



# Zajęcia Projektowe Podstawy Robotyki

*Platforma jeżdżąca automatycznie utrzymująca odległość od  
ściany*

## Autorzy:

Jakub Pająk  
Łukasz Grabarski  
Krzysztof Grądek  
Piotr Legień  
Bartosz Wuwer

AiR Grupa 5TI

# Spis treści

1.	Wprowadzenie . . . . .	2
1.1.	Cel projektu . . . . .	2
1.2.	Założenia wstępne . . . . .	2
2.	Realizacja projektu . . . . .	2
2.1.	Panel sterowania w aplikacji . . . . .	3
2.2.	Interfejs użytkownika aplikacji . . . . .	3
2.3.	Implementacja połączenia Bluetooth . . . . .	6
2.4.	Implementacja przesyłania danych . . . . .	7
2.5.	Implementacja prostego skryptu w odczytującego dane z kanału BLE . . . . .	8
2.6.	Proces wykonywania projektu obudowy robota . . . . .	10
2.7.	Implementacja prostego kodu weryfikującego prawidłowe połączenie silników . . . . .	14
2.8.	Podłączenie oraz weryfikacja poprawności działania czujników laserowych . . . . .	15
2.9.	Montaż silników wewnętrz dolnej komory obudowy . . . . .	16
2.10.	Montaż ogniw wraz z układem BMS oraz podłączenie czujników . . . . .	17
2.10.1.	Obliczanie parametrów zasilania . . . . .	17
2.10.2.	Dobór zasilania . . . . .	19
2.10.3.	Dobór układu BMS . . . . .	21
2.11.	Integracja czujników z silnikami oraz implementacja logiki sterowania . . . . .	22
2.12.	Integracja czujników z silnikami oraz implementacja logiki sterowania . . . . .	23
2.12.1.	Slave . . . . .	23
2.13.	Testy poprawności działania algorytmu sterującego . . . . .	24
3.	Napotkane problemy . . . . .	24
3.1.	Połączenie aplikacji z Arduino . . . . .	24
3.2.	Podłączenie laserowych czujników odległości . . . . .	24
3.3.	Montaż silników oraz kół . . . . .	24
4.	Podsumowanie . . . . .	24

# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Cel projektu

Celem niniejszego projektu jest opracowanie mobilnej platformy robotycznej, zdolnej do automatycznego utrzymywania określonej odległości od ściany. Platforma ta bazować będzie na mikrokontrolerze Arduino oraz laserowych czujnikach odległości typu ToF (ang. Time of Flight). Projekt ma na celu zbadanie i rozwinięcie zaawansowanych algorytmów sterowania i nawigacji, które umożliwią precyzyjne śledzenie ścian w zmiennych warunkach środowiskowych. Dodatkowym celem jest stworzenie wszechstronnego rozwiązania, które można łatwo dostosować do różnych zastosowań, takich jak roboty sprzątające, inspekcyjne czy systemy autonomiczne w logistyce.

## 1.2. Założenia wstępne

Robot zostanie zaprojektowany w oparciu o mikrokontroler Arduino Uno R4, wybrany ze względu na wbudowany moduł Bluetooth LE (LE - Low Energy), co umożliwia zdalne monitorowanie i kontrolę. Silniki zastosowane w projekcie muszą być wyposażone w enkodery, bądź umożliwiać ich dołączenie, co zapewni precyzyjne sterowanie. Czujniki odległości zostaną podłączone do mikrokontrolera za pomocą magistrali I2C. Ze względu na planowaną liczbę czujników (osiem), połączenie ich innymi metodami nie byłoby efektywne.

Zasilanie platformy musi być wystarczające do obsługi co najmniej jednego mikrokontrolera oraz czterech silników. Optymalnym rozwiązaniem będzie zastosowanie czterech ogniw litowo-jonowych połączonych w konfiguracji 2S2P, co zapewni odpowiednią wydajność energetyczną. Dodatkowo, konieczne jest zastosowanie układu zarządzania baterią BMS (ang. Battery Management System), który zabezpieczy ogniwa przed nadmiernym rozładowaniem i przeładowaniem.

Całość konstrukcji zostanie zamknięta w obudowie wykonanej techniką druku 3D. Obudowa będzie podzielona na dwie główne sekcje: dolną, w której zostaną umieszczone silniki oraz ogniwa wraz z układem BMS, oraz górną, zawierającą płytę stykową, mikrokontroler oraz czujniki. Taka konstrukcja zapewni łatwy dostęp do kluczowych komponentów i umożliwia ich sprawną wymianę w razie potrzeby.

Początkowo plan realizacji projektu zakładał stworzenie aplikacji, która byłaby odpowiedzialna za zdalne sterowanie robotem poprzez moduł BLE (ang. Bluetooth Low Energy). W wyniku późniejszych konsultacji plan uległ zmianie jednak aplikacja zostanie wykorzystana jako wsparcie dla automatycznego trybu robota.

# 2. Realizacja projektu

Projekt był realizowany etapami, jednak nie został zastosowany szczegółowy harmonogram. Przybliżone etapy rozwoju projektu:

1. Napisanie aplikacji w wersji dedykowanej systemowi Android w języku Dart,
2. Realizacja prostego skryptu w Arduino IDE w celu weryfikacji połączenia BLE z mikrokontrolerem,
3. Wykonanie projektu obudowy robota w 3D oraz przygotowanie do druku,
4. Wykonanie prostego kodu w celu weryfikacji poprawności połączenia silników do sterownika,
5. Podłączenie oraz weryfikacja poprawności działania laserowych czujników odległości,
6. Montaż silników wewnątrz dolnej komory obudowy,
7. Montaż ogniw wraz z układem BMS,
8. Integracja czujników z silnikami oraz implementacja logiki sterowania,
9. Testy poprawności działania algorytmu sterującego.

## 2.1. Panel sterowania w aplikacji

Podczas analizy możliwych rozwiązań problemu zdalnego sterowania robotem wybór padł na wykonanie aplikacji mobilnej oraz przesyłanie odpowiednich komend za pomocą protokołu BLE. Protokół BLE jest pewnym szczególnym przypadkiem ogólnego protokołu Bluetooth, jest on szczególnie często spotykany w przypadku mniej zaawansowanych mikrokontrolerów takich jak Arduino Uno R4. Dzięki odpowiedniej architekturze, protokół ten pozwala na bardziej efektywne zarządzanie pobieraną energią jednocześnie zachowując niezbędne funkcjonalności.

Przez wzgląd na wcześniej nabycie umiejętności tworzenia aplikacji za pomocą języka Dart przez jednego z członków sekcji, prace nad projektem rozpoczęto od implementacji podstawowej wersji aplikacji realizującej proste przesyłanie informacji w postaci całkowitoliczbowej w celu późniejszej interpretacji otrzymanych danych w środowisku Arduino.

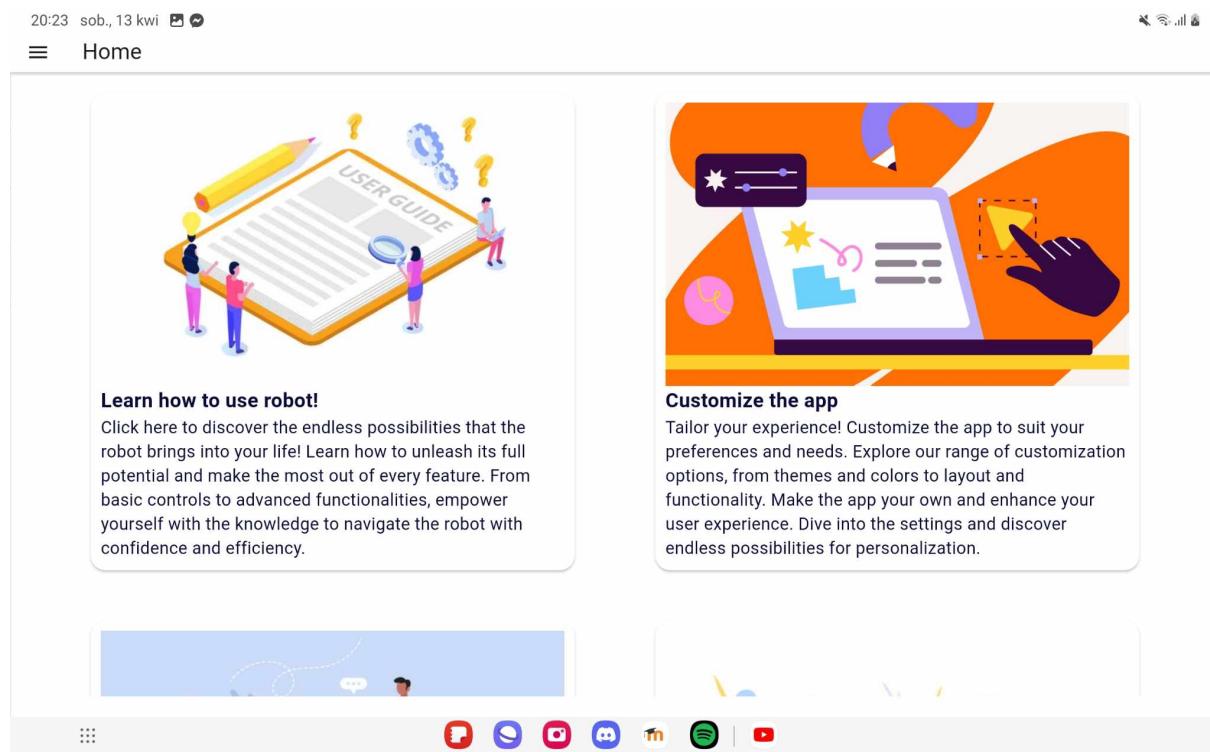
Przez wzgląd na tematykę projektu implementacja aplikacji nie zostanie w poniższym raporcie szczegółowo omówiona. Zostanie przedstawiony podstawowy interfejs graficzny oraz zasada działania kluczowych funkcji, takich jak połączenie lub realizacja przesyłu danych. Autor uważa, iż pewne wyszczególnienie części metod oraz zastosowanych bibliotek może pomóc niektórym osobom w prostrzym znalezieniu informacji na temat poprawnie działającego połączenia z mikrokontrolerem Arduino poprzez Bluetooth.

## 2.2. Interfejs użytkownika aplikacji

Interfejs użytkownika został zaprojektowany w celu umożliwienia podstawowej kontroli nad robotem. Z tego względu, nie poświęcono mu znacznej ilości czasu na poprawę estetyki.

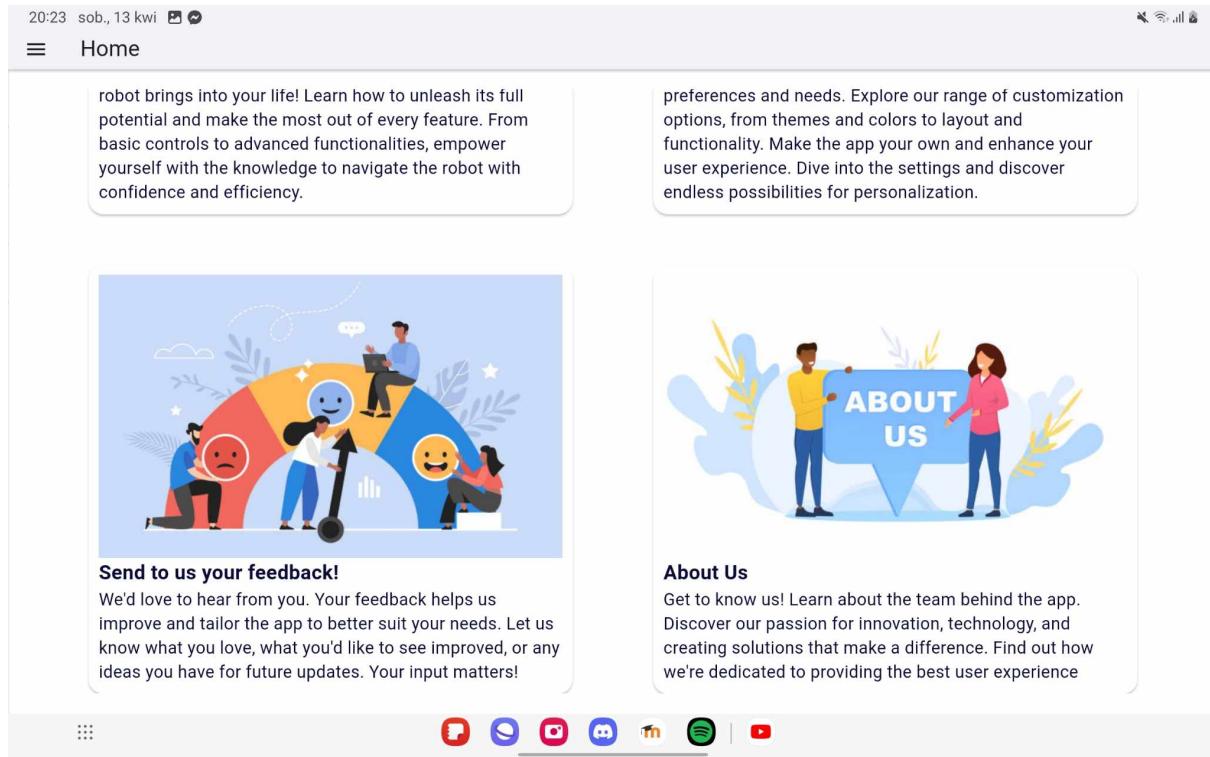
Po uruchomieniu aplikacji, użytkownik trafia na ekran początkowy (ang. Home), przedstawiony na Rysunku 1. Ekran ten zawiera cztery wyróżnione obszary, każdy z których pełni określona funkcję. Pierwsza sekcja ma na celu wprowadzenie nowego użytkownika w sposób bezpiecznego i poprawnego korzystania oraz sterowania robotem.

Druga sekcja prowadzi do ustawień wyglądu aplikacji, gdzie użytkownik może dostosować kolorystykę i inne elementy graficzne interfejsu.



Rysunek 1: Ekran początkowy aplikacji

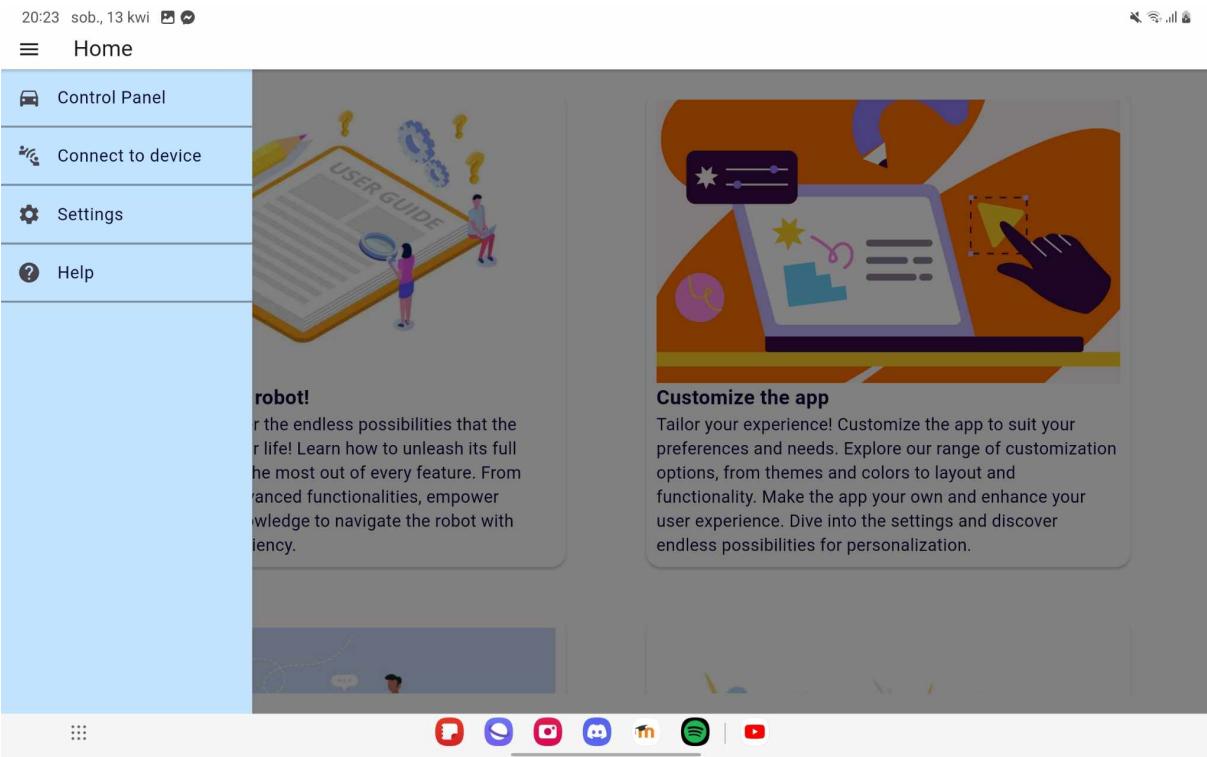
Trzecia i czwarta sekcja dotyczą genezy projektu oraz zespołu, który stworzył robota i aplikację. Ponadto, umożliwiają one użytkownikom przesyłanie opinii, co pozwala na wprowadzenie przyszłych aktualizacji mających na celu poprawę jakości korzystania z aplikacji.



Rysunek 2: Obraz prezentujący ekran początkowy aplikacji

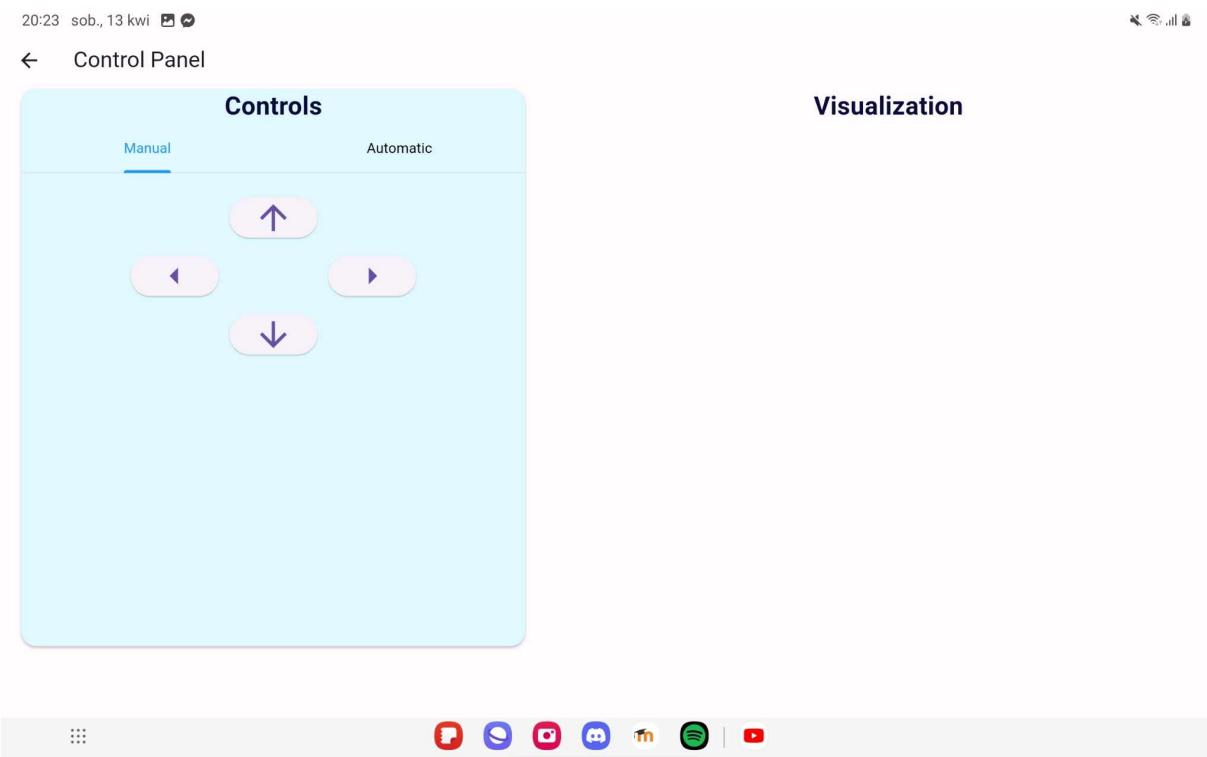
W lewym górnym rogu ekranu znajduje się standardowy dla aplikacji mobilnych przycisk rozwijający menu boczne. Menu zawiera wszystkie niezbędne zakładki, takie jak:

- *Control Panel* (Panel Kontrolny) – umożliwia sterowanie robotem,
- *Connect to device* (Połącz z urządzeniem) – pozwala na wyszukiwanie i łączenie z urządzeniem,
- *Settings* (Ustawienia) – umożliwia dostosowanie parametrów robota,
- *Help* (Pomoc) – zawiera informacje o korzystaniu z aplikacji oraz dane kontaktowe działu wsparcia.



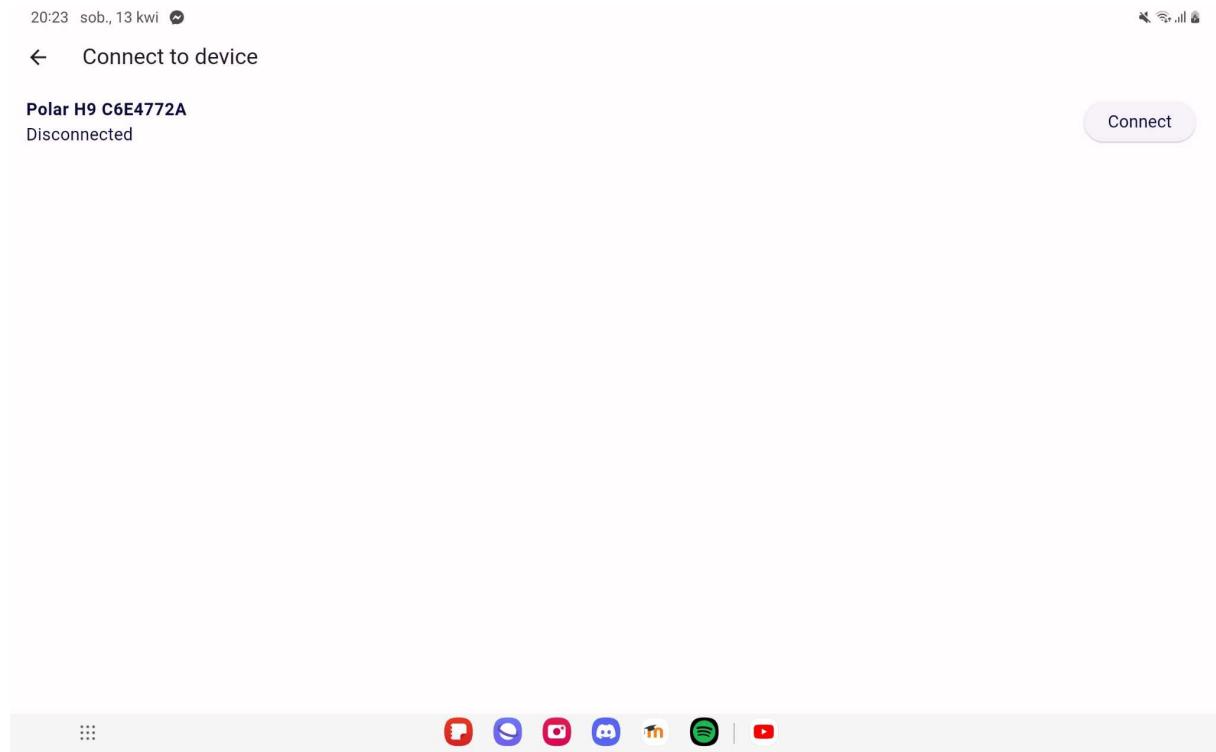
Rysunek 3: Menu boczne aplikacji

Po kliknięciu w pierwszą zakładkę użytkownik zostaje przekierowany do strony odpowiedzialnej za sterowanie robotem. Ekran ten podzielony jest na dwie sekcje. Pierwsza z nich, zatytułowana *Controls* (Kontrolki), umożliwia bezpośrednie sterowanie robotem poprzez odpowiednie przyciski. Po prawej stronie znajduje się sekcja, która w przyszłości ma wyświetlać animację przedstawiającą robota w ruchu.



Rysunek 4: Ekran kontroli robota

Kolejną zakładką jest ekran wyświetlający dostępne urządzenia Bluetooth. Użytkownik może połączyć aplikację z wybranym urządzeniem poprzez naciśnięcie przycisku *Connect* (Połącz). Zaleca się łączenie wyłącznie z urządzeniami będącymi częścią systemu robota.



Rysunek 5: Ekran połączenia z urządzeniami

Zakładki takie jak *Settings* (Ustawienia) i *Help* (Pomoc) nie zostały zaimplementowane z powodu zmiany priorytetów podczas rozwoju projektu. Niemniej jednak, aplikacja ma duży potencjał rozwoju i może zostać rozbudowana w przyszłości.

### 2.3. Implementacja połączenia Bluetooth

Kluczową informacją potrzebną do nawiązania połączenia z mikrokontrolerem Arduino UNO R4 jest fakt, iż mikrokontroler ten korzysta ze specyficznego rodzaju Bluetooth - Bluetooth Low Energy (BLE). W związku z tym konieczne było wykorzystanie odpowiedniej biblioteki, takiej jak *flutter\_blue*. Bibliotekę tę można pobrać za pomocą narzędzia w terminalu, wpisując komendę:

```
flutter pub add flutter_blue
```

Drugą istotną kwestią jest konieczność wykorzystania fizycznego urządzenia do uruchamiania aplikacji. Jest to zalecane ze względu na brak możliwości wyszukiwania urządzeń Bluetooth w niektórych emulatorach.

Pierwszym krokiem do nawiązania połączenia jest wyświetlenie listy wszystkich dostępnych urządzeń Bluetooth. W tym celu wykonywana jest funkcja *\_startScan()*, której zadaniem jest pobranie wszystkich dostępnych urządzeń i dodanie ich do listy w celu późniejszego wyświetlenia.

Funkcja *\_getPairedDevices()* zwraca wszystkie urządzenia, które zostały pomyślnie sparowane.

Po zakończeniu skanowania, proces jest zamykany przy pomocy funkcji *\_stopScan()*.



```
1 void _getPairedDevices() {
2     flutterBlue.connectedDevices.then((List<BluetoothDevice> devices) {
3         setState(() {
4             pairedDevices = devices;
5         });
6     });
7 }
8
9 void _startScan() {
10    flutterBlue.scanResults.listen((List<ScanResult> results) {
11        setState(() {
12            devices.clear();
13            for (ScanResult result in results) {
14                if (!devices.contains(result.device)) {
15                    devices.add(result.device);
16                }
17            }
18        });
19    });
20    flutterBlue.startScan();
21 }
22
23 void _stopScan() {
24     flutterBlue.stopScan();
25 }
```

Rysunek 6: Fragment kodu źródłowego zawierający implementację wyszukiwania dostępnych urządzeń

Kolejnym krokiem jest nawiązanie połączenia z wybranym urządzeniem. Proces ten jest realizowany przez funkcję `_connectToDevice()`, która jako parametr przyjmuje referencję do wybranego urządzenia z listy. Funkcja ta wywołuje metodę kończącą skanowanie, a następnie na instancji klasy `BluetoothDevice` wywołuje metodę `connect()`, która realizuje połączenie. Klasa `BluetoothDevice` jest dostępna dzięki użyciu biblioteki `flutter_blue`.



```
1 void _connectToDevice(BluetoothDevice device) async {
2     _stopScan();
3     await device.connect();
4     setState(() {
5         connectedDevice = device;
6     });
7     Provider.of<ConnectedDeviceProvider>(context, listen: false)
8         .setConnectedDevice(device);
9     PopupInfo.showInfo(
10         context,
11         'The connection have been established correctly with device: ${device}',
12         InfoType.success);
13 }
```

Rysunek 7: Fragment kodu źródłowego zawierający implementację nawiązywania połączenia BLE

## 2.4. Implementacja przesyłania danych

Proces przesyłania informacji do urządzenia Bluetooth opiera się na metodzie `sendValueToArduino()`. Ta metoda przyjmuje dwa parametry: referencję do połączonego urządzenia oraz wartość, która ma zostać przesłana.

Pierwszym krokiem w tej metodzie jest weryfikacja, czy urządzenie zostało poprawnie połączone oraz czy jest możliwe przesłanie danych. W przypadku niepowodzenia tej weryfikacji, w konsoli zostaje wyświetlona stosowna informacja diagnostyczna, co pozwala na szybkie zidentyfikowanie problemu.

Następnie metoda wyszukuje urządzenia o konkretnej charakterystyce, która jest niezbędna do prawidłowego funkcjonowania połączenia. Znalezienie urządzenia o odpowiedniej charakterystyce jest kluczowe, ponieważ zapewnia, że dane zostaną przesłane do właściwego odbiorcy.

Jeśli charakterystyka urządzenia zgadza się z oczekiwana, wartość jest przesyłana. Taki proces zapewnia nie tylko prawidłowość przesyłania danych, ale również bezpieczeństwo połączenia.

Poniżej znajduje się fragment kodu źródłowego, który ilustruje implementację logiki przesyłania informacji do urządzenia.



```
1 class SendingServices {
2     Future<void> sendValueToArduino(
3         BluetoothDevice? connectedDevice, int value) async {
4     if (connectedDevice != null) {
5         List<int> dataToSend = [value];
6         List<BluetoothService> services =
7             await connectedDevice.discoverServices();
8         BluetoothCharacteristic? characteristic;
9
10        services.forEach((service) {
11            service.characteristics.forEach((char) {
12                if (char.uuid.toString() == '19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1215') {
13                    characteristic = char;
14                }
15            });
16        });
17
18        if (characteristic != null) {
19            await characteristic!.write(dataToSend, withoutResponse: false);
20            print('Sent value $value to Arduino.');
21        } else {
22            print('Error: Characteristic not found.');
23        }
24    } else {
25        print('Error: Not connected to any device.');
26    }
27 }
28 }
```

Rysunek 8: Fragment kodu źródłowego zawierający implementację logiki przesyłania informacji do urządzenia

## 2.5. Implementacja prostego skryptu w odczytującego dane z kanału BLE

Fragment prezentowanego kodu rozpoczyna się od zadeklarowania zmiennych globalnych opisujących charakterystyki połączenia Bluetooth. Pierwsza charakterystyka określa identyfikator typu GUID serwisu, następna określa na jaki identyfikator przesyłane są zdarzenia typu "request". Ostatnia wartość definiuje identyfikator na jaki są przesyłane zdarzenia typu 'response'. W przypadku aktualnej wersji aplikacji istotna jest tylko wartość identyfikująca serwis oraz zdarzenia typu request, ponieważ mikrokontroler nie zwraca żadnej informacji do aplikacji. W razie dalszego rozwoju projektu zostanie zaimplementowanie wyświetlanie diagnostyki robota, stanu naładowania baterii oraz stanu pracy silników.

Funkcja `t5Callback()` ma za zadanie pobierać wartość która aktualnie została przesłana do kanału Bluetooth z poziomu aplikacji. Argumenty wejściowe funkcji to urządzenie z którym Arduino nawiązało połączenie, drugi argument to wcześniej wspomniany identyfikator zdarzenia "request".

Następnie wartość jest odczytywana z kanału za pomocą funkcji `readValue()`. Funkcja ta jest częścią biblioteki `ArduinoBLE.h`.

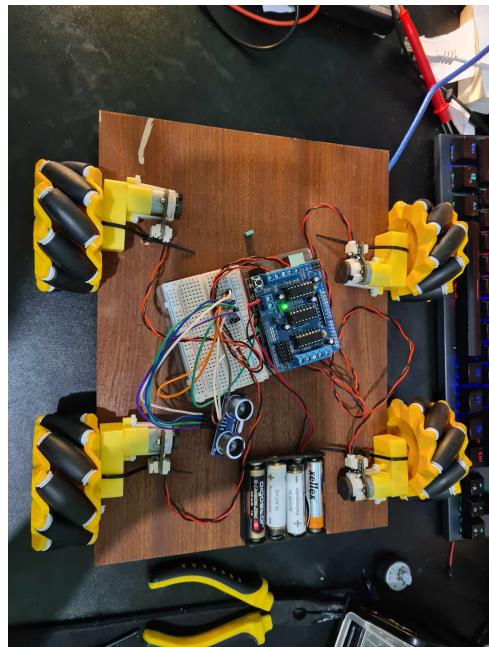
W funkcji `setup()` następuje inicjalizacja odpowiednich charakterystyk oraz za pomocą funkcji `setEventHandler()` zostaje określona sytuacja w której nastąpi wywołanie funkcji `t5Callback` oraz odczytanie danych z kanału.

```
 1 const char *deviceServiceUuid = "19b10000-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214";
 2 const char *deviceServiceRequestCharacteristicUuid = "19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1215";
 3 const char *deviceServiceResponseCharacteristicUuid = "19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1216";
 4
 5 BLEService servoService(deviceServiceUuid);
 6 BLEStringCharacteristic servoRequestCharacteristic(
 7   deviceServiceRequestCharacteristicUuid, BLEWrite, 20); // Increased buffer size to 20
 8 BLEStringCharacteristic servoResponseCharacteristic(
 9   deviceServiceResponseCharacteristicUuid, BLENotify, 20); // Increased buffer size to 20
10
11 void t5Callback(BLEDevice central, BLECharacteristic characteristic) {
12   if (central.connected()) {
13     if (characteristic == servoRequestCharacteristic)
14     {
15       int16_t value = 0;
16       servoRequestCharacteristic.readValue(&value, 2);
17       Serial.println("Received value: ");
18       Serial.println(value);
19     }
20   }
21 }
22
23
24 void setup() {
25   Serial.begin(9600);
26
27   BLE.setDeviceName("Arduino APP");
28   BLE.setLocalName("Arduino APP");
29
30   if (!BLE.begin()) {
31     Serial.println("- Starting Bluetooth® Low Energy module failed!");
32     while (1);
33   }
34
35   BLE.setAdvertisedService(servoService);
36   servoService.addCharacteristic(servoRequestCharacteristic);
37   servoService.addCharacteristic(servoResponseCharacteristic);
38   servoRequestCharacteristic.setEventHandler(BLEWritten, t5Callback); // Set the callback function for when data is written to the characteristic
39   BLE.addService(servoService);
40   servoResponseCharacteristic.writeValue("0");
41
42   BLE.advertise();
43
44   Serial.println("Arduino BLE (Peripheral Device)");
45   Serial.println(" ");
46 }
```

Rysunek 9: Fragment kodu źródłowego przedstawiający implementację konfiguracji kanału Bluetooth na Arduino

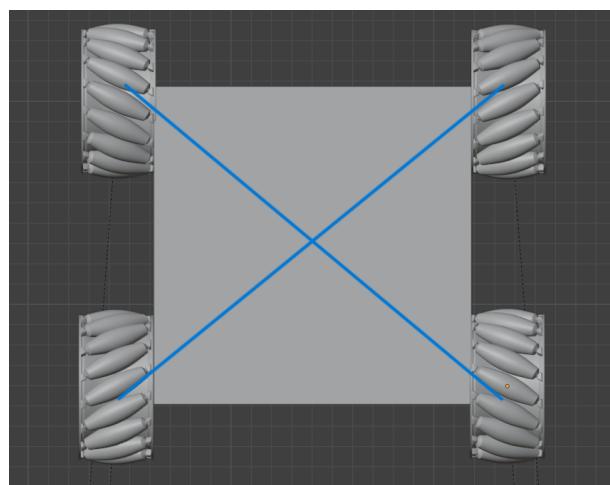
## 2.6. Proces wykonywania projektu obudowy robota

Proces projektowania obudowy dla platformy jeżdżącej stanowił wieloetapowe zadanie, które wymagało dokładnego zaplanowania i licznych poprawek. Pierwsza faza obejmowała stworzenie prototypu, który miał na celu optymalne rozmieszczenie komponentów oraz weryfikację ich poprawnego działania. Ten etap pozwalał zidentyfikować ewentualne problemy konstrukcyjne i funkcjonalne na wczesnym etapie prac.

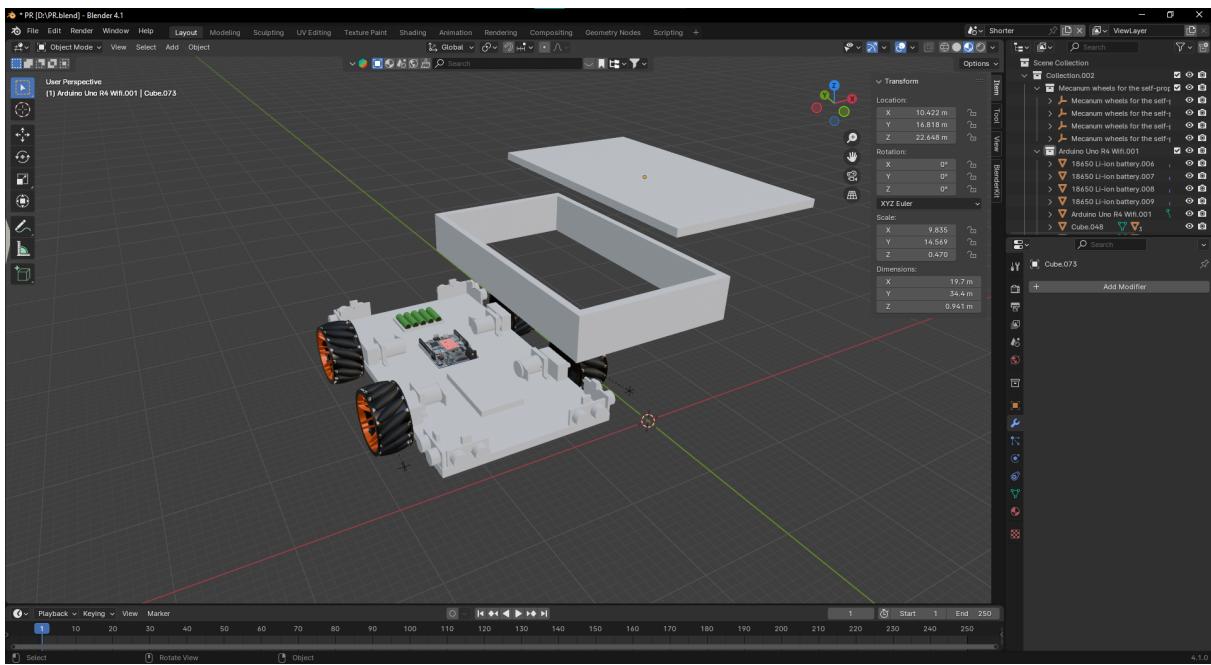


Rysunek 10: Prototypowa konstrukcja mająca na celu sprawdzenie poprawności działania komponentów.

Kolejnym krokiem było opracowanie specjalnej obudowy, zdolnej pomieścić wszystkie wymagane elementy, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej geometrii kół szwedzkich (zwanych również kołami Mecanum). Aby robot działał zgodnie z założeniami, koła musiały być rozmieszczone w orientacji X Y równych odstępach od siebie, a ich rolki powinny być skierowane do środka. Konieczne jest aby z rzutu górnego posiadał przedłużenie osi kół w kształcie znaku X.

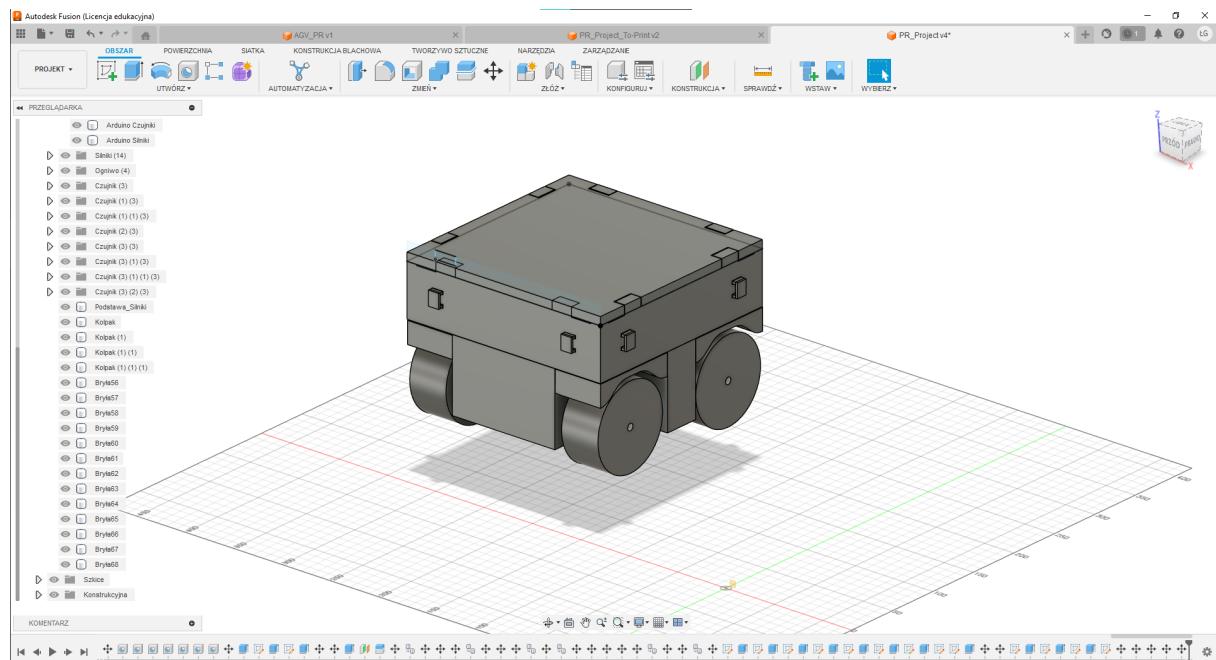


Rysunek 11: Plan rozmieszczenia kół szwedzkich. Kluczowe jest zachowanie kół w równych odstępach od siebie oraz utworzenie znaku X.



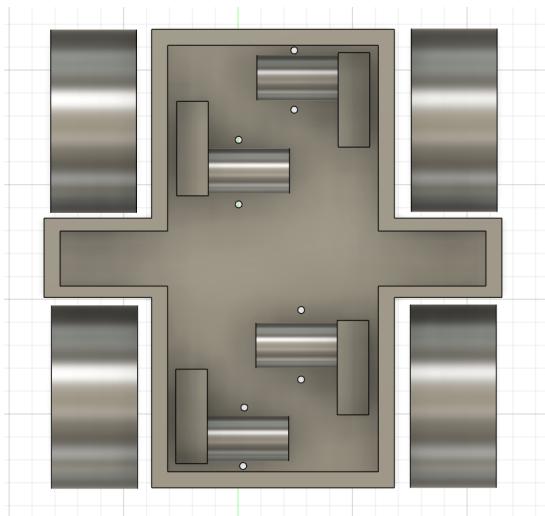
Rysunek 12: Pierwsza wersja projektu zamodelowana w programie Blender 4.1.

Jednakże podczas pierwszego etapu projektu nastąpiły problemy logiczne i konstrukcyjne. Pierwotnie używany darmowy program Blender 4.1 okazał się niewystarczający ze względu na niezgodność formatów eksportu z wymaganiami dostępnej drukarki 3D. W związku z tym, konieczne było przejście na bardziej zaawansowane narzędzie, jakim jest AutoDesrk Fusion. To oprogramowanie pozwoliło na dokładniejsze zaprojektowanie modelu, uwzględniając specyfikację drukarki, która posiadała obszar roboczy o wymiarach 25 cm x 25 cm. Z tego powodu, model musiał zostać zaprojektowany od nowa, z uwzględnieniem ograniczeń.

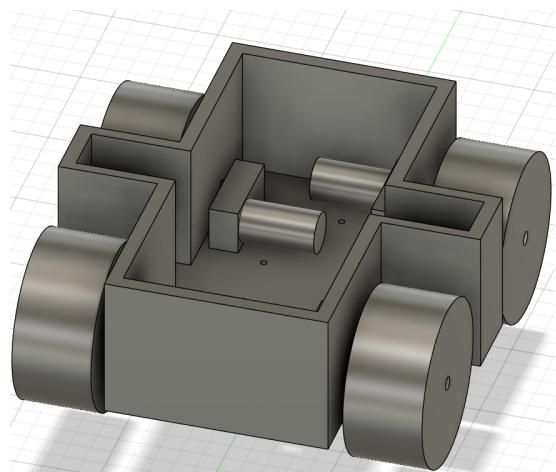


Rysunek 13: Wizualizacja gotowego modelu w programie AutoDesrk Fusion.

Gotowy produkt składa się z dwóch pięter, z których każde pełni inną funkcję. Pierwsze piętro to "piętro maszynowe", gdzie umieszczone zostały moduły napędowe, takie jak silniki kątowe z przekładnią oraz ogniva zasilające w ilości dwóch wraz ze sterownikiem BMS. Wszystkie istotne kable zostały przeprowadzone przez specjalnie przygotowany otwór do drugiego piętra.

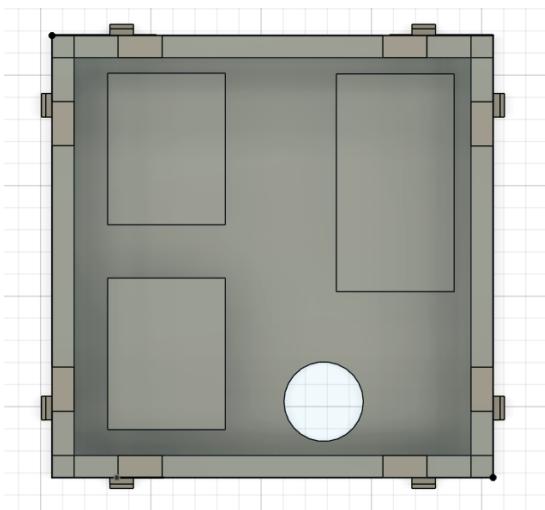


Rysunek 14: Widok rzutu górnego na pierwsze piętro modelu. Znajdują się w nim silniki kątowe z przekładnią oraz miejsce na ogniva zasilające wraz z BMS.

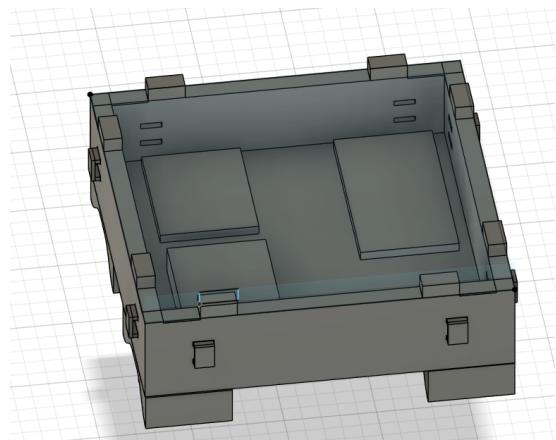


Rysunek 15: Widok rzutu bocznego na pierwsze piętro modelu.

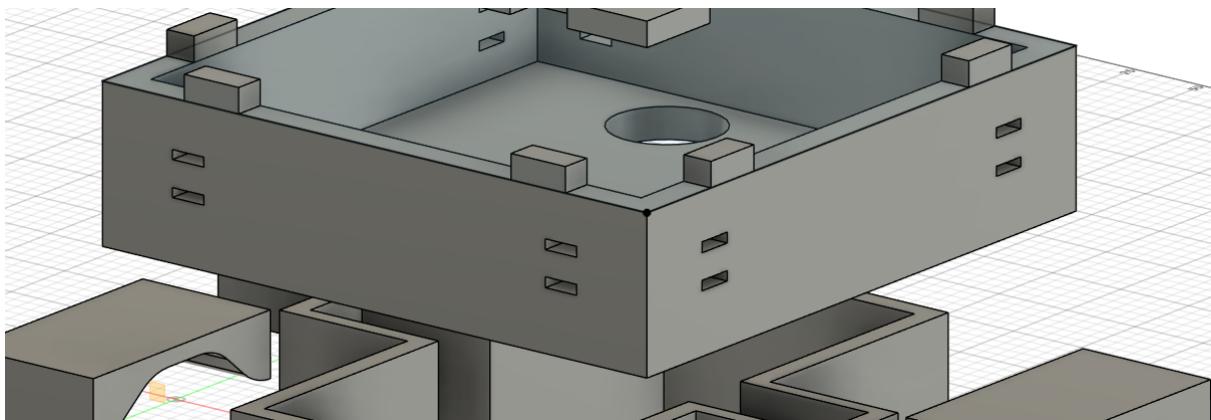
Drugie piętro to "mózg operacyjny" całego projektu. Zawiera ono kluczowe połączenia elektroniczne, w tym dwa mikrokontrolery Arduino UNO 4 i 3 w konfiguracji Master-Slave, oraz osiem czujników laserowych umieszczonych w przygotowanych otworach na ścianach bocznych. Takie rozmieszczenie i organizacja komponentów pozwalają na efektywne zarządzanie funkcjami robota.



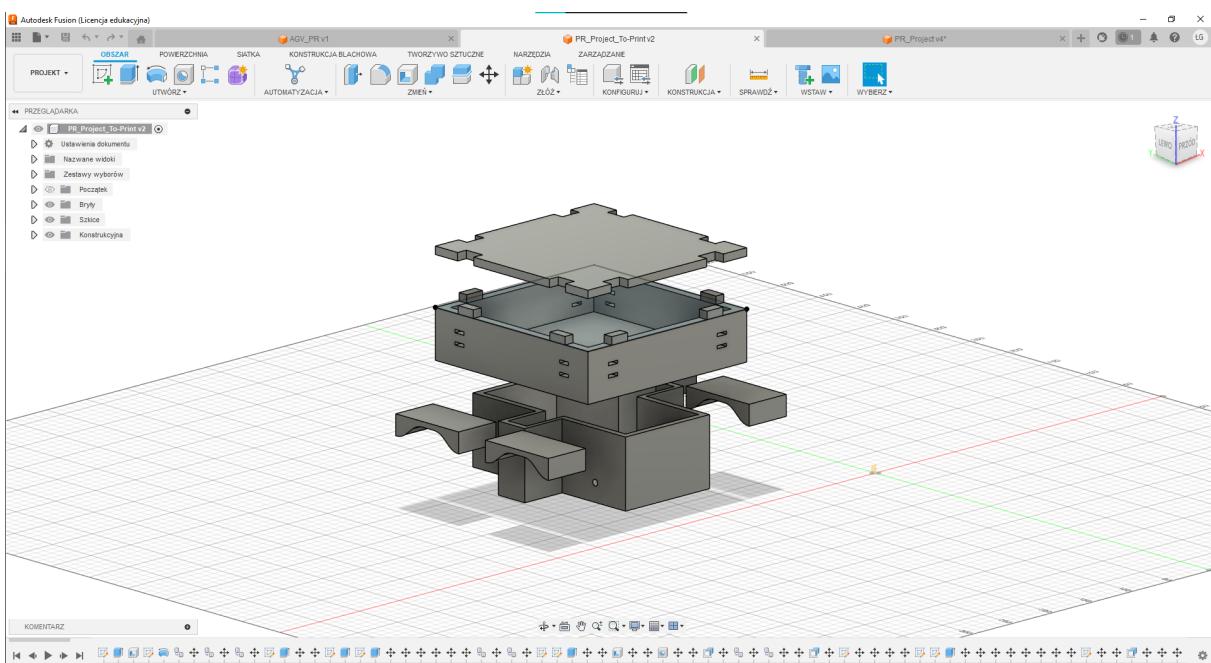
Rysunek 16: Widok rzutu górnego na drugie piętro modelu. Znajdują się w nim dwa mikrokontrolery Arduino UNO oraz płytką stykową.



Rysunek 17: Widok rzutu bocznego na drugie piętro modelu.

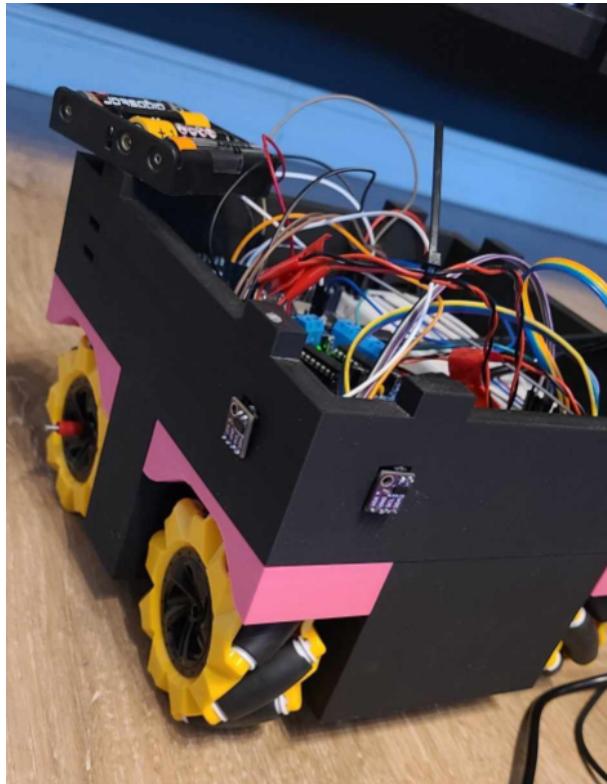


Rysunek 18: Widok rzutu bocznego na specjalnie przygotowane miejsca do wsunięcia czujników laserowych.



Rysunek 19: Gotowy model przesłany do wydruku. Został pozbawiony elementów stylistycznych takich jak koła, silniki kątowe, mikrokontrolerów Arduino UNO oraz czujników laserowych.

Gotowy model zawiera się w wymiarach 20 cm x 20 cm x 15 cm oraz wykonuje wszystkie zadane ruchy zdolne do wykonania tylko przy pomocy kół szwedzkich. Pojazd wykonuje jazdę w kierunku w przód i w tył oraz w lewo i w prawo jak i obrót w miejscu.



Rysunek 20: Gotowy model po złożeniu wszystkich elementów w całość.

## 2.7. Implementacja prostego kodu weryfikującego prawidłowe połączenie silników

Do połączenia silników z Arduino wykorzystano nakładkę Iduino ST1138. Umożliwia ona sterowanie czterema silnikami prądu stałego, o poborze prądu do 600 mA i napięciu zasilania do 36 V. Nakładka jest zasilana dwoma ogniwami 18650.

Weryfikacja połączenia silników została wykonana przy użyciu skryptu zamieszczonego poniżej. Na początku skryptu dodane są biblioteki Wire i AFMotor. Biblioteka Wire jest wykorzystywana do połączenia obu modułów Arduino w konfiguracji master-slave, natomiast biblioteka AFMotor służy do sterowania silnikami z nakładki Iduino.

W następnych liniach zdefiniowane są: adres urządzenia slave oraz globalna wartość bezpiecznego dystansu, który jest potrzebny, aby w przypadku wystającego gzymsu, który mógłby ominąć czujniki, pojazd nie zahaczył o niego.

Dalsza część kodu zawiera wykorzystanie biblioteki AFMotor i przypisanie konkretnych silników do zmiennych.

W ostatniej części, czyli setup, znajduje się połączenie przez bibliotekę Wire, rozpoczęcie komunikacji z prędkością 9600 bitów na sekundę (`Serial.begin(9600)`) oraz ustawienie prędkości wszystkich silników.

Do weryfikacji działania silników można zakomentować pozostałe ustawienia `setSpeed`, tak aby pozostało tylko jedno i sprawdzić, który silnik jest uruchomiony.

```

#include <Wire.h>
#include <AFMotor.h>

#define SLAVE_ADDR 9           // Address of the slave device
#define THRESHOLD_DISTANCE 20 // borderline for distance to the wall

// -----
// Creation of all necesary global instances
// -----

// Motor drivers
AF_DCMotor motor1(1);
AF_DCMotor motor2(2);
AF_DCMotor motor3(3);
AF_DCMotor motor4(4);

// -----
// Other global variables
// -----

int rd; // Global variable that stores value from I2C BUS

// -----
// -----


void setup() {

    Wire.begin(SLAVE_ADDR);
    Wire.onReceive(receiveEvent);
    Serial.begin(9600);
    motor1.setSpeed(250);
    motor2.setSpeed(250);
    motor3.setSpeed(250);
    motor4.setSpeed(250);
    Serial.println("Set up done.");
}

```

Rysunek 21: Fragment kodu źródłowego przedstawiający weryfikację prawidłowego połączenia silników

## 2.8. Podłączenie oraz weryfikacja poprawności działania czujników laserowych

We wczesnej fazie planowania zakładano wykorzystanie ultradźwiękowych czujników odległości. Pomyśl ten okazał się nietrafiony ze względu na sposób przekazywania danych przez te czujniki. Każdy czujnik posiada dwa wyprowadzenia, co przy użyciu ośmiu czujników wymagałoby wykorzystania co najmniej 16 pinów Arduino.

Następnie analiza skupiła się na wykorzystaniu magistrali I2C, która umożliwia podłączenie dużej

liczby czujników za pomocą niewielkiej liczby pinów. Kluczowym warunkiem jest poprawna komunikacja między czujnikiem a mikrokontrolerem.

Laserowe czujniki odległości VL53L0X okazały się trafnym wyborem ze względu na ich korzystny stosunek jakości do ceny. Pomiary odległości są wystarczająco dokładne, a biorąc pod uwagę charakter obiektu wykrywanego, wysoka precyzja nie jest wymagana.

Czujniki zostały podłączone zgodnie z przeznaczeniem poprzez magistralę I2C. Kluczową rolę w podłączaniu wielu identycznych czujników odegrało użycie dodatkowego pinu XSHUT oraz odpowiedniej sekwencji kodu, aby pomyślnie zmienić adres czujnika na magistrali I2C.

Pierwszym krokiem jest ustawienie odpowiedniego pinu GPIO (ang. General Purpose Input/Output) Arduino, podłączonego do pinu XSHUT czujnika, w trybie OUTPUT. Następnie należy skorzystać z funkcji `setAddress()`, aby ustawić odpowiedni adres dla wybranego czujnika. Kolejnym krokiem jest przełączenie stanu pinu Arduino na INPUT oraz odczekanie 10 milisekund.

Wykonanie powyższej sekwencji gwarantuje poprawną zmianę adresu czujnika na magistrali I2C. Użycie samej funkcji `setAddress()` bez zastosowania pinu XSHUT nie zmieni adresu czujnika.



```
1 #define Sensor2_newAddress 42
2
3 pinMode(XSHUT_pin2, OUTPUT);
4
5 Sensor2.setAddress(Sensor2_newAddress);
6 pinMode(XSHUT_pin2, INPUT);
7 delay(10);
```

Rysunek 22: Fragment kodu źródłowego przedstawiający sekwencję konieczną do zmiany adresu czujnika

## 2.9. Montaż silników wewnętrz dolnej komory obudowy

Silniki zostały przymocowane do dolnej części pojazdu za pomocą taśmy aluminiowej. Po wykonaniu tego kroku, przystąpiono do montażu kół na silnikach. Koła zostały zamontowane na wygwintowanej szprysze, która została przymocowana bezpośrednio do silników.

W celu wyeliminowania luzów na silnikach, podjęto dodatkowe działania. Wycięto dwie listwy aluminiowe, które zamontowano w taki sposób, aby przez nie przechodziły szprychy. Dzięki zastosowaniu tych listew, luz na kołach został znacznie zminimalizowany, co zapewniło stabilność całej konstrukcji.

Wykonanie tych czynności pozwoliło na usztywnienie wału silnika i zapewniło solidne połączenie kół z silnikami.



Rysunek 23: Listwa boczna usztywniająca mocowanie silnika i eliminująca luzy na kole.

## 2.10. Montaż ogniw wraz z układem BMS oraz podłączenie czujników

### 2.10.1. Obliczanie parametrów zasilania

Robot AGV korzysta z czterech silników kątowych z przekładnią SJ02. Każdy silnik sterowany jest z nakładek na zestaw Arduino L293D Motor Driver Board. Moduł ten pozwala na regulowanie prędkości obrotowej i kierunku czterech silników prądu stałego o prądzie do  $I_n = 600mA$  i napięciem do  $U_n = 36V$ , zasilanie silników zaleca się poprowadzić przez kanał odseparowany od linii zasilania z USB. Sam moduł musi być zasilany napięciem 4,5 do 16 V, w przypadku napięcia wyższego niż 12 V, zaleca się zasilać osobno moduł i Arduino zdejmując zworkę PWR\_IMP. Specyfikację L293D Motor Driver Board przedstawiono na rysunku 24.

#### Specyfikacja sterownika silników krokowych

- Napięcie zasilania: 4,5 V do 16 V
- Sterownik: 2 x L293D
- Maksymalny prąd na kanał: 600 mA (chwilowy do 1,2 A)
- Rejestr przesuwny 74HC595
- Liczba obsługiwanych silników:
  - 4 silniki DC
  - 2 silniki krokowe
- 2 złącza serw
- Przycisk reset

Rysunek 24: Specyfikacja modułu L293D Motor Driver Board. [1]

Silniki prądu stałego posiadają następującą specyfikację 25. Silnik bez obciążenia pobiera prąd od  $I_{o_{min}} = 140mA$  do  $I_{o_{max}} = 170mA$ , a podczas zwarcia (unieruchomiony wał) może płynąć maksymalnie prąd  $I_{stall} = 2,8A$ .

## Specyfikacja silnika kątowego z przekładnią

- Napięcie pracy silnika: od 3 V do 7,5 V
- Przekładnia: 120:1
- Parametry dla pracy bez obciążenia przy zasilaniu 6 V
  - Prędkość: 160 obr/min
  - Prąd: 0,17 A
- Parametry dla pracy bez obciążenia przy zasilaniu 3 V
  - Prędkość: 60 obr/min
  - Prąd: 0,14 A
- Maksymalny prąd: 2,8 A
- Maksymalny moment obrotowy: 0,8 kg\*cm (0,07 Nm)
- Szacunkowy moment obrotowy: 0,2 kg\*cm (0,02 Nm)
- Napięcie pracy enkodera: od 4,5 V do 7,5 V
- Średnica wału: 5,4 mm (obustronnie ścięty)
- Temperatura pracy: od -10 °C do 60 °C
- Masa: 50 g

Rysunek 25: Specyfikacja silnika TT Geared Motor with Encoder. [2]

Zasilanie silników powinno w związku z tym posiadać napięcie jednego silnika  $U = 3 \dots 7,5V$  i sumę prądów znamionowych każdego silnika czyli  $I = 560 \dots 680mA$ , a także posiadać gotowość na pobór maksymalnego prądu zwarciowego, w przypadku zatrzymania wszystkich kół robota  $I_{stall} = 11,2A$ , wartości umieszczone w tabeli 1. Dodatkowo warto zadbać o maksymalnie dużą pojemność, by robot mógł działać jak najdłużej.

Specyfikacja zasilania silników prądu stałego	Wartość min	Wartość max
U[V]	3	7,5
I [mA]	560	680
$I_{stall}$	11200	

Tabela 1: Wymagane wartości zasilania silników.

Arduino i moduł sterujący silnikami mogą być wspólnie zasilane dowolnym pakietem ogniw o napięciu  $U_{ster} = 4,5 \dots 12V$ .

## 2.10.2. Dobór zasilania

Robot musi być zasilany przez baterie żeby mógł być w pełni mobilny. Znając wymagania zasilania, należy teraz rozpatrzyć możliwe typy ogniw i ich połączenia. Połączenie równoległe ogniw sumuje pojemność i obciążalność pakietu  $I_{rwnolege} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$ , a połączenie szeregowe napięcie  $U_{szeregowe} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$ . Pakiety te oznacza się nomenklaturą XSYP, gdzie X to liczba ogniw połączonych szeregowo, a Y ilość ogniw połączonych równolegle dla każdej baterii w szeregu, np. 3S2P oznacza pakiet 6 ogniw, 3 połączone szeregowo i 2 równolegle dla każdej baterii w szeregu.

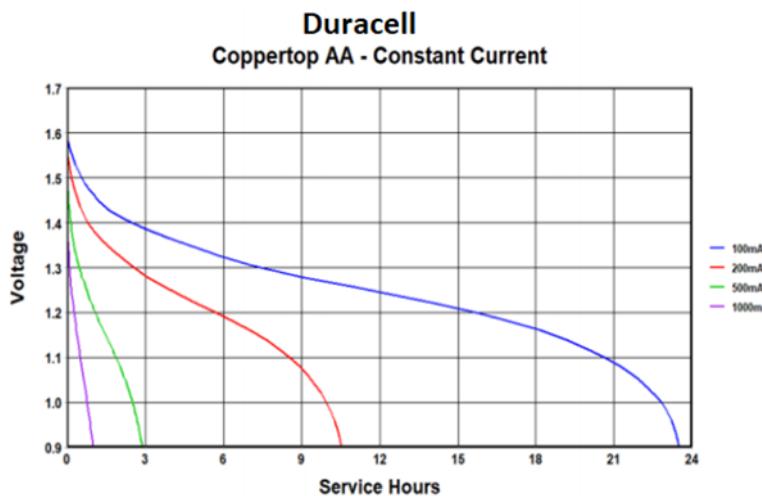
Pakiet powinien mieć wypadkowe napięcie  $U = 3 \dots 7,5V$ , a także być gotowy na pobór prądu zwarciowego  $I_{stall} = 11,2A$  w przypadku zaklinowania wszystkich kół robota. W związku z tym moc zasilania powinna wynosić  $P = 33,6 \dots 67,2W$ .

### (A) Baterie alkaliczne

Ten rodzaj baterii charakteryzuje się jednorazowością, wykorzystując roztwór alkaliczny jako elektrolit. Napięcie ogniwa zwyczajowo wynosi 1,5 V. Ich dużą zaletą jest dostępność i niska cena.

Producenci baterii nie podają pojemności, jako że zależy ona w dużej mierze od warunków, w których bateria pracuje, ale można założyć, że dobre ogniwo alkaliczne typu AA powinno mieć do 2300 mAh. Brakuje także bezpośrednich informacji o maksymalnym prądzie obciążenia, producenci zazwyczaj testują spadek napięcia dla maksymalnie prądu 1 A. Najprawdopodobniej bateria tego typu byłaby w stanie zostać obciążone większym prądem, jednakże patrząc na pojemność widzimy, że czas działania robota spadł by gwałtownie.

Ogniwa tego typu nie są odpowiednie dla zastosowania w robocie, by uzyskać potrzebne napięcie trzeba połączyć dwie baterie szeregowo (2S), jednak z powodu niskiej prędkości obrotowej i spadku napięcia, które następuje gwałtownie wraz z dużym poborem prądu 26, należy zastosować 3S lub 4S by uzyskać odpowiedni woltaż.



Rysunek 26: Wykres spadku napięcia do czasu pracy dla prądów ogniw Duracell.

Następnym problemem jest jednorazowość ogniw, jeśli wypadkowa pojemność będzie zbyt mała to używanie ich szybko przestanie być opłacalne. Należy także zwrócić uwagę na to, że wypadkowe napięcie nie spadło poniżej 3 V, czyli dla pakietu 3 baterii szeregowych (3S) 1 V na każdej baterii, a dla 4 ogniw szeregowych (4S) 0,75 V. Z wykresu spadków napięć 26 widać, że dla prądu 1 A, czas ten nie przekracza nawet 1,5 godziny. Nawet z zgrubnych obliczeń, przyjmując, że prąd obciążenia jednego silnika wynosi 600 mA, pobór prądu robota będzie wynosił 2,4 A. By ograniczyć pobór prądu na jednym pakiecie ogniw szeregowych, należy połączyć je równolegle pięciokrotnie (5P), robot będzie wtedy w stanie pracować w układzie 3-szeregowym (3S5P) przez około 2 godziny i 45 minut, w układzie 4-szeregowym (4S5P) czas ten wydłuży się w przybliżeniu do niecałych 3 godzin. W przypadku zwarcia silnika, baterie te zostaną gwałtownie rozładowane i czas pracy robota znaczco spadnie.

Praca robota nie przekracza trzech godzin, a żeby osiągnąć taki wynik trzeba użyć 15 do 20 baterii. Podsumowując, użycie ogniw alkalicznych jest nieopłacalne.

### (B) Akumulatory litowo-jonowe (Li-Ion)

Ogniwa te można ładować, rolę elektrolitu pełnią w nich sole litowe. Napięcie znamionowe wynosi 3,6 V. Ich zaletą jest duża gęstość energii. Ogniwa te nie mogą zostać nadmiernie naładowane, ani rozładowane, w związku z tym potrzebują układu BMS (ang. Battery Management System). Stosunkowo duża cena wymusza budowanie mniejszych pakietów, jednakże możliwość ładowania ogniw znacznie zwiększa funkcjonalność nawet dla krótszego czasu pracy robota.

Ze względu na dostępność do obliczeń posłużono się ogniwem 18650 Li-ion Samsung INR18650-25R 2500mAh 20A [27]. Ognisko te ma przystępna cenę, wysoką pojemność i przede wszystkim wysoki maksymalny prąd rozładowania, daje to pewność, że w przypadku awarii nie dojdzie do uszkodzenia baterii i potencjalnego pożaru.

### Specyfikacja techniczna ogniska



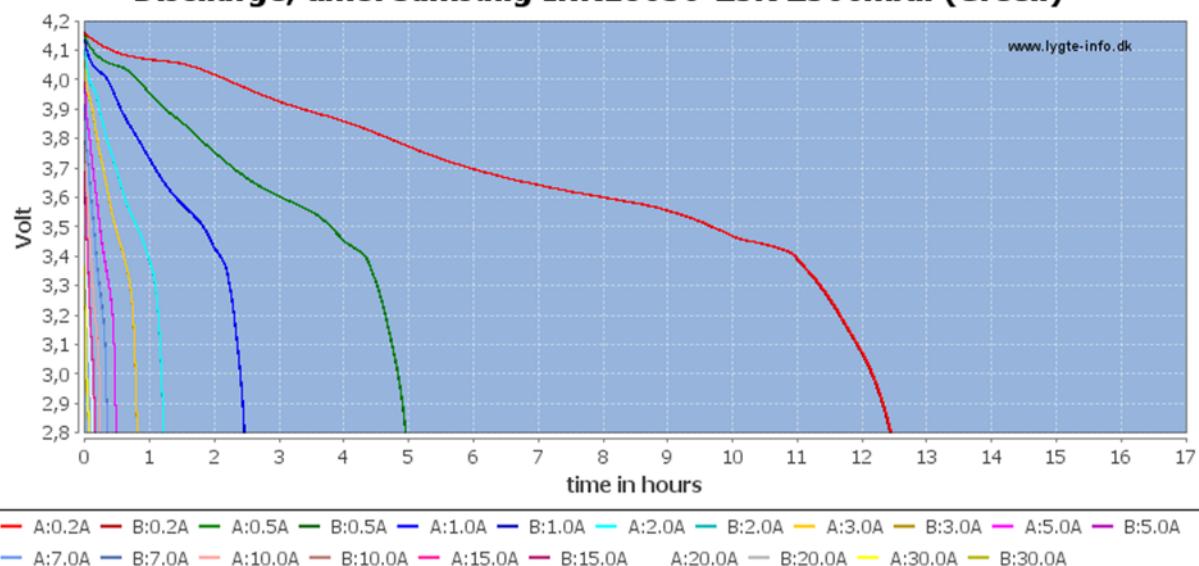
- Oznaczenie: 18650
- Model: Samsung INR18650-25R 20A
- Typ: akumulator litowo-jonowy
- Pojemność typowa: 2500 mAh
- Pojemność minimalna: 2450 mAh
- Napięcie nominalne: 3,7 V
- Maksymalny prąd ładowania: 4 A
- Maksymalny prąd rozładowania: 20 A
- Średnica: 18,3 mm
- Wysokość: 64,85 mm
- Masa: 45 g

Rysunek 27: Specyfikacja ogniska 18650 Li-ion Samsung INR18650-25R

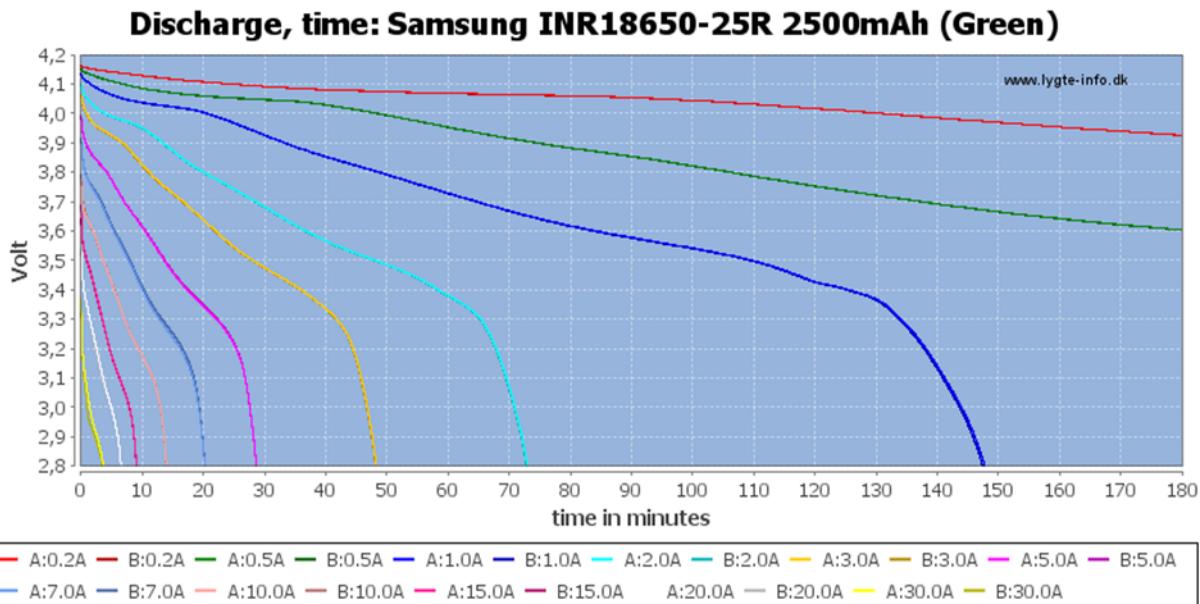
Zgodnie z specyfikacją producenta nie należy ładować ogniska powyżej napięcia  $4,20 \pm 0,05$  V, a także nie należy rozładowywać go do wartości poniżej 2,5 V [5]. W przypadku użycia ognisk jako zasilania robota AGV, nie należy doprowadzić do obniżenia napięcia wypadkowego poniżej 3 V.

Napięcie znamionowe akumulatora Li-Ion wynosi 3,7 V, jest to wystarczająca wartość by zasilić robota w granicach dolnego napięcia zasilania. W związku z tym nie jest konieczne by łączyć więcej ognisk w szereg, jednak należy zwrócić uwagę na wykres spadku napięcia (Rysunek 28, Rysunek 29).

### Discharge, time: Samsung INR18650-25R 2500mAh (Green)



Rysunek 28: Wykres spadku napięcia w czasie dla prądów obciążenia ogniska INR18650-25R w godzinach.



Rysunek 29: Wykres spadku napięcia w czasie dla prądów obciążenia ogniw INR18650-25R w minutach.

Dla prądu obciążenia wysokości 3 A, który można uznać za przybliżony prąd pracy w obciążeniu dla 4 silników robota, czas rozładowania pojedynczego akumulatora od pełnego naładowania do 3 V wynosi około 47 minut. Jest to znacznie lepszy czas w porównaniu z bateriami alkalicznymi, zwłaszcza, że ognisko po ponownym naładowaniu zachowuje zbliżone zależności napięcia do czasu (na wykresie wykres B:2.0A pokrywa się z pierwszym rozładowaniem A:2.0A).

Najprostszym rozwiązaniem będzie połączenie ogniw równolegle by ograniczyć prąd obciążenia na pojedynczym akumulatorze, wydłużając jednocześnie pracę robota. Wyniki czasów pracy zapisano w tabeli (Tab. 2.B.1), za wyjściowy prąd obciążenia uznano 3 A, a czasy sczytano z wykresów spadków napięć (Rys. 28, 29), dla wartości pośrednich wyznaczono wartość średnią. Obliczono także czas pracy z pojemności typowej (Tab. 2.B.2).

Alternatywnie, w celu zwiększenia prędkości obrotowej silników, można użyć pakietów dwóch ogniw szeregowych. Napięcie wypadkowe będzie wynosić wtedy 7,4 V.

W przypadku większego napięcia zwiększy się pobór prądu i czas pracy się zmniejszy, ciężko oszacować teoretycznie tą różnicę, należy ją sprawdzić w praktyce.

Podsumowując, ogniska Li-Ion nadają się idealnie jako zasilanie robota AGV, zwłaszcza biorąc pod uwagę potencjalnie wysoki prąd zwarciowy silników. Przez kwestie finansowe ograniczono ilość możliwych do użycia ognisk do 4, w związku z tym najlepszym rozwiązaniem jest użycie pakietu 2S2P maksymalizując prędkość obrotową, lub 1S4P maksymalizując czas pracy.

### 2.10.3. Dobór układu BMS

W celu zabezpieczenia układu należy użyć układ BMS, który będzie zabezpieczał przed nadmiernym rozładowaniem akumulatorów Li-Ion oraz nadmiernym naładowaniem. Dodatkowo BMS zabezpiecza przed zbyt dużym poborem prądu. W przypadku owego projektu, prąd rozruchowy silników może być bliski prądu zwarciowemu czterech silników, czyli 11,2 A.

## **2.11. Integracja czujników z silnikami oraz implementacja logiki sterowania**

## 2.12. Integracja czujników z silnikami oraz implementacja logiki sterowania

### 2.12.1. Slave

Mikrokontroler Arduino UNO 3 skonfigurowany do pracy typu Slave odbiera paczkę danych przez zmienną "rd" wysyłane przez Master.

```
21 int rd;
22 int rd_old; // Global variable that stores value from I2C BUS
23
24 // -----
25 // -----
26
27 > void setup() { ...
28 }
29
30 void loop() {
31
32     if(rd == 0){
33         Stop();
34     }
35
36     if(rd == 1){
37         Left();
38     }
39
40     if(rd == 2){
41         Right();
42     }
43
44     if(rd == 3){
45         Forward();
46     }
47
48     delay(50);
49 }
```

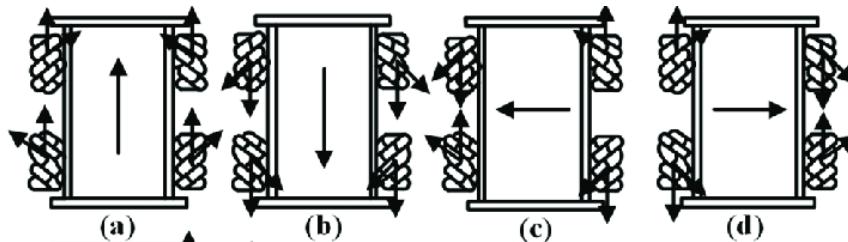
Rysunek 30: Fragment kodu źródłowego przedstawiający odbiór komunikatów przesyłanych przez mikrokontroler Master.

Zgodnie z odbieranym komunikatami o zmianie kierunku indeksowanymi od 0 do 3, program wywołuje odpowiednie funkcje.

```
88 void Right(){
89
90     motor1.run(BACKWARD); //LT
91     motor2.run(FORWARD); //PT
92     motor3.run(BACKWARD); //PP
93     motor4.run(FORWARD); //LP
94 }
95
96 void Left(){
97
98     motor1.run(FORWARD); //LT
99     motor2.run(BACKWARD); //PT
100    motor3.run(FORWARD); //PP
101    motor4.run(BACKWARD); //LP
102 }
103
104 void Forward(){
105
106     motor1.run(BACKWARD);
107     motor2.run(BACKWARD);
108     motor3.run(BACKWARD);
109     motor4.run(BACKWARD);
110 }
111
112 void Stop(){
113
114     motor1.run(RELEASE);
115     motor2.run(RELEASE);
116     motor3.run(RELEASE);
117     motor4.run(RELEASE);
118 }
119 // TODO:
120 // This function is responsible for calculating the steering
```

Rysunek 31: Fragment kodu źródłowego przedstawiający implementację ruchu pojazdu w odpowiednich kierunkach.

Funkcje określające kierunek jazdy zostały skonstruowane wedle logiki i geometrii działania kół szwedzkich.



Rysunek 32: Wizualizacja zależności kierunku jazdy od obrotu kół szwedzkich.

## 2.13. Testy poprawności działania algorytmu sterującego

### 3. Napotkane problemy

#### 3.1. Połączenie aplikacji z Arduino

#### 3.2. Podłączenie laserowych czujników odległości

#### 3.3. Montaż silników oraz kół

Pierwszym problemem było zamontowanie samych silników. Okazało się, że dziury na mocowanie silników znajdująły się w innych miejscach niż było to potrzebne. W związku z tym, konieczne było wprowadzenie listwy aluminiowej, która pozwoliła na odpowiednie przymocowanie silników do dolnej części pojazdu.

Kolejnym wyzwaniem było mocowanie kół do silników. Początkowo używaliśmy długich śrub do przy mocowania kół, jednak okazało się, że koła były bardzo niestabilnie zamocowane i miały spore luzy. Aby wyeliminować te luzy, wprowadziliśmy boczne listwy aluminiowe, przez które przechodzą długie gwin towane szprychy. To rozwiązań znacznie poprawiło stabilność kół i zminimalizowało luzy, zapewniając lepsze działanie całego układu.

Dzięki tym działaniom udało się rozwiązać napotkane problemy i zakończyć montaż kół i silników w sposób zapewniający solidność i niezawodność konstrukcji.

### 4. Podsumowanie