

*Arduino, zdalne sterowanie,  
kontrola trajektorii ruchu,  
napęd elektryczny*

Ramuald HATOUKA, Marcin KAMIŃSKI\*

## **ZASTOSOWANIE MODUŁU ARDUINO W UKŁADZIE ZDALNEGO STEROWANIA ROBOTEM MOBILNYM**

Celem opisanego projektu było wykonanie pojazdu zdalnie sterowanego, wykorzystującego elektryczny napęd gąsienicowy. Jednym z najistotniejszych założeń było zastosowanie taniego układu programowalnego, dla którego kod może być implementowany za pomocą języka wysokiego poziomu. W związku z tym część elektroniczną pojazdu, dotyczącą sterowania napędem elektrycznym oraz transmisją danych zbudowano wykorzystując moduł Arduino. Sterowanie wyżej wymienionym pojazdem dotyczyło trajektorii ruchu wykonanego modelu oraz platformy wykonawczej zamieszczonej na pokładzie.

### **1. WPROWADZENIE**

Obecnie projekty oraz konstrukcja robotów mobilnych specjalnego przeznaczenia stanowią jeden z istotnych trendów prac inżyniersko-naukowych [1]–[5]. Ze względu na zdalne sterowanie oraz szerokie spektrum wyposażenia, urządzenia tego typu znajdują wiele zastosowań, szczególnie w warunkach zagrażających życiu i zdrowiu człowieka. Poniżej przedstawiono kilka przykładów wykorzystania zdalnie sterowanych robotów mobilnych.

- Wykrywanie, rozbrajanie, a także transport ładunków wybuchowych.
- Poruszanie się w kosmosie, pobieranie oraz analiza próbek gruntów, elementów otoczenia. W tym celu roboty wyposażane są w technologie *Lab-on-a-chip*, umożliwiającą przeprowadzenie nieskomplikowanej analizy chemicznej bezpośrednio po pobraniu próbki [6], [7].
- Transport wyposażenia militarnego w trudno dostępnych rejonach.
- Działania operacyjne straży pożarnej.

---

\* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: romus.mail@yandex.ru, marcin.kaminski@pwr.edu.pl

Zakres zastosowań zdalnie sterowanych urządzeń mobilnych, nazywanych również łazikami, jest znacznie szerszy jeśli roboty są dostosowane do poruszania się w trudnym terenie. W związku z powyższym zastosowane, w trakcie projektowania oraz realizacji, rozwiązania konstrukcyjne powinny zapewnić pokonywanie przeszkód takich jak: krawężniki, schody, zavalone drzewa, gęste zarośla, błoto itp. W tym celu w projektach wykorzystywane są napędy gąsienicowe, bazujące na dwóch rodzajach gąsienic: twarde (wykonane ze stopów metali, oddzielnych elementów łączonych w całość) oraz miękkie (polimerowe, wykonane jednolicie).

Algorytmy sterowania stosowane w robotach najczęściej dotyczą nie tylko samego sterowania położeniem lub prędkością układów wykonawczych, lecz uwzględniają również kinematykę urządzenia oraz współpracę z elementami zewnętrznymi (np. panelem zdalnego sterowania) [8],[9]. W wielu przypadkach programy są bardzo złożone, zatem układ programowalny realizujący obliczenia odgrywa jedno z najistotniejszych zadań w konstrukcji robota. Obecnie rozwój technologii jest coraz bardziej ukierunkowywany w stronę szybkiego prototypowania (*rapid prototyping*) [10],[11]. Jest to uwarunkowane przede wszystkim znaczącym wzrostem zapotrzebowania na takie układy. Przykładowymi platformami takiego typu są: Arduino, Raspberry Pi, Beagleboard oraz dSpace. Moduły główne, opierające się na systemie Arduino, umożliwiają znacznie szybszą implementację kodu oraz ułatwiają praktyczną implementację części sprzętowej.

Zastosowana w projekcie platforma prototypowa Arduino, umożliwia znacznie szybsze wykonanie urządzeń, bazujących na systemach cyfrowych. Modułem głównym Arduino nazywany jest obwód drukowany zawierający mikrokontroler oraz elementy peryferyjne niezbędne do jego poprawnego działania. Ważną zaletą platformy jest to, iż proces programowania modułów nie wymaga wykorzystania elementów pośrednich, takich jak programatory. Język Arduino został stworzony na bazie znanego języka programowania C++. W celu kompilowania kodu programu jest wykorzystywany kompilator AVR-GCC. Nie zważając na znaczne podobieństwo tych dwóch środowisk programistycznych, język Arduino jest zaliczany do języków wyższego poziomu. Oznacza to, iż jest on prostszy do opanowania niż język C++ oraz, że stworzenie programu w tym środowisku zajmuje znacznie mniej czasu [12].

Niniejszy artykuł podzielono na pięć części, po wprowadzeniu zaprezentowano algorytm przetwarzania informacji w wykonanym robocie. Następnie przedstawiono wybrane etapy realizacji łazika. Praca została zakończona opisem testów robota oraz podsumowaniem.

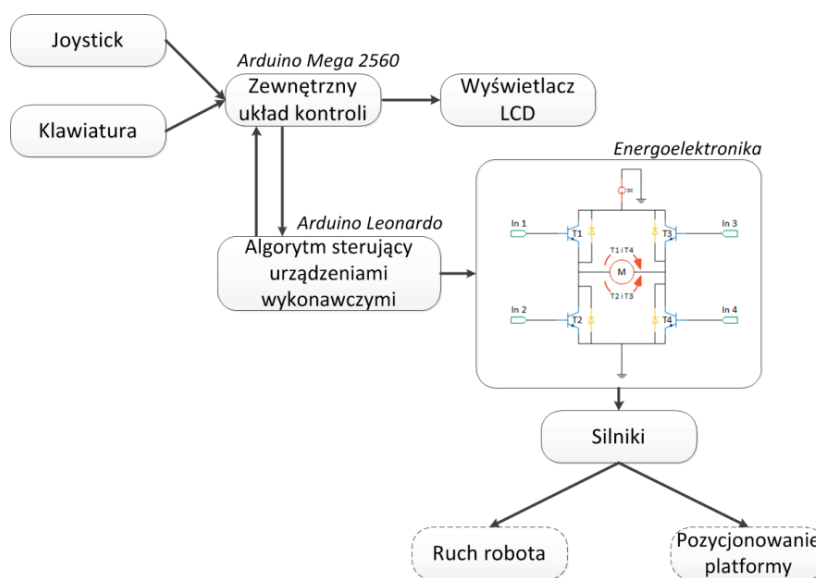
## 2. STRUKTURA STEROWANIA ROBOTEM

Sterowanie zaprojektowanym robotem jest realizowane za pomocą dwóch zestawów Arduino: Arduino Mega2560 oraz Arduino Leonardo. Pierwszy z nich analizuje

sygnały zadane, odczytywane z joysticka, przycisków lub wymusza realizację zaprogramowanej trajektorii. Do modułu Arduino Mega 2560 podłączono:

- wyświetlacz alfanumeryczny,
- klawiaturę membranową,
- dwa potencjometry dwuosiowe z dodatkowym przyciskiem,
- moduł transmisji radiowej.

W dalszym ciągu realizacji programu wywoływane są kolejno funkcje, odpowiadające za analizę i obrabianie danych dotyczących układu napędowego pojazdu oraz funkcji przesyłającej telegram cyfrowy do modułu odbiorczego. Uruchomiona zostaje funkcja przeprowadzająca analizę oraz obliczenia zmiennych dynamicznych wyświetlanych na wyświetlaczu alfanumerycznym.



Rys. 1. Schemat algorytmu sterującego

W odróżnieniu od modułu Arduino Mega 2560, zadaniem Arduino Leonardo jest pośrednie sterowanie elementami wykonawczymi. Głównym zadaniem tego modułu Arduino Leonardo jest sterowanie układem napędowym poprzez wykorzystanie podwójnego mostka H, oraz sterowanie dwoma serwomechanizmami, służącymi jako napędy w ramieniu o dwóch stopniach swobody. Takie sterowanie zostało wykonane za pomocą modulatora szerokości impulsów (PWM). W celu wysterowania wszystkimi układami napędowymi niezbędne jest sześć wyjść PWM. W tej części układu nie były wymagane duże moce obliczeniowe, ponieważ cały proces przetwarzania danych zrealizowano na module umieszczonym w panelu operatorskim. Taka decyzja konstrukcyjna została obrana ze względu na to, iż moduł główny umieszczony w pojeź-

dzie, musi posiadać możliwie najmniejsze gabaryty, spowodowane jest to ściśle określonymi wymiarami geometrycznymi pojazdu. Ogólna idea sterowania robotem została zaprezentowana na rysunku 1.

### 3. REALIZACJA PRAKTYCZNA ROBOTA

W trakcie wykonywania opisywanego łożnika wykonywano równolegle część montażową oraz implementowano algorytm sterowania do mikrokontrolerów zastosowanych w robocie. Poniżej zamieszczono bardzo krótką specyfikację (zwrócono uwagę na elementy szczególnie istotne dla realizacji zadania) układów Arduino zastosowanych w projekcie.

Arduino Leonardo jest to płyta bazowa oparta na mikrokontrolerze ATmega32u4 taktowanego za pomocą rezonatora kwarcowego o częstotliwości 16 MHz. Posiada ona 7 kanałów PWM, 12 wejść analogowych oraz 20 kanałów cyfrowych. Moduł jest zasilany napięciem z zakresu od 7 V do 12 V. Mikrokontroler zastosowany w tym module głównym posiada 32 KB pamięci Flash, do której jest wgrywany skompilowany kod programu, przy czym 4 KB są zarezerwowane dla systemu operacyjnego Bootloader.

W panelu operatorskim zastosowano został moduł Arduino Mega 2560. Elementem centralnym układu jest mikrokontroler Atmega 2560 posiada on 256 KB pamięci Flash, z których 8 KB są zarezerwowane dla systemu operacyjnego. Jest on taktowany za pomocą rezonatora kwarcowego o częstotliwość 16 MHz. Arduino Mega 2560 posiada 54 kanały cyfrowe, 15 kanałów PWM, 16 wejść analogowych. Zasilanie płyty bazowej przebiega analogicznie do modelu Arduino Leonardo. W odróżnieniu od Arduino Leonardo moduł główny Arduino Mega posiada dwa mikrokontrolery:

- główny ATmega 2560,
- pomocniczy ATmega 16 u2.

Zastosowanie drugiego mikrokontrolera jest spowodowane tym, że w ATmega2560 nie została uwzględniona bezpośrednia komunikacja z portem USB. Jak było wspomniane wyżej, jedną z zalet projektu Arduino jest bezpośrednie programowanie układu. Ten problem został rozwiązany przez projektantów Arduino poprzez stworzenie zintegrowanego programatora na bazie mikrokontrolera ATmega16u2.

W celu zapewnienia transmisji radiowej wykorzystano dwa moduły nRF24L01. Zostały one wybrane ze względu na niski koszt oraz wystarczającą funkcjonalność. Podłączenie modułu radiowego do mikrokontrolera jest realizowane za pomocą magistrali szeregowej SPI, poprzez kanały MISO, MOSI, SCK. Kanał SCK odpowiada za taktowanie modułu, MOSI – przesył danych wyjściowych, MISO – przesył danych wejściowych. Moduł nRF24L01 umożliwia komunikacje na 126 kanałach. Zerowy kanał pracuje na częstotliwości 2400 MHz. Częstotliwościowe pasmo pracy dla każdego kolejnego kanału jest zwiększane o 1 MHz, tak dla kanału 70 pasmo częstotliwości

ściowe odpowiada wartości 2470 MHz. Wybrany moduł może pełnić funkcje nadajnika jak i odbiornika, ustawiane jest to programowo. Warty zaznaczenia jest to, że dane moduły posiadają funkcje wysłania komunikatów wstępnych i zwrotnych. Komunikatem wstępnym nazywany jest słowo cyfrowe wysyłane przez odbiornik do nadajnika przed rozpoczęciem transmisji danych. Celem takiego zabiegu jest zlikwidowanie możliwości utraty danych poprzez brak gotowości modułu odbierającego. Często w terminologii programistycznej komunikat wstępny jest nazywany protokołem inicjalizującym transmisję danych, bez wykonania którego, moduł nadający nie ma prawa do rozpoczęcia przekazu pakietu danych. Komunikat zwrotny jest także informacją wysyłaną przez moduł odbierający, zadaniem którego jest zweryfikowanie poprawności przeprowadzonej transmisji. Komunikat wysyłany jest po odbiorze oraz zaakceptowaniu informacji, jeżeli nie zostanie on wysłany w określonym czasie moduł nadający zwróci błąd i przekaz danych zostanie powtórzony.

W realizacji części mechanicznej zastosowano dwa zestawy elementów konstrukcyjnych: Tamiya 70100 Track and Wheel Set oraz Tamiya 70157 Uniwersal Plate Set. W celu połączenia kół napinających z podwoziem zostały zastosowane osie metalowe o średnicy 3 mm. W podwoziu zamontowano także mocowane silniki Pololu HP 250:1, poprzez zastosowanie specjalnych mocowań Pololu 989.

Istotną częścią budowy każdego modelu autonomicznego jest właściwy dobór zasilania. W projekcie zastosowano litowo-polimerowe źródło zasilania. Pomimo tego, iż akumulator litowo-polimerowe posiadają znacznie lepsze właściwości napięciowo-prądowe w stosunku do innych źródeł zasilania, mają one tak, że jedną bardzo znaczącą wadę. Mianowicie akumulator wymaga ciągłego monitorowania stanu napięcia, ponieważ rozładowanie poniżej wartości krytycznej skutkuje trwałym uszkodzeniem elementu. Problem ten rozwiązano poprzez implementację dedykowanego do tego celu wskaźnika napięcia. Układ ten wykonuje pomiar napięcia na poszczególnych elementach akumulatorowych pakietu zasilającego. Posiada on również funkcje, umożliwiającą ustawienie poziomu napięcia krytycznego. Rozładowanie akumulatora poniżej tego poziomu powoduje sygnalizację poprzez diodę uruchomienie zintegrowanego „buzera”.

Schemat układu elektronicznego oraz model obwodu drukowanego, zostały wykonane za pomocą programu komputerowego EAGLE 7.0.0. Na tej podstawie, za pomocą fototransferu, zrealizowano rzeczywistą płytkę montażową przystosowaną do potrzeb projektu.

#### 4. TESTY WYKONANEGO MODELU

Po zrealizowaniu modelu przeprowadzono testy, których zadaniem jest sprawdzenie poprawności działania robota. Układ jest sterowany poprzez panel operatorski, przedstawiony na rysunku 2.Opis elementów, za pomocą których jest realizowane

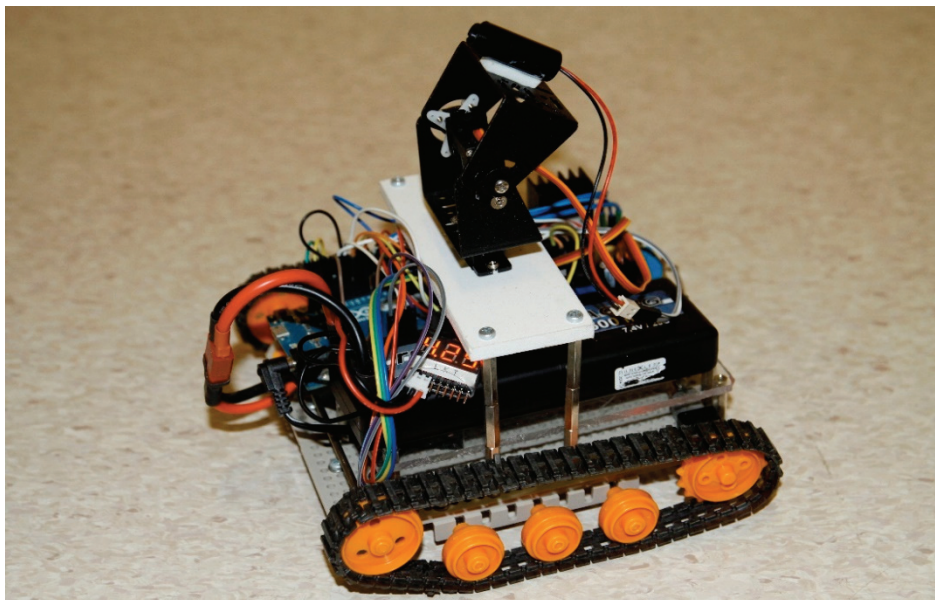
sterowanie, został zamieszczony na rysunku 3. Ostateczną postać modelu zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 2. Panel operatorski



Rys. 3. Opis elementów sterowniczych



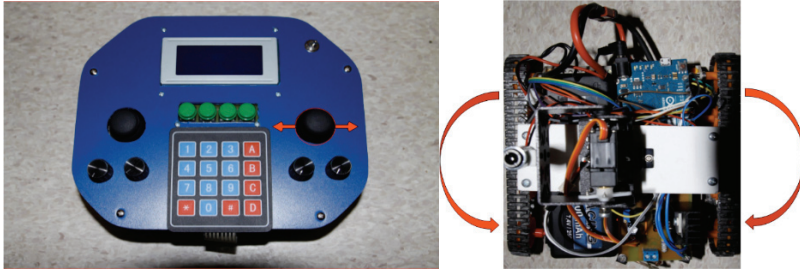
Rys. 4. Model pojazdu

Sterowanie torem ruchu pojazdu jest realizowane, za pomocą prawego potencjometru dwuosowego zamieszczonego na panelu operatorskim. Na rysunkach 5–7 widać zmianę toru ruchu pojazdu w zależności od położenia potencjometru. Maksymalna prędkość zostaje osiągnięta przy pełnym wychyleniu elementu sterującego. Skrećanie pojazdu jest zrealizowane na dwa sposoby:

- pierwszy został zaprezentowany na rysunku 6, pojazd wykonuje szybki obrót w miejscu, efekt ten został osiągnięty poprzez ruch gaśienic w przeciwnych kierunkach,
- w drugim sposobie (rysunek 7) pojazd wykonuje zakręt ‘po łuku’ na wskutek tego, iż gaśienice obracają się z różną prędkością obrotową.



Rys. 5. Panel operatorski oraz łazik w trakcie ruchu według liniowej trajektorii



Rys. 6. Panel operatorski oraz łożak w trakcie zmiany kierunku ruchu (obrót łożaka)



Rys. 7. Panel operatorski oraz łożak w trakcie zmiany kierunku ruchu (skręcanie)

Kontrola położenia platformy obrotowej jest realizowane, za pomocą lewego potencjometru dwuosowego. Na rysunkach 8 oraz 9 przedstawiono przykład takiego sterowania. Potencjometry dwuosowe pełnią także funkcje przycisku dwustanowego. Naciśnięcie lewego potencjometru spowoduje ustawienie się platformy w pozycje początkową, natomiast prawego – załączenie, lub wyłączenie modułu laserowego.



Rys. 8. Obrót platformy wokół osi pionowej





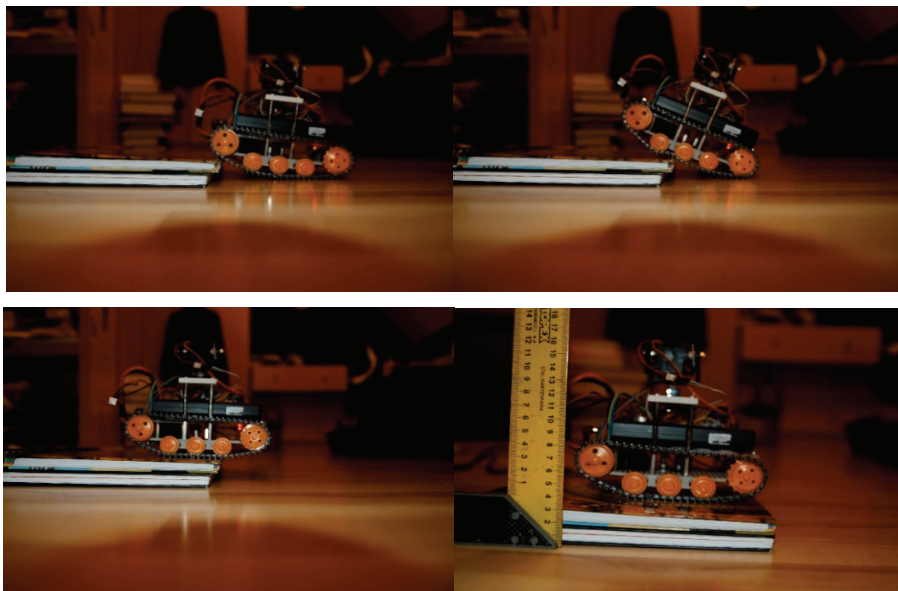
Rys. 9. Obrót platformy wokół osi poziomej

W trakcie obsługi robota istnieje możliwość zmiany trybu sterowania z ciągłego na precyzyjny (poprzez naciśnięcie zielonego przycisku). W tym trybie sterowanie jest realizowane bezpośrednio z klawiatury (rysunek 10). Określenie zmiennej, której wartość ma zostać skorygowana, jest realizowane za pomocą kursora, uruchomianego wraz z załączeniem tego trybu. Zmiana położenia kursora na wyświetlaczu jest wykonywana za pośrednictwem prawego potencjometru dwuosiowego. Wartość zaznaczonej przez kursor zmiennej jest ustawiana, za pomocą klawiatury membranowej. Przycisk „\*” powoduje powrót do sterowania ciągłego. W trybie sterowania precyzyjnego modyfikowane mogą być następujące nastawy:

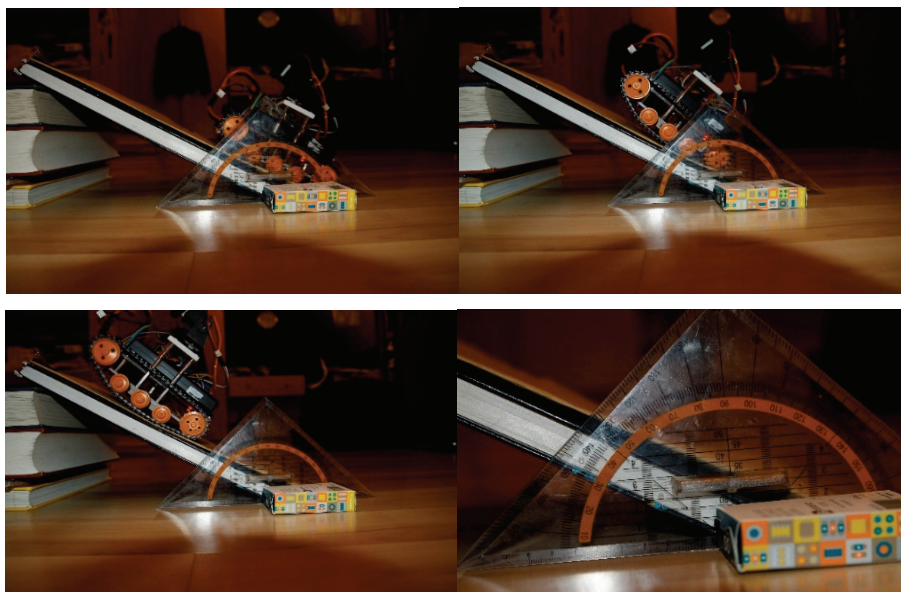
- ograniczenie maksymalnego napięcia zasilającego silniki prądu stałego,
- kąt odchylenia platformy obrotowej względem osi poziomej,
- kąt odchylenia platformy obrotowej względem osi pionowej,
- prędkość obrotowa serwomechanizmów.



Rys. 10. Sterowanie precyzyjne za pomocą klawiatury membranowej



Rys. 11. Testy robota – pokonywanie przeszkody



Rys. 12. Testy robota – przejazd po równi pochyłej

W ostatnim etapie testów analizowano możliwość pokonywania przez wykonany model łożnika, przeszkód terenowych. Badano działanie robota w przypadku

niewielkiej przeszkody (28 mm) oraz pokonywania równi pochyłej (30°). Kolejne sekwencje, prezentujące przemieszczanie urządzenia zamieszczono na rysunkach 11 oraz 12.

Przeprowadzone testy układu wykazały, że wszystkie elementy modelu działają poprawnie. Straty ciepłnie na układach energoelektronicznych, mieszczą się w zakresach temperaturowych, podawanych przez producentów w notach katalogowych. Zrealizowana transmisja radiowa wykazała bardzo wysoką stabilność. Podczas przeprowadzenia długotrwałych prób układu, mających na celu rozładowanie elementu zasilającego, została zachowana ciągłość łącza sterującego. Pojazd posiada bardzo wysoką precyzję sterowania. Zostało to osiągnięte dzięki wykonaniu precyzyjnego trybu sterowania. Pozwala on na wprowadzenie ograniczeń, umożliwiających ustalenie wymaganych parametrów, dotyczących zarówno ruchu pojazdu, jak i położenia platformy obrotowej.

## 5. PODSUMOWANIE

Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję, elementy konstrukcyjne oraz testy zdalnie sterowanego łoża. Osiągnięto wszystkie założenia projektowe dotyczące właściwości ruchowych robota: precyzję sterowania oraz skuteczne pokonywanie przeszkód. Zaprezentowane urządzenie może stanowić przykład realizacji niewielkiego oraz taniego robota. W dalszych pracach planowane jest rozwinięcie układu sterowania obiektem, poprzez wprowadzenie zamkniętej struktury sterowania z regulatorami adaptacyjnymi.

## LITERATURA

- [1] KREBS A., RISCH F., THUEER T., MAYE J., PRADALIER C., SIEGWART R., *Rover control based on an optimal torque distribution – Application to 6 motorized wheels passive rover*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010, 4372–4377.
- [2] CHOUMUANG R., *Distributed Control on a model of Mars Rover Spirit*, IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2008, 1–7.
- [3] RUI X., HUIPING J., SHENGJING T., PINGYUAN C., FUZHAN Y., *Analyzing and designing of lunar rover motion controller*, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007, 1574–1579.
- [4] NISHIDA S., WAKABAYASHI S., *Analyses for mobility and control system of lunar rover*, Proceedings of SICE Annual Conference, 2010, 799–803.
- [5] HUNTSBERGER T., AGHAZARIAN H., TUNSTEL E., *Onboard Adaptive Learning for Planetary Surface Rover Control in Rough Terrain*, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, 4156–4163.
- [6] HEROLDK. E., RASOOLY A., *Fundamentals Lab on a Chip Technology: Fabrication and microfluidics*, Horizon Scientific Press, 2009.
- [7] MONGILLO J.F., *Nanotechnology 101*, ABC-CLIO, 2007.

- [8] MESZYŃSKI S., JÓZEFOWICZ M., *Analog Mars Rover Service as a Robotic Hardware and Team Building Platform*, GSTF Journal of Engineering Technology (JET), 2013, Vol. 2, No. 3, 52–60.
- [9] WETTERGREEN D., TOMPKINS P., URMSON C., WAGNER M., WHITTAKER W., *Sun-Synchronous Robotic Exploration: Technical Description and Field Experimentation*, The International Journal of Robotics Research, 2005, Vol. 24, No. 1, 3–30.
- [10] CARTER P.W., *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Winding Conference, 2001. Proceedings*, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference, 2001, 107–114.
- [11] WON J., DELAURENTIS K., MAVROIDIS C., *Rapid prototyping of robotic systems*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, Vol. 4, 3077–3082.
- [12] <http://arduino.cc/>

#### APPLICATION OF ARDUINO IN REMOTE CONTROL SYSTEM OF MOBILE ROBOT

The main goal of described project was realization of a remote-controlled vehicle (track drive robot). One of the most important assumption was application of cheap programmable board that can be coded using high level language. Accordingly, the supervisor unit is based on Arduino platform. In made robot, the trajectory of whole machine and executive platform are controlled.