



**Politechnika
Śląska**

PROJEKT INŻYNIERSKI

Bezzałogowa platforma gąsienicowa.

Szymon NOWACKI

Nr albumu: 298966

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Automatyka i Eksploatacja Inteligentnych Budynków

PROWADZĄCY PRACĘ

dr inż. Andrzej Kozyra

KATEDRA Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Gliwice 2024

Tytuł pracy

Bezzałogowa platforma gąsienicowa.

Streszczenie

Tematem niniejszej pracy inżynierskiej jest projekt i konstrukcja bezzałogowego pojazdu gąsienicowego oraz implementacja algorytmów jego sterowania. Przedmiotem pracy jest kompleksowy proces projektowania takiej platformy, uwzględniający aspekty mechaniczne, elektroniczne oraz programistyczne. Omówione również zostały prace związane z konstrukcją i testowaniem wszystkich komponentów systemu.

Słowa kluczowe

Arduino, pojazd, BLDC, gąsienice

Thesis title

Unmanned crawler platform.

Abstract

The subject of this study is the design and construction of an unmanned tracked vehicle and the implementation of algorithms for its control. The subject of the work is the process of designing such a platform, including mechanical, electronic and programming aspects. Also discussed is the work involved in the construction and testing of all components of the system.

Key words

Arduino, crawler, BLDC, tracks

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Wprowadzenie	1
1.2	Cel projektu	2
1.3	Założenia projektowe	2
1.3.1	Założenia dotyczące części sprzętowej	2
1.3.2	Założenia dotyczące części elektronicznej i programowej	3
2	Konstrukcja mechaniczna	5
2.1	Układ jezdny	5
2.1.1	Elementy gąsienicowego układu jezdnyego	5
2.1.2	Konfiguracje przestrzenne układów napędu gąsienicowego	6
2.1.3	Techniki wykonania gąsienic napędowych	7
2.1.4	Wybrana konfiguracja	8
2.2	Rama	9
2.3	Układ napędowy	10
2.3.1	Bezszcotkowy silnik prądu stałego	11
2.3.2	Przekładnia zębata	11
3	Elektronika	13
3.1	Mikrokontroler	13
3.2	Płytki PCB	15
3.2.1	Sekcja zasilania	17
3.2.2	Mikrokontroler i wyprowadzenia jego wyjść	17
3.2.3	Układ przetwarzania sygnałów	18
3.2.4	Złącza dodatkowych komponentów	19
3.3	Pozostałe elementy układu elektronicznego	19
3.3.1	Odbiornik RC	19
3.3.2	Oświetlenie LED	20
3.3.3	Sterowniki ESC	21
3.3.4	Enkodery	21
3.3.5	Akumulator	22

4	Oprogramowanie	23
4.1	Zagadnienia realizowane przez oprogramowanie	23
4.1.1	Sterowanie prędkością w sprzężeniu zwrotnym	23
4.1.2	Przetwarzanie impulsów enkodera	24
4.2	Wykorzystane technologie	26
4.3	Struktura programu	26
5	Walidacja	29
6	Podsumowanie i wnioski	33
6.1	Podsumowanie przeprowadzonych prac	33
6.2	Możliwości dalszej rozbudowy	35
	Bibliografia	38
	Spis skrótów i symboli	41
	Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy	43
	Spis rysunków	46

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Współczesna technologia otwiera przed nami prawie nieskończone możliwości jeśli chodzi o konstruowanie nowoczesnych robotów mobilnych. Jedną z dziedzin, która obecnie szczególnie zyskuje na znaczeniu, jest tworzenie bezzałogowych platform gąsienicowych. W branżach takich jak wojskowość, rolnictwo czy ratownictwo występuje silne zapotrzebowanie wykorzystania pojazdów zdolnych do poruszania się w trudnych warunkach terenowych. Zdolność do przemierzania terenów takich jak bagna, piaski i lasy jest cechą pojazdów gąsienicowych, która współcześnie jest bardzo pożądana.

W ostatnich latach rejestruje się znaczący spadek cen robotów mobilnych [4]. Spadają jednocześnie ceny ich komponentów, takich jak silniki, regulatory ESC czy jednostki obliczeniowe. W branży niskobudżetowych konstrukcji efekt ten jest przyspieszany przez rozwój natywnie chińskich firm, które korzystając z doświadczenia w wytwarzaniu wyrafinowanych komponentów dla zachodnich korporacji, zaczęły być w stanie produkować jakościowe produkty w niskich cenach. Widać to po rozwoju firm takich jak DJI, SIYI, czy T-Motor. Ten spadek cen pozwala na rozwój nowego sektora tanich robotów mobilnych, mogących operować w zespołach lub rojach, tworząc zaawansowane systemy autonomiczne w zastosowaniach, dla których wcześniej było to zbyt drogie lub nieopłacalne [13].

Lądowe roboty mobilne zwykle przystosowane są do operacji w pomieszczeniach, przy zapewnieniu kontrolowanych warunków i braku występowania przeszkód terenowych czy innych elementów otoczenia. Upraszcza to znacznie zarówno konstrukcję mechaniczną jak i oprogramowanie platform, jednak istotnie ogranicza ich potencjalne zastosowanie. Proponowany w tym projekcie pojazd ma na celu rozszerzenie zakresu operacji poza kontrolowane warunki, umożliwiając operacje w terenie. W tym celu zastosowana zostanie wytrzymała aluminiowa konstrukcja oraz napęd gąsienicowy wraz z silnikami o dużej mocy.

Pojazdy proponowanego typu dostępne są już na rynku, jednak nie są one przysto-

sowane do omawianych zastosowań robotycznych. Większość z komercyjnych platform pozwala jedynie na manualne tryby kontroli i nie posiada funkcji pozwalających na adaptację do wykonywania autonomicznych misji. Robot omawiany w tym projekcie zostanie wyposażony w pokładowy system kontroli umożliwiający przystosowanie do dowolnych misji autonomicznych. Głównym jego zadaniem będzie zarządzanie poruszaniem się pojazdu, umożliwiając zewnętrznemu komputerowi pokładowemu (nieomawianemu w tej pracy) na wykorzystanie pełnych możliwości jezdnych platformy w każdym terenie. Poza podstawowymi funkcjami takimi jak regulacja prędkości silników, obsługa enkoderów czy zarządzanie trybami pracy, w razie potrzeby układ może zostać przystosowany do współpracy z systemem ROS za pomocą biblioteki `roserial` [10].

1.2 Cel projektu

Tematem niniejszej pracy inżynierskiej jest projekt i konstrukcja bezzałogowego pojazdu gąsienicowego oraz implementacja algorytmów jego sterowania. Przedmiotem prac jest kompleksowy proces projektowania takiej platformy, uwzględniający aspekty mechaniczne, elektroniczne oraz programistyczne. Omówiono również temat opracowania i wdrożenia algorytmów sterowania, które umożliwią skuteczne poruszanie się platformy w różnorodnych warunkach terenowych, optymalizując parametry dynamiczne bez udziału operatora.

1.3 Założenia projektowe

1.3.1 Założenia dotyczące części sprzętowej

Bazując na powyższym celu projektu i innych wymaganiach funkcjonalnych przyjęto następujące założenia dotyczące części sprzętowej:

- Pojazd powinien posiadać napęd pozwalający na poruszanie się jednocześnie po twardych nawierzchniach jak i w trudnym terenie oraz śniegu.
- Pojazd powinien posiadać wytrzymałą konstrukcję.
- Masa własna pojazdu nie powinna przekraczać 3 kg.
- Prześwit podwozia pojazdu powinien pozwalać na pokonywanie przeszkód będących częścią trudnego terenu.
- Pojazd powinien składać się z komponentów o niskim koszcie.
- Maksymalna prędkość pojazdu powinna wynosić $10 \frac{km}{h}$.

1.3.2 Założenia dotyczące części elektronicznej i programowej

Przyjęto następujące założenia dotyczące części sprzętowej:

- Zastosowany powinien zostać mikrokontroler kompatybilny z systemem Arduino.
- Pojazd powinien umożliwiać manualną kontrolę za pomocą modelarskiej aparatury radiowej FlySky fs-i6 [6].
- Pojazd powinien być zasilany akumulatorem Litowo-Polimerowym.
- Układ elektroniczny powinien obsługiwać protokoły I^2C i UART do komunikacji z zewnętrznym komputerem pokładowym.
- Pojazd powinien być wyposażony w sterowanie prędkością silników w pętli sprzężenia zwrotnego z wykorzystaniem enkoderów.

Rozdział 2

Konstrukcja mechaniczna

Tematem niniejszego rozdziału jest opis procesu konstrukcji mechanicznej pojazdu. Zostaną omówione kolejne etapy budowy, każdy z nich składać się będzie z części projektowej i wykonawczej.

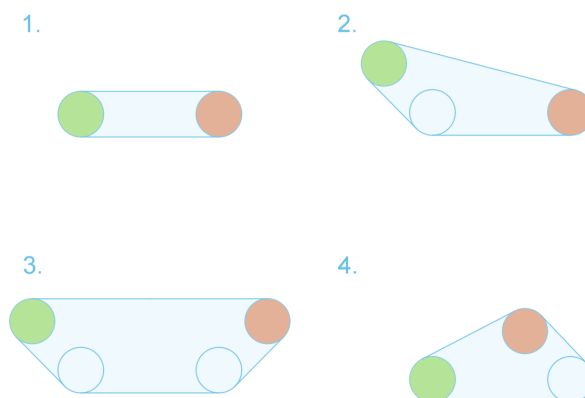
2.1 Układ jezdny

Kluczową decyzją determinującą cały proces projektowy był wybór rodzaju gąsienic pojazdu, ponieważ ich forma jest jednym z najważniejszych czynników definiujących kształt ramy i innych elementów pojazdu. Poniżej przedstawiono podstawowe informacje o gąsienicowych systemach jezdnych, na podstawie których dokonano ostatecznego wyboru układu jezdного.

2.1.1 Elementy gąsienicowego układu jezdного

- Koło napędzające - koło zazębiające się z gąsienicą, które przekazuje jej moment obrotowy z silnika. W konstrukcjach omawianej klasy jest ono zwykle bezpośrednio połączone z silnikiem lub ostatnim stopniem przekładni. Jego odległość od gruntu determinuje zazwyczaj maksymalny prześwit pojazdu. Siła przekazywana gąsienicy przez koło napędzające przenoszona jest do podłoża w kierunku przeciwnym do ruchu gąsienicy (w stronę tyłu pojazdu).
- Koło napinające - koło połączone z resztą konstrukcji układem wahacza i sprężyny, utrzymujące gąsienicę w stałym napięciu. Zapobieganie zbyt silnemu lub zbyt słabemu napięciu gąsienic jest bardzo istotne dla utrzymania dobrych właściwości jezdnych pojazdu. Jako że stosunek długości gąsienicy do odległości między jej prowadnicami może się zmieniać na skutek odkształceń dynamicznych lub pracy zawieszenia, konieczne jest jej ciągłe, aktywne napinanie za pomocą sprężyny.

Miejsce umiejscowienia koła napinającego w układzie napędowym ma duże znaczenie



Rysunek 2.1: Konfiguracje przestrzenne układów napędu gąsienicowego [12]. Zielone - koło napinające; czerwone - koło napędzające.

dla jego skuteczności. Ważne jest, aby koło napinające nie było umieszczone na drodze przekazywania siły między kołem napędzającym, a podłożem. Gdyby tak było, to część siły napędowej byłaby przekazywana mechanizmowi napinającemu, co powodowałoby luzowanie się gąsienicy.

- Koła nośne - koła, które mają kontakt z podłożem (mogą być amortyzowane). Funkcję tę mogą spełniać również koła napędzające lub napinające, jednak tego typu układy mają poważne wady. W przypadku kół napędzających może występować zmniejszenie prześwitu, a w przypadku kół napinających - niepożądane sprzężenie między napinaniem gąsienicy, a amortyzacją, czego skutkiem są chwilowe spadki napięcia gąsienicy podczas pokonywania przeszkód oraz zależność tego napięcia od obciążenia platformy.
- Rolki podtrzymujące - rolki zapobiegające nadmiernemu opadaniu gąsienicy na górnym odcinku jej toru. Zwykle nie są wymagane w konstrukcjach małej skali, nie występują w żadnej z konfiguracji przedstawionych w dalszej części pracy.

2.1.2 Konfiguracje przestrzenne układów napędu gąsienicowego

Znanych jest wiele konfiguracji układów gąsienicowych, których zastosowanie zależy od wymagań projektowych danego pojazdu. W tym podrozdziale opisano wady i zalety wybranych z nich. Analiza przeprowadzona została przez pryzmat wykorzystania układów w pojazdach małej skali. Ilustracje struktury wszystkich omawianych systemów znajdują się na rysunku 2.1.

1. Prosta konfiguracja - składa się z 2 kół, z których zwykle jedno jest napędowe a drugie napinające. Jest dobrze przystosowana do poruszania się po płaskich powierzchniach takich jak piasek czy śnieg, gorzej radzi sobie jednak z pokonywaniem

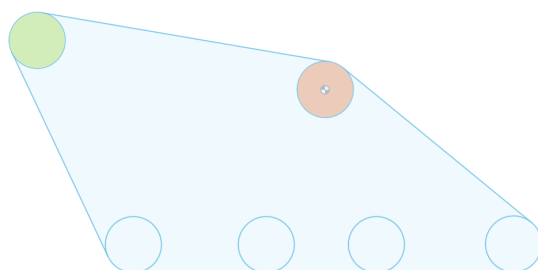
przeszkód. Zwykle nie pozwala na zastosowania zwiększonego prześwitu, ale z powodu małej złożoności może być wykorzystana w szybkobieżnych pojazdach.

2. Konfiguracja wspinająca się - dzięki dodatkowemu kołu dodanemu z przodu konstrukcji, pojazd wyposażony w taką konfigurację może pokonywać przeszkody wyższe niż połowa średnicy przedniego koła, co jest ograniczeniem wielu platform kołowych, jak i gąsienicowych. Zwykle przednie koło jest kołem napinającym, a tylne napędzającym, jako że taki układ zapewnia najlepszy transfer mocy. Powoduje to jednak niski prześwit tej konfiguracji, który jest jej wadą.
3. Konfiguracja z prześwitem, symetryczna - jest ona podobna do konfiguracji nr 2, jednak z dołożonym dodatkowym kołem z tyłu, które zwykle pełni funkcję koła napędzającego. Jej zalety to zwiększony prześwit (spowodowany wyższym umiejscowieniem koła napędzającego) oraz dobre przystosowanie do montażu amortyzacji, jako że żadne z kół nośnych nie ma dodatkowych funkcji. Te, jak i inne zalety powodują, że jest to jedna z najbardziej popularnych konstrukcji pośród pełnowymiarowych pojazdów gąsienicowych.
4. Konfiguracja z prześwitem, asymetryczna - układ ten działa podobnie jak układ nr 1, jednak posiada dodatkowe koło umieszczone wyżej, które służy jako koło napędzające. Poza zwiększeniem prześwitu lokalizacja dodanego koła pozwala na wygodne umiejscowienie silnika w środku konstrukcji, zamiast na jej tyle lub przodzie. Jest to unikalna cecha tej konfiguracji.

2.1.3 Techniki wykonania gąsienic napędowych

Kolejnym aspektem rozważanego układu jeźdnego jest rodzaj zastosowanych gąsienic. Rozważano następujące ich rodzaje:

- Gumowe - gąsienice wykonane z gumy popularne są w szerokim zakresie zastosowań, od zabawek po pojazdy budowlane i rolnicze. Do ich zalet należy dobre przystosowanie zarówno do twardych jak i miękkich nawierzchni. Najlepiej spośród wszystkich kategorii sprawdzają się na utwardzonych powierzchniach, utrzymując dobrą przyczepność i nie powodując uszkodzeń podłoża. Ich wadą w omawianym zastosowaniu jest mniejsza dostępność produktów z tej kategorii oraz trudność w dostosowywaniu długości gąsienic do potrzeb konkretnego pojazdu. [11]
- Metalowe - metalowe gąsienice wykonane są z ogniw połączonych zawiasami. Są bardzo wytrzymałe, jednak nie nadają się do poruszania się w pomieszczeniach. Układy oparte o metalowe gąsienice są głośniejsze z powodu wielu metalowych części. W omawianej klasie pojazdów bywają one łatwo konstruowane z łańcuchów rowerowych, montowanych pojedynczo lub parami.



Rysunek 2.2: Wybrana struktura zestawu jezdniego.



Rysunek 2.3: Wybrany zestaw jezdny zakupiony w sklepie internetowym.

- Plastikowe - plastikowe gąsienice składają się z wielu połączonych ogniw, wykonane są zwykle z materiałów takich jak nylon, często z domieszką włókna węglowego. Są one mniej wytrzymałe od gąsienic innych typów, jednak dzięki ogniowej budowie są bardzo łatwe w naprawie i modyfikacji. Nadają się do wszystkich typów podłoża. Wykorzystywane są wyłącznie w pojazdach małej skali, są dostępne w sklepach internetowych w postaci gotowych zestawów ogniw.

2.1.4 Wybrana konfiguracja

Na podstawie analizy istniejących rozwiązań została podjęta decyzja dotycząca najlepszej konfiguracji dla tworzonej platformy.

Struktura systemu gąsienicowego, na jaki się zdecydowano, jest połączeniem wariantów 2 i 4 z powyższej analizy (rysunek 2.2). Wybrana konfiguracja posiada wysunięte do przodu koło napinające, którego umiejscowienie pomaga w pokonywaniu przeszkód.



Rysunek 2.4: Rama platformy oparta o profile aluminiowe

Koło napędowe umieszczone zostało w centralnym położeniu, umożliwiając umiejscowienie układu napędowego w środku obudowy pojazdu. Pozwoliło to dodatkowo na zastosowanie zwiększonego prześwitu, co znacząco poprawiło właściwości terenowe pojazdu.

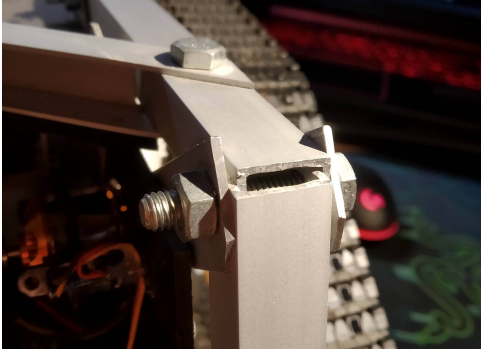
Jeśli chodzi o materiał wykonania gąsienic, za optymalne rozwiązanie uznano ogniwową konstrukcję wykonaną z plastiku. Poza dostępnością w sklepach internetowych, na decyzję wpłynęły czynniki takie jak łatwość naprawy, przystosowanie do zastosowań szybkobieżnych oraz skuteczność na większości rodzajów podłoża. Razem z gąsienicami zakupiono zestaw kół nośnych i koło napędowe, tworzące prawie kompletny zestaw jezdny pokazany na rysunku 2.3. Segmenty gąsienic mają wymiary $40,0 \times 9,3$ mm i połączone są zawiasami opartymi o stalowe pręty. Koła nośne wyposażone są we wbudowane łożyska 626ZZ, dzięki czemu ich instalacja ogranicza się zamocowania ich do ramy za pomocą śrub M6 będących osiami kół. Koło napędowe składa się z dwóch zębatek, przez które przechodzi piasta przyjmująca oś o średnicy 6mm. Oś blokowana jest w piaście śrubą dociskową.

2.2 Rama

Rama pojazdu jest elementem konstrukcji, który musiał zostać wykonany jako pierwszy. Przyjęte w czasie jej projektowania wymiary, materiały i procesy produkcyjne miały zdefiniować wygląd całej platformy, dlatego tej części projektu poświęcono szczególną uwagę.

Jako materiał wykonania ramy pojazdu wybrano aluminium. Do jego zalet należy niska gęstość - ok. $2,7 \text{ g/cm}^3$ (3 razy mniejsza niż stali), odporność na warunki atmosferyczne oraz stosunkowo prosta obróbka. Zdecydowano się na wykorzystanie ceowników z aluminium 6060 powszechnie dostępnych w sklepach budowlanych.

Ogólny kształt ramy podyktowany był wybraną konfiguracją układu jezdnego. Korzystając z wybranych profili, zaprojektowano kratownicową konstrukcję opartą o dwa panele boczne i sprzęgające je łączniki (rysunek 2.4). Taka struktura ramy pozwala na umieszczenie wszystkich kół układu gąsienicowego w odpowiednich miejscach, jednocześnie zachowując dużą jej sztywność. Z przodu paneli bocznych umieszczone są ramiona



(a) Tylni-górny punkt przecięcia profili panelu bocznego



(b) Model CAD Przedniego-górnego narożnika panelu bocznego

Rysunek 2.5: Zbliżenia sposobu łączenia profili aluminiowych

utrzymujące przednie koła pojazdu. Profile, z których zbudowano ramę połączone zostały śrubami M6, umieszczonymi w punktach przecięcia ceowników. Profile w kolidujących miejscach zostały odpowiednio nacięte, co pokazano na rysunkach 2.5.

Górne z ramion panelu bocznego zamontowane zostały na zawiasie (rysunek 2.5b), jako że po zainstalowaniu sprężyn, miały stać się ramionami napinającymi.

Wygląd ukończonej konstrukcji mechanicznej pojazdu znajduje się na rysunku 6.1a;

2.3 Układ napędowy

Kolejnym istotnym elementem konstrukcji mechanicznej platformy był jej układ napędowy. Rolą układu napędowego omawianego typu, jest zamiana energii elektrycznej na energię mechaniczną przekazywaną kołom napędowym. Zastosowano bardzo popularną wśród małych pojazdów gąsienicowych strukturę napędu, składającą się z dwóch silników elektrycznych wyposażonych w przekładnie zębate. Silniki współpracują, zapewniając sterowanie różnicowe.

Głównym zagadnieniem związanym z doбором i konstrukcją układu napędowego było zapewnienie optymalnej wydajności przy prędkości liniowej pojazdu zawartej w założeniach projektowych. Z następującego równania wyliczono wymaganą prędkość obrotową koła napędowego:

$$\omega = \frac{v}{2 * \pi * r} * 60 = \frac{10 \frac{km}{h} * \frac{1000}{3600}}{2 * \pi * 0.028m} * 60 = 947rpm \quad (2.1)$$

gdzie,

ω = maksymalna prędkość obrotowa koła napędowego, rpm ;

v = zamierzona maksymalna prędkość liniowa pojazdu, $\frac{m}{s}$;

r = promień koła napędowego, m

2.3.1 Bezszcotkowy silnik prądu stałego

Na tym etapie przeprowadzono rozeznanie wśród dostępnych na rynku silników elektrycznych. Zdecydowano się na wybór silnika bezszczotkowego prądu stałego.

Silnik bezszczotkowy prądu stałego, znany także jako silnik BLDC (ang. brushless direct-current motor), jest odmianą silnika synchronicznego. W tej konfiguracji, nieruchome cewki umieszczone w statorze zasilane są impulsami prądu generowanymi przez elektroniczny komutator (ESC). Składający się z magnesów stałych wirnik zwykle znajduje się na zewnątrz statora. Silnik BLDC oferuje wyższą wydajność, mniejsze zużycie energii i dłuższą żywotność w porównaniu do tradycyjnego silnika szczotkowego dzięki eliminacji mechanicznych szczotek i zastosowaniu sterownika ESC. Dodatkowo, dzięki cyfrowemu sterowaniu komutacją możliwa jest precyzyjna kontrola prędkości silnika w szerokim jej zakresie.

Charakterystyczny dla silników BLDC jest parametr k_v określający zależność prędkości obrotowej od napięcia wejściowego. Jest on zdefiniowany wzorem:

$$k_v = \frac{\omega}{U} \quad (2.2)$$

gdzie,

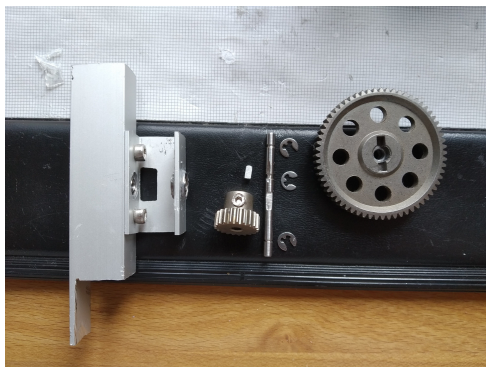
ω = prędkość obrotowa nieobciążonego silnika, *rpm*;

U = amplituda sygnału zasilającego silnik (napięcie podane do ESC), *V*;

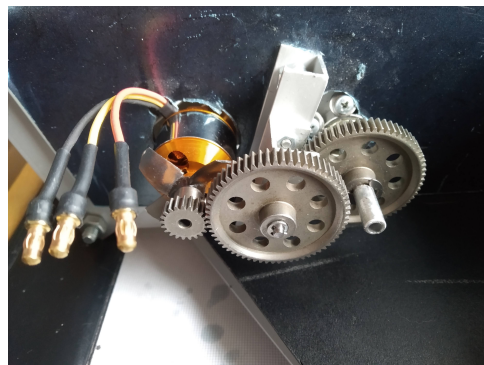
Podczas doboru silnika kierowano się minimalizacją parametru k_v , jako że miało to pozwolić na zmniejszenie wymaganego rozmiaru przekładni. Ostatecznie zdecydowano się na silnik BLDC 950kv o mocy maksymalnej ok. 180 W [1]. Mimo że dostępne są na rynku silniki omawianego typu o niższym parametrze k_v , są one znacznie droższe, a jako że jednym z wymagań projektu był niski koszt, wypór padł na wymieniony wyżej produkt. Przy zasilaniu akumulatorem litowo-polimerowym 3S (11.1V) nieobciążony napęd osiąga ok. 10500 rpm.

2.3.2 Przekładnia zębata

Przekładnia zębata w napędzie elektrycznym pozwala zwiększyć wyjściowy moment obrotowy układu kosztem prędkości obrotowej. W omawianym zastosowaniu wykorzystanie przekładni okazało się niezbędne, jako że szacowana prędkość obrotowa zakupionego silnika, wynosząca 10500 rpm była około 10-o krotnie większa od wymaganej prędkości wyjściowej napędu wynoszącej 947 rpm. Wynika z tego wymagane przełożenie 9:1 odpowiadające dwóm stopniom 3:1 połączonym w serii. Taka redukcja w teorii powoduje prędkość koła napędowego 1160 rpm, jednak przyjmując spadek prędkości obrotowej o 20-30% z powodu oporów ruchu związanych z pracą przekładni, jak i całej reszty układu



(a) Główne części składowe przekładni



(b) Przekładnia zamontowana w pojeździe

Rysunek 2.6: Przekładnia zębata

jezdnego, rzeczywiste obroty będą zbliżone do założonych.

Istotnym aspektem było, aby skonstruowana przekładnia była wytrzymała oraz zdolna do pracy przy wysokich obrotach. Zdecydowano się na zastosowanie gotowych zębatek dostępnych w internecie, wykonanych w procesie formowania wtryskowego metalu [7], na których oparto resztę konstrukcji przekładni. 2 stopnie układu podtrzymywane są przez aluminiowy wspornik (rysunek 2.6a), na którego łożyskach obraca się centralna oś przekładni. Sztywno zamocowane do niej są odpowiednio duże koło pierwszego stopnia i małe koło drugiego stopnia. Na rysunku 2.6b pokazano przekładnię zainstalowaną w pojeździe. Rysunek ten przedstawia całość układu napędowego jednej z gąsienic platformy. W sumie wykonane zostały 2 lustrzane układy, po jednym na każdą stronę pojazdu.

Rozdział 3

Elektronika

Po zakończeniu budowy konstrukcji mechanicznej pojazdu przystąpiono do projektowania i instalacji układu elektronicznego platformy. Całość projektowanej elektroniki będzie spełniać następujące zadania:

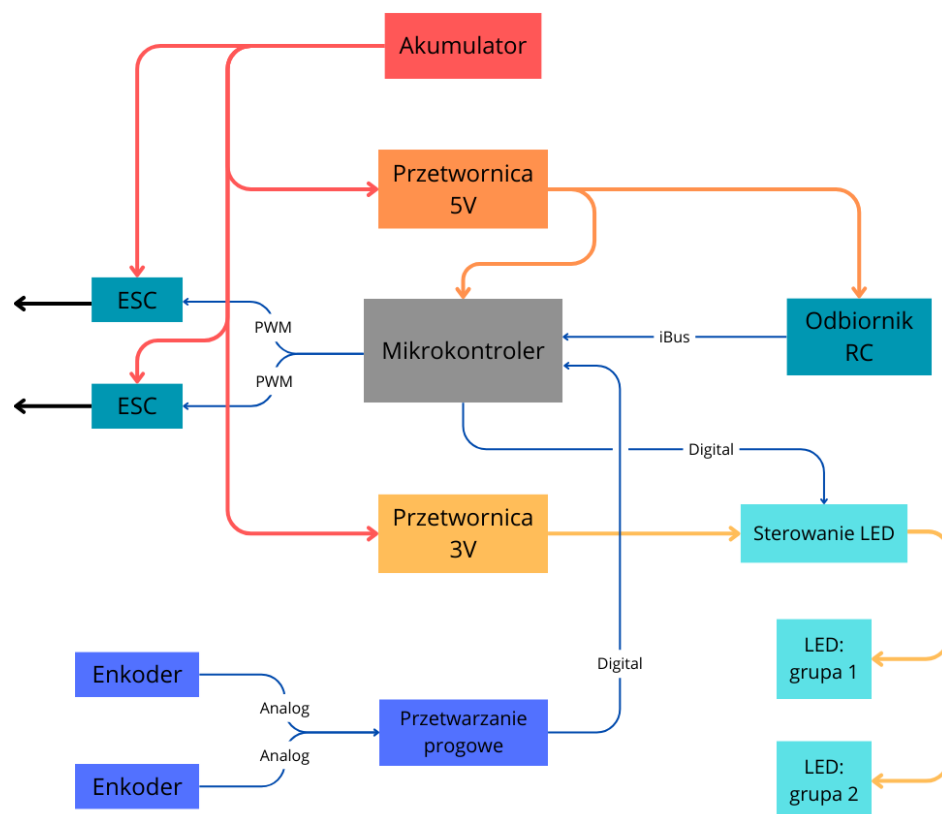
- zbieranie informacji z czujników znajdujących się na pokładzie pojazdu;
- komunikacja z operatorem za pomocą aparatury radiowej;
- sterowanie silnikami BLDC;
- obsługa innych peryferiów, takich jak oświetlenie LED.

Z myślą o realizacji powyższych celów stworzono ogólny projekt funkcjonalny układu elektroniki, pokazany na rysunku 3.1. Poszczególne jego elementy zostaną omówione w kolejnych podrozdziałach.

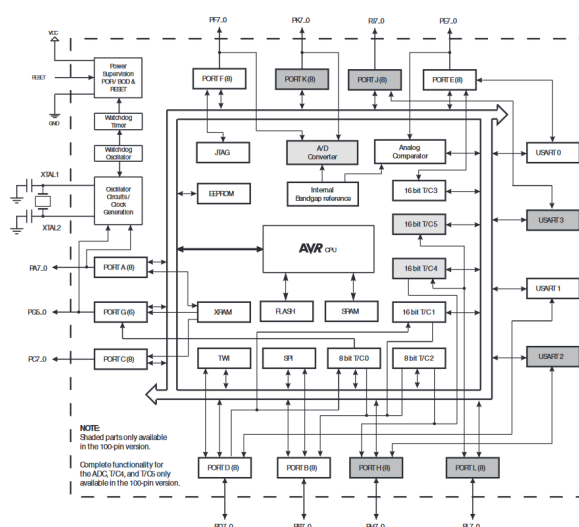
3.1 Mikrokontroler

Mikrokontroler to kompaktowy układ scalony, który integruje w sobie procesor, pamięć operacyjną, pamięć programu oraz różnorodne interfejsy komunikacyjne. Jego głównym zadaniem jest wykonywanie programu zapisanego w pamięci, co pozwala na realizację precyzyjnych operacji sterujących. Mikrokontrolery są powszechnie stosowane w szerokim spektrum zastosowań, takich jak automatyka przemysłowa, systemy automatyki domowej, urządzenia medyczne, czy elektronika samochodowa.

Poza ich niewielkim rozmiarem i niską ceną, zaletą mikrokontrolerów jest praca w czasie rzeczywistym (w przeciwieństwie do układów mikroprocesorowych opartych o systemy operacyjne takie jak Linux). Oznacza to, że zaprogramowane operacje zajmują deterministyczną ilość czasu i zawsze wykonywane są w określonej kolejności. Pozwala to na zastosowanie mikrokontrolerów w precyzyjnym, niskopoziomowym sterowaniu układami dynamicznymi, takimi jak roboty czy pojazdy autonomiczne.



Rysunek 3.1: Funkcjonalny schemat elektroniki pojazdu



Rysunek 3.2: Schemat blokowy architektury wewnętrznej mikrokontrolera ATmega2560 [2]

Spośród wielu mikrokontrolerów dostępnych na rynku, do omawianego projektu wybrane zostało Arduino Mega 2560 Mini oparte o układ scalony ATmega2560. Jego zaletami, które zadecydowały o jego wyborze są:

- taktowanie 16 MHz;
- duża ilość wyprowadzeń cyfrowych;
- 4 magistrale UART;
- szeroka obsługa przerwań sprzętowych;
- kompaktowe wymiary;
- duża popularność i przyjazne środowisko programistyczne.

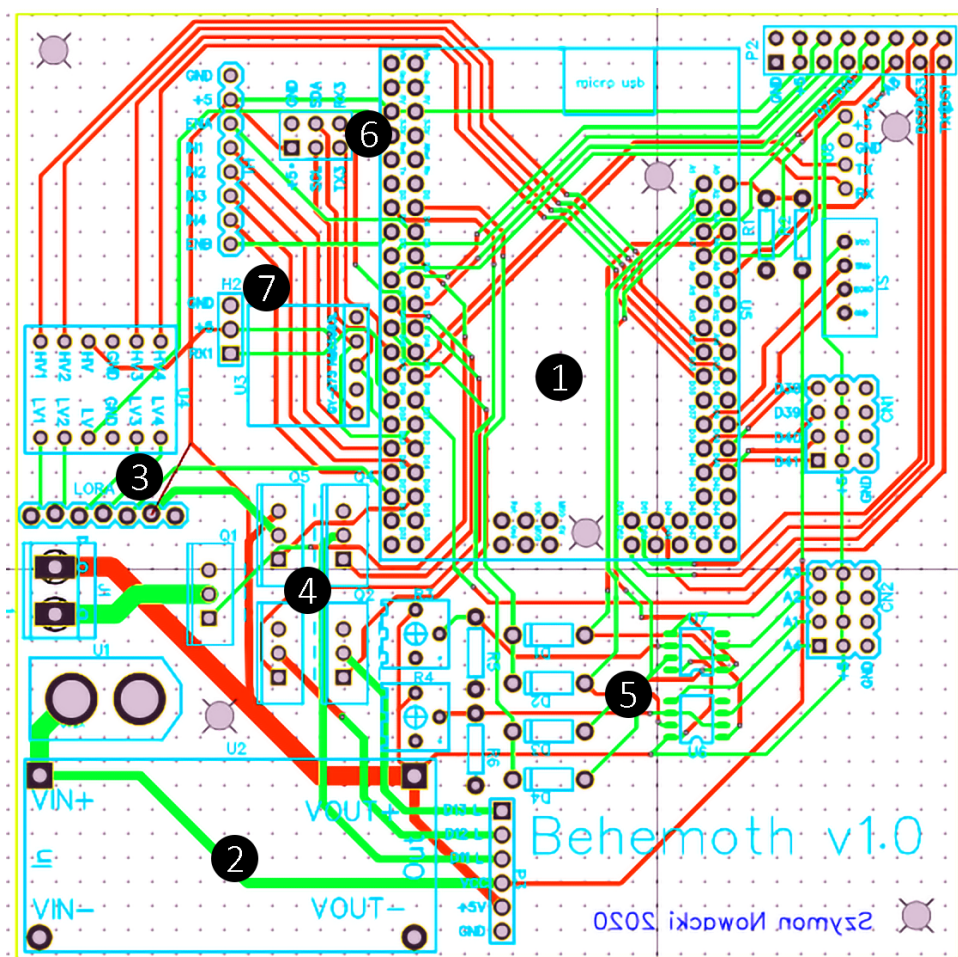
Na schemacie 3.2 pokazano zintegrowaną strukturę mikrokontrolera ATmega2560. W jednym układzie scalonym znajduje się procesor, pamięci RAM, FLASH i EEPROM, przetworniki ADC, moduły obsługi portów GPIO oraz układy komunikacji takie jak UART.

3.2 Płytką PCB

W związku z dużą ilością zadań, które miał realizować układ elektroniczny platformy, struktura fizycznych połączeń między komponentami miała być wysoce złożona. Z tego powodu, postanowiono zaprojektować oraz zamówić płytkę PCB (rysunek 3.3), która miała łączyć ze sobą wszystkie elektroniczne elementy układu. Założeniem przy tworzeniu projektu PCB było zapewnienie maksymalnej łatwości montażu poszczególnych modułów urządzenia, jak i ich wymiany. Wszystkie kluczowe komponenty umieszczono na konektorach, a dla elementów, które nie mogły zostać umieszczone w obrębie płytki, przewidziano złącza pozwalające na ich łatwe odpinanie. Rozwiązanie to pozwoliło na późniejszy rozwój konfiguracji elektronicznej pojazdu oraz testowanie alternatywnych komponentów.

Płytką dzieli się na 4 zespoły funkcyjne:

1. sekcja zasilania;
2. mikrokontroler i wyprowadzenia jego wyjść;
3. układ przetwarzania sygnałów;
4. złącza dla dodatkowych komponentów (w celu późniejszego rozwoju układu).



Rysunek 3.3: Projekt płytki PCB. 1 - mikrokontroler, 2 - przetwornica 5 V, 3 - miejsce przygotowane na moduł LoRa, 4 - układ sterowania LED, 5 - układ przetwarzania progowego enkoderów, 6 - złącze do podłączenia komputera pokładowego, 7 - złącze do odbiornika radiowego. Płaszczyzna masy zajmująca obie strony płytki została ukryta dla poprawy czytelności.

3.2.1 Sekcja zasilania

W celu uproszczenia instalacji w pojeździe i późniejszej eksploatacji postanowiono układ zasilania elektroniki zainstalować na płytce PCB. Wysokie napięcie z baterii podłączone jest do płytki wysokoprądowym złączem XT60. Następnie obniżane jest ono przez przetwornicę impulsową, opartą o układ scalony LM2596.

Działanie przetwornicy impulsowej opiera się na zasadzie cyklicznego przełączania, gdzie impulsy prądu są przesyłane przez cewkę i kondensator, umożliwiając regulację napięcia wyjściowego. Dzięki temu mechanizmowi prąd ze źródła zasilania pobierany jest tylko czasami, co pozwala na redukcję napięcia z dużą sprawnością [8].

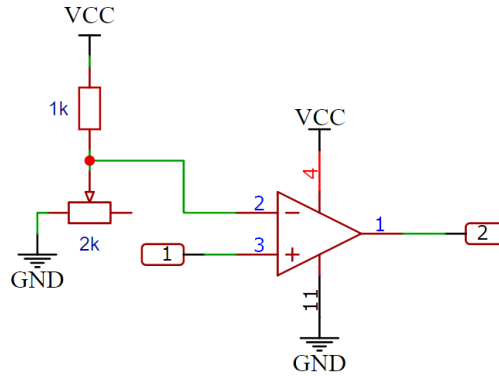
LM2596 to układ z regulowanym napięciem wyjściowym, które w tym przypadku ustawiono na 5,0 V i zablokowano możliwość jego przypadkowej zmiany. Maksymalny prąd wyjściowy przetwornicy wynosi 3,0 A, co jest wystarczające do omawianego zastosowania. Cały moduł zainstalowano nad płytką, dzięki czemu w razie awarii może on zostać wymieniony.

Ścieżki PCB będące częścią układu zasilania zostały pogrubione, w celu lepszego przystosowania ich do przewodzenia stosunkowo wysokich prądów. Szczególnie dotyczy to połączenia złącza XT60 z przetwornicą, oraz przetwornicy ze złączem silnika 3.2.4.

3.2.2 Mikrokontroler i wyprowadzenia jego wyjść

Mikrokontroler Arduino Mega 2560 Mini został zamontowany na dwurzędowych złączach goldpin o rastrze 2,54 mm w centralnej części płytki. Ma on kluczowe znaczenie w układzie elektronicznym platformy, będąc centralnym ogniwem wymiany informacji i przetwarzania sygnałów, co oznacza, że wszystkie przyszłe rozbudowy i modyfikacje pojazdu mogą wymagać podłączania dodatkowych peryferiów, czujników i efektorów do jego portów. W związku z tym zadbano o wyprowadzenie w formie wygodnych konektorów wielu z portów GPIO mikrokontrolera, jak również wejść jego przetworników ADC czy magistral komunikacyjnych.

Główne konektory tego typu znajdują się po prawej stronie płytki PCB w 2 grupach. Górna grupa (złącze P1) jest zbiorem 12 wyprowadzonych portów GPIO i wejść analogowych. Dolna grupa (złącze CN1) to 4 wyjścia PWM przystosowane do podłączania serwomechanizmów, lub innych peryferiów korzystających ze standardowego 3-pinowego złącza o konfiguracji DATA-VCC-GND. Dodatkowo zaprojektowano specjalny konektor (nr 6 na rysunku 3.3) przystosowany do podłączenia komputera pokładowego (np. Raspberry Pi), składający się z zasilania i magistral I2C oraz UART. Na lewo od niego znajduje się złącze H1 zaprojektowane do sterowania silnikami pojazdu.



Rysunek 3.4: Schemat elektroniczny komparatora będącego częścią układu przetwarzania progowego. 1 - wejście sygnału z enkodera, 2 - wejście mikrokontrolera wspierające przetwarzania sprzętowe.

3.2.3 Układ przetwarzania sygnałów

Układ przetwarzania sygnałów jest jedynym zespołem komponentów elektronicznych bezpośrednio zamontowanych na płytce PCB. Składa się on z dwóch części: sterownika LED oraz układu przetwarzania progowego (odpowiednio nr 4 i 5 na rysunku 3.3).

Sterownik LED to zestaw 3 N-kanałowych tranzystorów MOSFET dużej mocy (IRFZ44N). Źródła tranzystorów połączone są z masą układu, a ich dreny wyprowadzone są na złącze zasilające diody LED (P3). Układ taki pozwala na zasilanie oświetlenia osobną przetwornicą znajdującą się poza główną płytką, jednocześnie sterując nim przez przerywanie obwodu po stronie masy. Pomimo wykorzystania tranzystorów MOSFET dużej mocy nie zaprojektowano układu do pracy przy bardzo wysokich prądach, ponieważ planowane diody LED miały wykorzystywać maksymalnie 1,0 A na kanał. Według wzoru 3.1 obliczono minimalną szerokość ścieżki łączącej tranzystory ze złączem LED wynoszącą 0,78 mm (zastosowano ścieżkę 0,8 mm)[3]. Przyjęto maksymalny prąd 2,0 A i dopuszczalny wzrost temperatury ścieżki 10°C, a projektowana grubość ścieżki to 1 mil (0.0254 mm).

$$W = \frac{\left(\frac{I}{0.048 \cdot T_{Rise}^{0.44}}\right)^{\frac{1}{0.725}}}{t * 1.378} \quad (3.1)$$

gdzie:

W - minimalna szerokość ścieżki, mm;

I - maksymalny prąd, A;

T_{Rise} - dopuszczalny wzrost temperatury, °C;

t - grubość ścieżki, mm.

Układ progowania ma na celu przetworzenie sygnału analogowego enkoderów na sygnał cyfrowy. Układ działa poprzez zamianę sygnału 0-5 V na cyfrowe 0 lub 1 zależnie od ustawionego przez użytkownika progu. Wyjściowy sygnał cyfrowy może następnie zostać podany do portu przerwań sprzętowych mikrokontrolera. Do progowania sygnału

wykorzystano układ wzmacniacza operacyjnego MN3581 podłączonego jako komparator (rysunek 3.4). W takiej konfiguracji wejście odwracające wzmacniacza podłączone jest do napięcia referencyjnego, a na wejście nieodwracające podane jest napięcie wejściowe [5]. Sygnał wyjściowy określony jest warunkiem :

$$U_{wyjściowe} = \begin{cases} VCC, & U_{wejściowe} > U_{referencyjne} \\ GND, & U_{wejściowe} < U_{referencyjne} \end{cases}$$

3.2.4 Złącza dodatkowych komponentów

W związku z branymi pod uwagę zastosowaniami platformy, podczas projektowania płytki przewidziano miejsce na instalację wielu opcjonalnych komponentów. Przewidziane komponenty obejmują:

- Magnetometr (na przykład QMC5883L) - możliwy do zainstalowania pomiędzy mikrokontrolerem a złączem odbiornika radiowego;
- Moduł radiowy LoRa - może być zastosowany jako zamiennik standardowego sterowania radiowego lub dodatkowe źródło telemetry. Jego podłączenie wymaga zastosowania konwertera poziomów logicznych, miejsce, na który także zostało przewidziane na płytce;
- Sterowanie silnikiem DC - z lewej strony płytki znajduje się złącze zaciskowe pozwalające na podłączenie dodatkowego silnika służącego na przykład jako część układu lidara. Wyjście to jest sterowane przez MOSFET podłączony analogicznie jak te sterujące oświetleniem LED;
- Złącze ultradźwiękowego czujnika odległości - umieszczone po prawej mikrokontrolera.

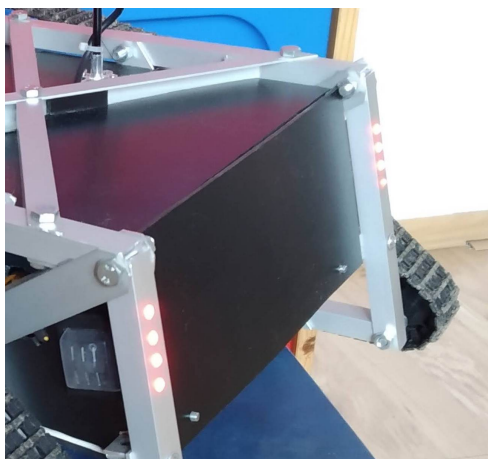
3.3 Pozostałe elementy układu elektronicznego

3.3.1 Odbiornik RC

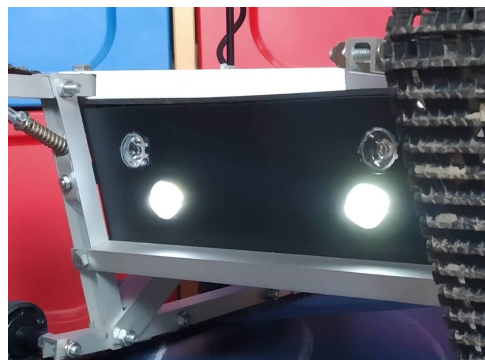
Odbiornik RC w pojeździe bezzałogowym służy do odbierania sygnałów radiowych wysyłanych przez nadajnik RC, umożliwiając zdalne sterowanie pojazdem.

Z założeń projektowych wynika konieczność zastosowania odbiornika radiowego kompatybilnego z aparaturą modelarską FlySky fs-i6. Zastosowano w związku z tym odbiornik FlySky fs-ia6b, który jest dedykowany do tej właśnie rodziny aparatur. Urządzenia te korzystają z własnego protokołu komunikacyjnego opartego o modulację GFSK.

Modulacja GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) to forma modulacji cyfrowej, stosowana głównie w transmisji danych przez fale radiowe. GFSK jest odmianą modulacji



(a) Oświetlenie tylne



(b) Oświetlenie przednie

Rysunek 3.5: Oświetlenie LED pojazdu.

FSK (Frequency Shift Keying), która charakteryzuje się zmianą częstotliwości nośnej w zależności od sygnału wejściowego.

W przypadku GFSK, zmiana częstotliwości nośnej jest dokonywana w sposób gładki, co oznacza, że przejścia między dwoma stanami (0 i 1) są łagodne, co minimalizuje emisję energii w bocznych pasmach częstotliwości. W GFSK, zmiana częstotliwości jest kształtowana za pomocą funkcji Gaussa, co powoduje, że widmo częstotliwościowe sygnału jest bardziej zlokalizowane i lepiej kontrolowane.

Odbiornik RC komunikuje się z mikrokontrolerem za pomocą protokołu iBus, który jest własnym protokołem firmy FlySky. Wykorzystuje on magistralę UART do przesyłania w czasie rzeczywistym stanu 10 kanałów aparatury radiowej.

3.3.2 Oświetlenie LED

Pośród planowanych zastosowań platformy przewidziano operacje nocne, w których pojazd sterowany byłby manualnie przez operatora. W celu umożliwienia takich działań postanowiono wyposażyć pojazd w system oświetlenia umożliwiający zarówno lokalizację platformy w czasie nocnych operacji jak i rozjaśnianie terenu w kierunku jazdy. Zainstalowano 3 sekcje diod LED:

1. oświetlenie tylne - 2 zestawy po 4 czerwone diody LED umieszczone na tylnych belkach paneli bocznych ramy. Są to diody niskiej mocy (rysunek 3.6a);
2. oświetlenie przednie pozycyjne - 2 reflektory LED o mocy 0,5 W każdy, umieszczone na przednim panelu obudowy (rysunek 3.5b);
3. oświetlenie przednie 'długie' - 2 reflektory LED o mocy 1 W każdy, umieszczone nad przednimi pozycyjnymi.

Diody sterowane są w dwóch grupach: sekcja 1 i 2 razem jako 'grupa 1', oraz osobno sekcja 3 jako 'grupa 2'. Poszczególne grupy mogą być niezależnie uruchamiane przez operatora.

3.3.3 Sterowniki ESC

Rolą regulatora ESC (ang. Electronic Speed Controller) jest sterowanie obrotami silnika BLDC poprzez wytwarzanie odpowiedniego sygnału trójfazowego, który następnie podawany jest na cewki silnika. Wymagana prędkość obrotów silnika zadawana jest za pomocą sygnału PWM wchodzącego do regulatora ESC.

W omawianej platformie zastosowano 2 sterowniki ESC zdolne do sterowania silnikami w obu kierunkach. W przypadku takich regulatorów sygnał sterujący PWM odpowiada zakresowi prędkości silnika od maksymalnej prędkości do tyłu, do maksymalnej prędkości do przodu, a silnik nie obraca się, gdy sygnał znajduje się w połowie zakresu.

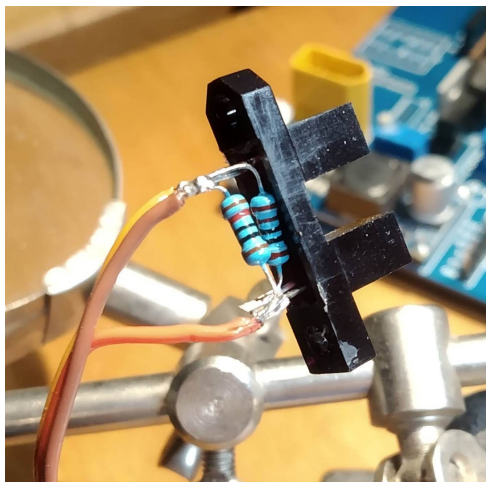
3.3.4 Enkodery

W celu pomiaru prędkości obrotowej napędu w czasie ruchu pojazdu zastosowano parę enkoderów optycznych zainstalowanych przy rotorach silników. Na każdy z enkoderów składają się:

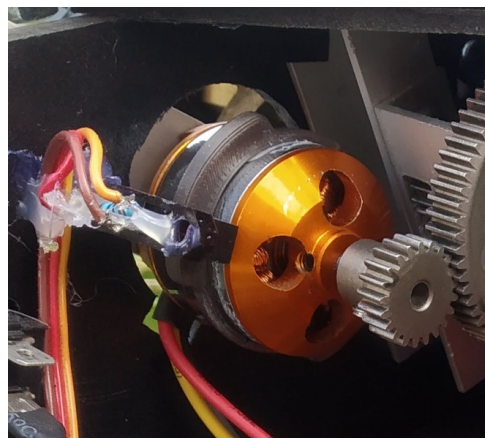
- Przysłona - zamocowana do rotora silnika. Składa się ona z dwóch listków umieszczonych po przeciwnych stronach rotora, które obracają się razem z nim;
- Czujnik szczelinowy - jest to czujnik wykrywający obroty przysłony. Składa się on z diody LED UV i fototranzystora, między którymi znajduje się szczelina. Przez tę szczelinę 2 razy na obrót silnika przechodzi listek przysłony, osłaniając fototranzystor przed światłem diody.

Sygnał wyjściowy fototranzystora czujnika szczelinowego trafia do układu przetwarzania progowego na płycie PCB, a następnie do mikrokontrolera, powodując przerwanie sprzętowe przy każdym zdarzeniu zasłonięcia lub odsłonięcia szczeliny.

Główną zaletą takiej konstrukcji enkodera optycznego, która spowodowała jego wybór do omawianego zastosowania, jest możliwość dostosowania ilości impulsów na jeden obrót silnika generowanych przez element. Biorąc pod uwagę przewidywaną prędkość obrotową silnika oraz maksymalną częstotliwość przerwań obsługiwaną przez mikrokontroler, ustalono optymalną ilość listków enkodera jako 2. Powoduje to generowanie 4 przerwań na obrót, co odpowiada częstotliwości poniżej 700 przerwań na sekundę.



(a) Czujnik szczelinowy enkodera



(b) Sposób instalacji enkodera optycznego

Rysunek 3.6: Enkoder optyczny

3.3.5 Akumulator

W związku z wyliczeniami przeprowadzonymi podczas doboru silników 2.3 podjęto decyzję o zastosowaniu akumulatora litowo-polimerowego 3S. Oznaczenie 3S odpowiada 3 ogniwom Li-Po połączonym w serii, co daje napięcie nominalne pakietu 11,1 V (napięcie maksymalne - 12,6 V). Wykorzystano akumulator o pojemności 5600 mAh.

Rozdział 4

Oprogramowanie

Zadaniem oprogramowania omawianej platformy jest zbieranie informacji pochodzących od operatora, jak i z pokładowych czujników, przetwarzanie ich, a następnie wypracowywanie wysterowania silników napędowych i innych wyjść układu elektronicznego pojazdu. W aktualnej konfiguracji projektu wejściami układu sterowania są:

- polecenia operatora platformy, w tym:
 - pozycje dźwzków aparatury radiowej;
 - pozycje przełączników aparatury radiowej;
- impulsy enkoderów mierzących prędkość obrotową silników.

Wyjściami układu są natomiast:

- wypełnienie sygnałów PWM sterujących silnikami;
- wysterowanie grup oświetlenia LED.

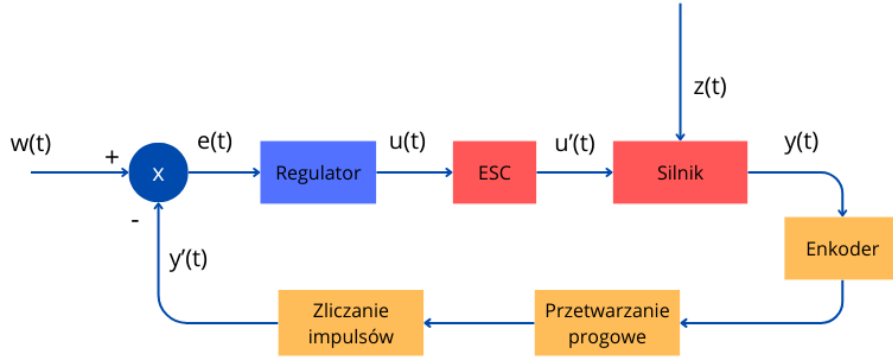
4.1 Zagadnienia realizowane przez oprogramowanie

Przed przystąpieniem do omawiania konkretnej struktury programu i jego implementacji należy wyjaśnić część zagadnień, które musiały zostać rozwiązane w celu realizacji wcześniej postawionych celów.

4.1.1 Sterowanie prędkością w sprzężeniu zwrotnym

Istotnym aspektem projektu była implementacja sterowania prędkością pojazdu w układzie sprzężenia zwrotnego. Potrzeba zastosowania takiego mechanizmu wynika z obserwacji przeprowadzonych podczas wczesnych testów systemu.

W testach tych, podczas pokonywania przeszkód terenowych operator próbował utrzymać stałą prędkość pojazdu. Okazało się to być trudnym zadaniem, ponieważ zmienne



Rysunek 4.1: Schemat układu regulacji.

opory ruchu występujące podczas pokonywania nierówności terenu znacząco wpływały na prędkość obrotową napędu. Zjawisko to jest szczególnie znaczące przy stosunkowo niskich prędkościach, ponieważ silnik, posiadając mniejszą moc w tym punkcie pracy, łatwo spowalnia, gdy wzrośnie przyłożony do niego opór.

Problem ten postanowiono rozwiązać za pomocą oprogramowania, implementując algorytm wyrównywania prędkości obrotowej silnika. W tym podejściu położenie drążka operatora interpretowane jest jako zadana prędkość, a algorytm, korzystając z informacji dostarczanych przez enkodery, dostosowuje wysterowanie silników, by tę prędkość osiągnąć.

Rysunek 4.1 przedstawia schemat zastosowanego układu regulacji. Jako regulator zastosowano regulator PID, którego parametry dobrano eksperymentalnie:

$$P = 3, T_I = 100, T_D = 1.$$

Regulator wyposażony został w mechanizm anti-windup, a krok całkowania wykorzystywany w obliczeniach, jest na bieżąco mierzonym czasem upływającym między pętlami programu. Regulacja przeprowadzana jest całkowicie niezależnie dla każdego z silników. Oznacza to, że wartością zadaną $w(t)$ jest zadana prędkość danego silnika, wyliczona algorytmem kierowania różnicowego.

4.1.2 Przetwarzanie impulsów enkodera

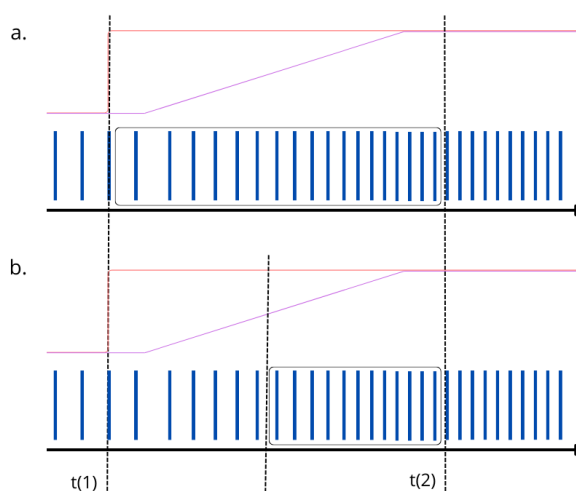
Obliczanie aktualnej prędkości obrotowej silnika, a przez to prędkości platformy odbywa się poprzez zliczanie impulsów enkoderów. Prędkość obliczana jest z zależności:

$$\omega = \frac{x}{4 * \Delta t}, \quad (4.1)$$

gdzie:

ω - prędkość obrotowa silnika, $1/s$;

x - liczba zliczonych przerwań;



Rysunek 4.2: Przykład dwóch sposobów zliczania impulsów enkodera; a) zliczanie w pełnym cyklu; b) zliczanie z podziałem cyklu. Czerwony wykres - zadana prędkość obrotowa; fioletowy wykres - rzeczywiste obroty silnika; niebieskie oznaczenia - impulsy będące efektem rzeczywistych obrotów silnika; pionowe linie to momenty wykonywania pętli programu.

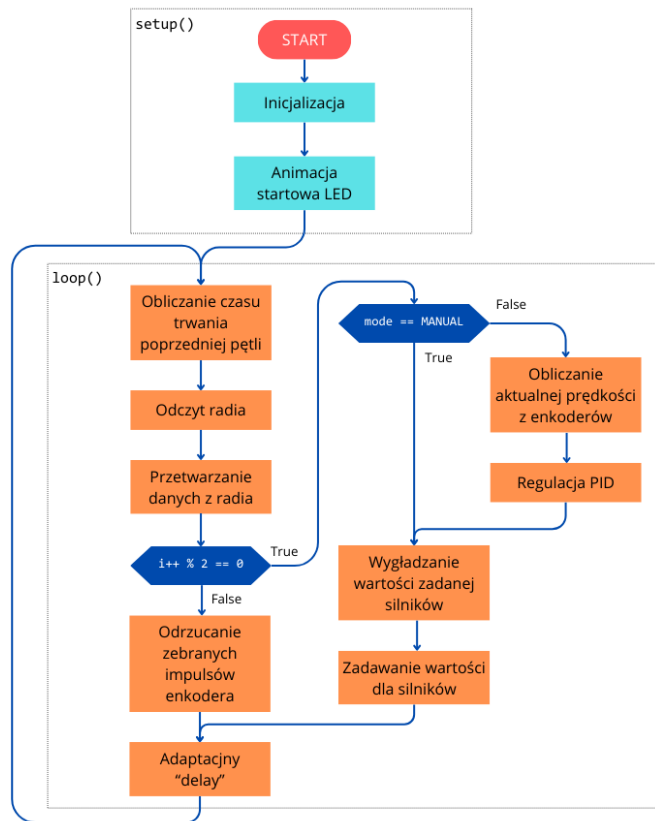
Δt - czas zliczania przerwań, s.

Przerwane sprzętowe rejestrowane jest przy każdej zmianie stanu logicznego wejścia mikrokontrolera, do którego podłączony jest enkoder. Oznacza to 4 zdarzenia na każdy obrót silnika, ponieważ przysłona enkodera ma 2 listki, z których każdy najpierw zasłania, a następnie odsłania fototranzystor czujnika szczelinowego.

Zagadnieniem związanym z pomiarem prędkości silników jest dobór odpowiedniego sposobu zliczania impulsów, pozwalającego na najlepszą dokładność pomiaru. W celu poprawnego doboru wysterowania silników ważne jest, aby w momencie wykonywania każdej pętli programu znana była ich aktualna prędkość obrotowa.

Na rysunku 4.2 znajduje się wykres w przestrzeni czasu dwóch sposobów zliczania impulsów. Wykres a) przedstawia standardowy algorytm zliczania, w którym w pętli $t(2)$ następuje obliczenie prędkości na podstawie wszystkich impulsów zliczonych od czasu poprzedniej pętli - $t(1)$. Jak widać, z powodu zmiennej gęstości impulsów korzystając ze wzoru 4.1 uzyskana zostaje wartość prędkości nieodpowiadająca tej występującej w momencie $t(2)$.

Sposób b) ma na celu poprawienie tego zjawiska, poprzez skrócenie czasu zliczania do połowy okresu $t(2) - t(1)$. W tym przypadku pętla programu wykonywana jest dodatkowo w połowie okresu. W jej czasie nie są wykonywane obliczenia, a tylko odrzucane są wszystkie zliczone impulsy. Oznacza to, że w momencie $t(2)$ sumowane jest mniej impulsów, ale obliczona prędkość jest znacznie bliższa rzeczywistej (za okres zliczania przyjmuje się $(t(2) - t(1))/2$). W oprogramowaniu platformy skorzystano z algorytmu b).



Rysunek 4.3: Schemat przepływu kontroli w programie mikrokontrolera

4.2 Wykorzystane technologie

Oprogramowanie mikrokontrolera wykonane zostało w języku C++, korzystając ze środowiska Arduino IDE. Jedyną biblioteką, z której korzystano podczas tworzenia oprogramowania to IBusBM.h utworzona przez Barta Mellinka [9].

4.3 Struktura programu

Schemat przepływu kontroli w programie mikrokontrolera znajduje się na rysunku 4.3.

Poza standardowymi funkcjami głównymi `setup()` i `loop()`, struktura kodu programu oparta została o przestrzeń nazw, które pełnią funkcję modułów, odpowiedzialnych za poszczególne zadania programu. Te moduły to:

- `ENCODER::` - zajmuje się zliczaniem pulsów enkoderów oraz obliczaniem na ich podstawie prędkości obrotowej silników;
- `MOTOR::` - odpowiada za wygladanie i zadawanie wypracowanej wartości wystęrowania silnikom;

- RADIO:: - zajmuje się zbieraniem i przetwarzaniem informacji przekazywanych przez moduł radiowy;
- REGULATOR:: - przechowuje funkcje realizujące regulacje PID.

Rozdział 5

Walidacja

Weryfikację działania wszystkich systemów omawianej platformy przeprowadzono w warunkach terenowych. Potwierdzono poprawne działanie w zróżnicowanych warunkach (rysunek 5.1), obejmujących wszystkie najważniejsze wymagania projektowe. Poniżej przedstawiono najistotniejsze wnioski uzyskane podczas procesu testowania pojazdu.

- Prędkość maksymalna - testy maksymalnej prędkości osiąganej przez platformę przeprowadzono na skoszonej nawierzchni trawiastej (rysunek 5.1c) przy napięciu akumulatora 11,4 V. Dystans 20,0 m pojazd przejechał w 8 s (średnia z 3 przejazdów), co daje prędkość średnią $2,5 \frac{m}{s}$, albo $9 \frac{km}{h}$. Jest to wynik bardzo zbliżony do prędkości przewidzianej w założeniach projektowych ($10 \frac{km}{h}$), która to może zostać osiągnięta poprzez naładowanie akumulatora do jego maksymalnego napięcia lub operację na innej nawierzchni.
- Zdolności terenowe - możliwość pokonywania przeszkód i pracy w różnych warunkach sprawdzono podczas różnorodnych testów na przestrzeni wielu miesięcy (rysunek 5.1). We wszystkich przypadkach, pojazd wykazał bardzo dobre zdolności terenowe przy dużych prędkościach. Był on w stanie przemierzać podłoże trawiaste, brukowane, pokryte śniegiem czy błotem. Sukcesem zakończył się także test jazdy w górę i w dół zbocza o nachyleniu 30 deg.
Pogorszone zdolności terenowe pojazdu zaobserwowano przy pracy z niskimi prędkościami. Przy operacji na nawierzchni trawiastej (charakteryzującej się większymi oporami ruchu) platforma wykazuje trudności ze skręcaniem w miejscu, oraz pokonywaniem przeszkód napotkanych przy prędkości poniżej 1/3 prędkości maksymalnej. Zjawisko to wynika bezpośrednio z niskiego momentu obrotowego silników przy niskim poziomie wysterowania, jako że zoptymalizowane są one do pracy przy wysokich prędkościach.
- Zasięg sterowania radiowego - w oparciu o testy szacowany jest na około 400 m. W zależności od terenu może on jednak wahać się od 200 do nawet 1000 m.



(a) Test na zmrożonym śniegu.



(b) Test na kostce brukowej.



(c) Test na skoszonej trawie.



(d) Test operacji w nocy.

Rysunek 5.1: Testy terenowe platformy.

- Czas pracy na akumulatorze - wysoka pojemność akumulatora, w który wyposażona została platforma, pozwala na czas pracy przekraczający 1 godzinę. Jest to wartość szacowana, jako że podczas żadnego z testów nie rozładowano baterii do jej minimalnego napięcia. Większość operacji przeprowadzonych zostało przy akumulatorze naładowanym do połowy, jako że minimalizuje to jego degradację.
- Działanie systemu sprzężenia zwrotnego - sprawdzone zostało w różnych warunkach i przy różnych nastawach regulatora. Zweryfikowano, że spełnia ono swoją funkcję, gwarantując utrzymywanie stałej prędkości i ułatwiając pracę operatora. Przede wszystkim, zaobserwowano redukcję samoczynnego skręcania pojazdu, powodowanego nierównomiernym oporem mechanicznym. Problematiczny pozostaje zakres niskich prędkości, w którym niska moc silników, jak i rozdzielczość enkoderów nie pozwala na precyzyjną regulację. Przy ciągłej jeździe z prędkością poniżej $2\frac{km}{h}$ występują szarpnięcia i ograniczone możliwości skręcania. Zauważalna jest jednak poprawa tego zjawiska względem trybu manualnego.
- Wytrzymałość mechaniczna - w ciągu długotrwałych testów została oceniona jako dobra. Nie wykryto żadnych uszkodzeń ani awarii, poza systemem jezdny. Materiał wykonania gąsienic oraz kół jezdnych okazał się zbyt mało wytrzymały do wykorzystania w pojeździe o tak dużej mocy i prędkości maksymalnej. Podczas operacji

na twardej nawierzchni zaobserwowano pęknięcia w ogniwach gąsienic, co powodowało ich zrywanie. Dzięki modularnej konstrukcji gąsienic możliwa jest jednak łatwa wymiana ich ogniw, co umożliwiło szybką naprawę wszelkich uszkodzeń.

Rozdział 6

Podsumowanie i wnioski

Porównując uzyskany efekt końcowy do przyjętych na początku prac założeń projektowych, należy uznać projekt za sukces. Udało się spełnić wszystkie wymagania postawione przed pojazdem, jednocześnie tworząc użyteczną i uniwersalną platformę przystosowaną do dalszej rozbudowy.

Wygląd ukończonego pojazdu znajduje się na rysunku 6.1.

W dalszej części podsumowane zostaną prace wykonane w ramach projektu, jak i możliwości dalszej jego rozbudowy.

6.1 Podsumowanie przeprowadzonych prac

Zrealizowanie projektu wymagało wykonania szerokiego zakresu prac, zaczynając od badań, przez projektowanie i konstrukcję, po testy i walidację.

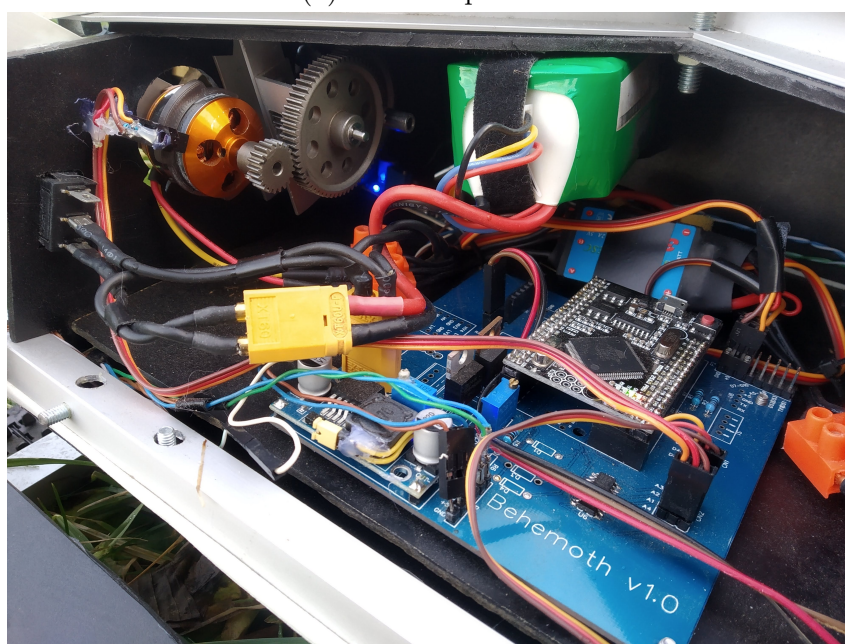
Jeśli chodzi o część koncepcyjno - projektową, dużą pomocą było wcześniejsze doświadczenie autora w dziedzinie pojazdów zdalnie sterowanych. Pozwoliło ono przyspieszyć poszukiwania dostępnych części oraz dobrać odpowiednie komponenty i technologie.

Największym wyzwaniem podczas realizacji projektu było stworzenie konstrukcji mechanicznej, szczególnie aluminiowej ramy oraz struktury przekładni zębatach. Było to zadanie czasochłonne z powodu ograniczonych możliwości warsztatowych, utrudniających obróbkę aluminium i stali, która była wymagana w procesie budowy. Uzyskana konstrukcja jest jednak bardzo wytrzymała i w pełni spełnia postawione jej zadania. W procesie konstrukcji mechanicznej nie wykorzystano technologii druku 3D, jako że nie była ona dostępna dla autora w trakcie projektu. Jej zastosowanie na pewno ułatwiłoby proces tworzenia konstrukcji, kosztem jednak jej wytrzymałości.

Część elektroniczno-programistyczna projektu powstała z myślą o modularności. W obliczu stosunkowo mało wymagających założeń projektowych w tej dziedzinie postanowiono dołożyć starania, by późniejsze modyfikacje mogły być przeprowadzone w prosty sposób. Więcej o możliwych modyfikacjach napisano w kolejnej sekcji.



(a) Widok z przodu.



(b) Widok wnętrza.

Rysunek 6.1: Końcowy wygląd pojazdu.

6.2 Możliwości dalszej rozbudowy

Podczas całego procesu koncepcyjnego i wykonawczego platformy zwracano szczególną uwagę na możliwość późniejszej rozbudowy zarówno części mechanicznej jak i programistycznej pojazdu. Dzięki temu podejściu zakres możliwych modyfikacji i usprawnień platformy jest bardzo szeroki. Poniżej przedstawiono wybrane dodatkowe funkcje, o jakie pojazd może zostać wzbogacony w przyszłości:

- Komputer pokładowy - dzięki przewidzianemu złączu, możliwa jest instalacja komputera pokładowego takiego jak Raspberry Pi czy Nvidia Jetson Nano zdolnego do wykonywania zadań planowania trasy, czy wizji maszynowej;
- Czujnik typu lidar lub sonar - mógłby pozwolić na wykonywanie misji autonomicznych w trudnym terenie;
- Komunikacja LoRa - mogłaby pozwolić na zwiększenie zasięgu operacji pojazdu oraz na przesyłanie dodatkowych danych telemetrycznych pomiędzy operatorem a platformą;
- Ramię robotyczne - pozwoliłoby na wykorzystanie pojazdu do misji wymagających manipulacji i przenoszenia przedmiotów;
- Modyfikacja układu napędowego - mogłaby obejmować zastosowanie przekładni o większym przełożeniu lub silników o niższym parametrze kv. Jej celem byłoby zmniejszenie maksymalnej prędkości pojazdu, dostosowując go do bardziej precyzyjnych zadań autonomicznych.

Bibliografia

- [1] *A2217 motor*. 2015. URL: https://www.aliexpress.com/item/32956581147.html?spm=a2g0o.productlist.main.89.3a38SRgJSRgJQj&algo_pvid=93ee44e9-bf29-4c18-afbc-e396c341e857&aem_p4p_detail=2023122110154424510542010941100016238&algo_exp_id=93ee44e9-bf29-4c18-afbc-e396c341e857-44&pdp_npi=4%40dis%21PLN%2130.08%2130.08%21%21%217.40%21%21%402103892f17031825442763496e848d%2166383851654%21sea%21PL%21906899883%21&curPageLogUid=AaRguhu2ZSCl&search_p4p_id=202312211015442451054201094110001623815_9 (term. wiz. 23. 12. 2023).
- [2] *ATmega2560 datasheet*. 2014. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf (term. wiz. 24. 12. 2023).
- [3] *DigiKey Trace Width Calculator*. URL: <https://www.digikey.com/en/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width> (term. wiz. 08. 01. 2024).
- [4] Dawid Edwards. *Industrial robot costs to drop by half in the next three years*. 2022. URL: <https://roboticsandautomationnews.com/2022/05/12/industrial-robot-costs-to-drop-by-half-in-the-next-three-years/50878/> (term. wiz. 29. 10. 2023).
- [5] Andrzej Filipkowski. *Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe*. Warszawa: WNT, 2006. ISBN: 832043260X. URL: <https://ksiegarnia.pwn.pl/Uklady-elektroniczne-analogowe-i-cyfrowe,68738446,p.html>.
- [6] *FlySky fs-i6c product specification*. 2023. URL: <https://www.flysky-cn.com/i6s-gaishu> (term. wiz. 20. 11. 2023).
- [7] D.F. Heaney. *Handbook of Metal Injection Molding*. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. Elsevier Science, 2018. ISBN: 9780081021538. URL: <https://books.google.pl/books?id=dA6ZDwAAQBAJ>.
- [8] *LM2596 efficiency*. 2012. URL: <https://lygte-info.dk/review/Power%20Adjustable%20buck%20converter%20LM2596%20UK.html> (term. wiz. 25. 12. 2023).
- [9] Bart Mellink. *IBusBM Arduino library*. 2020. URL: <https://github.com/bmellink/IBusBM> (term. wiz. 28. 12. 2023).

- [10] Adam Stambler Michael Ferguson. *Rosserial arduino package summary*. 2022. URL: http://wiki.ros.org/rosserial_arduino (term. wiz. 19.11.2023).
- [11] Łopatka Marian Janusz Szpaczyńska Daniela. „Analysis of the possibility of using rubber track systems in high-speed engineering machines. Part I. Review of design solutions”. W: *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej* 70.1 (2021), s. 71–96. DOI: 10.5604/01.3001.0015.6960.
- [12] *Tracked robots*. 2015. URL: <http://www.robotpark.com/academy/all-types-of-robots/wheeled-robots/tracked-robots/> (term. wiz. 17.12.2023).
- [13] Sean Wilson, Ruben Gameros, Michael Sheely, Matthew Lin, Kathryn Dover, Robert Gevorkyan, Matt Haberland, Andrea Bertozzi i Spring Berman. „Pheeno, A Versatile Swarm Robotic Research and Education Platform”. W: *IEEE Robotics and Automation Letters* 1.2 (2016), s. 884–891. DOI: 10.1109/LRA.2016.2524987.

Dodatki

Spis skrótów i symboli

ESC (ang. *Electronic Speed Controler*) - regulator obrotów silnika, stosowany dla silników bezszczotkowych

ROS (ang. *Robot Operating System*) - to otwarte oprogramowanie pośredniczące, dostarczające zestaw narzędzi i usług do rozwoju, sterowania i zarządzania systemami robotycznymi

Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy

W systemie do pracy dołączono dodatkowe pliki zawierające:

- źródła programu,
- projekt płytki PCB,
- film pokazujący działanie platformy.

Spis rysunków

2.1	Konfiguracje przestrzenne układów napędu gąsienicowego [12]. Zielone - koło napinające; czerwone - koło napędzające.	6
2.2	Wybrana struktura zestawu jezdny.	8
2.3	Wybrany zestaw jezdny zakupiony w sklepie internetowym.	8
2.4	Rama platformy oparta o profile aluminiowe	9
2.5	Zbliżenia sposobu łączenia profili aluminiowych	10
2.6	Przekładnia zębata	12
3.1	Funkcjonalny schemat elektroniki pojazdu	14
3.2	Schemat blokowy architektury wewnętrznej mikrokontrolera ATmega2560 [2]	14
3.3	Projekt płytki PCB. 1 - mikrokontroler, 2 - przetwornica 5 V, 3 - miejsce przygotowane na moduł LoRa, 4 - układ sterowania LED, 5 - układ przetwarzania progowego enkoderów, 6 - złącze do podłączenia komputera pokładowego, 7 - złącze do odbiornika radiowego. Płaszczyzna masy zajmująca obie strony płytki została ukryta dla poprawy czytelności.	16
3.4	Schemat elektroniczny komparatora będącego częścią układu przetwarzania progowego. 1 - wejście sygnału z enkodera, 2 - wejście mikrokontrolera wspierające przerwanie sprzętowe.	18
3.5	Oświetlenie LED pojazdu.	20
3.6	Enkoder optyczny	22
4.1	Schemat układu regulacji.	24
4.2	Przykład dwóch sposobów zliczania impulsów enkodera; a) zliczanie w pełnym cyklu; b) zliczanie z podziałem cyklu. Czerwony wykres - zadana prędkość obrotowa; fioletowy wykres - rzeczywiste obroty silnika; niebieskie oznaczenia - impulsy będące efektem rzeczywistych obrotów silnika; pionowe linie to momenty wykonywania pętli programu.	25
4.3	Schemat przepływu kontroli w programie mikrokontrolera	26
5.1	Testy terenowe platformy.	30

6.1 Końcowy wygląd pojazdu.	34
-------------------------------------	----