

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

Hierarchiczny system sterowania dwukołowym balansującym pojazdem mobilnym

Inż. Patryk PIPCZYŃSKI

Student drugiego stopnia studiów na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka). 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 mobilne są projektowane i rozwijane od kilkunastu lat. W artykule opisano dwukołowy balansujący pojazd mobilny. Zastosowane rozwiązania mechaniczne i elektroniczne są jego cechami charakterystycznymi. Ponadto sposób kierowania pojazdem jest nietypowy i polega na pochylaniu się w danym kierunku, a zmiany kierunku jazdy dokonuje się za pomocą drążka kierowniczego. W celu opracowania algorytmów sterowania koniecznym okazało się przygotowanie sygnałów pomiarowych (filtracja i fuzja), co zrealizowano wykorzystując dyskretny filtr Kalmana. Następnie zaprojektowano dedykowany hierarchiczny system sterowania. W warstwie nadrzędnej wykorzystano adaptacyjny regulator PID, a w warstwie podrzędnej kaskadowy układ regulacji. Przeprowadzono badania testowe zaproponowanego rozwiązania uzyskując obiecujące wyniki.

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

Hierarchical control system of a self-balancing mobile vehicle

Abstract

Mobile vehicles have been designed and developed for a dozen or so years. The works related to the modern forms of transport are intensively carried out throughout the world. This paper presents a two-wheeled self balancing mobile vehicle. The final result of the project developed is shown in Figures 2-4. A detailed description of the vehicle is presented in [3]. The used mechanical and electronic solutions are characteristic for this type of vehicle. Furthermore, the type of control is atypical and it requires the inclination in the given direction, while the change of the travelling direction is made by means of a steering wheel. The self balancing two-wheeled mobile vehicle is an unconventional approach to the classical form of mobile vehicles. Small dimensions slightly exceeding those of a standing man help navigate e.g. in a crowd, and only two supporting points provide mobility. To develop control algorithms, it was necessary to prepare measuring signals (filtering and fusion), which was carried out with use of the discrete Kalman filter (Section 3). Next, a hierarchical control system was designed (Section 4). There was used an adaptive PID controller for the upper control level and a cascade control system for the lower control level. There were performed investigations of the control system and the results obtained, presented in Section 5, are promising.

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

1. Wstęp

W ostatnim okresie obserwuje się duże zainteresowanie pojazdami elektrycznymi. Nowoczesne rowery elektryczne znane są na świecie od kilku lat. Innymi przykładami są motocykle i samochody elektryczne. Prace badawcze z tego obszaru rozwijane są w różnych ośrodkach na całym świecie, ale ich popularność w życiu codziennym jest niewielka. Głównym powodem jest wysoka cena oraz ograniczony zasięg wykorzystywania.

Niewątpliwie wymagania stawiane pojazdom elektrycznym przeznaczonym do użytku miejskiego są zupełnie inne niż klasycznych pojazdów spalinowych. Zasięg wynoszący kilkadziesiąt kilometrów staje się wystarczający, a głównym czynnikiem decydującym o wyborze jest ich mobilność i zwrotność. Nie bez znaczenia jest również ochrona środowiska naturalnego. Poruszanie się rowerem, motocyklem w tłumie, czy w przestrzeni o ciasnej architekturze jest utrudnione z powodu gabarytów tych pojazdów. Ich przeciwieństwem jest pojazd typu „Segway HT” [1]. Małe gabaryty niewiele przekraczające wymiary stojącego człowieka pozwalają sprawnie poruszać się między innymi wśród tłumu, a jedynie dwa punkty podparcia zwiększają jego mobilność. Dodatkowo dwukołowa platforma mobilna może być podstawą do budowy różnego typu robotów [2].

W artykule przedstawiono zbudowany pojazd mobilny odbiegający od klasycznej postaci takich obiektów. Główna różnica polega na umiejscowieniu napędów oraz sposobie poruszania się. Krótko opisano założenia i strukturę pojazdu oraz przedstawiono jego mechaniczne i elektroniczne części składowe. Przeprowadzono fuzję i filtrację sygnałów pomiarowych. Następnie zaprojektowano hierarchiczny algorytm sterowania pojazdem mobilnym i dokonano oceny jego działania.

2. Konstrukcja pojazdu mobilnego

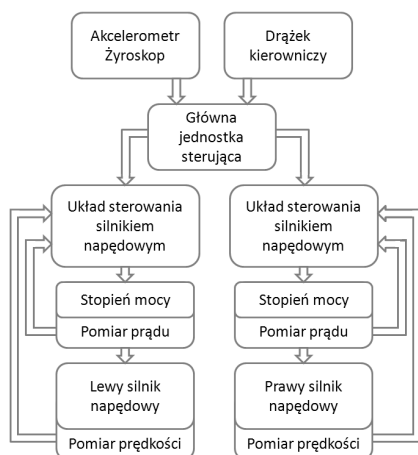
Szczegółowy opis projektu technicznego i wykonania dwukołowego balansującego pojazdu mobilnego przedstawiono w [3]. Konstrukcję mechaniczną pojazdu zaprojektowano uwzględniając charakterystyczne umiejscowienie napędów oraz sposób poruszania. Poszczególne elementy składowe tej konstrukcji dobrano uwzględniając wymagania związane z cechami pojazdu i jego przeznaczeniem tak, aby tworzyły funkcjonalną całość.

Ramę pojazdu zbudowano z profili stalowych zamkniętych o wymiarach 20x10x1mm. Elementy konstrukcyjne ramy zespaano uzyskując dużą trwałość i odporność konstrukcji na uszkodzenia. Do napędu pojazdu wybrano silniki prądu stałego z magnesami trwałymi z zintegrowaną przekładnią planetarną o mocy 500W każdy. Zamontowano koła napędowe o rozmiarze 11” z oponą 120/70.

Na rysunku 1 pokazano schemat konstrukcji elektronicznej zaprojektowanego pojazdu mobilnego.

Konstrukcja elektroniczna pojazdu została podzielona na trzy podstawowe elementy: główną jednostkę obliczeniową, do kontroli pracy całego pojazdu; układy regulacji silników napędowych, odpowiedzialne za sterowanie napędami; zasilanie silników napędowych zrealizowane za pomocą zaprojektowanych stopni mocy dobranych do parametrów silników. Wszystkie podzespoły tej konstrukcji zostały wykonane w formie modułowej. Dzięki temu możliwe jest elastyczne wprowadzanie zmian w elektronicznej konstrukcji pojazdu, co pozwala na dalszą rozbudowę lub wymianę poszczególnych modułów. Ponadto uwzględniono możliwość

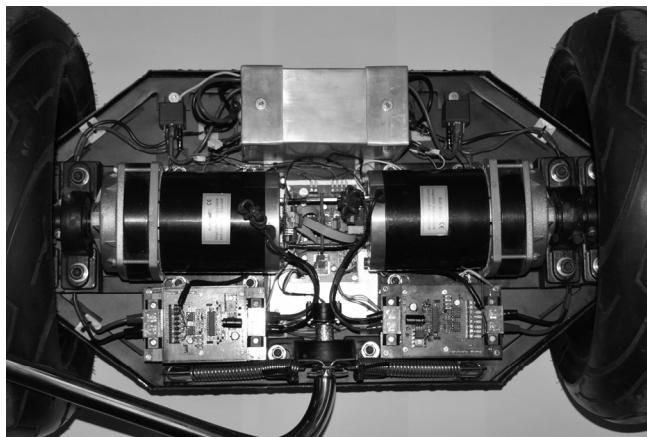
wyposażenia pojazdu w dodatkowe elementy elektroniczne, które można połączyć z pojazdem za pomocą standardowych interfejsów stosowanych w elektronice. Na rysunkach 2-4 przedstawiono zbudowany pojazd mobilny.



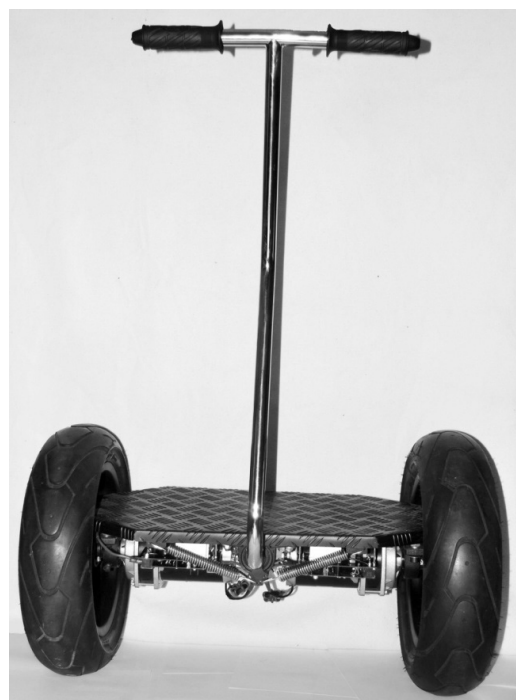
Rys. 1. Struktura elektronicznej części pojazdu mobilnego
Fig. 1. Structure of the electronic part of a mobile vehicle



Rys. 2. Widok z boku
Fig. 2. Side view



Rys. 3. Widok rozmieszczenia elementów
Fig. 3. View of the layout of elements



Rys. 4. Widok z przodu
Fig. 4. Front view

3. Przygotowanie sygnałów pomiarowych

Pojazd wykonano z możliwością pomiaru jak największej liczby wielkości. Najważniejszą z nich jest pomiar kąta odchylenia pojazdu od osi pionowej, gdyż na jego podstawie opiera się idea poruszania pojazdem. Pomiar ten zrealizowano za pomocą czujników inercyjnych, które dodatkowo pozwalają mierzyć przyspieszenia pojazdu we wszystkich osiach. Kolejnymi mierzonymi wielkościami są: prędkość obrotowa i prąd pobierany przez silniki napędowe. Są one kluczowe dla układów regulacji napędami oraz stanowią dodatkowe informacje dla systemu zabezpieczeń.

3.1. Pomiar kąta odchylenia pojazdu

Pomiar kąta odchylenia pojazdu, jako główną wielkość związaną ze sterowaniem pojazdu, zrealizowano z wykorzystaniem akcelerometru oraz żyroskopu wykonanych w technologii MEMS (ang. Micro Electro-Mechanical Systems). Zastosowanie trójosiowego akcelerometru BMA180 [4] o programowalnym zakresie pomiarowym $1 \div 16g$ i rozdzielczości 14 bitów z interfejsem szeregowym oraz żyroskopu trójosiowego ITG 3200 [5] o rozdzielczości 16 bitów w zakresie pomiaru prędkości kątowej $\pm 2000^\circ/s$ pozwala na dokładny pomiar przyspieszenia pojazdu i obliczenie jego kąta odchylenia.

Pomiaru kąta można dokonać tylko na podstawie pomiaru składowych przyspieszenia ziemskiego odczytywanych z akcelerometru. Należy jednak zaznaczyć, że pomiar jest poprawny wyłącznie, gdy na układ pomiarowy nie działają inne przyspieszenia. Aby spełnić to wymaganie, w czasie ruchu pojazdu należy wstępnie obliczyć przyspieszenie całego pojazdu, a następnie wyznaczyć kąt odchylenia od pionu. Obliczenie ostatniej wielkości na podstawie danych tylko z akcelerometru obarczone jest błędami związanymi z szumami pomiarowymi i przyspieszeniem pojazdu. W celu otrzymania dokładnej informacji o kącie odchylenia rozbudowano układ o żyroskop mierzący prędkość kątową wokół aktywnej osi czujnika. Niestety urządzenie to również nie jest pozbawione wad, a głównym problemem jest tzw. dryft, czyli systematyczny wzrost wartości prędkości kątowej wskazywanej przez czujnik znajdujący się w spoczynku. W związku z powyższym urządzenie to nie jest użyteczne do pomiaru wartości sta-

tycznych kąta, ale przy pomiarze stosunkowo szybkich zmian kąta wpływ dryftu jest znikomy. Ponadto również przyspieszenie liniowe nie zakłóca pomiaru przyspieszenia kąowego przez żyroskop.

3.2. Pomiary innych wielkości

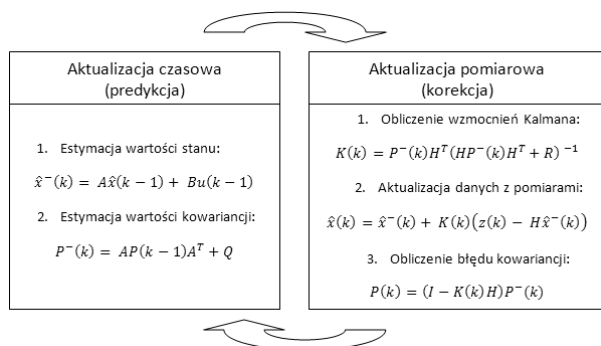
Pomiar prędkości obrotowej silników napędowych zrealizowano wykorzystując enkodery magnetyczne firmy Austriamicrosystems [6]. Pozwalają one na dużą dokładność oraz rozdzielczość pomiaru, przy małych gabarytach przetwornika i odporność na zanieczyszczenia. Jako metodę pomiaru wykorzystano pomiar impulsów w stałym okresie czasu otrzymując pomiar z rozdzielczością 9 bitów w pełnym zakresie prędkości.

Pomiar prądu twornika silników napędowych jest istotny z dwóch powodów. Pierwszym z nich jest zabezpieczenie napędów przed dużymi przeciążeniami, ale jednocześnie z możliwością dopuszczenia do krótkotrwałych kontrolowanych przeciążeń. Dodatkowo prąd twornika wykorzystywany jest w układzie regulacji silnikami napędowymi. W pojeździe zainstalowano urządzenie firmy Allegro Microsystems [7]. Przetwornik wykorzystujący efekt Hall'a pozwala dokonać pomiaru o natężeniu prądu do 200A przy ultra niskim spadku mocy na rezystancji czujnika.

3.3. Fuzja sygnałów pomiarowych

Zastosowanie kilku urządzeń pomiarowych oraz odpowiednia kombinacja danych pomiarowych (tzw. fuzja) prowadzi do otrzymania większej ilości informacji o obiekcie. Pomaga to ponadto w estymacji wartości nieznanymi wielkości. Fuzję sygnałów pomiarowych można wykorzystać na wiele sposobów. W pracy [8] zostały one użyte do wyjaśnienia różnych wejściowych danych pomiarowych, w celu budowy wiarygodnych modeli środowiska, które można wykorzystać przez inne podsystemy nawigacji. Fuzja sygnałów jest w tym przypadku procesem integrowania danych z urządzeń pomiarowych na potrzeby samolokalizacji robota, budowania map czy wykonywania ruchów.

Fuzji sygnałów z akcelerometru i żyroskopu dokonano za pomocą dyskretnego filtra Kalmana [9], w celu estymacji kąta odchylenia pojazdu. Filtr ten jest dwufazowym rekursywnym algorytmem (rysunek 5).

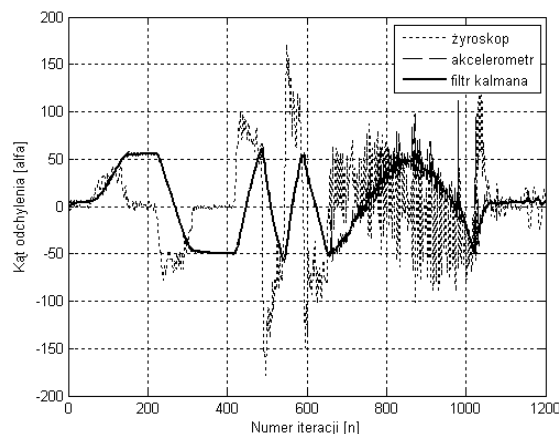


Rys. 5. Algorytm dyskretnego filtra Kalmana
Fig. 5. The algorithm of the discrete Kalman filter

W pierwszej fazie następuje aktualizacja czasowa (tzw. predykcja) bazująca na danych z poprzedniego kroku obliczeń na podstawie których wyznaczana jest estymowana wartość stanu oraz kowariancja. Druga faza filtra odpowiada za aktualizację pomiarową (tzw. korekcja). Następuje wtedy estymacja wartości stanu i kowariancji na podstawie danych pomiarowych. Faza korekcji stanowi sprzężenie zwrotne. Filtr Kalmana jest filtrem rekursywnym, co oznacza, że nie przechowuje danych z przeszłości w celu kolejnych obliczeń, natomiast bazuje jedynie na danych z poprzedniego kroku. Dane dostępne z urządzeń pomiarowych wykorzystano zarówno w fazie predykcji jak i korekcji. Wzięto pod

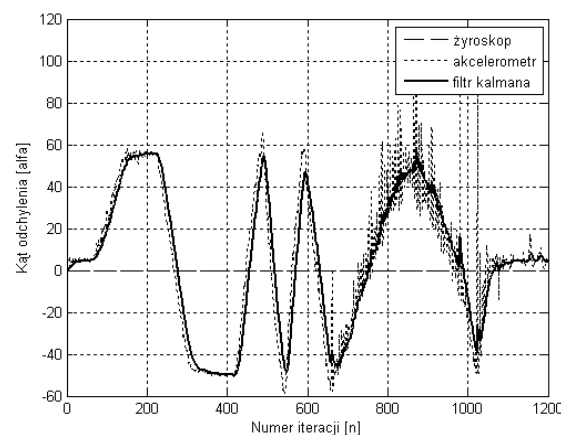
uwagę cechy charakterystyczne sygnałów pomiarowych, tj. szumy pomiarowe i dryft. W fazie predykcji uwzględniono pomiar prędkości obrotowej obarczonej dryftem, a w fazie korekcji wykorzystano dane z akcelerometru obarczone szumem pomiarowym, czyli błędem losowym-systematycznym. Rozwiązanie to pozwoliło usunąć niepożądane zjawisko dryftu dostarczając niezasumioną informację o odchyleniu.

W pierwszej kolejności dyskretny filtr Kalmana zaimplementowano w środowisku Matlab. Wszystkie badania symulacyjne wykonano na podstawie danych pomiarowych. Pozwoliło to dobrać odpowiednie wartości składowych filtra. Wyniki pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Badania symulacyjne działania dyskretnego filtra Kalmana
Fig. 6. Simulation studies of the discrete Kalman filter

Otrzymane rezultaty badań pozwalają jednoznacznie potwierdzić prawidłowe działanie filtra. Przebieg estymowanej wartości kąta odchylenia pojazdu pozbawiony jest szumu i zakłóceń, które są szczególnie widoczne po 600 iteracji działania filtra. W celu przeprowadzenia uzupełniających testów sprawdzono działanie filtra przy braku danych o prędkości kątovej otrzymywanej z żyroskopu wykorzystywanego w fazie predykcji. Rezultaty przeprowadzonych badań pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Badania symulacyjne dyskretnego filtra Kalmana bez danych z żyroskopu
Fig. 7. Simulation studies of the discrete Kalman filter without data from the gyro

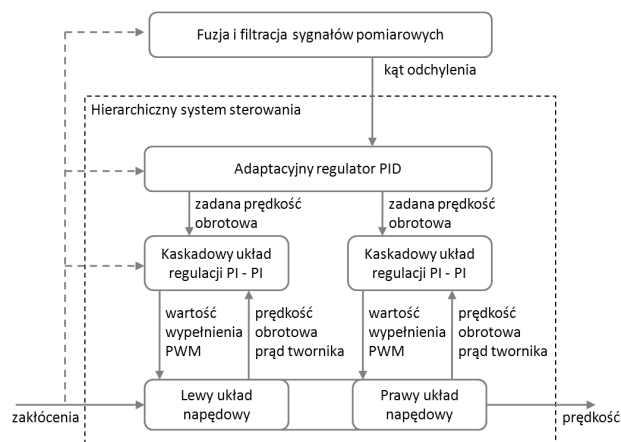
Estymowana wartość kąta pozbawiona została zakłóceń, ale obarczona jest przesunięciem fazowym. Przedstawione wyniki potwierdzają poprawne działanie filtra oraz fuzję sygnałów pomiarowych. Innym ważnym aspektem działania filtra przy niepełnych danych pomiarowych jest otrzymanie wartości kąta w przypadku uszkodzenia, np. żyroskopu, co zwiększa bezpieczeństwo prawidłowego działania pojazdu. Ostatecznie powyższy filtr zaimplementowano w pojeździe mobilnym.

4. Algorytmy sterowania

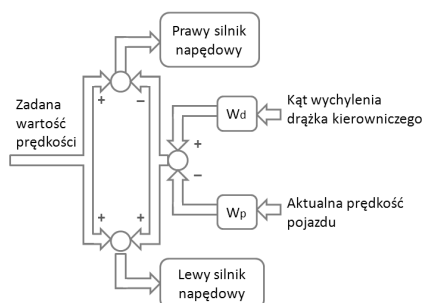
Balansujący pojazd mobilny jest przykładem mobilnego odwróconego wahadła, czyli nieliniowego, niestabilnego systemu dynamicznego. W związku z tym sterowanie tym obiektem jest trudnym zadaniem. W dalszej części, zaprojektowano, zaimplementowano i zbadano dedykowany hierarchiczny układ sterowania pojazdem w pozycji neutralnej.

4.1. Układ sterowania pozycją pojazdu oraz zmianą kierunku jazdy

Stabilizację pojazdu w pozycji neutralnej zrealizowano z wykorzystaniem adaptacyjnego regulatora PID, którego wartością zadaną jest zerowy kąt odchylenia pojazdu od osi pionowej, a informacja o aktualnym kącie odchylenia pojazdu uzyskiwana jest z dyskretnego filtra Kalmana (patrz rozdział 3.3). Adaptację parametrów regulatora zrealizowano w oparciu o aktualny kąt odchylenia pojazdu od osi pionowej. W zależności od wartości tego kąta modyfikowane są parametry regulatora dobrane wcześniej metodą heurystyczną i zapisane w postaci tablicy sterowań (ang. look-up table). Dyskretny adaptacyjny regulator PID zaimplementowano w głównej jednostce sterującej. Sygnał sterujący z regulatora odpowiada zadanej prędkości obrotowej kół napędowych pojazdu i jest przekazywany do podrzędnych układów sterowania napędami, jako wartość zadana prędkości obrotowej. Schemat hierarchicznego układu sterowania przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Hierarchiczna struktura systemu sterowania
Fig. 8. Hierarchical structure of the control system



Rys. 9. Struktura zmiany kierunku jazdy pojazdu
Fig. 9. The structure of change of the vehicle direction

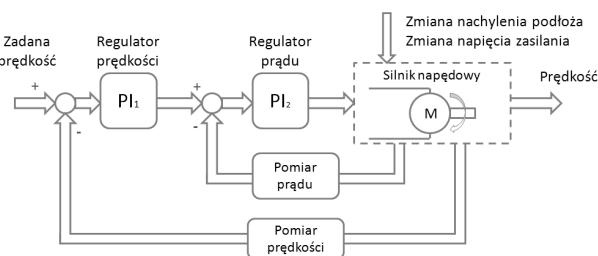
Zmianę kierunku jazdy pojazdu zrealizowano sterując silnikami napędowymi. Wymuszono, aby różnica prędkości obrotowej między kołami napędowymi powodowała zmianę kierunku jazdy pojazdu. W tym celu modyfikowana jest zadana wartość prędkości obrotowej silników napędowych wyznaczana przez nadrzędny

adaptacyjny regulator PID. Zrealizowano to na podstawie kąta wychylenia drążka kierowniczego oraz aktualnej prędkości pojazdu z odpowiednimi wagami. Takie rozwiązanie pozwala sprawnie i szybko zmienić kierunek jazdy przy małej prędkości pojazdu, co zwiększa jego zwrotność i umożliwia zawracanie w miejscu. Ponadto wraz ze wzrostem prędkości zmiana kierunku jazdy staje się płynna i łagodniejsza. Na rysunku 9 przedstawiono strukturę zmiany kierunku jazdy pojazdu.

4.2. Kaskadowy układ sterowania silnikiem prądu stałego

Kaskadowe układy regulacji są szeroko stosowane w sterowaniu nieliniowymi procesami przemysłowymi [10, 11, 12], w szczególności, gdy możliwe jest wyodrębnienie dodatkowej wielkości pomocniczej, dla której opóźnienie w stosunku do sygnału zakłócającego jest znacznie mniejsze niż opóźnienie głównej wielkości regulowanej. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie znacznie lepszej jakości sterowania w porównaniu do klasycznych jednoobwodowych układów regulacji.

Prędkość obrotowa i prąd twornika silnika napędowego są odpowiednio główną i pomocniczą wielkością w rozważanym układzie sterowania (patrz rysunek 10).



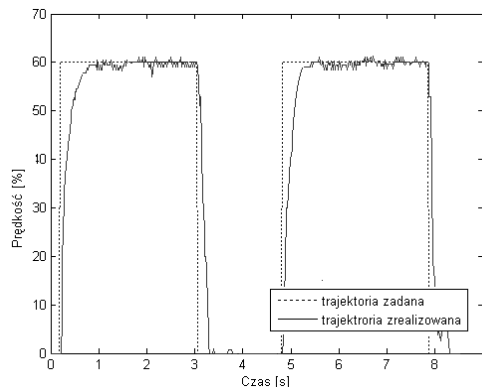
Rys. 10. Schemat blokowy kaskadowej regulacji silnikiem prądu stałego
Fig. 10. Block diagram of cascade control of the DC motor

Zaprojektowano dwa układy regulacji podrzędnej, oddzielnie dla każdego z silników napędowych, w postaci kaskadowej regulacji silnikami napędowymi z regulacją prędkości obrotowej PI_1 i prądu twornika PI_2 . Realizacja regulacji prędkości obrotowej jest ściśle związana z utrzymaniem prawidłowej prędkości oraz kierunku pojazdu. Drugi układ regulacji odpowiada za ograniczanie wartości prądu twornika oraz jego kontrolę w stanach przejściowych. Ograniczenie wartości wyjściowej regulatora prędkości jest jednocześnie ograniczeniem prądu twornika w stanach ustalonych i przejściowych.

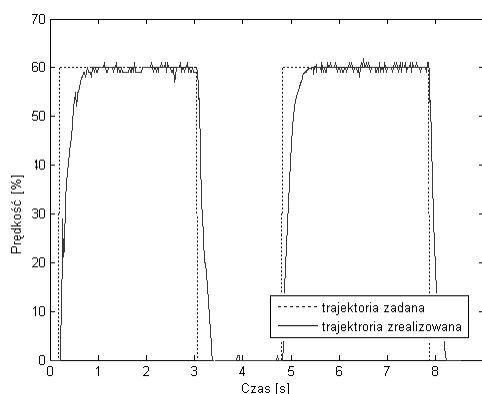
Przedstawiony układ regulacji zaimplementowano w postaci dyskretny w mikrokontrolerach układów sterowania poszczególnymi silnikami napędowymi. Przyjęto częstotliwość pracy regulatorów równą 100 Hz. Można zatem założyć, że urządzenia pomiarowe nie wprowadzają istotnego opóźnienia sygnału wyjściowego względem sygnału wejściowego.

5. Badania testowe

Pierwszym etapem przygotowania pojazdu do uruchomienia, czyli balansowania w pozycji pionowej, było dostrojenie układu regulacji kaskadowej silników napędowych. Okazało się, że układy napędowe, mimo identycznej budowy, różnią się od siebie i nastawy regulatorów należy dobierać osobno dla każdego z silników. Wykonano to eksperymentalnie zaczynając od wewnętrznego regulatora PI_2 . Następnie określono nastawy zewnętrznego regulatora PI_1 . Ostatecznie uzyskano: $K_{p1}=5.4$, $T_{i1}=0.11s$, $K_{p2}=2$, $T_{i2}=0.6s$ dla prawego silnika, oraz $K_{p1}=5.3$, $T_{i1}=0.12s$, $K_{p2}=2.4$, $T_{i2}=0.7s$ dla lewego silnika. Różne wartości nastaw wynikają z różnic konstrukcyjnych między układami napędowymi. Wyniki działania układu sterowania silnikami przedstawiono na rysunkach 11-12. Układ działa prawidłowo, a uzyskana jakość regulacji jest wysoka.

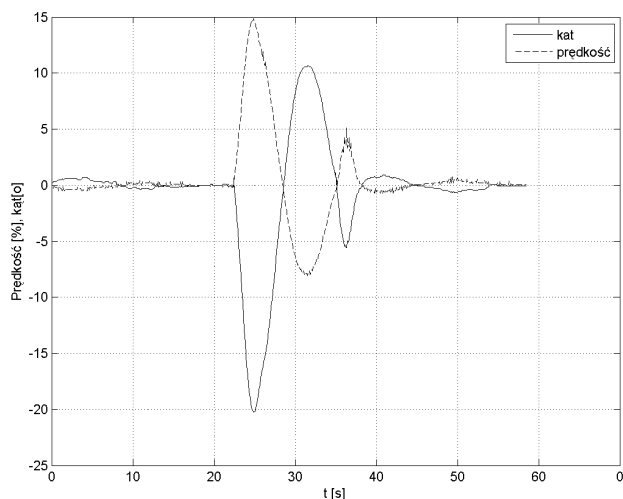


Rys. 11. Rozruch prawego silnika
Fig. 11. Starting of the right DC motor



Rys. 12. Rozruch lewego silnika
Fig. 12. Starting of the left DC motor

W następnym kroku, eksperymentalnie dostrojono nadrzędny układ regulacji odpowiedzialny za utrzymanie pojazdu w pozycji pionowej. Podczas badań okazało się, że nastawy regulatora dobrane dla balansowania pojazdu w pobliżu położenia neutralnego nie są odpowiednie przy większym kącie odchylenia pojazdu, co prowadziło do przewracania się pojazdu. Ponadto, przy większym odchyleniu pojazdu, zaobserwowano jego oscylacje wokół pozycji neutralnej.



Rys. 13. Przebiegi podczas pracy pojazdu
Fig. 13. Waveforms during the vehicle operation

W związku z tym postanowiono dokonać adaptacji parametrów regulatora w stosunku do aktualnego kąta odchylenia pojazdu. Już wstępne testy pokazały stabilniejsze balansowanie pojazdu w pozycji neutralnej oraz powrót do tej pozycji przy większej wartości odchylenia pojazdu. Na rysunku 13 przedstawiono przebiegi podstawowych wielkości pojazdu podczas samodzielnego poruszania się i po wyprowadzeniu ze stanu równowagi.

Uzyskane wyniki potwierdzają nieliniowy i niestabilny charakter pojazdu. Do 22 sekundy pojazd balansuje samoczynnie w pobliżu zerowej wartości kąta odchylenia pojazdu od osi pionowej, po czym zostaje wyprowadzony ze stanu równowagi. Stabilizowanie pojazdu trwa około 15 sekund, po czym ponownie następuje jego balansowanie w pobliżu zerowej wartości kąta.

6. Podsumowanie i kierunki dalszych prac

Prace związane z nowoczesnymi formami transportu prowadzone są intensywnie na całym świecie. W artykule przedstawiono balansujący dwukołowy pojazd mobilny oraz ogólnie opisano proces jego budowy. Następnie opisano urządzenia pomiarowe wykorzystane w pojeździe i opracowano algorytm fuzji i filtracji sygnałów pomiarowych. W dalszej części zaprojektowano hierarchiczny algorytm regulacji pojazdem, przedstawiono wyniki sterowania i dokonano ich analizy. Opisany pojazd mobilny stanowi bazę do dalszych badań. Jego modułowa struktura pozwala na zmiany programowo-sprzętowe, co umożliwi testy innych algorytmów sterowania. Aktualnie trwają prace nad przygotowaniem szczegółowego modelu matematycznego pojazdu oraz opracowaniem nieliniowego systemu sterowania pozwalającego osiągnąć punkt równowagi w sytuacji, gdy pojazd znacznie odchylił się od osi pionowej, przy niezerowych wartościach prędkości i przyspieszeń.

7. Literatura

- [1] Segway human transporter. <http://www.segway.com/>, dostęp 30.03.2012.
- [2] Project of robotnic head. <http://emys.lirec.ict.pwr.wroc.pl/>, dostęp 30.03.2012.
- [3] Pipczyński P., Piotrowski R.: Projekt techniczny i wykonanie dwukołowego balansującego pojazdu mobilnego. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2/2012, 241-246 – płyta CD.
- [4] Data sheet BMA180 v2.5, 07 December 2010.
- [5] ITG-3200 Product Specification Rev. 1.4, 30 March 2010.
- [6] Data sheet AS5040 Austriamicrosystems, Rev. 2.10.
- [7] Allegro MicroSystems, <http://www.allegromicro.com>, dostęp 30.03.2012.
- [8] Kam M., Zhu X., Kalata P.: Sensor fusion for mobile robot navigation. *Proc. of the IEEE*, Vol. 85, No. 1, pp. 108-119, 1997.
- [9] Welch G., Bishop G.: *An Introduction to the Kalman Filter*. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science Chapel Hill, NC, 2006.
- [10] Preitl Z., Bauer P., Bokor J.: Cascade Control Solution for Traction Motor for Hybrid Electric Vehicle. *Acta Polytechnica Hungarica*. Vol. 4, No. 3, 2007.
- [11] Li S., Zhang W., Zhang R., Lv D., Huang Z.: Cascade fuzzy control for gas engine driven heat pump. *Energy Conversion and Management* 46 (2005) 1757-1766.
- [12] Pisano A., Davila A., Fridman L., Usai E.: Cascade Control of PM DC Drives Via Second-Order Sliding-Mode Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No 11, November, 2008.

otrzymano / received: 16.04.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2012

artykuł recenzowany / revised paper