

## BEZZAŁOGOWY KOŁOWY POJAZD ELEKTRYCZNY DO AUTOMATYCZNEGO WYCHODZENIA Z POŚLIZGÓW

Juliusz CIECIERSKI<sup>1</sup>, Piotr DREWEK<sup>2</sup>, Adam MISIAK<sup>3</sup>, Robert PIOTROWSKI<sup>4</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. e-mail: juliusz.ciecierski@gmail.com
2. e-mail: piotr.drewek@gmail.com
3. e-mail: adammisiak3@gmail.com
4. e-mail: robert.piotrowski@pg.edu.pl

**Streszczenie:** Pojazdy bezzałogowe znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach współczesnego świata. Pojazdy autonomiczne wraz z algorytmami wspomagającymi kierowanie pojazdami skupiają uwagę wielu zespołów inżynierskich. Jednym z ważniejszych aspektów bezpieczeństwa na drogach jest wspomaganie zapobiegania i wychodzenia z poślizgów w dynamicznym środowisku. Artykuł przedstawia projekt oraz wykonanie bezzałogowego pojazdu kołowego zdolnego do automatycznego wychodzenia z poślizgów. Następnie pojazd oprogramowano oraz opracowano aplikację mobilną na urządzenia z systemem Android. Na koniec wykonano badania testowe opracowanego rozwiązania.

**Słowa kluczowe:** mechatronika, pojazd bezzałogowy, układ regulacji, automatyczne wychodzenie z poślizgów.

### 1. WSTĘP

Bezzałogowe pojazdy znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach współczesnego świata m.in.: w przemyśle, militariach, transporcie czy życiu codziennym [1]. Można je podzielić na dwie główne grupy: pojazdy sterowane zdalnie przez człowieka oraz pojazdy poruszające się autonomicznie według algorytmu ustalonego przez człowieka. Druga kategoria nie wymaga ciągłej uwagi człowieka. Cechy jakimi wyróżniają się pojazdy bezzałogowe to: zdalne sterowanie, ogromna liczba czujników zbierających pomiary, przetwarzanie zewnętrznych bodźców. Bezzałogowymi pojazdami, których prawdopodobieństwo spotkania jest najwyższe to oczywiście autonomiczne samochody oraz małe domowe roboty sprzątające. Każdy z nich charakteryzuje się różnymi dostępnymi funkcjami oraz stopniem rozbudowania. Niektóre modele posiadają rozwinięty system komunikacyjny w postaci aplikacji mobilnej. Alternatywą aplikacji mobilnych jest wiadomość tekstowa informująca np. o utknięciu robota po kilku próbach pokonania danego obszaru.

### 2. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Celem jest zaprojektowanie i skonstruowanie pojazdu, który ma możliwość poruszania się w dowolnym kierunku. Pojazd jest trzykołowy, przy czym dwa koła nie mają możliwości skrętu. Jediną możliwością skrętu pojazdu w innym kierunku jest przyspieszenie oraz spowolnienie odpowiednich kół. Dodatkowo, trzecie koło porusza się

bezwładnie. Głównym założeniem funkcjonalnym pojazdu jest, aby po wpadnięciu w poślizg samodzielnie go wykrył na podstawie wbudowanych urządzeń pomiarowych, a następnie powrócił do pierwotnego kierunku jazdy. Dzięki dołączonemu modułowi Bluetooth możliwe będzie zdalne sterowanie pojazdem za pomocą smartfona z systemem Android.

### 3. CZĘŚĆ MECHANICZNA

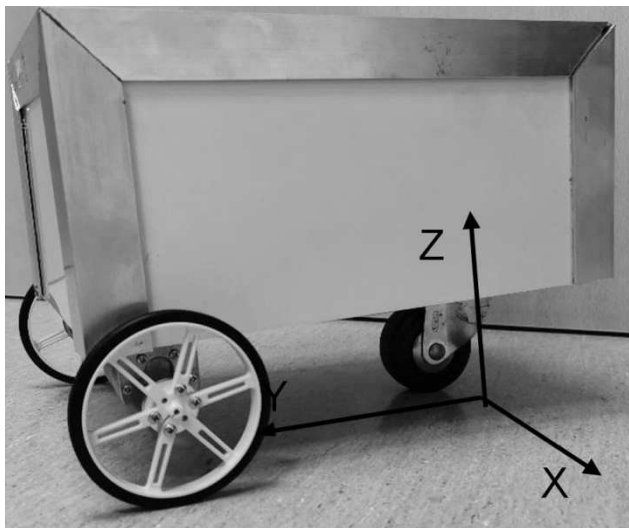
Pierwszym etapem realizacji części mechanicznej pojazdu było stworzenie projektu komputerowego – wizualizacji pojazdu. Do tego celu wykorzystano środowisko Inventor Professional 2020 [2].

Wymiary pojazdu wynoszą odpowiednio: długość – 300 mm, szerokość – 200 mm oraz wysokość 150 mm, natomiast waga konstrukcji to około 5000 g. Kolejnym aspektem będącym rozpatrywanym podczas planowania budowy pojazdu było rozważenie rodzaju napędu. Po przeprowadzeniu szeregu konsultacji oraz analizie dostępnych źródeł przyjęto, iż wykorzystane zostaną dwa silniki prądu stałego na linii przedniej osi, natomiast na tylnej linii przegubowe łożyskowane koło umieszczone centralnie. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwoliło na osiągnięcie bardzo dużych odchyłeń od trajektorii jazdy podczas poślizgu spowodowanego pchnięciem lub uderzeniem w przeszkodę.

Głównym elementem całej konstrukcji pojazdu jest prostopadłościenna klatka, do której spodu przytwierdzone są silniki na dedykowanych holderach oraz łożyskowane koło. Wspomnianą klatkę zbudowana ze stalowych profili o wymiarach 3x3 mm oraz 2x3 mm łączonych metodą spawania TIG (ang. Tungsten Inert Gas).

Do tak zbudowanej konstrukcji przymocowano holdery silników oraz koło. Ściany boczne oraz spód obito płytą warstwową, natomiast łączenia krawędzi wykonano za pomocą aluminiowych kątowników wykończeniowych. Ważnym aspektem w procesie projektowania oraz montowania elementów jezdnych było zachowanie właściwej geometrii, w celu zapewnienia pożądanego zachowania pojazdu. Do napędzania pojazdu wykorzystano dwa silniki prądu stałego marki Pololu z przekładnią 19:1. Taki zestaw zapewniał moc około 8 W. Silniki zamontowano na stałe, bez łożyska skrętnego. Zmiana

kierunku jazdy odbywać się może za pomocą różnicy prędkości obrotowej kół [3]. Pozostałe elementy, takie jak moduł sterujący, akumulator oraz inne komponenty przymocowano do podstawy pojazdu. Efekt końcowy przedstawia rys. 1.

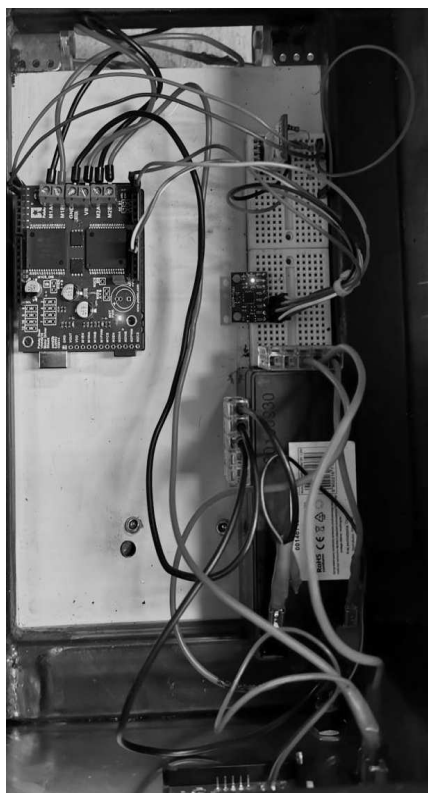


Rys. 1. Widok robota z boku

#### 4. CZĘŚĆ ELEKTRONICZNA

Jednym z kluczowych aspektów pracy nad projektem układu elektronicznego (Rys. 2) pojazdu był odpowiedni dobór części wchodzących w jego skład. Pod uwagę brany był szereg kryteriów niezbędnych do spełnienia, między innymi:

- napięcie zasilania,
- protokół komunikacyjny,
- zakresy pomiarowe,
- liczba wejść i wyjść.



Rys. 2. Zdjęcie prototypu instalacji elektronicznej

Jednostką sterującą pojazdem jest płytką programowalna Arduino Uno Rev3 oparta na mikroprocesorze ATmega328 o taktowaniu 16MHz.

Do sterowania silnikami prądu stałego wykorzystano dedykowaną nakładkę dla Arduino, Pololu VNH5019. Pozwala ona na kontrolowanie pracy dwóch silników prądu stałego w zakresie napięć od 5,5 do 24 V. Posiada możliwość sterowania prędkością oraz kierunkiem obrotu pojedynczej jednostki napędowej.

W celu komunikacji z urządzeniami zewnętrznymi zastosowano moduł Bluetooth HC-05 [4]. Wykorzystuje on komunikację szeregową UART.

W projekcie zastosowano 3-osiowy akcelerometr i żyroskop MPU-6050. Pozwala na wykonanie pomiarów prędkości oraz przyspieszenia kąowego w trzech osiach [5]. Posiada protokół komunikacyjny I2C, co ułatwia połączenie z jednostką sterującą.

Do zasilania całego układu wybrano akumulator kwasowo-ołowiowy o napięciu 12 V i pojemności 1,2 Ah.

Dodatkowo w pojeździe wykorzystano: woltomierz cyfrowy prądu stałego, gniazdo zasilające DC  $\phi 5,5 \times 2,4$  mm, przełącznik on/off.

#### 5. OPROGRAMOWANIE

Jednym z ważniejszych aspektów pojazdu jest oprogramowanie. Aby pojazd spełniał swoje zadanie, tj. wychodzenie z poślizgu oraz ustabilizowanie toru jazdy wymagany jest odpowiednio zaimplementowany algorytm. Całość oprogramowania wykonano na platformie Arduino.

W celu zapewnienia niezawodnego działania systemu należało zapewnić odpowiednią kondycję sygnału pomiarowego. Możliwe było to przy zastosowaniu algorytmów filtracyjnych. W projekcie zdecydowano się na użycie filtra Kalmana dla sygnału pomiarowego z czujnika MPU-6050. Filtr Kalmana stanowi bardzo przydatne narzędzie w wielu dziedzinach techniki. Wykorzystywany jest on między innymi w automatyce, robotyce oraz wszędzie tam, gdzie używane są pomiary rzeczywistego otoczenia [6]. Filtr Kalmana stanowi estymator stanu układu dynamicznego. Jest on implementowany głównie do eliminacji szumów występujących w sygnałach pomiarowych oraz również często do odtwarzania zmiennych stanu, niedostępnych bezpośrednio za pomocą pomiarów. Zastosowanie filtra Kalmana pozwoliło znacznie polepszyć jakość odczytów z urządzeń pomiarowych w taki sposób, aby nie były one obciążone szumami.

Aby zrealizować założone cele zaprojektowano układ regulacji. Odchylenie pojazdu od założonego kierunku jazdy może wynikać z wielu czynników. Mogą być to poślizgi, czy wytrącenia spowodowane siłami zewnętrznymi. Aby je wykryć zastosowano czujnik w postaci żyroskopu i akcelerometru obrotowego opartego na chipie MPU-6050 i wykorzystano z niego dane wychylenia kąowego w osi Z. Uzyskane z czujnika dane zostają przefiltrowane i trafiają wraz z wartością zadaną do algorytmu regulacji kierunkiem jazdy. Algorytm podzielono na kilka głównych części. Pierwszy podział wyróżnia małe zmiany odchylenia w granicach od  $-5^\circ$  do  $5^\circ$  i duże odchylenia powyżej  $5^\circ$  oraz poniżej  $-5^\circ$ . Drugi dzieli dane wejściowe ze względu na znak danych, te poniżej zera oznaczają ruch zgodny ze wskazówkami zegara, czyli poślizg w prawo, natomiast powyżej zera ruch przeciwny ruchowi wskazówek zegara

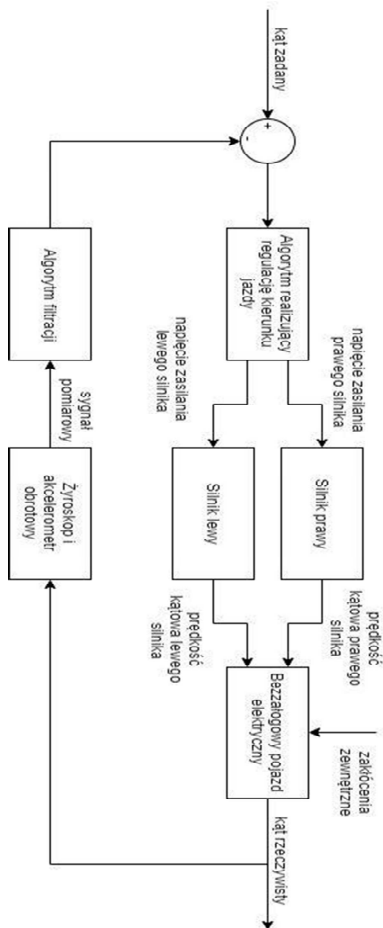
równoznaczny z poślizgiem w lewo. Aby skorygować odchylenie pojazdu w prawo należy odpowiednioysterować prawy silnik, analogicznie odchylenie w lewo koryguje się lewym silnikiem.

Schemat układu regulacji przedstawia rys. 3. W celu prawidłowego sterowania napędami zastosowano algorytmy regulatora PID dla każdego z przypadków, czyli regulatory dla niewielkich odchyżeń dla prawego silnika i lewego silnika oraz dla dużych odchyżeń zarówno dla prawego silnika, jak i dla lewego. Każdy z zestawów nastaw różni się od siebie, co bezpośrednio wynika z podziału algorytmu na dwa przedziały odchyżeń oraz na niewielkie różnice w wykonaniu prawego i lewego silnika. Nastawy regulatorów dobrano metodą doświadczalną. Wartości nastaw pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości nastaw regulatorów PID

Regulator PID	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Prawy regulator dla kątów $-5^\circ < \text{kąt}$ oraz $\text{kąt} < 0^\circ$	3	0,01	0,18
Lewy regulator dla kątów $5^\circ > \text{kąt}$ oraz $\text{kąt} > 0^\circ$	2,7	0,01	0,18
Prawy regulator dla kątów $-5^\circ > \text{kąt}$	160	0,9	80
Lewy regulator dla kątów $5^\circ < \text{kąt}$	150,2	0,9	80

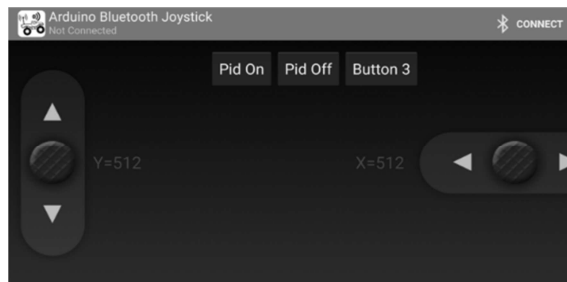
gdzie:  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  oznaczają wzmocnienia odpowiednio członów proporcjonalnego, całkującego i różniczkującego.



Rys. 3. Schemat układu regulacji

Dodatkowo zastosowano „strefę martwą” wynoszącą  $0,15^\circ$  pozostawiając niewielką tolerancję błędu wynikającą między innymi z niedoskonałości urządzenia pomiarowego. Pozwala to na zmniejszenie oscylacji wokół wartości zadanej i wydłużenie żywotności urządzeń wykonawczych.

Do ręcznego kierowania pojazdem służy ogólnodostępna aplikacja Arduino Bluetooth Joystick (rys. 4), dedykowana urządzeniom z systemem Android. Aplikacja ta pozwala na sterowanie pojazdem w osi X i Y, przy użyciu Bluetooth. Dodatkowo w aplikacji zaimplementowano funkcję umożliwiającą włączanie oraz wyłączanie algorytmu regulacji kierunku jazdy. Poprzez połączenie Bluetooth z jednostką centralną, aplikacja przekazuje wartości aktualnego położenia joysticka dla osi X i Y.



Rys. 4. Interfejs aplikacji Arduino Bluetooth Joystick

## 6. BADANIA TESTOWE

Aby sprawdzić jakość algorytmu regulacji [7] wykonana została seria badań testowych. Zbadano przeregulowanie oraz czas regulacji. Dodatkowo sprawdzana była poprawność działania algorytmów sterowania. Wszystkie wykonane badania były badaniami ilościowymi.

Przeprowadzono testy na dwóch podłożach (linoleum, płyta kamienna). W przypadku każdego testu akumulator zasilający był w pełni naładowany. Pojazd po położeniu na wybranej powierzchni oraz włączeniu akumulatora rozpoczynał ruch. Po kilku sekundach jazdy pojazd został wyprowadzony z trajektorii jazdy poprzez uderzenie w ramę. Przetestowane zostały dwa zestawy nastaw dla wszystkich 4 regulatorów. W tabeli 2 porównano wartości przeregulowania.

Tabela 2. Porównanie przeregulowań

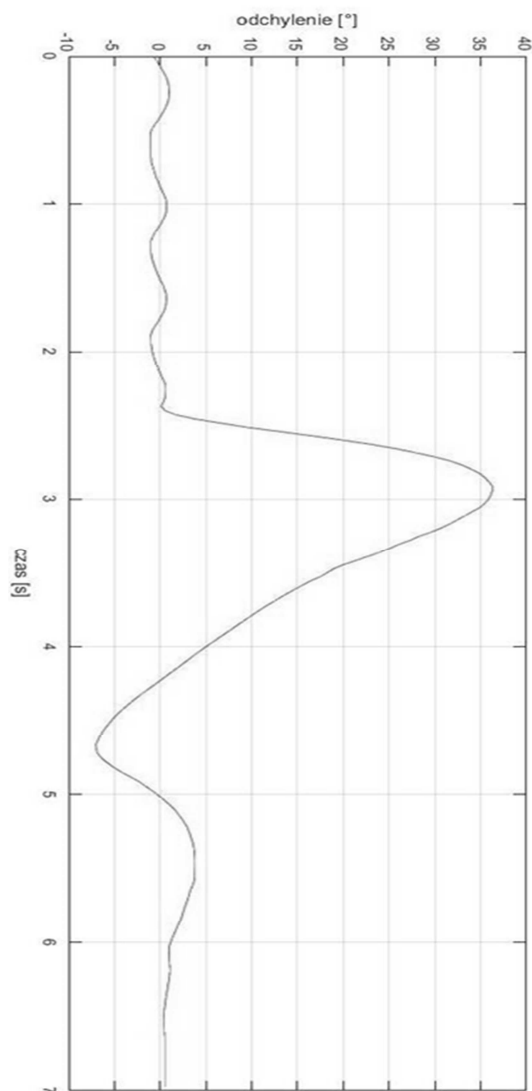
Test	Podłoże	Przeregulowanie [%]
Test pierwszy	linoleum	19
Test drugi	płyta kamienna	22,4
Test trzeci	linoleum	22,5

Nastawy regulatorów dla testu pierwszego i drugiego przedstawiono w tabeli 1. Do testu trzeciego wartości dla regulatora dla wąskiego zakresu to :  $K_p = 3$ ,  $K_i = 0,01$ ,  $K_d = 0,18$ , zaś wartości dla regulatora dla szerokiego zakresu to:  $K_p = 160$ ,  $K_i = 0,9$ ,  $K_d = 80$ .

Z tabeli 2 wynika, że najkorzystniejsze wyniki wystąpiły w pierwszym badaniu, w którym powierzchnią była wykładzina z linoleum. Można również zauważyć, że test przeprowadzony na płytach kamiennych ma podobne wyniki do badania przeprowadzonego przy takich samych zestawach nastaw dla obu grup regulatorów na wykładzinie wykonanej z linoleum. W tabeli 3 przedstawiono czas regulacji wraz z maksymalnymi odchyleniami od trajektorii jazdy. W przypadku trzeciego testu układ nie został wyregulowany z powodu śliskiego podłoża. Wykres uchybu dla pierwszego testu pokazano na rys. 5.

Tabela 3. Porównanie czasów regulacji

Test	Czas regulacji [s]	Odchylenie maksymalne [°]
Test pierwszy	3	36,3
Test drugi	2,1	49,9
Test trzeci	-	42,7



Rys. 5. Wykres uchybu dla pierwszego testu

## 7. ZAKOŃCZENIE

Celem artykułu było zaprezentowanie dedykowanego systemu kontroli oraz korekcji toru prostej jazdy bezzałogowego pojazdu elektrycznego. Założenia projektowe zostały spełnione, a przeprowadzone testy przygotowanego systemu potwierdzają poprawność jego działania. Ograniczenia sprzętowe oraz niedokładność czujników nie pozwoliły na osiągnięcie lepszych wyników.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Kim I. Y., Yang K. S., Baek J. J., Hwang S. H.: Development of Intelligent Electric Vehicle for Study of Unmanned Autonomous Driving Algorithm, School of Mechanical Engineering Sungkyunkwan University, Gyeonggi, Korea, 2013.
2. Noga B.: Inwentor. Podstawy projektowania, Helion, 2011.
3. Trojnecki M.: Modelowanie dynamiki mobilnych robotów kołowych, Oficyna Wydawnicza PIAP, Warszawa, 2013.
4. Dada E. G., Alkali A. H., Mshelia D. E., Zarma A. A.: Bluetooth Activated Robotic Car, „International Journal of Computer Engineering and Information Technology”, vol. 10, nr 8, 2018, s. 151-158.
5. Jaskot K., Babiarz A.: Układ inercyjny do pomiaru orientacji obiektów, „Przegląd Elektrotechniczny”, Vol. 86, Nr 11a, 2010, s. 323-333.
6. Welch G., Bishop G.: An Introduction to the Kalman Filter: Course 8, University of North Carolina at Chapel Hill – Department of Computer Science, 2006.
7. Jędrzykiewicz Z.: Teoria sterowania układów jednowymiarowych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowe – Dydaktyczne AGH, Kraków, 2002.

## AN UNMANNED WHEELED ELECTRIC VEHICLE FOR AUTOMATIC SKIDDING

Unmanned vehicles are used in many areas of the contemporary world. Autonomous vehicles together with control algorithms are the focus of many engineering teams. One of the most important aspects of road safety is to help prevent and recover from skidding in a dynamic environment. The paper presents the design and construction of an unmanned wheeled vehicle capable of automatic skidding. Then the vehicle was programmed and developed a mobile application for Android devices. At the end of the paper there were described tests of the developed vehicle.

**Keywords:** mechatronics, unmanned vehicle, control system, automatic skidding.