

Piotr FALKOWSKI, Marek KORZENIEWSKIPOLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH,
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok**Elektryczny Pojazd Balansujący - realizacja praktyczna****Mgr inż. Piotr FALKOWSKI**

W 2012 roku ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie. Obszar zainteresowań naukowych to zagadnienia związane z predykcyjnymi metodami regulacji przekształtnika AC/DC/AC zasilającego silnik indukcyjny, wykorzystanie techniki cyfrowej w energoelektronice i napędzie elektrycznym.



e-mail: p.falkowski@doktoranci.pb.edu.pl

Dr inż. Marek KORZENIEWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej. Od 2010 roku zatrudniony w Katedrze Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych na stanowisku adiunkta. Zainteresowania naukowe obejmują zastosowania techniki cyfrowej (CPLD, FPGA, DSP) w układach sterowania przekształtnikami energoelektrycznymi oraz nieliniowe metody bezpośredniego sterowania momentem i strumieniem silników indukcyjnych (DTFC).



e-mail: m.korzeniewski@pb.edu.pl

Streszczenie

W artykule opisano zasadę działania oraz budowę Elektrycznego Pojazdu Balansującego. Zbudowany pojazd został skonstruowany przez studentów Koła Naukowego Techniki Mikroprocesorowej w Energoelektronice, którzy zostali zainspirowani seryjnie produkowanym pojazdem. W artykule omówiony został zaprojektowany i wykonany układ sterujący, którego głównymi elementami są czujniki MEMS. Przedstawiono w nim opracowany algorytm sterujący pracą silników elektrycznych odpowiedzialnych za poruszanie się pojazdu i utrzymywanie pozycji pionowej.

Słowa kluczowe: Segway, MEMS, ARM, Pojazd Elektryczny, LabVIEW.**Balancing Electric Vehicle - practical implementation****Abstract**

This paper presents the Electric Balancing Vehicle, which has been designed based on the standard Personal Transporter produced by Segway®. This vehicle is unstable, because of the fact that its centre of gravity is above the axis of rotation, which causes the effect of an inverted pendulum (Fig. 1). In order to hold the vehicle in a vertical position (Y axis in Fig. 1a), it is necessary to provide the continuous, active regulation by proper control of a torque to the wheels. Fig. 2 shows the block diagram of the control system, where control of the inclination angle is the primary control loop. The method of determining the angle of the platform is shown in Fig. 5. The main part of the vehicle control system (Figs. 3 and 4) is a 32-bit Micro-controller STM32F103 from STMicroelectronics. Its main tasks are: collecting data from voltage and current MEMS sensors, executing the control algorithm (Fig. 2) and controlling the electric motors. The wheel drive uses two DC brushed motors with permanent magnets (each of 750W power), controlled by DC/DC converters (Fig. 6) with the option of returning the energy to batteries during a braking process. The data such as angle and motor currents are sent through a Bluetooth module to a PC and displayed in LabVIEW (Fig. 9).

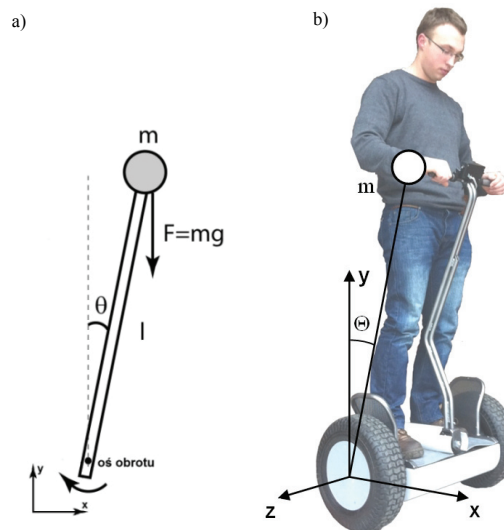
Keywords: Segway, MEMS, ARM, Electric Vehicle, LabVIEW.**1. Wstęp**

Inspiracją do budowy Elektrycznego Pojazdu Balansującego EPB był seryjnie produkowany Segway Human Transporter. Omawiany pojazd został zbudowany przez studentów Koła Naukowego Techniki Mikroprocesorowej w Energoelektronice [1] działającego pod opieką dr inż. Marka Korzeniewskiego. Głównym założeniem studentów było stworzenie pojazdu całkowicie samodzielnie, ograniczając do minimum ilość gotowych podzespołów. Prace podzielono na trzy główne zagadnienia: konstrukcję mechaniczną, układy energoelektryczne i elektroniczne oraz programowanie. Budowę pojazdu zakończono w marcu 2012r.

2. Zasada działania pojazdu

Największym wyzwaniem projektu było opracowanie sposobu poruszania się pojazdu bazującego na idei odwróconego wahadła.

Jest to układ niestabilny ponieważ jego środek ciężkości znajduje się powyżej osi obrotu (rys.1). W celu utrzymania go w pozycji pionowej (oś y na rys. 1a) konieczna jest więc ciągła, aktywna regulacja poprzez odpowiednią kontrolę momentu obrotowego na kołach co przekłada się na przemieszczanie osi obrotu wzdłuż osi x układu współrzędnych. Omawiany pojazd można traktować jako odwrócone wahadło, w którym koła jezdne umieszczone są na wspólnej osi, stanowiącej jednocześnie oś obrotu wahadła (oś z na rys. 1b).



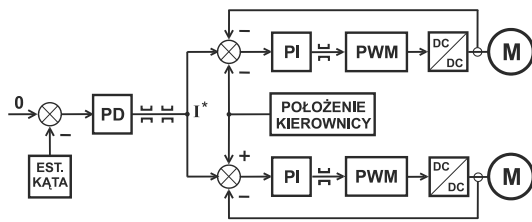
Rys. 1. Schemat odwróconego wahadła, m – masa, g – przyspieszenie grawitacyjne, F – siła działająca na masę m , θ – wychylenie od pozycji pionowej; l – długość ramienia (a), Schemat przemieszczania środka ciężkości o kąt θ od osi y układu odniesienia (b)

Fig. 1. Scheme of inverted pendulum, m - mass, g - gravitational acceleration, F - force acting on the mass m , θ - deflection from the vertical position, l - length of the arm (a) Schematic of the center of gravity movement at the angle θ from the y -axis reference system (b)

Ułożyskowane koła są na stałe sprzęgnięte z silnikami elektrycznymi przytwierdzonymi do platformy jezdnej. Układ napędowy tego typu umożliwia ciągłe przekazywanie momentu obrotowego na koła dążąc do uzyskania kąta wychylenia $\theta=0^\circ$.

Nadrzędną pętlą regulacji jest regulacja kąta wychylenia (rys. 2), którego wartość zadana wynosi 0. Wychylenie środka ciężkości od położenia pionowego powoduje wychylenie platformy jezdnej o kąt różny od zera w wyniku czego na wyjściu regulatora PD pojawia się sygnał prądu zadanego I^* . Znak prądu zadanego oraz jego wartość uzależniona jest od kierunku i stopnia wychylenia się platformy jezdnej ($\theta < 0^\circ$ lub $\theta > 0^\circ$) powodując regulację prądu w silnikach przekazując tym samym odpowiedni moment napędowy na koła. Sygnał zadany prądu pochodzący z regulatora PD podawany jest dwóm ograniczeniom. Nastawy

pierwszego ograniczenia wynikają z dopuszczalnego maksymalnego prądu silników ($\pm 28A$), nastawy drugiego ograniczenia ($\pm 8A$) aktywne są jedynie w przypadku braku pasażera obsługującego pojazd i zostały zastosowane głównie do łagodnego sprowadzenia platformy jezdnej do położenia startowego (np. po włączeniu pojazdu) i przygotowania do jazdy.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania Elektrycznego Pojazdu Balansującego

Fig. 2. Block diagram of the control system of the Electric Balancing Vehicle

W zależności od wychylenia kierownicy możliwa jest dodatkowa zmiana wartości prądów zadanych kształtowanych w silnikach DC. Zmiana położenia kierownicy (odchylenie w lewo lub w prawo) powoduje proporcjonalnie zwiększenie wartości prądu zadanego w jednym silniku oraz jednocześnie zmniejszenie wartości prądu zadanego w drugim silniku. Niezależna regulacja prądów obu silników umożliwia skręcanie pojazdu dzięki różnicy momentów obrotowych kół. Ze względu na zdolność kół pojazdu do obrotów w przeciwnych kierunkach, pojazd może wykonać obrót w jednym miejscu (promień skrętu: 0 m).

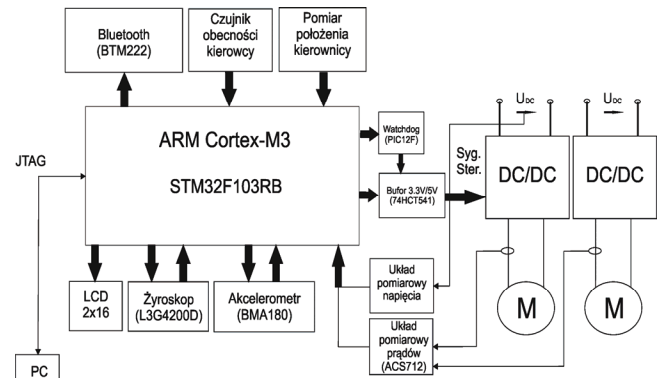
Uchyby regulacji prądów silników trafiają na regulatory typu PI, których sygnały wyjściowe podawane są na modulatory PWM umożliwiając tym samym regulację prądu za pomocą przetworników DC/DC. Regulacja prądów w silnikach realizowana jest metodą sterowania „w przeciw-fazie”. Oznacza to, że w przypadku gdy zadana wartość prądu kształtowanego w silniku wynosi 0, napięcie na zaciskach silnika zmienia się na przeciwne z współczynnikiem wypełnienia 50% w wyniku czego średnia wartość napięcia w okresie modulacji wynosi 0.

3. Układ sterowania

Bazując na idei opisanej powyżej opracowano układ sterowania analizujący wychylenie środka ciężkości od pozycji pionowej i odpowiednie sterowanie silnikami napędowymi w celu minimalizowania wychylenia. Głównym elementem układu sterowania jest 32-bitowy mikrokontroler STM32F103RBT6 z rdzeniem ARM Cortex-M3. Jednostka ta jest taktowana zegarem o częstotliwości 72MHz i wyposażona jest między innymi w 128kB Flash, 20kB pamięci SRAM, dwa 12-bitowe przetworniki ADC, cztery timery w tym z możliwością generowania trójfazowych przebiegów PWM z czasami martwymi oraz porty komunikacyjne (I2C, SPI, USART). Powyższe peryferia wykorzystano do budowy systemu sterowania omawianego pojazdu, który przedstawiono na rysunku 3. Płyta główna układu sterowania składa się z mikrokontrolera sterującego, zewnętrznego watchdoga kontrolującego sygnały sterujące przetwornikami DC/DC, interfejsów pomiarowych napięcia i dwóch prądów, złącz do których podłączane zostały układy zewnętrzne takie jak:

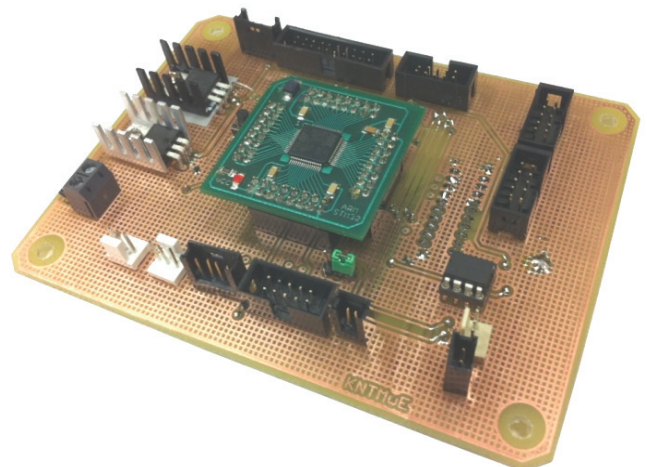
- czujniki położenia tj. akcelerometr i żyroskop,
- układ komunikacji Bluetooth,
- wyświetlacz LCD,
- dwa czujniki pomiarowe prądu,
- czujnik obecności kierownicy,
- czujnik położenia kierownicy,
- złącze JTAG.

Mikrokontroler na podstawie informacji z czujników, realizuje w przerwach algorytm sterowania pracą silników elektrycznych oraz dodatkowo (w czasie wolnym od przerw) komunikuje się z otoczeniem przez moduł Bluetooth, i wyświetlacz LCD.



Rys. 3. Układ sterowania pojazdem
Fig. 3. Vehicle control system

Na rysunku 4 przedstawiono wykonaną płytę główną, w raz z adapterem na którym umieszczono mikrokontroler. Do obliczania kąta θ wykorzystano dane pochodzące z dwóch cyfrowych czujników typu MEMS (Micro Electro - Mechanical Systems): akcelerometru i żyroskopu. Czujniki zamontowano na stałe z platformą jezdnią i połączono przewodami do układu sterowania znajdującego się pod podestem.

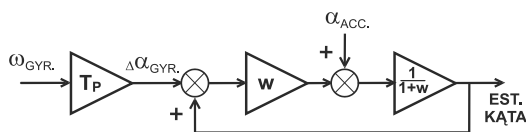


Rys. 4. Płyta główna z mikrokontrolerem
Fig. 4. Motherboard with a microcontroller

Akcelerometr BMA180 firmy Bosch mierzy siły działające na czujnik w trzech osiach. Dane te trafiają do układu mikroprocesorowego i za pomocą zależności trygonometrycznych wyliczany jest kąt wychylenia osi pionowej akcelerometru od wektora siły przyciągania ziemskiego (w płaszczyźnie x-y jak na rys. 1). Czujnik przyspieszenia jest bardzo wrażliwy na udary mechaniczne, dlatego nie jest jedynym źródłem informacji o kącie wychylenia. Przeprowadzone symulacje przejazdów transportera po nierównościach dowiodły, że dane z akcelerometru bez dodatkowej „obróbki” były bezwartościowe.

Żyroskop L3G4200D firmy STmicroelectronics mierzy prędkość obrotową wokół trzech osi. Kąt wychylenia wyznaczany jest jako całka prędkości w jednej osi. Pomiar kąta tą metodą jest obarczony błędem wynikającym z dryftu. Dryft powoduje ciągłe powolne narastanie wartości prędkości niezależnie od rzeczywistej prędkości obrotowej.

Aby wypracować dokładną wartość kąta wychylenia pojazdu zestawiono dane z obu czujników [2, 3]. Ostateczna wartość kąta obliczana jest według algorytmu przedstawionego na rysunku 5.



Rys. 5. Sposób wyznaczania kąta estymowanego na podstawie prędkości kątowej z żyroskopu (ω_{GYR}) oraz kąta akcelerometru (α_{ACC}), T_p – okres próbkowania, $\Delta\alpha_{GYRO}$ – przyrost kąta wyznaczonego z żyroskopu, w – współczynnik wagi dla kąta z żyroskopu

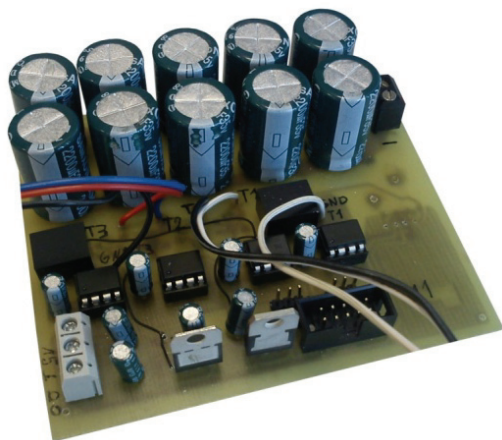
Fig. 5. Method for the estimated angle calculation on the basis of the angular velocity of the gyroscope (ω_{GYR}) and the angle of the accelerometer (α_{ACC}), T_p – sample time, $\Delta\alpha_{GYRO}$ – increase of the angle calculated from the gyro, w – weight factor for the angle of the gyro

4. Układ Napędowy

Do napędu kół zastosowano dwa silniki szczotkowe prądu stałego z magnesami trwałymi o mocy 750W. Główną przyczyną wyboru takiego rodzaju napędów była prostota sterowania oraz niska cena. Silniki sprzężone są z kołami poprzez przekładnię łańcuchową (przełożenie 7,8 : 1). Każdy z silników zasilany jest indywidualnie poprzez przetworniki tranzystorowe pracujące w układzie mostkowym. Niezależne sterowanie napędami pozwala zrealizować w prosty sposób skręcanie poprzez wymuszenie różnych prędkości obrotowych kół.

Pojazd zasilany jest z trzech żelowych akumulatorów o pojemności 14 Ah połączonych szeregowo dając napięcie 36V. Do zasilania części sterującej użyto impulsowej przetwornicy obniżającej napięcie typu LM2576.

Do budowy przetworników czterokwadrantowych [4] wykorzystano tranzystory IGBT. Każdy z nich kontrolowany jest poprzez oddzielny układ sterujący HCPL3120, zapewniający izolację galwaniczną pomiędzy mikrokontrolerem, a częścią silnopiędową pozwalając jednocześnie na szybkie załączenie/wyłączenie tranzystorów. Dodatkowy układ czasowy licznikowy typu „watchdog timer” wykonany na mikrokontrolerze PIC12F683 i buforze 74HCT541, umożliwia wyłączenie sygnałów PWM sterujących tranzystorami przetwornika w sytuacjach awaryjnych.



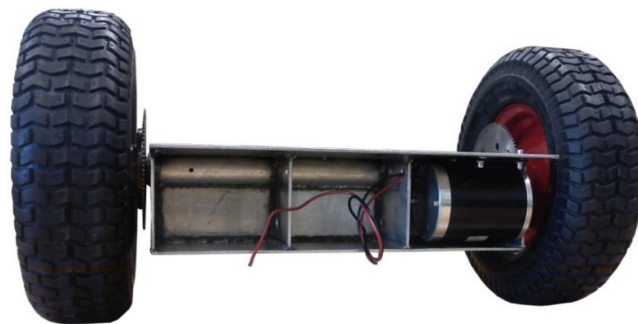
Rys. 6. Płytki przetworników wraz z kondensatorami, bez tranzystorów IGBT
Fig. 6. Board converters with capacitors, without IGBT transistors

W zastosowanej metodzie sterowania przetwornikami „prze-ciw-fazie” do generowania sygnałów sterujących z mikrokontrolera wykorzystano wbudowany blok modulatora PWM, umożliwia wypracowanie czasów martwych w sygnałach sterujących nie-

zbędnych do prawidłowej pracy przetworników. Do sterowania pracą silników opracowano dwie wersje układu sterowania. W pierwszej wersji (w układzie otwartym - bez czujników prądu) regulator położenia bezpośrednio zadaje wypełnienie. Jego zaletą jest prostota działania, wadą natomiast brak kontroli prądów oraz gorsza dynamika wynikająca z tego, że maksymalne wypełnienie musiało zostać ograniczone by nie przekroczyć dopuszczalnych wartości prądów w silnikach. W drugiej wersji regulator położenia zadaje wartość prądu dla dwóch oddzielnych regulatorów (dla każdego silnika). Do jego pomiaru wykorzystano czujniki ACS712 firmy Allegro z izolacją galwaniczną, działające na podstawie efektu Halla. Zaletą tej metody jest pełna kontrola prądu (oraz momentu elektromagnetycznego), co zabezpiecza układy półprzewodnikowe przed uszkodzeniem oraz zwiększa dynamikę (w porównaniu do układu otwartego z ograniczeniem wypełnienia PWM tj. napięcia), i eliminuje zależność dynamiki pojazdu od stanu naładowania akumulatorów.

5. Konstrukcja mechaniczna

Konstrukcja mechaniczna miała stanowić kompromis pomiędzy maksymalną sztywnością podwozia i niewielką masą. Z tego względu przestrzenna rama została w całości wykonana ze spawanych blach aluminiowych o grubości 4 mm. Konstrukcja podwozia została podzielona na przegrody umożliwiające łatwy montaż akumulatorów, silników elektrycznych oraz płytek przetworników energoelektronicznych.



Rys. 7. Aluminiowa rama pojazdu
Fig. 7. The aluminum frame of the vehicle

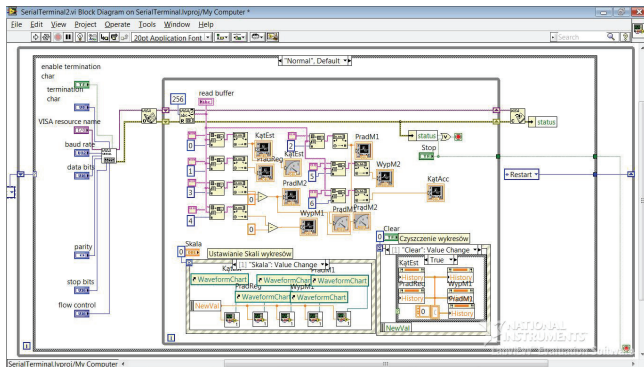
Podstawowym elementem ramy jest aluminiowa rura $\varnothing 40$ umieszczona tuż pod pomostem nośnym pojazdu. Tego typu konstrukcja umożliwiła maksymalne obniżenie środka ciężkości pojazdu. Oś kół wykonano z tocznego pręta stalowego. Stalowe koła firmy BICO zostały przerobione na potrzeby projektu, wyposażono je w łożyska toczne kulowe 6201 oraz 6205. Koła zębate zostały połączone z piastami kół jezdnych za pomocą tarczy zabierakowej. Do przekazania momentu użyto przekładni łańcuchowej. Kierownica pojazdu została w całości wykonana ze spawanych rur aluminiowych. Przytwierdzono ją do podestu za pomocą dwóch łożysk kulkowych osadzonych w oprawkach wykonanych z tworzywa sztucznego. W osi obrotu kierownicy umieszczono gumowy element tłumiący, umożliwiający swobodny powrót kierownicy do pozycji wyjściowej. Konstrukcja mocowania kierownicy zapewnia stabilne oparcie dla kierowcy podczas jazdy.

6. Faza testów

Złożoność projektu wymusiła opracowanie bezprzewodowej metody zbierania informacji diagnostycznych. Członkowie koła naukowego wcześniej nie pracowali z czujnikami typu MEMS, dlatego konieczna była ciągła analiza danych wysyłanych z sensorów. Praca czujników wychylenia pojazdu ma kluczowy wpływ na działanie układu napędowego, a tym samym na bezpieczeństwo kierowcy. Dodatkowo istotna była analiza prądów w układzie silnopiędowym.

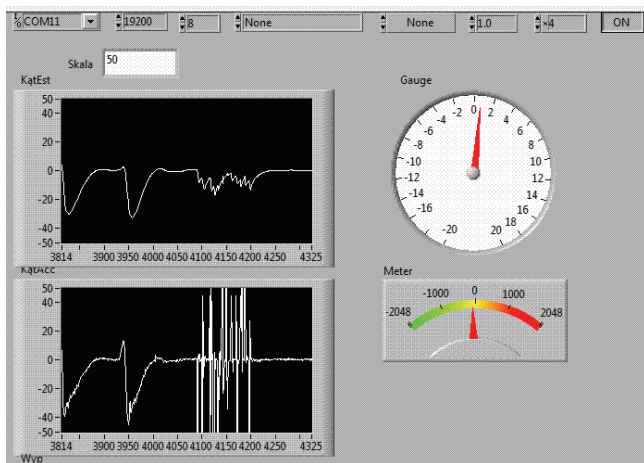
Jednym z założeń projektu była pełna mobilność transportera, podczas pomiarów diagnostycznych dlatego do przesyłu danych wybrano standard Bluetooth i układ BTM222 komunikujący się z mikrokontrolerem przez port RS232. Dzięki temu rozwiązaniu możliwy jest przesył danych między pojazdem, a stacją roboczą do 10 m (z możliwością zwiększenia zasięgu do 100m).

Zbieranie i wizualizacja danych umożliwiło oprogramowanie LabVIEW firmy National Instruments. Stworzono w nim aplikację (rys. 8), która wyświetla zmienne używane w procesie sterowania, tj.: kąt estymowany, dane z czujników MEMS, prądy obydwu silników. Przykładowe okno z omawianej aplikacji przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 8. Program napisany w środowisku LabVIEW umożliwiający wyświetlanie i archiwizowanie danych diagnostycznych w trybie on-line

Fig. 8. A program written in LabVIEW capable of displaying and archiving diagnostic data in an on-line mode



Rys. 9. Wizualizacja w programie LabVIEW

Fig. 9. Visualization in LabVIEW

7. Wnioski

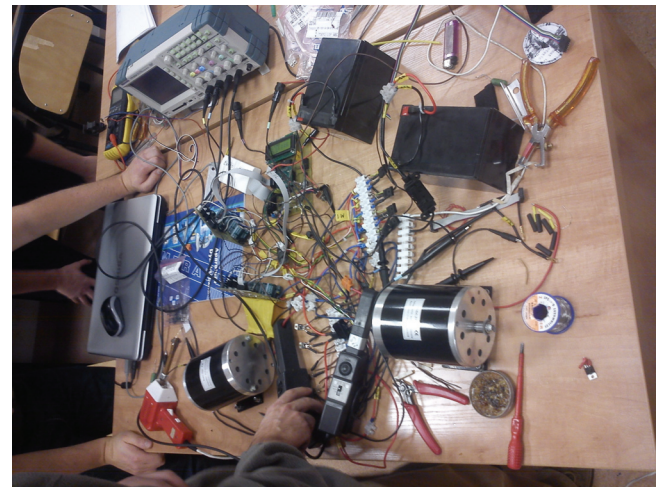
Przedstawiony pojazd w swojej zasadzie działania przypomina seryjnie produkowany transporter Segway, którego sposób poruszania się jest szeroko znany. Nie oznacza to jednak, że jego budowa i sposób sterowania jest banalnym zadaniem, tym bardziej, że jednym z głównych założeń przy tworzeniu pojazdu była minimalizacja kosztów oraz budowa pojazdu od podstaw. Transporter jest złożonym urządzeniem (rys. 10), który łączący w sobie wiele dziedzin technicznych. Konstruktorzy pojazdu musieli rozwiązać wiele problemów napotkanych podczas budowy oraz

podczas uruchamiania i pierwszych testów. Część z nich przedstawiono w niniejszym artykule.

Efekt prac został doceniony na Konferencji Elektroniki i Telekomunikacji Studentów i Młodych Naukowców SECON 2012 otrzymaniem pierwszej nagrody za wygłoszony referat na temat omawianego pojazdu. Pod adresem internetowym <http://www.youtube.com/watch?v=xZgVWym41Nk> można zobaczyć film przedstawiający zbudowany pojazd.

W przyszłości planowane jest użycie w pojeździe silników synchronicznych z magnesami trwałymi PMSM, które charakteryzują się wyższą sprawnością i mniejszą awaryjnością od używanych obecnie silników prądu stałego. Zastosowanie nowych silników wymaga zmiany silnoprowadowej (przekształtników napięcia) oraz użycia odpowiednich metod sterowania charakteryzujących się wysoką dynamiką kształtowania momentu np. DTC- δV_3 [5].

Stworzony egzemplarz jest prototypem przeznaczonym jedynie na potrzeby dydaktyczne oraz promocyjne Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej.



Rys. 10. Prace przy uruchamianiu przekształtników DC/DC

Fig. 10. Work at the startup of DC/DC converters

Praca dofinansowana ze środków z pracy W/WE/4/2013 oraz z pracy S/WE/3/2013.

8. Literatura

- [1] Falkowski P., Gryczewski M., Halicki A.: Elektryczny pojazd balansujący. XXXI Konferencja Elektroniki i Telekomunikacji Studentów i Młodych Pracowników Nauki SECON 2012, Warszawa 2012.
- [2] Shui-Chun L., Ching-Chih T.: Development of a Self-Balancing Human Transportation Vehicle for the Teaching of Feedback Control. IEEE Transactions on Education, vol. 52, no. 1, pp 157-168 Feb. 2009.
- [3] Pinto, L.J., Dong-Hyung K., Ji Yeong L., Chang-Soo H.: Development of a Segway robot for an intelligent transport system. 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) Kyushu University, Fukuoka, Japan December 16-18, 2012.
- [4] Nowak M., Barlik R.: Poradnik Energoelektronika. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [5] Grodzki R., Sikorski A.: A New DTC control for PMSM with torque ripple minimization and constant switching frequency, COMPEL, vol. 30,3/2011, s. 1069-1081

otrzymano / received: 03.06.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2013

artykuł recenzowany / revised paper