

**Stefan Brock, Bogdan Fabiański, Bartłomiej Wicher**  
**Politechnika Poznańska, Poznań**  
**Krzysztof Zawirski**  
**Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Pile, Instytut Politechniczny**

## **KONSTRUKCJA I STEROWANIE TRÓJKOŁOWEGO ROWERU ELEKTRYCZNEGO BEZ PRZEKŁADNI MECHANICZNEJ**

### **CONSTRUCTION AND CONTROL OF AN ELECTRICAL TRICYCLE WITHOUT MECHANICAL COUPLING**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono konstrukcję prototypu oryginalnego trójkołowego pojazdu napędzanego pedałami ze wspomaganiami elektrycznym, bez sprzężenia mechanicznego korby pedałów z kołami. Każde z kół pojazdu jest napędzane przez bezszczotkowy silnik elektryczny (BLDC). Pedały napędzają generator, który ładuje baterię akumulatorów. Zaprojektowany został układ dystrybucji energii, zapewniający bezpieczne zachowanie się napędów pojazdu w warunkach awaryjnych. Zaprojektowane i zbudowane zostały centralny układ sterowania oraz dedykowane przekształtniki energoelektroniczne, a całość komunikacji odbywa się z wykorzystaniem protokołu CAN-open. Jako jednostkę sterującą zastosowano układ STM32F407, który pełni rolę sterownika we wszystkich podsystemach pojazdu. Prędkość pojazdu jest proporcjonalna, z nastawianym współczynnikiem, do prędkości pedałowania, natomiast moc dostarczana do silników poszczególnych kół jest odpowiednio większa od mocy generowanej przez rowerzystę. Dużą uwagę zwrócono na ergonomiczne właściwości układu napędowego, dopasowując charakterystykę momentu oporowego generatora do naturalnej charakterystyki pedałowania. W ten sposób układ napędowy zachowuje się analogicznie do klasycznego roweru mechanicznego.

**Abstract:** The paper presents the construction of a prototype of an original three-wheeled electrically powered vehicle. The vehicle is driven by pedals without mechanical coupling of the crank handle with the wheels. Each of the vehicles wheels is driven by a brushless electric motor (BLDC). The pedals drive a generator that charges the battery. The power distribution system has been designed to ensure the safe behaviour of the vehicle's drives under emergency conditions. The central control system and dedicated power electronic converters have been designed and built, and all communication is performed using the CAN-open protocol. STM32F407 is used as the control unit for all subsystems. The speed of the vehicle is proportional to the pedalling speed, with a variable factor, and the power supplied to the motors of the individual wheels is correspondingly higher than the cycling power. Considerable attention was paid to the ergonomic characteristics of the drive unit, adjusting the torque characteristics of the generator to the natural characteristics of the pedal system. In this way, the drive system behaves similarly to a classic mechanical bike.

**Słowa kluczowe:** *rower elektryczny, napęd BLDC, magistrala CAN, pedałowanie*  
**Keywords:** *electric bicycle, BLDC drive, CAN bus, pedal*

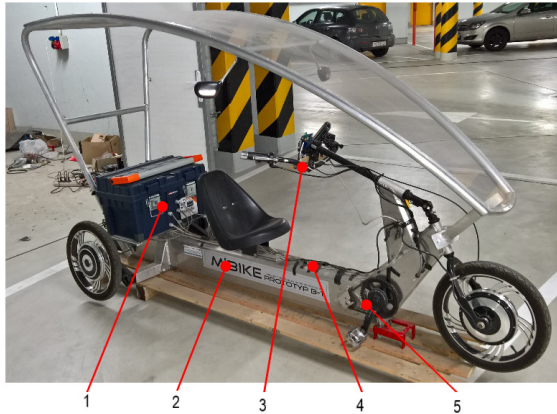
### **1. Wstęp**

Tematem prezentowanej pracy jest nowa koncepcja pojazdu elektrycznego, odpowiadająca przepisom „Prawa o ruchu drogowym”. Zgodnie z definicją kodeksową rower może być wyposażony w uruchamiany naciskiem na pedały pomocniczy napęd elektryczny zasilany prądem o napięciu nie wyższym niż 48 V, o znamionowej mocy ciągłej nie większej niż 250 W, którego moc wyjściowa zmniejsza się stopniowo i spada do zera po przekroczeniu prędkości 25 km/h. Kierując się tymi ograniczeniami opracowano koncepcję i skonstruowano prototyp trójkołowego pojazdu napędzanego peda-

łami ze wspomaganiami elektrycznym [1, 2]. Określono następujące cele projektu:

- stworzenie ekologicznego, trzykołowego pojazdu do poruszania się po mieście zgodnie 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.

Rower wyposażono w trzy silniki BLDC, stanowiące indywidualny napęd trzech kół, nato-



Rys. 1. Prototyp roweru na stanowisku badawczym: 1 – układy energoelektroniczne i sterujące, 2 – umiejscowienie baterii zasilających, 3 – panel sterowania i dźwignia hamulca odzyskowego, 4 – wiązka przewodów zasilania i sterowania, 5 – pedały sprzęgnięte z generatorem BLDC.

miast za pomocą pedałów napędzana jest prądnica doładowująca baterię akumulatorów (rys. 1). 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. Układy sterowania napędów kół oraz układ generatora z modułem centralnego sterowania połączone są za pomocą sieci komunikacyjnej CAN. W pracy przedstawiono

zagadnienia konstrukcji i sterowania układów energoelektronicznych roweru,

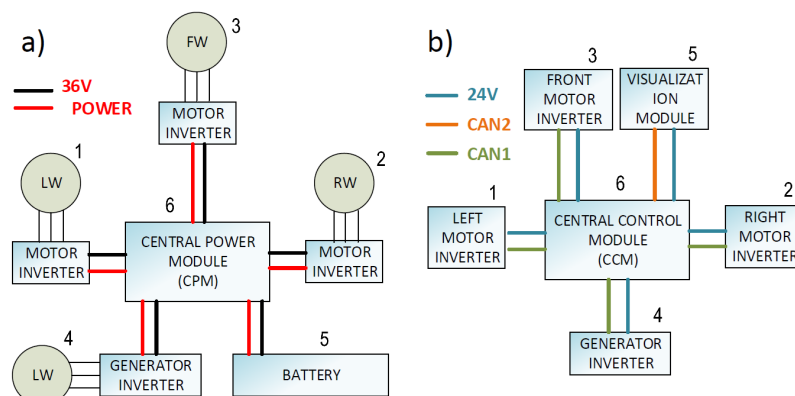
## 2. Struktura układu zasilania i sterowania

### 2.1. Układ zasilania

Na rysunku 2a przedstawiona została struktura zasilania roweru, w skład której wchodzi: napędy poszczególnych kół (1, 2, 3), generator napędzany pedałami (4), bateria akumulatorów (5), jednostka nadrzędna oraz zarządzania mocą CPM (6), oraz nie pokazany na rysunku blok ładowarki akumulatorów [3]. Odpowiednia konfiguracja linii zasilających umożliwia monitorowanie napięcia i prądu całkowitego akumulatorów w punkcie rozgałęzienia oraz niezależne przyłączanie bloków do sieci pokładowej za pomocą styczników półprzewodnikowych SSR. Dodatkowo zastosowano przekaźnik elektromagnetyczny, z obwodem cewki przerywanym przez wyłącznik awaryjny. Przewidziano także wytracanie energii na rezystancji zewnętrznej w trakcie awaryjnego hamowania dynamicznego.

### 2.2. Układ sterowania

Schemat z rysunku 2b przedstawia strukturę układu sterowania pojazdu. Sterownik centralny CCM (6) stanowi jednostkę master sieci CAN1 (główniej sieci systemu napędowego) oraz CAN2 (wydzielonej sieci dla celów integracji z elementami wizualizacji i sterowania). Dzięki zastosowanej izolacji sieci komunikacyjnej systemu napędowego (CAN1) wyeliminowano możliwość zakłócenia jej pracy przez układy energoelektroniczne. W warstwie aplikacji



Rys. 2. Schemat blokowy układu napędowego (a) i układu sterowania (b). Układ napędowy: 1, 2, 3 – napędy odpowiednio tylnego lewego, tylnego prawego i przedniego koła, 4 – prądnica napędzana pedałami, 5 – bateria akumulatorów, 6 – układ zarządzania energią. Układ sterowania: 1, 2, 3 – przekształtniki napędów kół, 4 – przekształtnik generatora, 5 – panel wizualizacji i sterowania, 6 – blok centralny

zdecydowano się na implementację protokołu CAN-open, często wykorzystywanego w pojazdach. Dopasowanie do specyfikacji CAN-open pozwala na wykorzystanie gotowych mechanizmów w tym: logiki zarządzania stanem węzłów sieci, detekcji błędów oraz kontroli spójności sieci. Mając na względzie bezawaryjną pracę układów przyjęto separację galwaniczną całego systemu mikro-procesorowego od części silnoprdowej.

System magistrali CAN2 łączy sterownik centralny z panelem wizualizacji. Na panelu tym wyświetlane są wszystkie istotne informacje dotyczące parametrów jazdy roweru i stanu pracy układu napędowego. Za pomocą panelu zadawać można także parametry określające wspomaganie pedałowania.

Jako jednostkę sterującą zastosowano nowoczesny układ STM32F407, który pełni rolę sterownika we wszystkich podsystemach pojazdu.

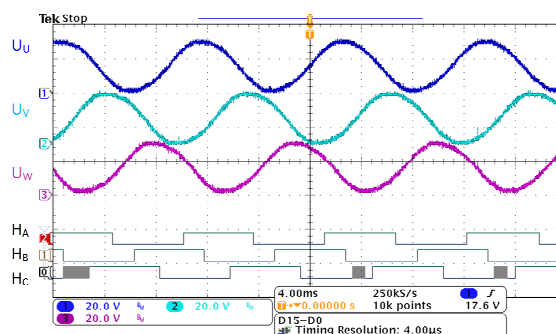
### 2.3. Zabezpieczenia układu napędowego

Przyjęta 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 przekładnika elektromagnetycznego z wyłącznikiem awaryjnym. 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 kół, prądnicy, ładowarki, rezystora mocy do akumulatora) w zależności od stanu pojazdu (np. niedopuszczalny jest ruch pojazdu podczas ładowania stacjonarnego). Poza głównym przekładnikiem elektromagnetycznym układ sterowania steruje stycznikami półprzewodnikowymi SSR. Wyłączenie awaryjne poprzez sprzętowy układ logiczny, niezależny od systemu mikroprocesorowego, powoduje załączenie rezystora w obwód zasilania napędów umożliwiając tym samym wspomaganie hamulca mechanicznego.

## 3. Moduły napędów kół

Każde z trzech kół napędzane jest wielobiegunowym bezszczotkowym silnikiem prądu stałego BLDC, którego konstrukcja (zamontowanie w piaście kół ze szprychami) przewidziana

jest do napędu pomocniczego rowerów. Niska prędkość obrotowa tych silników pozwala na



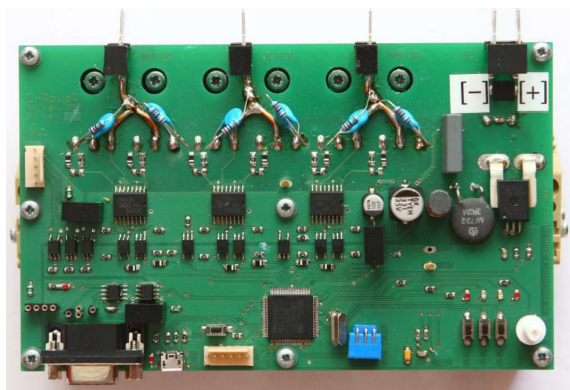
Rys. 3. Przebieg SEM silników i sygnały z czujników położenia.

napęd kół bez dodatkowej przekładni mechanicznej. Moc znamionowa każdego z silników, wynosząca około 1 kW, jest wystarczająca do zapewnienia ruchu pojazdu wraz kompletem akumulatorów i pasażerem lub pasażerami z zachowaniem zadowalających właściwości dynamicznych. W wersji prototypowej zainstalowana moc silników przekracza wymagania kodeksowe, przewidziane jest jednak ograniczenie dostępnej mocy na drodze programowej.

Podczas prowadzonych badań stwierdzono, że indukcyjność uzwojeń stojana jest bardzo mała, rzędu 50  $\mu\text{H}$ . Tak mała wartość indukcyjności sprawia, że nawet przy dużych częstotliwościach nośnych modulacji PWM ( $f_c = 20 \text{ kHz}$ ) prąd uzwojeń stojana ma charakter przerywany. Wymusiło to zastosowanie dedykowanych filtrów analogowych i cyfrowych w torze pomiaru prądu.

W trakcie prowadzonych badań stwierdzono, że kształt przebiegu siły elektromotorycznej stojana jest bliższy kształtowi sinusoidalnemu aniżeli trapezoidalnemu, co ilustruje rysunek 3.

W tej sytuacji zdecydowano, aby zaimplementować w przekształtniku sterowanie sinusoidalne. Idea sterowania z wymuszeniem trójfazowego napięcia sinusoidalnego polega na takim kształtowaniu sygnałów napięć fazowych, aby rzeczywiste napięcia międzyfazowe miały kształt sinusoidy. Sterowanie napięciem sinusoidalnym z powodzeniem przetestowano w całym zakresie zmian prędkości. Główną zaletą tego sposobu sterowania jest wygładzenie nierównomierności wytwarzanego momentu elektromagnetycznego, występujących w ramach jednego obrotu wału silnika. Sterowanie to posiada ponadto inną ważną zaletę, polegającą na znaczącej redukcji poziomu hałasu napędu względem klasycznego sterowania sil-



Rys. 4. Prototypowy przekształtnik do zasilania silników BLDC

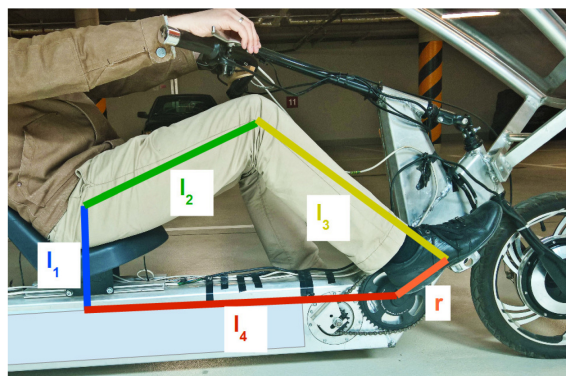
nika BLDC, który ujawnia się zwłaszcza podczas forsowania momentu, czy pracy z małą prędkością.

W trakcie prac opracowano własną konstrukcję przekształtnika energoelektronicznego, przedstawioną na rysunku 4. W projekcie wykorzystano tranzystory typu MOSFET IRFP4310Z, o prądzie nominalnym 120 A i dopuszczalnym napięciu dren-źródło 100 V. Zaprojektowano obwody bramkowe tranzystorów mocy, zachowując izolację galwaniczną z układem sterowania. Układ sterowania przekształtnika obsługuje komunikację w standardzie CAN, z możliwością swobodnego wybierania adresów lokalnych węzłów. Zaprojektowano węzły sieci CAN w ten sposób, aby możliwe było zarówno wysyłanie datagramów do poszczególnych napędów, jak i sygnałów alarmowych, w tym hamowania, do wszystkich węzłów jednocześnie.

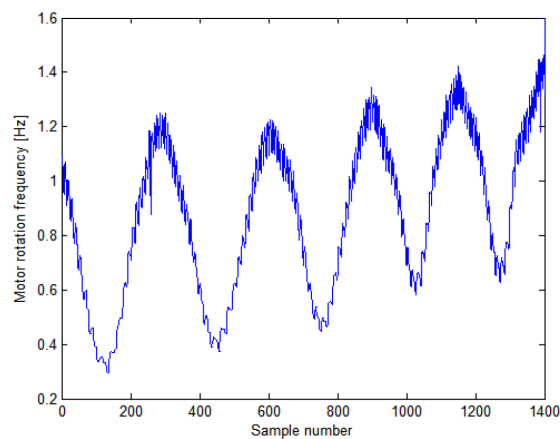
#### 4. Moduł generatora z odwzorowaniem charakterystyki pedalowania.

##### 4.1. Ergonomiczne kształtowanie charakterystyki momentu obciążenia w trakcie pedalowania.

Podczas testów układu generatorowego pojawiła się bardzo istotna kwestia utrzymania płynności pedalowania [4-7]. Szczególnie dla większych momentów obciążenia dawała o sobie znać nierównomierność siły mięśni nóg rowerzysty w funkcji kąta obrotu korb pedałów. W położeniach równoległych do płaszczyzny wyznaczonej przez golenie rowerzysty ( $I_3$  na rys. 5) wytwarzany moment obrotowy minimalny. W efekcie kadencja pedalowania (często tliwość obrotów korby) charakteryzowała się



Rys. 5. Analiza biomechaniczna procesu pedalowania



Rys. 6. Zmienność kadencji pedalowania w funkcji czasu dla układu bez korekcji.

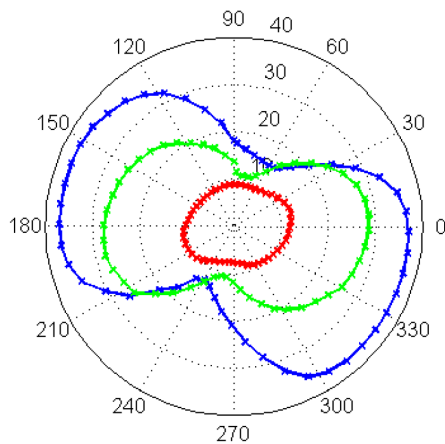
bardzo dużą zmiennością, co było bardzo nieprzyjemne dla rowerzysty (efekt szarpanego pedalowania). Przykładowe wyniki testów przedstawia rysunek 6.

Rozważania teoretyczne, zweryfikowane następnie na stanowisku badawczym, pozwoliły na określenie rodziny charakterystyk pedalowania, jak to przedstawiono na rysunku 7. Korekcja momentu oporowego w funkcji kąta położenia korby pozwoliła na zredukowanie zmienności kadencji (rys. 8) i uzyskanie wrażenia porównywalnego do roweru mechanicznego.

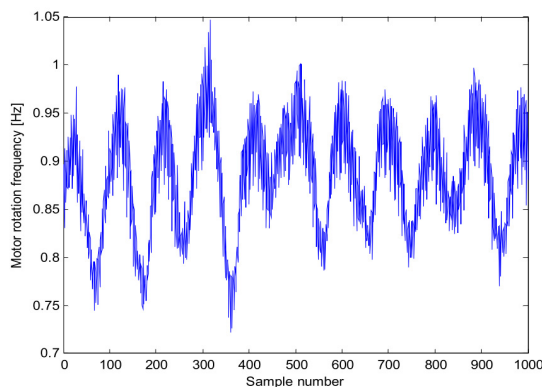
##### 4.2. Zadawanie parametrów ruchu na podstawie prędkości pedalowania

W toku prac analizowano różne warianty układów sterowania [3, 5, 8], których ogólny schemat blokowy przedstawia rysunek 9. Prędkość pedalowania ( $\omega_p$ ) jest skalowana współczynnikiem  $k_{\omega/u}$  zależnym od aktualnego przełożenia





Rys. 7. Charakterystyki momentu na korbie pedałów w funkcji położenia kąowego korby. Linie czerwona, zielona, niebieska – odpowiednio obciążenie małe, średnie i duże.



Rys. 8. Zmienność kadencji pedalowania w funkcji czasu dla układu z korekcją.

elektronicznego dając w efekcie wartość napięcia zadanego ( $U_{SP}$ ) na trzy napędy. Wartość napięcia silników jest ograniczana w układzie regulacji prądu maksymalnego (regulator prądu aktywuje się wyłącznie po przekroczeniu wartości maksymalnej  $i_{MAX}$ ). Sygnały trzech momentów elektromagnetycznych ( $T_{PVx}$ ) generowanych w napędach są wymuszeniami dla przyjętego modelu części mechanicznej pojazdu (VM). Czwartym sygnałem wejściowym jest kąt skręcenia kierownicy, którego nie uwzględniono na schemacie. Dla uzyskania realistycznych wrażeń dla rowerzysty zmierzone wartości prądów napędów ( $i_{PVx}$ ) przesyłane są do sterownika centralnego, który ich sumę skaluje współczynnikiem  $k_i$  (zależnym od aktualnie wybranego przełożenia) i koryguje zgodnie z charakterystyką pedalowania. Wynikiem jest wartość zadana prądu prądnicy ( $i_{SPG}$ ).

Wykorzystanie informacji o kącie skręcenia kierownicy umożliwiło implementację elektro-

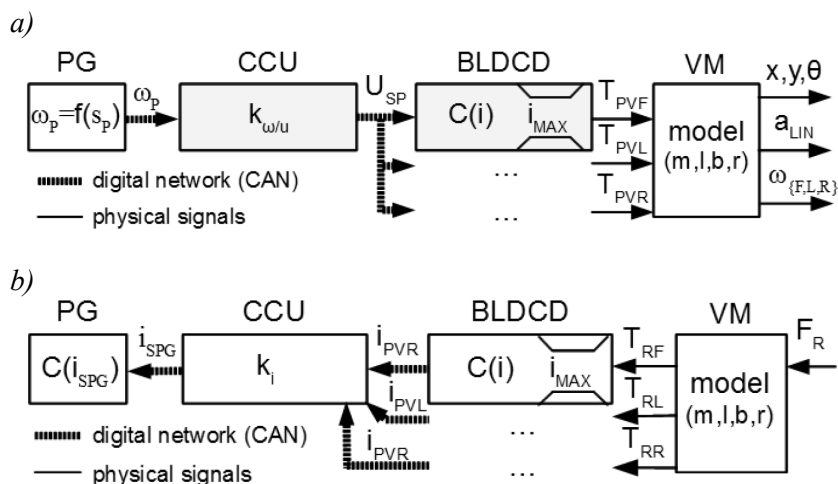
nicznego układu różnicowego kół tylnych. W takim wariancie sterowania prędkość pedalowania odpowiada uzyskiwanej prędkości liniowej pojazdu.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania i prace konstrukcyjne posłużyły do zbudowania oryginalnego pojazdu o interesujących właściwościach. Zespół konstruktorów zdobył w trakcie realizacji projektu doświadczenie w zakresie konstrukcji energoelektronicznych, modułowych układów sterowania z komunikacją CAN, a także zagadnień modelowania interfejsu pojazd – rowerzysta. Uzyskany prototyp działa niezawodnie i może być podstawą wdrożenia przemysłowego.

## 6. Literatura

- [1]. Fabianski B., Wicher B.: Control algorithms in distributed system of three wheeled electric vehicle, Mechatronics - Mechatronika (ME), 16th International Conference on, CD-ROM ISBN: 978-80-214-4817-9, e-ISBN: 978-80-214-4816-2, DOI: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018233, 2014.
- [2]. Zawirski K., Nowopolski K., Wicher B., Janiszewski D., Fabianski B., Siembab K.: Gearless Pedaling Electric Driven Tricycle, Lect. Notes Electrical Eng., Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems, vol. 324, ch. 34, Springer, ISBN 978-3-319-11247-3, 2014.
- [3]. Fabianski B., Wicher B.: Dynamic model and analysis of distributed control system algorithms of three wheel vehicle, Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 19th International Conference on, p.70-75, DOI: 10.1109/MMAR.2014.6957327, Miedzyzdroje, 2014.
- [4]. Bielak C., Nowopolski K., Wicher B.: Static and Dynamic Ergonomic Corrects of Torque Controlled in Bicycle Ergometer, Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 18th Conference on, p.161-165, ISBN 978-1-4673-5508-7, DOI: 10.1109/MMAR.2013.6669899, Miedzyzdroje, 2013
- [5]. Fabianski B., Wicher B.: Model and analysis of pedals ergonomic load torque angular distribution in the pedaling-by-wire system, Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 21st International Conference on, p.1164-1169, Miedzyzdroje, DOI: 10.1109/MMAR.2016.7575303, 2016.
- [6]. Spagnol P., Corno M., Savaresi S. M.: Pedaling Torque Reconstruction for Half Pedaling Sensor, European Control Conference (ECC), p.275-280, Zürich, 2013.
- [7]. Sankaranarayanan V., Sowmya R.: Torque sensorless control of a human-electric hybrid bicycle, 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), College of Engineering Pune, India. May 28-30, 2015



Rys. 9. Schemat blokowy zadawania prędkości (a) i generowania momentu oporowego (b)

[8]. Corno M., Berretta D., Savaresi S.M. Human Machine Interfacing Issues in SeNZA, a Series Hybrid Electric Bicycle, 2015 American Control Conference, Palmer House Hilton, July 1-3, 2015. Chicago, IL, USA.

#### Autorzy

Stefan Brock, Bogdan Fabiański, Bartłomiej Wicher: Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Krzysztof Zawirski: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Pile, Instytut Politechniczny ul. Podchorążych 10, 64-920 Piła

#### Informacje dodatkowe

Praca była finansowana w ramach projektu PARP: *Opracowanie koncepcji i konstrukcji oraz przeprowadzanie badań przemysłowych układów zasilających i sterujących zespołem napędowym wielośladowego pojazdu multimedialnego wspomaganego ekologicznym zasilaniem elektrycznym* (Politechnika Poznańska, temat nr 45-098/12 JG), a także w ramach programu badań (Politechnika Poznańska temat nr 04/45/DSPB/0162).