

**Patryk PIPCZYŃSKI, Robert PIOTROWSKI**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI, POLITECHNIKA GDAŃSKA  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

**Dwukołowy pojazd balansujący – budowa i sterowanie****Mgr inż. Patryk PIPCZYŃSKI**

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka, 2013r.). Zainteresowania: elektronika mikroprocesorowa, robotyka i mechatronika, pojazdy elektryczne.



e-mail: p.pipczynski@vp.pl

**Dr inż. Robert PIOTROWSKI**

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka) (2001r.). W roku 2005 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@eia.pg.gda.pl

**Streszczenie**

Pojazdy elektryczne cieszą się coraz większym zainteresowaniem, jako nowa forma transportu. W artykule opisano kontynuację prac nad dwukołowym pojazdem balansującym, jako alternatywę dla rowerów elektrycznych. Jego cechy charakterystyczne to umiejscowienie napędów oraz sposób poruszania. Okazuje się, że jest to również złożony obiekt sterowania, dla którego zaprojektowano dwa układy regulacji: klasyczny z regulatorem PID i hierarchiczny z miękko przełączalnym regulatorem PID w warstwie nadrzędnej oraz regulacją kaskadową w warstwie bezpośrednio sterującej silnikami napędowymi. Przeprowadzono badania testowe zaprojektowanego pojazdu.

**Słowa kluczowe:** pojazd elektryczny, hierarchiczny system sterowania, sterowanie, projektowanie, robot mobilny, robotyka.

**Self-balancing two-wheeled vehicle – construction and control system****Abstract**

Electric vehicles are becoming more popular as a new form of transportation. They are electric cars and smaller vehicles such as motorcycles or bicycles. This paper describes the continuation of the work on a two-wheeled self-balancing vehicle, as an alternative to electric bikes. The distinguishing features of the vehicle are the location of motors and a control system. The method of moving the vehicle is also unusual. To move forward or backward, one should lean in that direction. To change the course, one should use the steering wheel. With the increase in vehicle speed changing the sensitivity of the steering system changes with the increase in the vehicle speed. This allows for quick returning of the vehicle at the minimum turning radius and ease of driving at higher speeds. The vehicle structure is presented in Section 2 by discussing elements of mechanical, electronic and measuring equipment. In Section 3 there are presented two designed control systems: the classical control system with a PID controller and the hierarchical control system with a soft-switchable PID controller in the upper layer and a cascade control in the bottom control layer. The results obtained for the both control systems are given in Section 4. The last section provides a summary and directions for further research.

**Keywords:** self balancing vehicle, hierarchical control system, control, designing, mobile robots, robotics.

**1. Wprowadzenie**

Pojazdy elektryczne zdobywają coraz większą popularność i coraz częściej można je spotkać. Są to zarówno samochody elektryczne, które charakteryzują się coraz większym zasięgiem, jak i mniejsze pojazdy, np. motocykle, skutery czy rowery elektryczne. Wzrost zainteresowania tego typu pojazdami bezpośrednio przekłada się na rozwój badań, czego efektem jest udoskonalanie źródeł zasilania oraz systemów sterowania.

Cechami wyróżniającymi pojazd jest umiejscowienie napędów oraz sposób poruszania się. Małe gabaryty pojazdu pozwalają na łatwe przemieszczanie w przestrzeni o ciasnej architekturze.

Gabaryty pojazdu niewiele przekraczające wymiary stojącego człowieka umożliwiają sprawne poruszanie się między innymi wśród tłumu.

W literaturze można znaleźć liczne prace dotyczące elektrycznych pojazdów kołowych. W szczególności dotyczą one zagadnień projektowania [1], modelowania [2] i syntezy algorytmów sterowania [3-5].

Artykuł stanowi kontynuację prac przedstawionych w [6, 7]. Gruntownie zmodernizowano konstrukcję mechaniczną pojazdu, zmieniając postawę kierującego z pozycji stojącej na siedzącą. Przebudowano konstrukcję elektroniczną pojazdu i zbudowano ją w oparciu o mikrokontroler klasy Cortex-M4. Zaprojektowano dwa systemy sterowania: klasyczny z regulatorem PID i hierarchiczny zbudowany w oparciu o miękko przełączalne regulatory PID oraz sterowanie kaskadowe silnikami napędowymi.

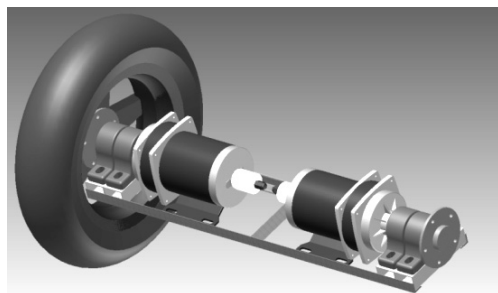
**2. Budowa pojazdu****2.1. Elementy mechaniczne**

Budowa konstrukcji mechanicznej pojazdu jest związana z charakterystycznym umiejscowieniem układu napędowego. Ponadto została zaprojektowana tak, aby wytrzymać obciążenie związane z pracą napędów oraz masą człowieka. Szerokość pojazdu została podyktowana rozmiarami wybranych napędów oraz zapewnieniem miejsca na enkodery inkrementalne zamocowane na osi silników napędowych. Konstrukcję mechaniczną pojazdu podzielono na dwa główne elementy: ramę poziomą z zamontowanymi napędami oraz ramę pionową stanowiącą konstrukcję nośną dla akumulatorów, konstrukcji elektronicznej oraz pozostałych elementów, w tym układu kierowniczego oraz miejsca siedzącego dla kierującego pojazdem. Poszczególne elementy składowe dobrano uwzględniając wymagania związane z cechami pojazdu i jego przeznaczeniem tak, aby tworzyły funkcjonalną całość i jednocześnie zapewniały trwałość i jednolitość konstrukcji.

Rama pojazdu została zaprojektowana w oprogramowaniu Autodesk Inventor w celu przeprowadzenia analizy wytrzymałości mechanicznej. Szczególny nacisk został położony na wytrzymałość ramy poziomej (rysunek 1), ponieważ stanowi ona konstrukcję nośną dla całego pojazdu, a jej odkształcenia mogłyby negatywnie wpływać na pracę układu napędowego pojazdu.

Podczas modelowania ramy pojazdu założono jej wykonanie z kątowników stalowych o wymiarach 25x25 mm i grubości ścianki 2 mm oraz odcinków profilu zamkniętego stanowiących jednocześnie podstawę pod łożyska samonastawne podpierające wały napędowe.

Rama pionowa pojazdu również została zamodelowana w celu wizualnego dobrania jej kształtu i określenia miejsca potrzebnego na podzespoły. Zbudowano ją z elementów stalowych zespawanych ze sobą, co daje konstrukcji trwałość i odpowiednią odporność na uszkodzenia.



Rys. 1. Model ramy poziomej pojazdu  
Fig. 1. Model of the main frame of vehicle

Do napędu pojazdu zostały wykorzystane silniki prądu stałego z zintegrowaną przekładnią planetarną o parametrach przedstawionych w tabeli 1.

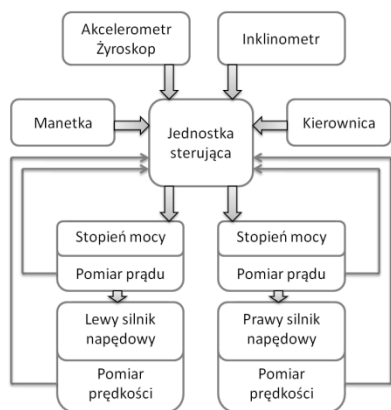
Tab. 1. Parametry silnika prądu stałego  
Tab. 1. Parameters of the DC motor

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

Jako koła napędowe zostały wykorzystane koła z felgą aluminiową o rozmiarze 11" wraz z oponą 120/70 połączone bezpośrednio z silnikami napędowymi zaprojektowanym wałem napędowym podpartym na dwóch łożyskach w oprawie.

## 2.2. Konstrukcja elektroniczna

Konstrukcja elektroniczna pojazdu składa się z dwóch zasadniczych części: jednostki sterującej wraz z urządzeniami pomiarowymi oraz wysoko prądowych sterowników silników napędowych. Strukturę elektroniczną pojazdu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura elektronicznej części pojazdu mobilnego  
Fig. 2. Structure of the electronic part of a mobile vehicle

Jednostka sterująca odpowiada za sterowanie i kontrolę pracy wszystkich elementów konstrukcji elektronicznej. Zostały w niej zaimplementowane algorytmy obsługi wszystkich urządzeń zainstalowanych w pojeździe oraz układ sterowania pojazdem. Do jej budowy wybrano moduł przeznaczony do szybkiego prototypowania zawierający mikrokontroler STM32F407 [8] z urządzeniami peryferiami niezbędnymi do działania oraz programowania mikrokontrolera. Wybór modułu był podyktowany parametrami mikrokontrolera, w którym zaimplementowano systemy sterowania pojazdem.

W celu adaptacji modułu na potrzeby sterowania pojazdem zaprojektowano w środowisku Autodesk Inventor oraz wykonano płytę bazową, która zawiera dodatkowe elementy bezpośrednio związane z pozostałą konstrukcją elektroniczną pojazdu oraz zapewniającą integrację wszystkich elementów. Podstawowe elementy płyty bazowej to: układ zasilania, złącza dla urządzeń pomiarowych, złącza dla sterowników silnikami napędowymi, moduł komunikacji bezprzewodowej bluetooth oraz złącza dla modułu z mikrokontrolerem.

Sterowanie silnikami napędowymi pojazdu zostało zrealizowane poprzez impulsową regulację wartości napięcia w celu zmiany prędkości obrotowej oraz poprzez zmianę konfiguracji połączenia obwodu twornika w celu zmiany kierunku obrotów. Elementami zmieniającymi konfigurację obwodu twornika silnika są przełączniki elektromagnetyczne z jednym stykiem przełączanym. Odpowiadają one za zmianę kierunku obrotów silników napędowych. Zmiany prędkości dokonuje się z wykorzystaniem połączonych równolegle trzech tranzystorów N-MOSFET (ang. Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) sterowanych sygnałem PWM (ang. Pulse Width Modulation) za pośrednictwem sterownika TC4422. Dzięki zmianie szerokości wypełnienia impulsu sterującego tranzystorami uzyskuje się zmianę średniej wartości prądu twornika silnika, co skutkuje zmianą prędkości obrotowej i momentu napędowego.

Sterowniki silników zaprojektowano tak, aby ich wymiary zewnętrznie pozwalały na montaż wewnątrz ramy pojazdu możliwie jak najbliższe silników napędowych oraz akumulatorów.

Do zasilania pojazdu wybrano akumulatory żelowe, które są rodzajem akumulatorów kwasowo-ołowiowych. Ich główne cechy to: możliwość pracy w każdej pozycji, brak konieczności uzupełniania elektrolitu (bezobsługowość), brak wycieków elektrolitu mogącego powodować korozję elementów, a także wysoka odporność na uderzenia i wibracje. Ze względu na napięcie zasilania silników (24 V) zastosowano dwa akumulatory o napięciu nominalnym 12 V i pojemności 7 Ah połączone szeregowo. W rezultacie otrzymano baterię o pojemności 7 Ah i napięciu 24 V.

## 2.3. Urządzenia pomiarowe

Pomiar kąta odchylenia pojazdu od osi pionowej jest kluczowym elementem układu sterowania pojazdem, ponieważ na jego podstawie opiera się zasada poruszania pojazdem. W pojeździe zostały wykorzystane dwa rozwiązania. Pierwsze z nich to pomiaru wykorzystuje akcelerometr trójosiowy BMA180 z interfejsem szeregowym oraz żyroskop trójosiowy ITG 3200 również z interfejsem szeregowym, wykonane w technologii MEMS (ang. Micro Electro-Mechanical Systems). Urządzenia pomiarowe zostały zamontowane na jednej płycie drukowanej. Otrzymane dane pomiarowe zostały poddane filtracji Kalmana w celu dokładnej estymacji kąta odchylenia pojazdu [7]. Drugą realizacją pomiaru jest wykorzystanie fabrycznego inklinometru firmy IFM electronic. Zastosowane urządzenie EC2045 [9] posiada wyjście analogowe, którego wartość bezpośrednio zależy od aktualnego kąta odchylenia pojazdu.

Do pomiaru prędkości obrotowej silników napędowych użyto enkoderów inkrementalnych montowanych na przedłużeniu wirnika silnika. Przy wyborze rodzaju urządzenia ważnym parametrem jest sygnał wyjściowy pozwalający na łatwą integrację z mikroprocesorowym systemem sterowania, który posiada interfejs dla enkoderów inkrementalnych z wyjściem kwadraturowym. Innym istotnym czynnikiem jest możliwość występowania zanieczyszczeń oraz pola magnetycznego w pobliżu enkoderów. Ostatecznie wybrano enkodery formy SICK DDS36 [10].

Do pomiaru prądu twornika silników napędowych wykorzystano przetworniki elektryczne firmy LEM wykorzystujące zjawisko Halla. Przetworniki transformują prąd pierwotny na izolowany galwanicznie sygnał proporcjonalny do wartości chwilowej lub skutecznej tego prądu w szerokim zakresie częstotliwości. Stosowane są zarówno do pomiaru prądów stałych jak i zmiennych. Wybrany model LTS 15-NP charakteryzuje się zakresem pomia-

rowym  $\pm 48A$ , zasilaniem jednobiegunowym napięciem 5V oraz napięciowym sygnałem wyjściowym. Zastosowane urządzenie pozwala mierzyć prąd twornika silnika napędowego w szerokim zakresie, z możliwością uwzględnienia przeciążeń, oraz pozwala na łatwą integrację z systemem mikroprocesorowym. Przetwornik został umieszczony na płytach sterowników silników w obwodzie zasilania sterownika.

Pozostałymi urządzeniami pomiarowymi występującymi w pojeździe są potencjometryczne przetworniki położenia wykorzystane do określenia wychylenia kierownicy pojazdu oraz położenia manetki.

## 2.4. Rezultat prac

Na rysunku 3 przedstawiono końcowy efekt pracy nad konstrukcją pojazdu, którego funkcjonalność jest zgodna z przyjętymi założeniami.

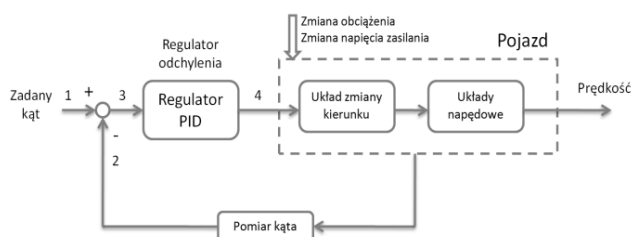


Rys. 3. Widok pojazdu  
Fig. 3. A view of the vehicle

## 3. Projektowanie systemów sterowania

### 3.1. Klasyczny układ regulacji

Pierwszym zaprojektowanym systemem sterowania pojazdem jest klasyczny jednoobwodowy układ z regulatorem PID (rysunek 4).



Rys. 4. Schemat klasycznego układu regulacji  
Fig. 4. Scheme of the classical control system

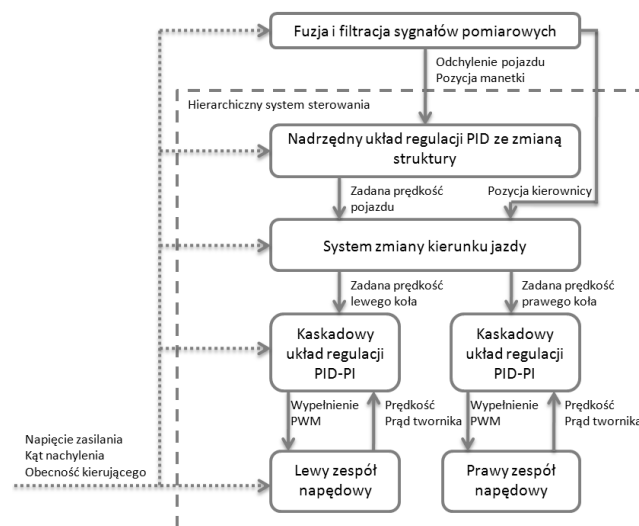
Wartością zadaną jest wartość kąta odczytana z urządzeń pomiarowych odpowiadająca zerowemu odchyleniu pojazdu od osi pionowej (1), sprzężeniu zwrotnemu stanowi pomiar kąta odchylenia pojazdu (2), na podstawie którego generowany jest uchyb regulacji (3) przekazywany do regulatora odchylenia PID. Regulator wypracowuje sygnał sterujący (4) w postaci współczynnika wy-

pełnienia, który po modyfikacji przez algorytm zmiany kierunku jazdy przekazywany jest bezpośrednio do stopni mocy sterowania silnikami.

Zadaniem regulatora jest utrzymanie pojazdu w pozycji pionowej, czyli zerowym odchyleniu od osi pionowej. Natomiast kierujący pojazdem, aby poruszać się w wybranym kierunku, wychyla się wyprowadzając pojazd ze stanu równowagi i dodatkowo zmieniając kierunek jazdy poprzez skręt kierownicą. Regulator dążąc do eliminacji uchybu zwiększa wypełnienie sygnału sterującego silnikami powodując wzrost prędkości obrotowej kół pojazdu.

### 3.2. Hierarchiczny układ regulacji

Dwukołowy pojazd balansujący jest w przybliżeniu przykładem mobilnego odwróconego wahadła, czyli nieliniowego, niestabilnego i niestacjonarnego systemu dynamicznego. Pierwsze dwie cechy dotyczą fizycznych właściwości pojazdu. Niestacjonarność konstrukcji wynika ze zmiany napięcia zasilania (rozładowanie akumulatorów) i wagi pojazdu (obecność kierującego). Podjęto próbę zaprojektowania hierarchicznego układu sterowania pojazdem z wykorzystaniem regulatorów PID ze zmianą konfiguracji i regulacją kaskadową (rysunek 5). Różni się on od układu regulacji przedstawionego w [7] tym, że zamiast zmiany nastaw jednego regulatora, poprzez twarde przełączanie, zaprojektowano trzy równoległe pracujące regulatory. Ich nastawy dobrano do różnych obszarów pracy. Sygnał sterujący jest ważoną sumą funkcji przynależności (patrz rysunek 7) zależną od aktualnego kąta odchylenia pojazdu.

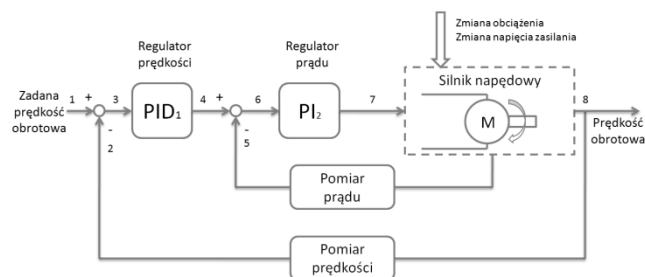


Rys. 5. Hierarchiczna struktura systemu sterowania  
Fig. 5. Hierarchical structure of the control system

Fuzja i filtracja sygnałów pomiarowych dotyczy pomiaru kąta odchylenia pojazdu od osi pionowej. Estymacji kąta odchylenia od pionu można dokonać z wykorzystaniem fuzji sygnałów z akcelerometru i żyroskopu za pomocą filtru Kalmana, dzięki któremu uzyskano niezasumioną wartość kąta odchylenia od pionu [7].

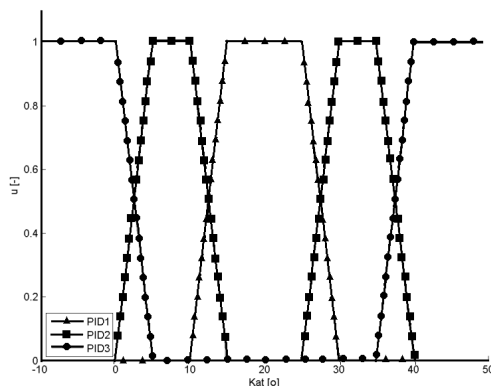
Kaskadowy układ regulacji przedstawiono na rysunku 6. Wartość zadaną (1) jest prędkość obrotowa generowana przez nadrzędny układ regulacji, która po odjęciu aktualnej prędkości obrotowej (2) stanowi uchyb regulacji (3) dla regulatora prędkości PID<sub>1</sub>. Od sygnału sterującego generowanego przez regulator prędkości (4) odejmowana jest wartość pomiaru prądu twornika silnika napędowego (5), który jest wielkością pomocniczą. Następnie uchyb regulacji (6) przekazywany jest do regulatora prądu PID<sub>2</sub>, który generuje sygnał sterujący w postaci współczynnika wypełnienia (7). Jest on przekazywany do stopnia mocy sterowania napędem, z którego otrzymujemy główną wielkość sterowaną – prędkość obrotową (8). Wykorzystanie wielkości pomocniczej pozwala regulatorowi pomocniczemu PI<sub>2</sub> wpłynąć odpowiednio

wcześniej na wielkość nastawianą, niż jest to możliwe w jednoobwodowym układzie regulacji.



Rys. 6. Struktura kaskadowego systemu sterowania  
Fig. 6. Structure of the cascade control system

Zachowanie pojazdu silnie zależy od jego aktualnego stanu. W związku z tym, jako nadrzędny układ regulacji postanowiono zaimplementować kilka przełączanych regulatorów dla różnych obszarów pracy pojazdu. Do rozpatrzenia pozostaje kwestia wyboru metody przełączania (twarde, miękkie) pomiędzy regulatorami. Zdecydowano się na miękkie przełączanie z wykorzystaniem trapezoidalnej funkcji przynależności. Na rysunku 7 przedstawiono funkcje przynależności dla trzech regulatorów PID w zależności od aktualnego kąta odchylenia pojazdu.

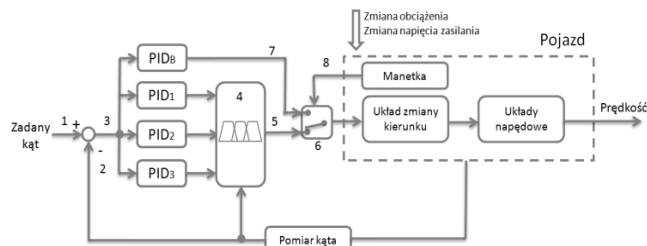


Rys. 7. Funkcje przynależności regulatorów PID  
Fig. 7. Membership functions of PID controllers

Dodatkowo, ze względu na zaobserwowaną znaczną różnicę w pracy pojazdu podczas samodzielnego balansowania w zależności od obecności kierującego, system sterowania rozszerzono o dodatkowy regulator PID przeznaczony wyłącznie do stabilizacji pojazdu w pozycji pionowej bez kierującego oraz przełącznik sygnału sterującego. Jest to podyktowane zmianą stanu pojazdu związaną z dodatkowym obciążeniem w postaci masy kierującego. Wymusza to wzrost momentu generowanego przez układy napędowe w celu utrzymania balansowania. Ponieważ pojazd początkowo nie został wyposażony w urządzenie pomiarowe umożliwiające wykrycie obecności kierującego postanowiono dodać do konstrukcji pojazdu manetkę informującą system sterowania o obecności kierującego. Na rysunku 8 pokazano strukturę nadrzędnego systemu sterowania.

Wartością zadaną (1) stanowi kąt odpowiadający zadanej pozycji, od którego odejmowana jest aktualna wartość kąta (2). Uchyb regulacji (3) przekazywany jest do czterech równolegle połączonych regulatorów PID. Następnie sygnały sterujące pochodzące z trzech regulatorów (PID<sub>1</sub>, PID<sub>2</sub>, PID<sub>3</sub>) przeznaczonych do jazdy przekazywane są do bloku obliczenia funkcji przynależności (4) w zależności od aktualnego kąta odchylenia pojazdu. Sygnał sterujący (5) trafia do przełącznika (6), do którego również doprowadzony jest sygnał sterujący pochodzący z regulatora (PID<sub>B</sub>) przeznaczonego dla samodzielnego balansowania (7). W zależności od sygnału pochodzącego z manetki (8), do układu zmiany

kierunku jazdy przekazywany jest odpowiedni sygnał. Po modyfikacji sygnału sterującego przez algorytm zmiany kierunku jazdy odpowiednie wartości zadane prędkości obrotowych przekazywane są do układów napędowych, które poprzez kaskadową regulację PID-PI sterują silnikami napędowymi.



Rys. 8. Struktura nadrzędnego systemu sterowania  
Fig. 8. Structure of the upper level control system

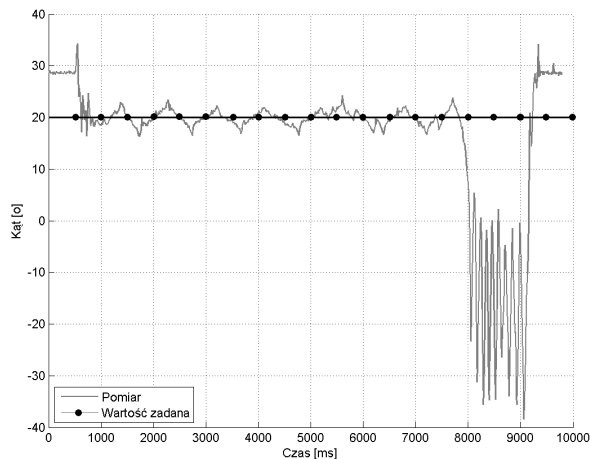
Jeżeli manetka nie jest wciśnięta, zadaniem układu regulacji jest utrzymanie balansowania bez kierującego, więc do układu napędowego sterowanego przez kaskadowe układy regulacji przekazywany jest sygnał sterujący pochodzący z regulatora z nastawami dobranymi dla tego punktu pracy. Minimalne wciśnięcie manetki przekazuje informację do systemu sterowania o obecności kierującego, co powoduje zmianę struktury systemu sterowania. Dodatkowo sygnał z manetki został wykorzystany do częściowego ograniczenia mocy przekazywanej przez układy napędowe tak, aby zwiększyć kontrolę nad pojazdem i jego płynne ruszanie.

Ostatnim elementem struktury układu sterowania jest system zmiany kierunku jazdy (patrz rysunek 5). Pojazd posiada dwa koła napędowe, które służą zarówno do napędzania pojazdu jak i zmiany kierunku jazdy. Rolę sprzężenia pomiędzy kierownicą, a zespołami napędowymi stanowi sygnał elektryczny odczytywany z przetwornika położenia. Dzięki takiemu rozwiązaniu można dowolnie kształtować charakterystykę zespołu kierowniczego uzależniając ją od aktualnej prędkości pojazdu. Zmiany kierunku jazdy dokonuje się poprzez wychylenie kierownicy, co powoduje modyfikację zadanej wartości prędkości obrotowej przekazywanej z nadrzędnego regulatora PID do układów regulacji kaskadowej. Algorytm zmiany kierunku jazdy zmniejsza różnicę prędkości pomiędzy zespołami napędowymi wraz ze wzrostem prędkości pojazdu. Wybrany sposób realizacji zmiany kierunku jazdy pozwala na zawracanie pojazdu w miejscu poprzez wysterowanie napędów w różnych kierunkach. Ponadto zmniejszanie czułości układu kierowniczego wraz ze wzrostem prędkości ułatwia manewrowanie pojazdem.

## 4. Wyniki testów

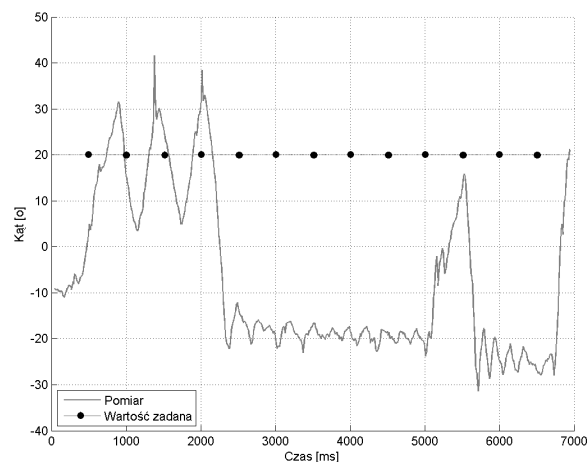
### 4.1. Klasyczny układ regulacji

Badania testowe z wykorzystaniem klasycznego jednoobwodowego układu regulacji (patrz sekcja 3.1) wskazały na problemy z pracą pojazdu podczas swobodnego balansowania oraz podczas jazdy. Jeżeli nastawy regulatora zostały dobrane dla balansowania pojazdu w pobliżu zerowego kąta odchylenia od osi pionowej układ regulacji spełniał swoje zadanie. W chwili, gdy wyprowadzono pojazd ze stanu równowagi system sterowania nie był w stanie utrzymać pojazdu powodując oscylacje, co skutkowało jego przewracaniem. Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas pracy pojazdu. Początkowo pojazd zostaje ustawiony w pobliżu pozycji pionowej odpowiadającej 20° odczytanym z urządzeń pomiarowych. Od około 1 s pojazd balansuje samodzielnie (kolor niebieski) w pobliżu wartości zadanej kąta odchylenia (kolor czerwony), następnie w 8 s pojazd zostaje wyprowadzony z równowagi, co skutkuje znacznym odchyleniem położenia pojazdu i jego oscylacjami.



Rys. 9. Klasyczny układ regulacji – wyniki testów 1  
Fig. 9. Classical control system – tests results 1

Ponieważ w działaniu pojazdu można wyróżnić dwa główne stany pracy: samodzielne balansowanie oraz jazda, postanowiono tak dobrać nastawy regulatora, aby możliwe było stabilne działanie pojazdu w obu przypadkach. Eksperymentalny dobór nastaw regulatora pozwolił na utrzymanie pojazdu w pozycji pionowej oraz jazdę w przód, lecz ze znacznymi oscylacjami. Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas działania pojazdu.



Rys. 10. Klasyczny układ regulacji – wyniki testów 2  
Fig. 10. Classical control system – tests results 2

Jak można zauważyć, między 0,5-2 s pojazd silnie oscyluje w pobliżu wartości zadanej przez co kierujący był zmuszony dodatkowo utrzymywać równowagę poprzez balansowanie tułowiem. W 2s kierujący znacznie wychyla się do przodu, aby wymusić jazdę do przodu. Niestety jazda nie jest płynna i wymaga odpowiedniego balansowania tułowiem.

Kolejnym problemem zauważonym przy implementacji jedno-obwodowego układu sterowania było samoczynne skręcanie pojazdu. Przyczyną okazały się niedoskonałości zespołów napędowych i różnice w konstrukcji mechanicznej, co przy jednakowym współczynniku wypełnienia przekazywanym do sterowników mocy napędów, powodowało różną prędkość obrotową prawego i lewego zespołu napędowego.

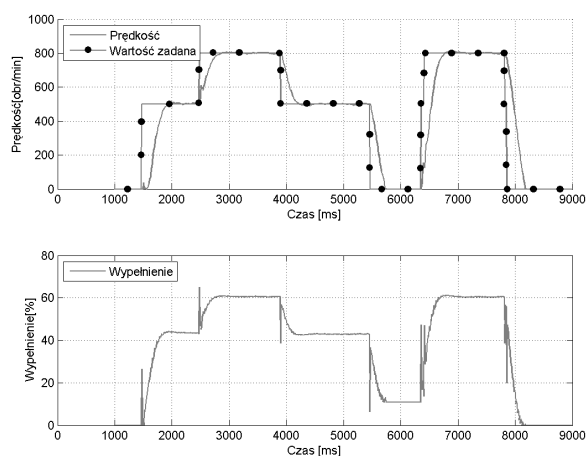
Inną cechą układu był znaczny wpływ poziomu naładowania akumulatorów na działanie pojazdu. Dobrane nastawy regulatora dla samodzielnego balansowania przy pełni naładowanych akumulatorach powodowały niestabilną pracę przy niższym poziomie napięcia. Dodatkowo jakość sterowania silnie zależała od obecności kierującego pojazdem i od aktualnego kąta odchylenia pojazdu od osi pionowej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można jednoznacznie stwierdzić, że klasyczny układ regulacji jest niewystarczający do efektywnego sterowania pojazdem. Przeprowadzone badania potwierdzają nieliniowy charakter pojazdu i możliwość pracy regulatora PID tylko w pobliżu punktu pracy.

## 4.2. Hierarchiczny układ regulacji

Celem zastosowania hierarchicznego systemu sterowania (patrz sekcja 3.2) była eliminacja wad poprzedniego układu regulacji. W pierwszej kolejności rozwiązano problem związany z brakiem utrzymywania stałego kierunku jazdy przy zerowym wychyleniu kierownicy oraz wpływem poziomu naładowania akumulatorów na pracę pojazdu. W tym celu wykorzystano oddzielne układy regulacji dla każdego z silników napędowych zbudowane w oparciu o kaskadowe połączenie regulatorów PID-PI.

Na rysunku 11 przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas rozruchu układu napędowego.



Rys. 11. Rozruch układu napędowego  
Fig. 11. Start of the propulsion system

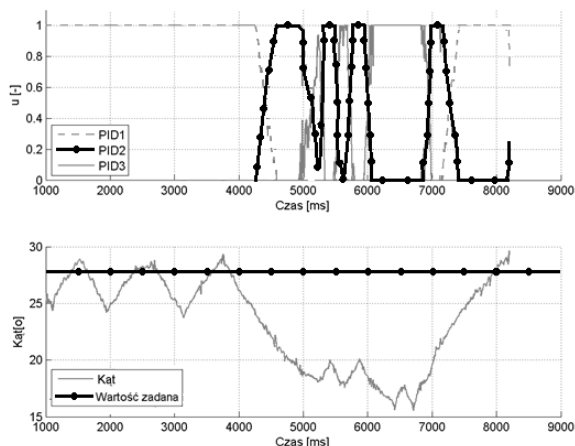
Jak można zauważyć, regulacja kaskadowa pozwala na osiągnięcie wartości zadanej po upływie około 500ms. Wzrost prędkości rozpoczyna się po opóźnieniu, spowodowanym bezwładnością zespołu napędowego. Zmniejszeniu wartości zadanej prędkości do zera również towarzyszy opóźnienie, spowodowane bezwładnością zespołu napędowego oraz brakiem możliwości podania sygnału sterującego o przeciwnym znaku. Analizując przebieg przedstawiony na rysunku 11 można zauważyć obecność członu D regulatora w postaci chwilowych pików sygnału sterującego. Dodatkowo przebieg wypełnienia wskazuje, że nie uaktywnia się ograniczenie sygnału sterującego, co może świadczyć o poprawnie dobranych nastawach oraz o właściwym zapasie mocy zespołu napędowego. Należy również zaznaczyć, że nastawy regulatorów dobrane dla lewego zespołu napędowego różniły się od nastaw dla prawego zespołu, przy osiągnięciu bardzo zbliżonej jakości regulacji. Stanowi to potwierdzenie różnicy w konstrukcji mechanicznej napędów.

Zastosowanie kaskadowej regulacji dodatkowo wyeliminowało zarówno wpływ poziomu napięcia akumulatorów na pracę zespołów napędowych oraz utrzymanie zadanego kierunku jazdy.

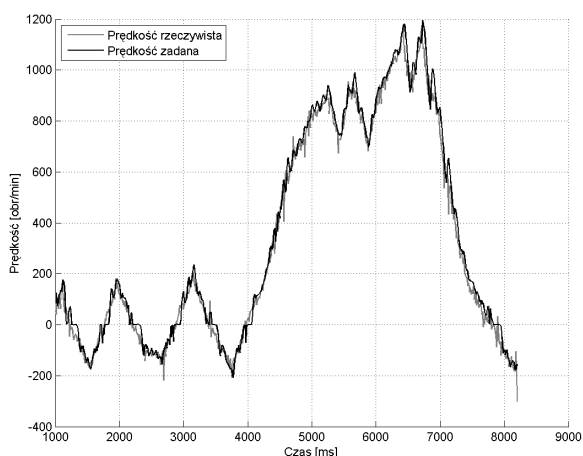
Wcześniejsze badania pokazały, że pojazd wykazywał niestabilność zarówno przy balansowaniu z kierującym i podczas jazdy. Jako rozwiązanie tego problemu postanowiono wykorzystać miękko przełączalny regulator PID będący elementem hierarchicznego systemu sterowania. Na rysunku 12 przedstawiono przebiegi zmiany wartości funkcji przynależności dla poszczególnych regulatorów podczas jazdy oraz przebieg zmiany kąta odchylenia pojazdu.

Do 4 s pojazd balansuje w pobliżu wartości zadanej kąta – 26,5°. W tym czasie aktywny jest regulator PID<sub>1</sub>. Następnie, kierujący pojazdem przechyla się do przodu w celu wymuszenia jazdy, następuje zmiana kąta odchylenia pojazdu, co powoduje zmianę współczynników regulatora PID<sub>1</sub> oraz PID<sub>2</sub> i rozpędzanie

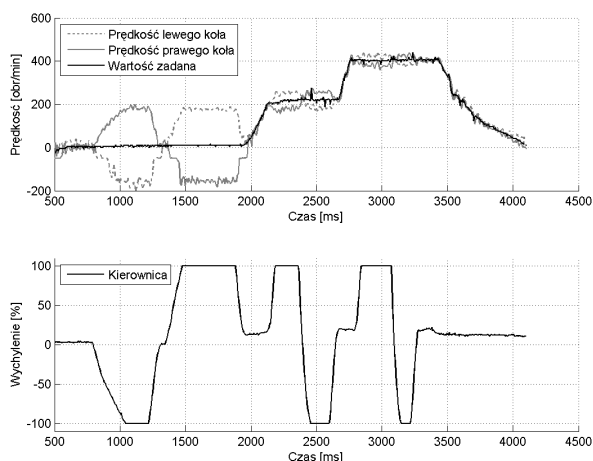
się pojazdu. Między 5-7 s niezerowe współczynniki mają regulatory  $PID_2$  i  $PID_3$ , po czym następuje zwalnianie pojazdu i jego zatrzymanie. Przebieg zmiany kąta wskazuje na stosunkowo spokojne balansowanie, łagodne przyspieszanie pojazdu (4-5 s) oraz jego hamowanie (7-8 s). Niestety między 5-7 s przebieg zmiany kąta wskazuje na niestabilną jazdę. Przyczyną takiej reakcji pojazdu może być niedokładne dobranie nastaw regulatora  $PID_3$  lub zły obszar jego działania.



Rys. 12. Zmiany wartości funkcji przynależności i kąta odchylenia  
Fig. 12. Change of the values of membership functions and deviation angle



Rys. 13. Prędkość obrotowa pojazdu – zadana i rzeczywista  
Fig. 13. Rotational speed of the vehicle – set point and actual



Rys. 14. Zmiana kierunku jazdy pojazdu  
Fig. 14. Change of the direction of vehicle driving

Na rysunku 13 przedstawiono przebiegi wartości zadanej i zrealizowanej prędkości obrotowej jednego z kół (kierownica została ustawiona w pozycji zerowej).

Wyniki potwierdzają prawidłowe działanie dolnej warstwy hierarchicznego systemu sterowania, ponieważ zadana prędkość obrotowa jest realizowana przez zespoły napędowe.

Na rysunku 14 pokazano przebiegi zarejestrowane podczas testowania systemu zmiany kierunku jazdy (patrz rysunek 5).

## 5. Zakończenie

Prace nad nowoczesnymi formami transportu prowadzone są intensywnie na całym świecie, a badania nad robotami społecznymi wskazują kierunki dalszych prac.

Najbardziej złożonymi elementami konstrukcji mechanicznej wykonanego pojazdu są zespoły napędowe. Podczas badań testowych działały one prawidłowo. Stwierdzono jedynie nieznaczny luz pomiędzy lewym kołem a silnikiem. Do zapewnienia pełnej funkcjonalności mechanicznej pojazdu potrzeba obudowy osłon zabezpieczających konstrukcję elektroniczną przed uszkodzeniem, a także obudowanie silników napędowych. Konstrukcja elektroniczna pojazdu działa prawidłowo, a wybrany mikrokontroler (szybkość, ilość pamięci i mocy obliczeniowej) pozwolił na implementację złożonego, zaawansowanego systemu sterowania. W trakcie badań stwierdzono, że zdecydowanie lepiej zastosować inklinometr zamiast akcelerometrów i żyroskopu. Urządzenie to pozbawione jest błędów związanych z pomiarem poziomych przyspieszeń pojazdu. Dodatkowo metoda pomiaru odchylenia, na podstawie pomiarów przyspieszeń w dwóch osiach, sprawdza się jedynie podczas ruchu pojazdu po powierzchniach płaskich lub nachylnych jedynie wzdłuż kierunku jazdy.

Niewątpliwie system sterowania pojazdem wymaga dalszych modernizacji, ponieważ aktualnie jazda pojazdem nie jest płynna i wymaga od kierującego utrzymywania równowagi poprzez balansowanie tułowiem. Zmiany powinny dotyczyć nadrzędnego układu sterowania (lepsze dostrójenie regulatorów PID, modyfikacje funkcji przynależności). Modułowa struktura pojazdu pozwala na zmiany programowo-sprzętowe, co sprzyja dalszej modernizacji i rozbudowie.

## 6. Literatura

- [1] Ciężkowski M.: Modelling the Interaction Between two-Wheeled Self-Balancing Vehicle and its Rider. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 18, Issue 2, pp. 341-351, 2013.
- [2] Wang L., Liang Z., Ding X.: Design and Implementation of The Two Wheel Self-Balancing Car Based on Single chip microcomputer Of Freescale. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 341-342, pp. 1028-1032, 2013.
- [3] Hu J. S., Tsai M. Ch., Hu F. R., Hori Y.: Robust control for coaxial two-wheeled electric vehicle. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 172-180, 2010.
- [4] Lin S. Ch., Tsai Ch. Ch., Huang H. Ch.: Adaptive Robust Self-Balancing and Steering of a Two-Wheeled Human Transportation Vehicle. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 62, Issue 1, pp. 103-123, 2011.
- [5] Li Y., Wang D., Zhang X., Bian P.: Research on PID Linear Motion Control Strategy of Self-balanced Two-wheeled Vehicle. *Advanced Materials Research*, Vol. 694-697, pp. 1679-1683, 2013.
- [6] Pipeczyński P., Piotrowski R.: Projekt techniczny i wykonanie dwukołowego balansującego pojazdu mobilnego. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2/2012, 241-246 – płyta CD.
- [7] Pipeczyński P., Piotrowski R.: Hierarchiczny system sterowania dwukołowym balansującym pojazdem mobilnym. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 58, Nr 12, 1095-1099, 2012.
- [8] Datasheet - STM32F407, DocID022152 Rev 4, June 2013.
- [9] Inclination sensor EC2045, www.ifm.com/, dostęp 02.12.2013.
- [10] DDS36 Incremental Encoders 8013472/2010-10 · SS/MD (2010-10).