

Projekt techniczny i wykonanie dwukołowego balansującego pojazdu mobilnego

Patryk Pipczyński, Robert Piotrowski

Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska

Streszczenie: W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój pojazdów mobilnych, które znajdują coraz szersze zastosowanie w życiu codziennym i w różnych gałęziach przemysłu. W artykule przedstawiono projekt, założenia i strukturę dwukołowego balansującego pojazdu mobilnego. Następnie szczegółowo opisano jego konstrukcję mechaniczną i elektroniczną włącznie z urządzeniami pomiarowymi. Poszczególne elementy składowe zaprojektowano, dobrano i połączono tworząc spójną całość.

Słowa kluczowe: pojazd mobilny, projektowanie, robot mobilny, robotyka

1. Wprowadzenie

Dział robotów mobilnych należy do najprężniej rozwijających się sektorów przemysłu. Roboty te są stosowane zarówno w pracach badawczych, np. [1, 15, 18], jak również w różnych gałęziach przemysłu, np. [4, 13]. W życiu codziennym zaobserwować można niewielką popularność robotów mobilnych, mimo to większość rozwiązań technicznych cieszy się społecznym uznaniem, co przyczynia się do rozwoju tej dziedziny, np. [16]. W dobie ciągłego pośpiechu wszelkie formy transportu stają się koniecznością. Niestety zatłoczone ulice uniemożliwiają sprawne przemieszczanie się szczególnie na krótkich odcinkach. Ponadto często istnieje potrzeba szybkiego poruszania się w budynkach o ciasnej architekturze, wśród tłumu, gdzie konieczna jest interakcja z otoczeniem. Klasyczne formy pojazdów poprzez swoje gabaryty często utrudniają poruszanie. Okazuje się, że bardzo dobrym rozwiązaniem jest pojazd, którego wymiary niewiele przekraczają wymiary stojącego człowieka. Najpopularniejszym tego typu urządzeniem jest „Segway HT” [17]. Jego konstrukcja znacznie ułatwia poruszanie się zarówno w budynkach jak i na otwartej przestrzeni. Jest to nowoczesny, ekologiczny środek transportu.

W artykule przedstawiono projekt oraz sposób wykonania pojazdu odbiegającego od klasycznej formy pojazdów mobilnych. Główna różnica polega na umiejscowieniu napędów oraz sposobie poruszania się. W rozdziale drugim opisano założenia i strukturę pojazdu. Następnie szczegółowo przedstawiono mechaniczne i elektroniczne części składowe balansującego pojazdu mobilnego.

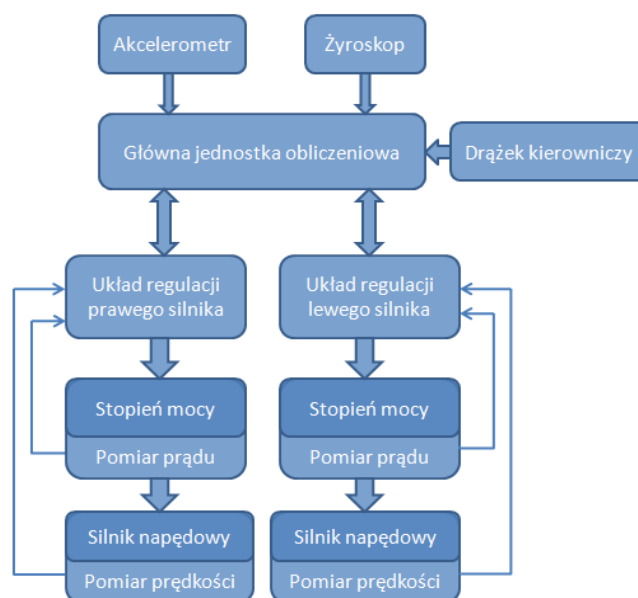
2. Założenia i struktura pojazdu

Konstrukcja mechaniczna pojazdu jest związana z jego cechami, w szczególności umiejscowieniem napędów oraz

sposobem kierowania. Ponadto powinna ona wytrzymać obciążenia związane z pracą napędów oraz masą człowieka, przede wszystkim podczas jazdy po nierównym terenie. Rozmiary pojazdu są wymuszone wielkością elementów składowych, oraz ograniczone wymiarami stojącego człowieka. Rama pojazdu powinna zawierać wszelkie części związane z umiejscowieniem wszystkich elementów składowych oraz potrzebnego osprzętu.

Strukturę konstrukcji elektronicznej pojazdu przedstawiono na rys. 1. Składa się ona z dwóch podstawowych elementów, tj. pomiaru odchylenia pojazdu od osi pionowej oraz układu sterowania różnicowym napędem pojazdu.

Główna jednostka obliczeniowa kontroluje pracę wszystkich elementów konstrukcji elektronicznej oraz stanowi nadrzędny układ sterowania pojazdem. Podrzednymi układami sterowania są sterowniki silników, które poprzez odpowiednie sterowanie silnikami napędowymi realizują zadaną wartość prędkości pojazdu wygenerowaną przez jednostkę nadrzędną.



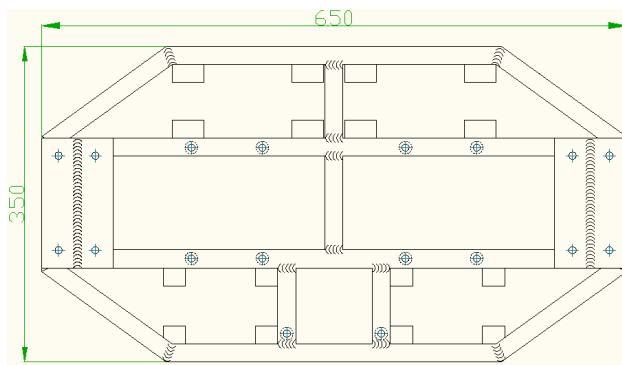
Rys. 1. Struktura pojazdu

Fig. 1. The structure of the vehicle

3. Wykonanie części mechanicznej

3.1. Rama pojazdu

Ramę pojazdu zaprojektowano i wykonano zgodnie z założeniami z punktu 2. Szkielet ramy przygotowano z profili stalowych zamkniętych o wymiarach $20 \times 10 \times 1$ mm. Elementy składowe ramy połączono za pomocą spawania elektrycznego, co daje konstrukcji trwałość i odpowiednią odporność na uszkodzenia. Widok projektu ramy wraz z głównymi wymiarami przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widok projektu ramy pojazdu

Fig. 2. View design of the vehicle frame

Rama pojazdu zawiera mocowania pod wszelkie podzespoły, tj. silniki napędowe z przeniesieniem napędu, skrzynkę akumulatorową wraz z osprzętem elektrycznym oraz mostki H do sterowania silnikami.

Projekt ramy uwzględnia również mocowanie pod oprawę łożyska tocznego przeznaczonego do montażu drążka kierowniczego. Łożysko zablokowano w oprawie, dzięki czemu uzyskano stabilne połączenie drążka z ramą pojazdu oraz prostotę manewrowania drążkiem.

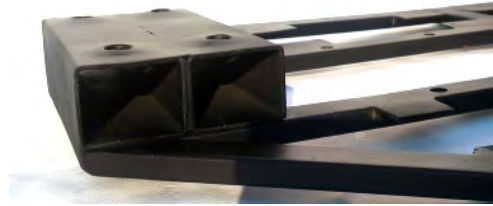
Drążek kierowniczy jest utrzymywany w pozycji neutralnej za pomocą dwóch sprężyn o długości 140 mm wykonanych z drutu stalowego o średnicy 2,5 mm (rys. 3). Sprężyny są zaczepione o ramę pojazdu oraz uchwyt przyspawany do łożyska. Odpowiednio naciągnięte zapewniają one samoczynny powrót drążka kierowniczego do pozycji neutralnej, jednocześnie nie utrudniając ruchu drążka. Jako przetwornik położenia drążka kierowniczego wykorzystano dwuścieżkowy potencjometr obrotowy.



Rys. 3. Mocowanie drążka kierowniczego

Fig. 3. Mounting of the steering

Ze względu na różnicę wysokości pomiędzy dolną krawędzią oprawy łożyska, a krawędzią silnika należało wykonać odpowiednie mocowania. Zrealizowano to w oparciu o profil stalowy o wymiarach $30 \times 40 \times 1$ mm i długości 145 mm pod każdą oprawę łożyska, a następnie połączono z ramą za pomocą spawania elektrycznego (rys. 4).



Rys. 4. Mocowanie łożyska

Fig. 4. Mounting of the bearing

Silniki napędowe są zamocowane do ramy pojazdu poprzez fabryczne otwory umieszczone w podstawie silnika. W celu ich montażu wykonano cztery otwory o średnicy 8 mm w ramie pojazdu oraz powiększono otwory na jednej ze ścianek profilu do średnicy 12 mm, aby śruby były ukryte wewnątrz profilu.

3.2. Napęd

Do napędu pojazdu wykorzystano silniki prądu stałego z magnesami trwałymi ze zintegrowaną przekładnią planetarną o parametrach przedstawionych w tab. 1.

Tab. 1. Parametry silnika

Tab. 1. The motor parameters

Lp.	Parametr	Wartość
1	Napięcie znamionowe	24 V
2	Znamionowy prąd twornika	$\leq 26,7$ A
3	Moc	500 W
4	Sprawność	≥ 78 %
5	Prędkość obrotowa	533 ± 5 % obr/min

Jako koła napędowe użyto kół o rozmiarze 11" wraz z oponą 120/70 (rys. 5).

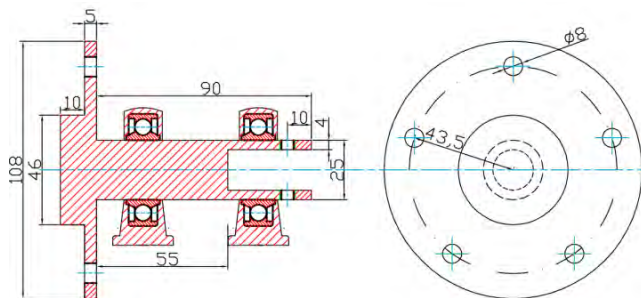


Rys. 5. Koła napędowe

Fig. 5. Driving Wheel

W celu przeniesienia napędu zaprojektowano wałek łączący wyjście przekładni silnika z kołem (rys. 6). Połączenie powinno wytrzymać obciążenia związane z ciężarem człowieka, nie przenosić obciążeń na łożyska silnika oraz zapewnić jak najmniejsze straty energii związane z prze-

niesieniem momentu mechanicznego. Ważnym elementem połączenia koła z wałkiem przenoszącym napęd jest uwzględnienie sił tnących występujących na połączeniu koła napędowego z wałkiem, które mogą spowodować uszkodzenie śrub mocujących koło do wałka. Aby zmniejszyć ich oddziaływanie należało uwzględnić ich działanie w projekcie wałka. Zmniejszenie oddziaływania sił tnących osiągnięto poprzez odpowiedni kształt wałka od strony koła. Koło jest przytwierdzone do wałka za pomocą pięciu śrub M6/30 z łbem imbusowym i nakrętkami samoblokującymi. Wałek podparto na dwóch łożyskach tocznych samonastawnych w oprawie.



Rys. 6. Wałek napędowy

Fig. 6. The driver shaft

Połączenie silnika napędowego z wałkiem polega na unieruchomieniu wałka wyjściowego z przekładni wewnątrz wałka napędowego za pomocą dwóch śrub M6. Tak wykonane przeniesienie napędu spełnia wcześniej założone wymagania, dodatkowo dzięki śrubom blokującym umieszczonym w oprawie łożyska tocznego uniemożliwia przesuwanie wzdłużne wałka, które mogłyby spowodować rozłączenie napędu. Zbudowany układ napędowy przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Układ napędowy

Fig. 7. The propulsion system

4. Wykonanie części elektronicznej

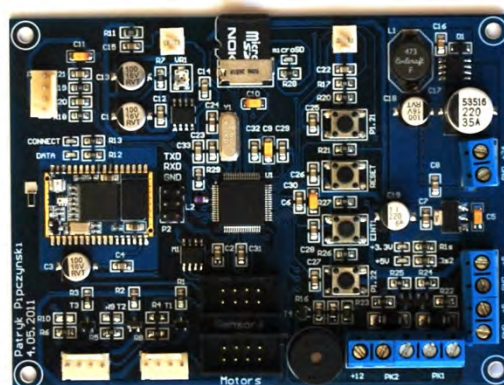
Strukturę elektroniczną pojazdu podzielono na trzy elementy: główną jednostkę obliczeniową, której zadaniem jest fuzja i filtracja sygnałów sensorycznych, kontrola działania całego pojazdu, zbieranie i archiwizacja danych o pojeździe, komunikacja z komputerem klasy PC; samodzielnie działający układ kaskadowej regulacji silnika prądu stałego, oddzielny dla każdego silnika; stopień mocy zasilania silnika, czyli mostek H do sterowania kierunkiem

oraz prędkością obrotową silnika, oddzielny dla każdego silnika. Umożliwia to zmianę konstrukcji poszczególnych elementów bez konieczności zmiany pozostałych, co jest istotne w fazie prototypowej pojazdu i pozwala ograniczyć koszty oraz czas związany ze zmianami w projekcie.

4.1. Główna jednostka obliczeniowa

Sercem głównej jednostki sterującej jest mikrokontroler firmy NXP – LPC2148 z rdzeniem ARM7TDMI-S pracującym z maksymalną częstotliwością 60 MHz [12]. Umożliwia to zmianę konstrukcji poszczególnych elementów bez konieczności zmiany pozostałych, co jest istotne w fazie prototypowej pojazdu i pozwala ograniczyć koszty oraz czas związany ze zmianami w projekcie.

Główną jednostkę sterującą zaprojektowano na płycie drukowanej o wymiarach 84 × 110 mm (rys. 8). Wyposażono ją w następujące elementy: moduł komunikacji Bluetooth do bezprzewodowej komunikacji z komputerem klasy PC, złącze kart microSD do archiwizacji danych, pamięć EEPROM do przechowywania ustawień pojazdu, wejścia analogowe do pomiaru napięcia akumulatorów oraz położenia drążka kierowniczego, wyjścia sterujące przekaźnikami mocy do załączania zasilania silników napędowych, wyjścia do komunikacji z akcelerometrem i żyroskopem oraz silnikami napędowymi, inne elementy, tj. diody LED oraz przyciski.



Rys. 8. Widok płytki drukowanej głównej jednostki obliczeniowej

Fig. 8. View of the main PCB (printed circuit board) unit of account

Płytę główną wyposażono w dwa złącza: do komunikacji z akcelerometrem i żyroskopem poprzez magistralę I²C (Inter-Integrated Circuit) oraz z silnikami, połączonymi magistralą SPI (Serial Peripheral Interface). W obu przypadkach mikrokontroler LPC2148 pełni nadrzędną rolę w transmisji danych. Dodatkowo do płyty głównej doprowadzono sygnały przerwań generowane przez akcelerometr i żyroskop, których inicjalizacja jest programowalna.

Do zasilania płyty głównej oraz pozostałych elementów zasilanych napięciem 5 V wykorzystano przetwornicę step-down LM 2575 firmy National Semiconductor [10]. W celu zapewnienia jej poprawnej pracy również projekt płytki drukowanej wykonano według zaleceń producenta. Ze względu na konieczność zasilania mikrokontrolera LPC2148 oraz modułu Bluetooth BTM112 [5] napięciem

3,3 V w projekcie dodatkowo wykorzystano liniowy stabilizator napięcia LM1117 [9].

Wcześniej wymieniony akcelerometr i żyroskop to modele odpowiednio: BMA180 o programowalnym zakresie pomiarowym 1–16 g i rozdzielczości 14 bitów [8] oraz ITG 3200 o rozdzielczości 16 bitów w zakresie pomiaru prędkości kątowej $\pm 2000^\circ/\text{s}$ [14] wykonane w technologii MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). Czujniki pomiarowe umieszczono na dodatkowej płytce drukowanej tak, aby znajdowały się w osi obrotu kół napędowych pojazdu. Pozwala to na bezpośredni pomiar prędkości kątowej pojazdu bez wpływu innych czynników. Ponieważ czujniki MEMS wykorzystują ten sam sposób transmisji I²C są połączone za pomocą wspólnych linii danych.

4.2. Układ sterowania napędem

Układ sterowania napędem jest podrzędnym elementem układu sterowania pojazdem realizującym kaskadową regulację prędkością obrotową silnika prądu stałego z magnesami trwałymi. Głównym elementem tego układu jest 8-bitowy mikrokontroler ATmega32 pracujący z częstotliwością 16 MHz [7]. Aby zapewnić odpowiednie sprzężenia zwrotne dla układu regulacji, jako sprzężenie wewnętrznej pętli układu sterowania wykorzystano prąd twornika, natomiast sprzężenie zewnętrznej pętli stanowi prędkość obrotowa twornika.

Wartość prądu pobieranego przez silniki jest istotna w ich zabezpieczeniu przed przeciążeniem, które może spowodować uszkodzenie, a ponadto stanowi sprzężenie dla regulatora. Ze względu na stosunkowo duży prąd pobierany przez silniki napędowe, zaprojektowano odpowiedni układ pomiaru prądu. Jedną z najczęściej stosowanych metod pomiaru prądu wykorzystywaną w robotyce jest pomiar spadku napięcia na rezystorze włączonym szeregowo w obwodzie twornika. Niestety, duży prąd twornika prowadzi do dużych strat mocy wydzielanej na rezystorze pomiarowym. Zmniejszenie rezystancji powoduje ograniczenie mocy, ale jednocześnie wiąże się z koniecznością wzmocnienia mierzonego napięcia w celu jego pomiaru. W związku z tym zastosowano czujnik ACS758 firmy Allegro Microsystems wykorzystujący efekt Halla (rys. 9). Jego działanie polega na pomiarze pola magnetycznego wywołanego przez prąd płynący przez przewodnik. Wielkość pola magnetycznego jest proporcjonalna do natężenia prądu, zatem w prosty sposób można otrzymać sygnał napięciowy.

Czujnik umożliwia pomiar prądu stałego/zmiennego o natężeniu do 200 A, jednocześnie przy spadku mocy przez rezystancję czujnika wynoszącą tylko 100 $\mu\Omega$. Dodatkową jego zaletą jest separacja galwaniczna.

Kolejną wielkością mierzoną jest prędkość obrotowa twornika. Przy wyborze sposobu pomiaru tej wielkości kierowano się jak najmniejszymi gabarytami przetwornika ze względu na ograniczoną ilość miejsca, możliwość pomiaru prędkości ze stałym okresem próbkowania, a także dużą dokładność i rozdzielczość. Innym ważnym czynnikiem decydującym o wyborze czujnika pomiarowego była odporność na zanieczyszczenia w obrębie jego działania.



Rys. 9. Struktura wewnętrzna czujnika [2]

Fig. 9. Internal structure of the sensor [2]



Rys. 10. Widok zamontowanego magnesu

Fig. 10. View of the magnet mounted

Zastosowano magnetyczny enkoder AS5040 firmy Austriamicrosystems [6]. Urządzenie to wykorzystuje oddziaływanie pola magnetycznego, co pozwala dokonać bezkontaktowego pomiaru prędkości. Enkoder składa się z dwóch elementów: układu scalonego zawierającego w swojej strukturze czujniki Halla oraz magnesu neodymowego o wymiarach 6 × 2,5 mm umieszczonego na obracającym się elemencie. Umieszczenie magnesu na wale silnika (rys. 10) nie wpływa na jego pracę.

Aplikacja enkodera pozwala na jego programowanie podczas pracy, a do pomiaru prędkości obrotowej wykorzystuje się wyjścia w trybie impuls/kierunek z rozdzielczością 10 bitów. Układ sterowania napędem wyposażono również w czujnik temperatury o symbolu LM35 [11] do kontrolowania temperatury radiatora stopnia mocy sterującego silnikiem. Dodatkowo w celu ułatwienia przeprowadzania testów, do układu dodano wyjście transmisji szeregowej UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), przycisk oraz diody LED.

Płytkę drukowaną zaprojektowano z możliwością umieszczenia jej na obudowie silnika. Pozwoliło to umieścić układ scalony enkodera AS5040 na tej samej płytce drukowanej. Ponieważ z tyłu obudowy silnika znajdują się otwory wentylacyjne, wielkość oraz kształt płytki została wymuszona ich rozmieszczeniem (rys. 11).



Rys. 11. Widok płytki drukowanej układu sterowania silnikiem

Fig. 11. View of motor controller PCB

4.3. Zasilanie oraz stopień mocy sterowania silnikami

Do zasilania pojazdu zastosowano cztery akumulatory litowo-polimerowe o pojemności 5200 mAh i nominalnym napięciu 11,1 V. Charakteryzują się one bardzo niską masą oraz gabarytami w stosunku do pojemności. Innym bardzo ważnym parametrem tego typu akumulatorów jest wysoki prąd rozładowania, który dla wykorzystanego akumulatora o pojemności 5200 mAh wynosi 20 C. Parametr ten jest znaczący w przedstawionym projekcie ze względu na parametry silników napędowych, których prąd znamionowy twornika wynosi 26,7 A, a wartości chwilowe mogą być znacznie większe. Dodatkowo mała masa akumulatorów nieznacznie zwiększa masę pojazdu.



Rys. 12. Widok mostka H

Fig. 12. H-bridge view

W celu zmiany kierunku i prędkości obrotowej silników napędowych zastosowano mostki H zbudowane z tranzystorów MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) oraz sterownik bramek tranzystorów HIP4081 [3]. Sterownik ten wybrano ze względu na szereg zalet związanych z jego działaniem, a mianowicie: wysoki prąd sterowania bramkami tranzystorów, zabezpieczenie przed włączeniem tranzystorów w jednej gałęzi mostka H, martwy czas załączenia tranzystorów.

W projekcie stopnia mocy uwzględniono wszelkie zalecenia producenta dotyczące zarówno doboru komponentów jak i projektu płytki drukowanej. Ze względu na stosunkowo duży prąd pobierany przez silniki napędowe zdecydowano się wykonać sterownik silników w postaci dwóch płytek drukowanych. Pierwsza z nich zawiera jedynie tranzystory wraz z radiatorami, elementy zabezpieczające, złącza zasilania i wyprowadzenia dla silnika. Na drugiej płytce umieszczono sterownik HIP4081 wraz z osprzętem i wyprowadzeniami do zasilania i sterowania. Aby zapewnić jak najlepsze połączenie HIP4081 z tranzystorami, płytkę sterującą umieszczono nad płytką wysokoprądową. Na rys. 12 przedstawiono kompletny mostek H do sterowania jednym silnikiem napędowym.

5. Wynik końcowy

Na rys. 13–15 przedstawiono końcowy efekt pracy nad pojazdem. Wszystkie założenia zostały spełnione, czego rezultatem jest w pełni działająca konstrukcja mechaniczno-elektroniczna pojazdu mobilnego.



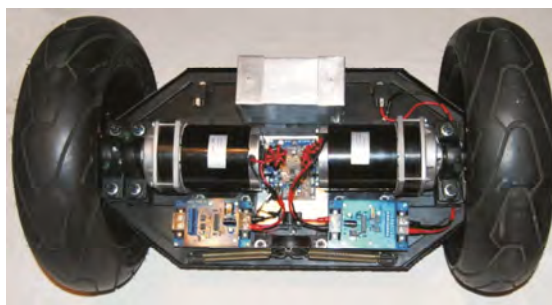
Rys.13. Widok z przodu

Fig.13. Front view



Rys.14. Widok z boku

Fig.14. Side view



Rys.15. Widok rozmieszczenia elementów

Fig.15. View layout of elements

6. Podsumowanie

Prace dotyczące pojazdów mobilnych są intensywnie prowadzone na całym świecie. Urządzenia te coraz częściej wspomagają/zastępują człowieka w obowiązkach domowych i zawodowych, szczególnie w środowisku niebezpiecznym lub w miejscach trudno dostępnym. W artykule przedstawiono projekt i wykonanie balansującego pojazdu mobilnego. Jego elastyczność wynikająca z modułowej budowy powoduje, że może on być rozbudowywany, a dzięki temu może znaleźć szerokie zastosowanie (np. edukacja, badania, przemysł). Użyte interfejsy pozwalają na rozbudowę konstrukcji elektronicznej o kolejne moduły bez konieczności ingerencji w całość, co zarówno przyspiesza modyfikację, jak i ogranicza koszty z tym związane.

Bibliografia

1. Afonso P., Azevedo J. Cardeira C. Cunha B., Lima P., Santos V.: *Challenges and solutions in an autonomous driving mobile robot competition*. Proc. of the 7th Portuguese Conference on Automatic Control CONTROL, Lisbon, 11–13 September, 2006.
2. Allegro Microsystems, [www.allegromicro.com], dostęp 29.10.2011.
3. Application Note HIP4081, February 2003 AN9325.3.
4. Borkowicz Z., Cader M., Górska-Szkaradek J.: *Pierwszy mobilny robot do zadań specjalnych w kopalniach*. „Pomiary Automatyka Robotyka” 1/2011, 8–11.
5. BTM-11x Specification, [www.kamami.pl/dl/btm112_datasheet.pdf], dostęp 29.10.2011.
6. Data sheet AS5040 Austriamicrosystems, Rev. 2.10.
7. Data sheet ATmega32 Atmel, 2503Q-AVR-02/11.
8. Data sheet BMA180 v2.5, 07 December 2010.
9. Data sheet LM1117/LM1117I National Semiconductor, October 2002.
10. Data sheet LM1575/LM2575/LM2575HV National Semiconductor, April 2007.
11. Data sheet LM35 National Semiconductor, November 2000.
12. Data sheet LPC2141/42/44/46/48 Rev. 01-07 September 2005.
13. Heyer C.: *Human-robot interaction and future industrial robotics applications*. [w:] Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, 18–22 October, 2010.
14. ITG-3200 Product Specification Rev. 1.4, 30 March 2010.
15. Klimasara W.J.: *Koncepcja, projekt oraz konstrukcja mechaniczna mobilnego robota interwencyjno-inspekcyjnego SR-10 Inspector*. Materiały Konferencyjne VII Krajowej Konferencji Robotyki, Łądek Zdrój, 5–8 września 2001.
16. Mikołajewska E., Mikołajewski D.: *Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzoszkieleciech medycznych*, „Pomiary Automatyka Robotyka” 5/2011, 58–63.
17. Segway HT, [www.segway.com], dostęp 29.10.2011.
18. Szykiewicz W., Chojecki R., Rydzewski A., Majchrowski M., Trojanek P.: *Modułowy robot mobilny Elektron*, „Postępy Robotyki”, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006. ■

Technical design and construction of two-wheeled self-balancing mobile vehicle

Abstract: In recent years we can see rapid development of mobile vehicles that are becoming more widely used in everyday life and in different industries. The paper presents the design assumptions and structure of two-wheel self-balancing mobile vehicle. Then it describes in detail the mechanical construction, electronic and measuring devices. The individual components are designed, chosen and combined to form a coherent whole.

Keywords: mobile vehicle, designing, mobile robots, robotics

inż. Patryk Pipczyński

Student studiów drugiego stopnia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka). Zainteresowania: elektronika mikroprocesorowa, robotyka i mechatronika.

e-mail: p.pipczynski@vp.pl



dr inż. Robert Piotrowski

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, kierunek: Automatyka i Robotyka (2001 r.). W 2005 r. uzyskał stopień doktora (Automatyka i Robotyka). Obecnie adiunkt w Katedrze Inżynierii Systemów Sterowania. Zainteresowania naukowe dotyczą modelowania i zaawansowanych metod sterowania procesami przemysłowymi.

e-mail: r.piotrowski@ely.pg.gda.pl

