratoryjnych i trakcyjnych.

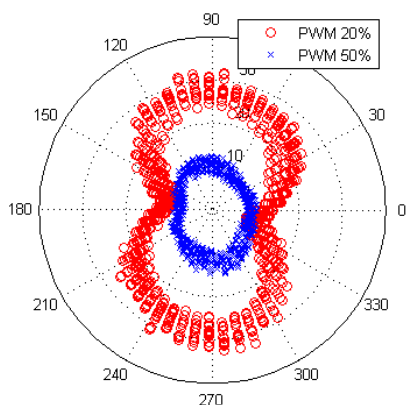
Schemat części silnopiędowej pokazano na rysunku 12. Linia przerywaną objęto elementy wchodzące w skład silnika BLDC. Każda z trzech faz silnika jest zaprezentowana jako szeregowe połączenie: siły elektromotorycznej, rezystancji oraz indukcyjności. Napięcie generowane przez silnik zostaje wyprostowane za pomocą diod D1 – D6 i podane na kondensator filtrujący w obwodzie DC. Napięciem tym zasilana jest część silnopiędowa przekształtnika DC/DC.

Przekształtnik zbudowano w topologii *boost convertera*. Topologia ta została wybrana z następujących powodów:

- podczas pracy wymagane będzie tylko i wyłącznie zwiększanie napięcia (w celu ładowania akumulatorów)
- prosta konstrukcja (wymagany tylko jeden tranzystor mocy oraz jedna dioda mocy)
- bezpieczeństwo użytkownika (żadna z awarii jakie mogą wystąpić w układzie, wliczając w to błędy na poziomie sterowania, nie spowoduje samoczynnego obrotu pedałów)
- relatywnie wysoka sprawność tego typu konstrukcji.

#### Badania skuteczności korekt ergonomicznych w zadaniu obciążenia kierowcy pojazdu

Podczas testów układu generatorowego na stacjonarnym rowerze, pojawiła się bardzo istotna kwestia utrzymania płynności pedałowania [9]. Szczególnie dla większych momentów obciążenia (tj. prądów zadanych generatora rzędu kilkunastu amperów) dawała o sobie znać nierównomierność siły mięśni nóg rowerzysty w funkcji kąta obrotu korb pedałów. W położeniach prostopadłych do płaszczyzny podłoża moment obrotowy wytwarzany przez kierowcę jest minimalny, co przejawia się w szarpaniu podczas pedałowania. Choć obserwacje przedstawione w trakcie badań pozwalają na stwierdzenie, że prądy zadane generatora przekraczające 10 A są dalekie od energetycznego optimum, to z pewnością konieczne jest zapewnienie naturalnego procesu pedałowania także i przy takich wartościach obciążeń zadanych.



Rys. 13. Charakterystyka momentowa pedałowania rowerzysty w funkcji kąta obrotu korb.

Zagadnienie utrzymania płynnego pedałowania jest niezwykle istotne z punktu widzenia końcowego użytkownika pojazdu [10]. Korzystając z pojazdu wspomaganego elektrycznie powinien on odczuwać wrażenia jak najbardziej zbliżone do tych, do których był

przyzwyczajony podczas jazdy zwykłym rowerem. Niestety, z powodu całkowitego rozprzęgnięcia pedałów od napędu pojazdu, to trywialne z pozoru zadanie stało się bardzo istotnym punktem badań. Całość odczuć, które w sposób naturalny są przekazywane w mechanizmie tradycyjnego roweru musi być emulowana przez oprogramowanie i elektronikę sterowanego mikroprocesorowo przekształtnika energoelektronicznego układu generatora.

Sporządzono kątową charakterystykę momentu wytwarzanego przez pedałuującego. Z rozdzielczością kątową wynoszącą 7° zmierzono chwilowe wartości prądów generatora. Zebrane pomiary przedstawiono na rysunku 13, przedstawiającym dwie względne wartości obciążenia w biegunowym układzie współrzędnych.

Najprostszym rozwiązaniem jest modyfikacja zadanej wartości prądu, komplementarnie do możliwości osoby pedałuującej. W ten sposób suma obu momentów byłaby wartością stałą. Taka statyczna (będąca tylko funkcją kąta obrotu pedałów i aktualnej nastawy prądu zadanego średniego) korekcja nie przynosiła oczekiwanych rezultatów. Przyjętym kryterium skuteczności metody korekcji był statystyczny opis jednostajności pedałowania – wariancja prędkości kątowej odniesiona do średniej wartości prędkości, dany wzorem:

$$(1) \quad I = \frac{1}{\bar{\omega}} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^2$$

gdzie:  $N$  – liczba próbek,  $\omega_i$  – kolejna próbka,  $\bar{\omega}$  – średnia prędkość.

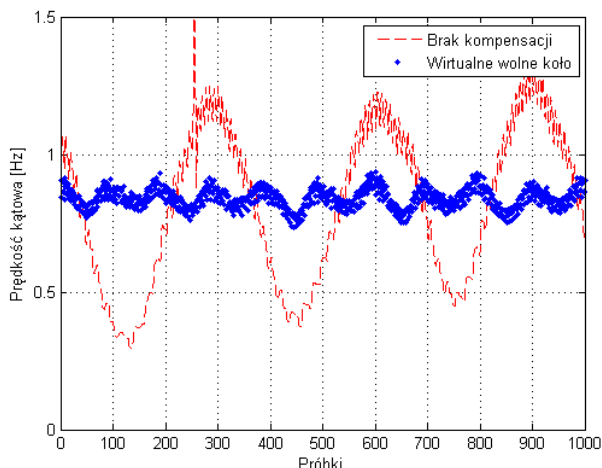
Malejąca wartość tego wskaźnika odpowiada rosnącej skuteczności metody. Choć wartość wskaźnika jakości korekcji zmalała trzykrotnie (z 0,063 do 0,027), to subiektywne wrażenie nadal nie było satysfakcjonujące. Dodatkowo, każdy pedałuujący cechuje się nieco odmienną charakterystyką momentową pedałowania, co w praktyce skutkowałooby koniecznością stosowania zaawansowanych algorytmów adaptacyjnych.

Efektywniejszym rozwiązaniem okazały się metody określone przez autorów jako dynamiczne, oparte na pomiarach chwilowej prędkości pedałowania [12]. Najskuteczniejszą z nich jest algorytm emulujący w systemie mikroprocesorowym model wolnego koła. Zawiera on wirtualną bezwładność, „dopędzaną” przez pedałuującego, ilekroć aktualna prędkość pedałowania przekroczy wartość prędkości bezwładności wirtualnej: wolne koło dąży do osiągnięcia prędkości rzeczywistej poprzez model inercji pierwszego rzędu. Gdy prędkość rzeczywistego pedałowania jest mniejsza niż prędkość wirtualnej bezwładności, następuje iteracyjne zmniejszanie prędkości wolnego koła, zgodnie z formułą:

$$(2) \quad \omega_{k+1} = \omega_k - \alpha \cdot \omega_k$$

gdzie  $\omega_{k+1}$  i  $\omega_k$  to prędkości koła wirtualnego w bieżącej i poprzedniej iteracji, natomiast współczynnik  $\alpha$  wiąże ze sobą moment bezwładności i współczynnik tarcia wiskotycznego modelu. Gdy wolne koło hamuje, wartość zadanego prądu generatora jest zmniejszana proporcjonalnie do różnicy obu prędkości (wirtualnej i rzeczywistej). Gdy wirtualny model zwiększa swoją prędkość, wirtualne obciążenie jest dodawane do zadanej wartości prądu generatora o składnik proporcjonalny do pochodnej prędkości rzeczywistej. W ten sposób pojawia się dodatkowy czynnik przeciwdziałający gwałtownym szarpnięciom pedałami – następuje kompensacja przyspieszenia kątowego. Skuteczność metody została potwierdzona 10-krotnym zmniejszeniem wartości

wskaźnika równomierności pedałowania (z 0,063 do 0,0061), popartym subiektywnymi wrażeniami, niemal nieodróżnialnymi od tych związanych z jazdy klasycznym rowerem.



Rys. 14. Porównanie przebiegów prędkości pedałowania przy zastosowaniu algorytmu wirtualnego wolnego koła oraz przy braku korekt.

Rysunek 14 zawiera zarejestrowane przebiegi prędkości pedałowania (kadencji) bez algorytmu kompensacji nierównomierności charakterystyki obciążeniowej i z algorytmem emulacji wolnego koła. Jak widać, choć średnia wartość prędkości na obu wykresach jest taka sama i wynosi około 0,9 obr./s, to różnica amplitud odchyłań jest znacząca.

#### Podsumowanie

Próby i testy pojazdu wykazały, że przyjęta koncepcja układu się sprawdziła a poszczególne moduły i układ centralnego sterowania i zarządzania mocą działają prawidłowo. Pojazd reaguje poprawnie na zmiany prędkości pedałowania, z możliwością elektronicznego przełączania przełożenia pomiędzy tą prędkością a prędkością pojazdu (przełączanie biegów). Wstępnie przyjęto 10 biegów przekładni elektronicznej. Pedałujący prawidłowo odczuwa opory ruchu, czyli wkładany wysiłek w uruchomienie i ruch pojazdu przy odpowiednio dużym wzmocnieniu mocy podawanej na koła, które jest zmienne zgodnie z ustawionym biegiem. Pojazd posiada skuteczne hamowanie elektryczne, które pozwala odzyskać część energii hamowania w formie doładowywania akumulatorów.

Przyjęte rozwiązanie oparte na pełnej separacji układów mikroprocesorowych od części silnoprądowej

minimalizowało ryzyko ich uszkodzenia – podczas badań pomimo błędów w torach mocy nie stwierdzono uszkodzeń układu jednostki centralnej.

#### LITERATURA

- [1] STM Corp., Software techniques for improving microcontroller EMC performance, AN1015 (2007)
- [2] STM Corp., Oscillator design guide for ST microcontrollers, AN2867 (2010)
- [3] Fabiański B. Embedded system of critical information management, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, Issue 76, 143-150, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013, ISSN 1897-0737
- [4] Boterenbrood H., CANopen - high-level protocol for CAN-bus, NIKHEF, Amsterdam (2000)
- [5] Corrigan S., Introduction to the Controller Area Network(CAN), Texas Instrument Application Report (2008)
- [6] Krishnan R., Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, Taylor & Francis (2010)
- [7] Krykowski K., Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym: analiza, właściwości, modelowanie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej (2011)
- [8] Zawirski K., Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (2005)
- [9] Janiszewski D., Bezczipnikowy napęd z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych oparty na bezśladowym filtrze Kalmana, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 86 (2010), 169-174
- [10] Spagnol P., Alli G., Spelta C., Lasanti P., Todeschini F., Savaresi S. M., Morelli A., A full hybrid electric bike: How to increase human efficiency, *American Control Conference* (2012), 2761-2766
- [11] Pang-Chia Chen, Huan-Yu Lin, Shue-Bin Chang, Yu-Che Huang, The torque control of human power assisted electric bikes, *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)* (2010), 373-378
- [12] Bielak C., Nowopolski K., Wicher B., Static and Dynamic Ergonomic Corrects of Torque Controlled in Bicycle Ergometer, *18<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics* (2013)

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Krzysztof Zawirski, E-mail: [krzysztof.zawirski@put.poznan.pl](mailto:krzysztof.zawirski@put.poznan.pl), dr inż. Dariusz Janiszewski, E-mail: [dariusz.janiszewski@put.poznan.pl](mailto:dariusz.janiszewski@put.poznan.pl), mgr inż. Bogdan Fabiański, E-mail: [bogdan.fabiański@put.poznan.pl](mailto:bogdan.fabiański@put.poznan.pl), mgr inż. Krzysztof Siembab, E-mail: [krzysztof.siembab@put.poznan.pl](mailto:krzysztof.siembab@put.poznan.pl), mgr inż. Krzysztof Nowopolski, E-mail: [krzysztof.nowopolski@put.poznan.pl](mailto:krzysztof.nowopolski@put.poznan.pl), mgr inż. Bartłomiej Wicher, E-mail: [bartlomiej.wicher@put.poznan.pl](mailto:bartlomiej.wicher@put.poznan.pl), Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Cezary Bielak, E-mail: [cbielak@agregatypolska.pl](mailto:cbielak@agregatypolska.pl) Agregaty Polska, ul. Obornicka 258A, 60-650 Poznań