

## PROJEKTOWANIE STEROWANIA MONOCYKLEM ELEKTRYCZNYM

Michał MUŻA, Seweryn HOŁYSZ, Robert PIOTROWSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
e-mail: michalmuzza@gmail.com; sewerynholysz@gmail.com; robert.piotrowski@pg.edu.pl

**Streszczenie:** Wraz z rozwojem technologii zaobserwować można globalny wzrost zainteresowania branżą pojazdów elektrycznych. Czynniki, które pozytywnie wpływają na to zjawisko jest możliwość redukcji spalin oraz hałasu, które emitują standardowe pojazdy. Przy mniejszych, mobilnych konstrukcjach elektrycznych, dodatkową zaletą jest zmniejszenie problemu związanego z zatłoczeniem ulic. Artykuł zawiera opis projektu monocyklu elektrycznego, dla którego zaprojektowano dwa układy sterowania z filtrami Kalmana. W badaniach testowych przedstawiono wyniki sterowania.

**Słowa kluczowe:** monocykl elektryczny, filtr Kalmana, regulator PID, układ regulacji.

### 1. WPROWADZENIE

Mobilność człowieka powoduje wzmożony popyt na indywidualne środki transportu. W wyniku tego następuje wzrost liczby samochodów osobowych. Umożliwiają one szybkie przemieszczanie się, ale niestety w konsekwencji drogi stają się coraz bardziej zatłoczone. Ponadto rośnie ilość emitowanych spalin, wpływając negatywnie na środowisko. Alternatywą dla samochodów mogą być małe pojazdy elektryczne, ekologiczne i proste w eksploatacji, np. monocykle.

Monocykl jest pojazdem jednośladowym, który posiada jedno koło napędzane silnikiem elektrycznym. Pojazd nie emituje spalin, dzięki czemu jest ekologiczny. Urządzenie można również przetransportować w inne dowolne miejsce, co czyni go w pełni mobilnym. Wyzwaniem stojącym przed użytkownikiem jest umiejętność balansowania ciałem podczas jazdy.

Pojazdy oparte o zasadę zachowania równowagi w danym wymiarze posiadają szerokie spektrum zastosowań – od automatycznych odkurzaczy poprzez pojazdy służące przemieszczaniu się [1, 2]. Monocykl elektryczny nie może być sklasyfikowany jako pojazd w pełni samobalansujący, gdyż za stan zachowania równowagi odpowiada pośrednio użytkownik. Zasada działania jest jednak zbliżona do dwukołowych balansujących pojazdów mobilnych [3, 4, 5].

### 2. KONSTRUKCJA MONOCYKLU ELEKTRYCZNEGO

Głównym celem projektu było zbudowanie wytrzymałego pojazdu służącego przemieszczaniu się, opartego o zasadę zmiany kąta wychylenia użytkownika. Koszt realizacji projektu był jednym z głównych wyznaczników, dlatego też zastosowano silnik DC (ang.

Direct Current), który jest znacznie tańszy od silnika BLDC (ang. BrushLess Direct Current). Z tego powodu wygląd monocyklu znacznie odbiega od tych dostępnych na rynku. Cały pojazd zaprojektowano w programie Autodesk Inventor Professional 2017 [6]. Głównymi częściami mechanicznymi są: rama główna i przekładnia łańcuchowa. Starano się uzyskać jak najwyższą jakość wykonania, zapewniając jednocześnie bezpieczeństwo w trakcie eksploatacji pojazdu oraz wytrzymałość na przeciążenia związane z masą własną użytkownika. Zmiany prędkości podczas jazdy powinny odbywać się możliwie płynnie, bez większych szarpnięć przekładni łańcuchowej. Wymiary konstrukcji powinny być takie, aby zmieścić monocykl między nogami, przy zachowaniu komfortu dla kierowcy. Założono, że waga całej konstrukcji nie powinna przekroczyć 10 kg, czyli powinna być zbliżona do wagi komercyjnych monocykli. Czas pracy baterii powinien zapewnić około 15 minut jazdy. W konstrukcji brakuje amortyzatorów, dlatego też pojazd nie jest przystosowany do pokonywania większych przeszkód, takich jak krawężniki czy uskoki. Wygodne przenoszenie pojazdu przez przeszkody umożliwia rączka umieszczona powyżej silnika. Rysunek 1 przedstawia wykonaną prototypową wersję monocyklu elektrycznego.



Rys. 1. Monocykl elektryczny

Za część elektroniczną odpowiadają cztery odrębne podzespoły, a mianowicie: zasilanie, główna jednostka sterująca, sterownik silnika oraz urządzenie pomiarowe. Każdy z nich musi spełniać kryterium nominalnego obsługującego napięcia wejściowego oraz prądów, zarówno

ciągłych, jak i chwilowych. Do zasilania monocyklu wykorzystano akumulatory litowo-polimerowe. Kryterium wyboru było zapewnienie odpowiednio wysokiego napięcia (24 V) oraz wymaganej wydajności prądowej. Jako centralną jednostkę sterującą wykorzystano moduł Arduino UNO. Posiada on mikrokontroler ATmega328. Programowanie jednostki odbywa się w środowisku Arduino IDE z wykorzystaniem odpowiednich bibliotek [7]. Mikrokontroler posiada pin umożliwiający generowanie sygnału prostokątnego PWM (ang. Pulse Width Modulation). Z powodu zbyt dużych wartości prądów i napięć pochodzących od silnika, niemożliwym było jego bezpośrednie połączenie z modułem Arduino UNO. Niezbędnym okazało się wykorzystanie sterownika silnika BTS7960, który umożliwia ruch pojazdu w obie strony [8].

Wielkościami mierzonymi są: kąt wychylenia w stosunku do osi poziomej w pozycji stojącej monocyklu oraz prędkość obrotowa koła. Do pomiaru kąta odchylenia pojazdu wykorzystano 3-osiowy akcelerometr i żyroskop MPU6050. Akcelerometr określa aktualne położenie na podstawie wartości przyspieszenia ziemskiego działającego na daną oś. Żyroskop mierzy zmianę położenia na podstawie pomiaru obrotu względem danej osi – w projekcie jest to oś Y. Dzięki tym urządzeniom pomiar wychylenia staje się dokładniejszy [9]. Do pomiaru prędkości obrotowej monocyklu, którą potem przeliczono na wartość prędkości liniowej, wykorzystano kontaktron. Jest to łącznik elektryczny, sterowany przez pole magnetyczne. Impulsy elektryczne zliczane są, gdy kontaktron znajdzie się na tej samej wysokości, co magnes, który zamontowano na szprysze koła. Na podstawie częstości impulsów oraz znajomości promienia koła obliczana jest prędkość obrotowa pojazdu.

### 3. ALGORYTM FILTRACJI

Sygnały wysyłane przez żyroskop, w trakcie pracy silnika, były silnie zaszumione. Zatem niemożliwe było zaprojektowanie zamkniętego układu sterowania, a obiekt w otwartej pętli sterowania poruszał się w sposób nieprzewidywalny. Niezbędnym zabiegiem okazała się implementacja algorytmu filtracji. Ponieważ układ MPU6050 posiada również wbudowany żyroskop, zdecydowano się go wykorzystać do korekcji danych z akcelerometru. W celu korekcji wyników pomiaru zastosowano filtr Kalmana [10].

Filtr Kalmana, na podstawie pomiarów wejścia i wyjścia z modułu MPU6050, minimalizuje średniokwadratowy błąd estymacji. Innymi słowy, na podstawie danych odczytanych z akcelerometru (przyspieszenie kątowe) i żyroskopu (prędkość kątowa), dokonuje fuzji i filtracji sygnałów tak, aby sygnał wyjściowy

czynnikiem losowych, bądź ich sumą [11]. Jest to algorytm rekursywny, co oznacza, że bazuje na wartościach obliczonych w poprzednim kroku, nie uwzględniając danych z przeszłości. W celu implementacji algorytmu Kalmana na platformie Arduino wykorzystano dedykowaną bibliotekę dla modułu MPU6050. Dzięki temu poprawiono sygnał z akcelerometru. Filtrację oparto o model stanu, wprowadzony z zależności (1 – 4).

$$\phi(t) = \phi(t - 1) + \omega dt \quad (1)$$

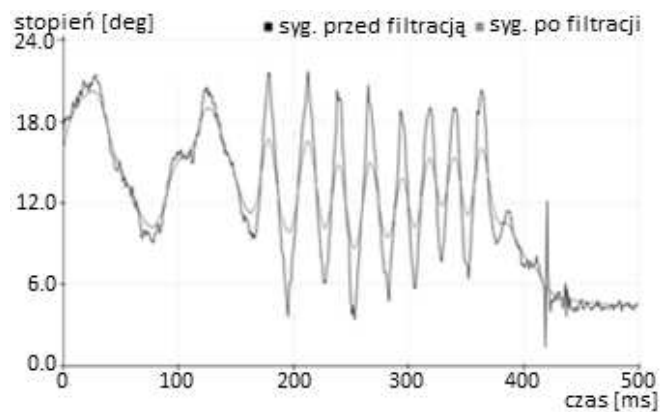
$$\omega(t) = \omega_g(t) - g(t - 1) \quad (2)$$

$$\phi(t) = \phi(t - 1) + \omega_g(t)dt - g(t - 1)dt \quad (3)$$

$$g(t) = g(t - 1) \quad (4)$$

gdzie:  $\phi(t)$  – odchylenie kątowe [rad],  $\omega(t)$  – prędkość kątowa [rad/s],  $\omega_g(t)$  – pomiar z żyroskopu [rad/s],  $g(t)$  – wartość dryftu żyroskopu [-].

Na rysunku 2 pokazano wynik działania filtru Kalmana.

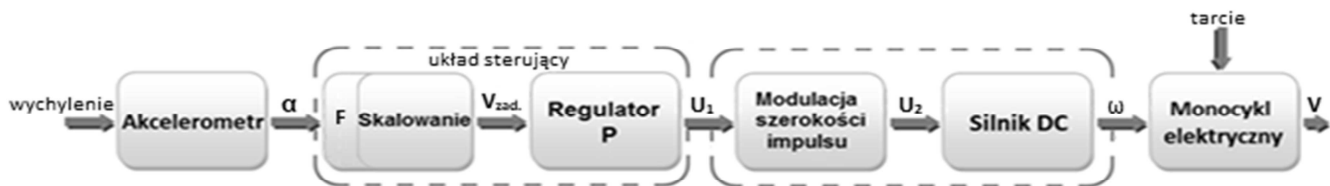


Rys. 2. Wynik działania filtru Kalmana

Sygnał przed filtracją, przy niewielkich zmianach sygnału, zachowywał dużą niepewność pomiaru. Różnice widać zwłaszcza przy stosunkowo szybkich zmianach wartości kąta wychylenia żyroskopu. Niepewność ta wprowadzała „szarpane” obroty koła monocyklu. Po zastosowaniu filtru Kalmana pomiar jest gładziej, pozbawiony błędów powodujących niepożądaną pracę monocyklu.

### 4. ALGORYTMY STEROWANIA

W układzie zaprojektowano dwa rodzaje algorytmów sterowania – w pętli otwartej z regulatorem proporcjonalnym



Rys. 3. Schemat blokowy otwartego układu sterowania z regulatorem typu P i filtrem Kalmana (gdzie:  $\alpha$  – kąt, F – filtr Kalmana,  $V_{zad}$  – prędkość zadana,  $U_1$  – napięcie wejściowe,  $U_2$  – napięcie wyjściowe,  $\omega$  – prędkość obrotowa, V – prędkość liniowa)

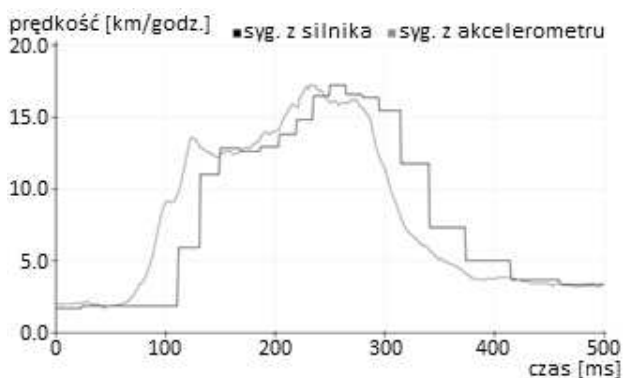
z akcelerometru pozbawić szumów. Należy jednak przyjąć, iż proces przetwarzania wewnątrz układu oraz pomiar mają charakter gaussowski, tzn. dana wielkość jest średnią

typu P oraz w pętli zamkniętej z regulatorami PI (proporcjonalno-całkujący), PD (proporcjonalno-różniczkujący) i PID (proporcjonalno-całkująco-

różniczkujący) [12]. We wszystkich strukturach dołączono filtr Kalmana.

Na rysunku 3 przedstawiono strukturę otwartego układu sterowania z filtrem Kalmana. Obiektem sterowania jest monocykl elektryczny – pojazd o jednym wejściu (prędkość obrotowa) i wyjściu (prędkość liniowa).

Na podstawie zadawanego wychylenia, akcelerometr odczytuje wartość kąta  $\alpha$ , który trafia do jednostki sterującej. Tam następuje skalowanie wartości na prędkość liniową  $V_{zad}$ , która podawana jest na wejście regulatora proporcjonalnego. Regulator wysyła wzmacniony sygnał napięciowy  $U_1$  o wartości parametru  $K_p$ . Następnie napięcie wyjściowe  $U_2$  z bloku PWM kierowane jest na silnik DC. Tym samym następuje konwersja energii elektrycznej na mechaniczną, uzyskując w efekcie prędkość obrotową  $\omega$ . Monocykl elektryczny, poprzez przekładnię łańcuchową, zamienia prędkość obrotową silnika na prędkość liniową  $V$  pojazdu [13]. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki sterowania.



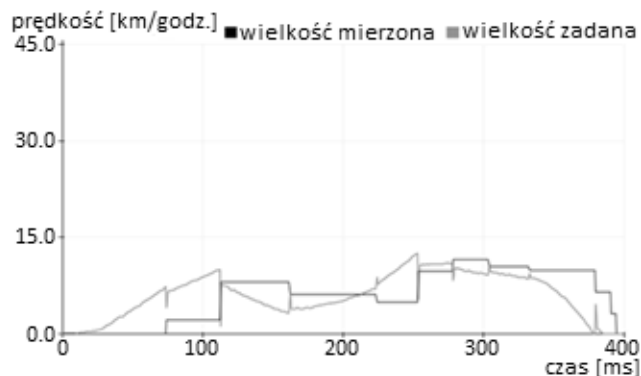
Rys. 4. Wyniki sterowania otwartego układu sterowania

Otwarty układ sterowania spełnia podstawową rolę monocyklu, jaką jest możliwość przemieszczania się. Takie rozwiązanie byłoby w pełni wystarczające i skuteczne, gdyby na obiekt sterowany nie oddziaływały zakłócenia

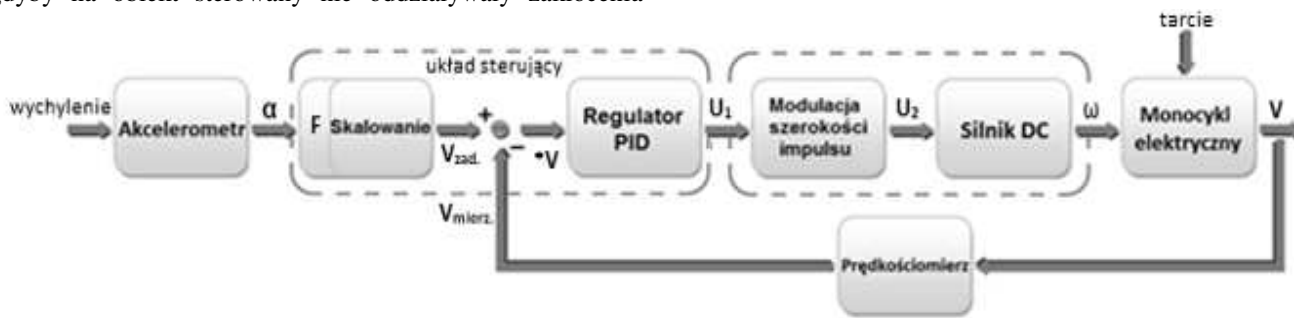
najlepszego sposobu regulacji prędkości urządzenia napędowego. Na obiekt działa wiele sygnałów zakłócających wpływających na prawidłową pracę obiektu. W głównej mierze są to siły tarcia, straty energii wynikające z przełożenia energii elektrycznej na mechaniczną oraz pozostałe opory ruchu.

Każdy typ regulatora zapewnia różną jakość sterowania oraz poprawia wybrane wskaźniki jakości sterowania. Pod uwagę zostały wzięte trzy struktury regulatora PID (PI, PD, PID). Wartością wejściową dla każdego regulatora jest uchyb prędkości.

Dobór nastaw regulatora PID jest kluczowy w prawidłowym działaniu układu regulacji. Jedną z podstawowych metod doboru nastaw jest I metoda Zieglera-Nicholsa [14]. Opiera się ona na odpowiedzi skokowej w pętli otwartej układu sterowania. Przeprowadzono identyfikację obiektu sterowania, a następnie wyznaczono wartości nastaw. Ostatecznie uzyskano, dla regulatora PI:  $K_p=1,3$ ,  $K_i=0,206$ ; dla regulatora PD:  $K_p=1,84$ ,  $K_d=0,19$ ; dla regulatora PID:  $K_p=1,61$ ,  $K_i=0,37$ ,  $K_d=0,79$ . Przyjęte oznaczenia:  $K_p$  – wzmacnienie proporcjonalne,  $K_i$  – wzmacnienie całkujące i  $K_d$  – wzmacnienie różniczkujące.



Rys. 6. Wyniki sterowania układu regulacji PID – nastawy dobrane I metodą Zieglera – Nicholsa



Rys. 5. Schemat blokowy układu regulacji z regulatorem PID i filtrem Kalmana (gdzie:  $\alpha$  – kąt, F – filtr Kalmana,  $V_{zad}$  – prędkość zadana,  $V_{mierz}$  – prędkość mierzona,  $*V$  – uchyb prędkości,  $U_1$  – napięcie wejściowe,  $U_2$  – napięcie wyjściowe,  $\omega$  – prędkość obrotowa,  $V$  – prędkość liniowa)

zewnętrzne, np. tarcie. W celu poprawy skuteczności sterowania w warunkach zakłóceń niezbędnym jest wprowadzenie układu regulacji, czyli układu sterowania z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Na rysunku 5 pokazano strukturę układu regulacji z filtrem Kalmana.

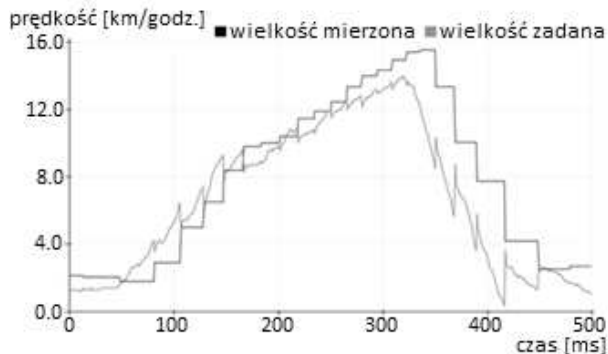
W układzie zamkniętym umieszczono urządzenie pomiarowe odczytujące aktualną wartość prędkości pojazdu, która następnie porównywana jest z wartością zadaną tej wielkości. Dzięki temu pojazd dostosowuje prędkość do masy użytkownika oraz do występujących w czasie eksploatacji zmian podłoża, tj. wzniesień i zbroczy. W pojazdach elektrycznych niezbędne jest opracowanie jak

Na rysunku 6 pokazano wyniki sterowania dla układu regulacji PID z nastawami dobranymi I metodą Zieglera-Nicholsa.

Wynik regulacji może zostać poprawiony poprzez wyznaczenie nastaw metodą testów symulacyjnych. Metoda ta bazuje na regulatorze PID, a dokładniej na modyfikacji nastaw regulatora w zależności od wymaganych wskaźników jakości sterowania. O skuteczności tej metody decyduje znajomość wpływu poszczególnych parametrów na wynik regulacji [14].

Metoda ta bywa zawodna i wysoko nieskuteczna w sytuacji, gdy użytkownik nie posiada wiedzy na temat

obiekta. W takim przypadku metody analityczne oferują dużo większą pewność regulacji. Używając metody testów symulacyjnych na podstawie wcześniejszych badań obiektu metoda ta może prowadzić do poprawy jakości sterowania. Ostatecznie wartości nastaw dobrane metodą symulacyjną wynoszą:  $K_p=1,4$ ,  $K_i=0,5$ ,  $K_d=0,25$ . Na rysunku 7 przedstawiono wyniki sterowania dla układu regulacji PID z nastawami dobranymi metodą testów symulacyjnych.



Rys. 7. Wyniki sterowania układu regulacji PID – nastawy dobrane metodą testów symulacyjnych

Widoczne jest szybkie narastanie prędkości mierzonej wobec prędkości zadanej. W stanie ustalonym nie udaje się osiągnąć wartości zadanej. Dużo ważniejszym parametrem wpływającym na eksploatację pojazdu jest jednak czas narastania, który w metodzie testów symulacyjnych jest krótszy. Dzięki temu obiekt szybciej reaguje na sygnały użytkownika, jednak nie jest to gwałtowne. Delikatne szumy pojawiają się, w wyniku wibracji silnika na ramie monocyklu, lecz nie mają one znacznego wpływu na regulację. Po implementacji regulatora monocykl działa płynnie, delikatnie dochodząc do wartości zadanej i utrzymując obroty blisko zadanej wartości.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano kilka struktur regulacji PID dla monocyklu elektrycznego. Dobierając nastawy regulatorów skorzystano z I metody Zieglera – Nicholasa oraz testów symulacyjnych. W celu filtracji sygnału pomiarowego wykorzystano filtr Kalmana. Monocykl jest płynnie działającym urządzeniem. Zaimplementowany układ regulacji okazał się skuteczny i komfortowy dla poruszania się w ruchu ulicznym.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Afonso P., Azevedo J., Carneira C., Cunha B., Lihma P., Santos V.: Challenges and solutions in an autonomous driving mobile robot competition, Proc. of the 7<sup>th</sup> Portuguese Conference on Automatic Control - CONTROLO, September 11-13, 2006, Lisbon, Portugal.
2. Freiberger F., Hermanns H.: On the Control of Self-Balancing Unicycles, Proc. of the Workshop on Models for Formal Analysis of Real Systems (MARS 2015), November 23, 2015, Suva, Fiji.
3. Kadis A., Caldecott D., Edwards A., Jerbic M., Madigan R., Haynes M., Cazzolato B., Prime Z.: Modelling, simulation and control of an electric unicycle, Proc. of the 2010 Australasian Conference on Robotics & Automation (ACRA 2010), December 1-3, 2010, Brisbane, Australia.
4. Chen P.C., Pan S.M., Chuang H.S., Chiang C.H.: Dynamics Analysis and Robust Control for Electric Unicycles Under Constrained Control Force, Arabian Journal for Science Engineering, Vol. 41 (2016), No. 11, pp. 4487-4507.
5. Srikanth B., Pavan Kumar Maddukuri S. V.: Design and Fabrication of I-Cycle, International Journal of Electronics and Electrical Engineering, Vol. 3 (2015), No. 5, pp. 359-364.
6. Kapias K.: Inventor. Praktyczne rozwiązania, Wydawnictwo Helion, 2002.
7. Datasheet Arduino UNO. [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf)
8. Datasheet BTS7960. [http://www.robotpower.com/downloads/BTS7960\\_v1.1\\_2004-12-07.pdf](http://www.robotpower.com/downloads/BTS7960_v1.1_2004-12-07.pdf)
9. Datasheet MPU6050. <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
10. Zając M.: Filtracja Kalmana w technice na przykładzie urządzenia SST, Zeszyty Naukowe WSInf., Vol. 12, No 1, 2013, s. 5-20.
11. Wawrzynek J.: Metody opisu i wnioskowania statystycznego, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu, Wrocław 2007.
12. Brzózka J.: Regulatory i układy automatyki, Wydawnictwo MIKOM, 2004.
13. Ronkowski M., Michna M., Kostro G., Kutt F.: Maszyny elektryczne wokół nas. Zastosowanie, budowa, modelowanie, charakterystyki, projektowanie, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
14. Holecjo D., Kościelny W. J.: Automatyka procesów ciągłych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.

## CONTROL DESIGN OF ELECTRIC MONOCYCLE

The development of electric vehicles has been observed in recent times. The factors that positively influence this phenomenon are the reduction of exhaust emissions and noise emitted by standard vehicles. With smaller, mobile electrical structures, an additional advantage is to reduce the congestion problem. The article contains a description of the design of an electrical monocyte for which two control systems with Kalman filters are designed. Control results are presented in the test studies.

**Keywords:** electric monocyte, Kalman filter, PID controller, control system.