

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**BALANCUJÍCÍ ROBOT**

Bc. Pavel Prokop

Diplomová práce  
2021

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Prokop**  
Osobní číslo: **I19304**  
Studijní program: **N0714A150005 Automatické řízení**  
Studijní obor: **Automatické řízení**  
Téma práce: **Balancující robot**  
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

### Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh a realizace balancujícího robota na principu funkce inverzního kyvadla. Pro realizaci robota bude vytvořen model ve formě 3D návrhu, ve volně dostupném typu CAD software. Základem řídicí jednotky robota bude jednočipový mikročip řady ATmega doplněný o příslušnou senzorickou síť. Pohyb robota bude realizován diferenciallyně řízeným podvozkem, s pohonem stejnosměrnými motory. Robot bude plnit úlohy řízení stabilizace polohy a pohybu pomocí vytvořených a implementovaných algoritmů řízení. Ovládání robota bude kombinací autonomního a dálkového řízení. Součástí práce bude rešerše na dané téma, kompletní výrobní dokumentace robota, zdrojové kódy vytvořeného software a podrobný uživatelský manuál.

Rozsah pracovní zprávy: **60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4

EVERETT, H., R. Sensors for Mobile Robots, Theory and Applications. 1.vyd. A.K.Peters, Ltd. ISBN 1-568811-048-2.

NOVÁK, P. Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení, BEN-technická literatura, Praha 2007, ISBN 80-7300-141-1

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**  
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **6. listopadu 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2021**

L.S.

---

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Daniel Honc, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 16. listopadu 2020

## **Prohlášení**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Bc. Pavel Prokop

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za odborné rady a konzultace. Dále chci poděkovat své rodině a přátelům za podporu v celém průběhu studia.

V Pardubicích dne

Bc. Pavel Prokop

## **ANOTACE**

*Diplomová práce se zabývá návrhem, realizací a programováním balancujícího robota založeném na principu inverzního kyvadla. Návrh těla robota byl vypracován ve formě 3D modelu a vytištěn pomocí 3D tiskárny. Pro ovládání a řízení je použit jednočipový mikropočítač řady ATmega doplněný o příslušné vstupně-výstupní obvody. Pro podpůrné obvody a svorkovnice byla navržena a vytvořena deska plošných spojů ve formě doplňujícího modulu. Pohyb robota je zajištěn dvojicí krokových motorů, které tvoří diferenciální podvozek. Robot pomocí navrženého programu, jehož základem je kaskádní regulátor, plní funkci stabilizace polohy, dálkového ovládání a autonomního režimu. Ovládání a konfigurace robota je zajištěna přes integrovaný dotykový displej nebo mobilní telefon s operačním systémem Android podporující komunikačním rozhraní Bluetooth.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*robot, inverzní kyvadlo, kaskádní regulace, dálkové ovládání, dotykový displej*

## **TITLE**

*BALANCING ROBOT*

## **ANNOTATION**

*The diploma thesis deals with the design, implementation and programming of a balancing robot based on the principle of an inverse pendulum. The design of the robot body was developed as a 3D model and printed on a 3D printer. For controlling the robot is used a single-chip microcomputer of ATmega series, supplemented by input-output circuits. For input-output circuits and terminal blocks was developed a printed circuit board as additional module. The movement of the robot is ensured by a pair of stepper motors, which form a differential chassis. Using the developed program, the robot performs the function of position stabilization, remote control and autonomous mode. Control and configuration of the robot is provided via a touch screen or a mobile phone with the Android operating system supporting the Bluetooth communication interface.*

## **KEYWORDS**

*robot, inverse pendulum, cascade regulation, remote control, touch display*

## OBSAH

	Seznam zkratk a značek .....	9
	Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí .....	10
	Seznam ilustrací .....	12
	Seznam tabulek .....	14
	ÚVOD .....	15
1	REŠERŠE.....	16
1.1	B-ROBOT .....	16
1.2	BALA.....	17
1.3	SEGWAY.....	17
2	INVERZNÍ KYVADLO .....	19
2.1	MATEMATICKÝ MODEL .....	19
3	KROKOVÉ MOTORY .....	22
3.1	KROKOVÝ MOTOR S PROMĚNNOU RELUKTANCÍ.....	23
3.2	KROKOVÝ MOTOR S PERMANENTNÍM MAGNETEM.....	23
3.3	HYBRIDNÍ KROKOVÝ MOTOR.....	24
3.4	ZPŮSOBY ŘÍZENÍ .....	27
3.4.1	Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze .....	27
3.4.2	Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází .....	28
3.4.3	Osmitaktní řízení.....	29
3.4.4	Mikrokrokování .....	30
4	POUŽITÉ KOMPONENTY .....	32
4.1	ŘÍDICÍ OBVOD ARDUINO.....	32
4.2	KROKOVÝ MOTOR .....	33
4.3	ŘADIČ KROKOVÉHO MOTORU.....	34
4.4	SENZORY A SNÍMAČE .....	35
4.4.1	Gyroskop a akcelerometr .....	36
4.4.2	Senzor sledování čáry .....	38
4.4.3	Ultrazvukový senzor vzdálenosti .....	39
4.5	NAPÁJENÍ.....	41
4.5.1	Step-down měnič.....	42
4.6	OVLÁDÁNÍ A KOMUNIKACE .....	42
4.6.1	Dotykové ovládání .....	42

4.6.2	Dálkové řízení .....	44
5	REALIZACE .....	46
5.1	KONSTRUKCE ROBOTY .....	46
5.2	NÁVRH DPS .....	48
5.3	KONFIGURACE ŘADIČE KROKOVÉHO MOTORU .....	53
5.4	MĚŘENÍ ÚHLU POMOCÍ GYROSKOPU A AKCELEROMETRU .....	53
5.5	DÁLKOVÉ OVLÁDÁNÍ .....	56
5.5.1	Konfigurace bluetooth modulu .....	56
5.5.2	Mobilní aplikace .....	57
5.6	OVLÁDÁNÍ DOTYKOVÝM DISPLEJEM .....	59
5.6.1	Komunikační protokol .....	59
5.6.2	Uživatelské rozhraní .....	61
5.7	TVORBA PROGRAMU PRO ŘÍDICÍ SYSTÉM.....	61
5.7.1	Režim balancování a dálkového ovládní.....	64
5.7.2	Autonomní režim .....	65
5.7.3	Realizace akčního zásahu regulátoru .....	67
5.8	OVĚŘENÍ FUNKCE .....	69
5.8.1	Nastavení parametrů uzavřené regulační smyčky.....	70
5.8.2	Dosažené výsledky.....	71
6	ZÁVĚR .....	73
	POUŽITÁ LITERATURA .....	74
	PŘÍLOHY .....	76



## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

2D	dvourozměrný prostor
3D	trojrozměrný prostor
6DOF	šest stupňů volnosti
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
AT	krátké textové příkazy pro konfiguraci modemů
A/D	analogově-digitální
CAD	počítačem podporované projektování
DPS	deska plošných spojů
EEPROM	elektricky mazatelná paměť typu ROM-RAM
FHSS	metoda přenosu dat v rozprostřeném spektru s přeskokováním frekvencí
I2C	počítačová sériová sběrnice
IDE	programové vybavení pro vývojáře
ISCP	protokol pro sériové programování mikrokontrolérů
LCD	displej z kapalných krystalů
LED	dioda emitující světlo
Li-Pol	lithium-polymerový akumulátor
MEMS	mikroelektromechanická součástka
MOSFET	polem řízený tranzistor
PC	osobní počítač
QR	kód rychlé reakce
PD	proporcionálně derivační (regulátor)
PS	proporcionálně sumační (regulátor)
PSD	proporcionálně sumačně diferenční (regulátor)
PWM	pulzně šířková modulace
SD	paměťová karta
SCL	hodinový signál sběrnice I2C
TTL	tranzistorově-tranzistorová logika
UART	univerzální asynchronní přijímač / vysílač (sériové rozhraní)
USB	univerzální sériová sběrnice

## SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

$\varphi''$	úhlové zrychlení těla robota, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$
$\varphi'$	úhlová rychlost těla robota, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
$\varphi$	úhel náklonu těla robota, $^\circ$
$\varphi_v$	výsledný úhel náklonu, $^\circ$
$\varphi_g$	úhel z gyroskopu, $^\circ$
$\varphi_a$	úhel z akcelerometru, $^\circ$
$\varepsilon_0$	permitivita vakua, $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$
$\varepsilon_r$	permitivita dielektrika, $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$
$CPU_f$	taktovací frekvence procesoru, Hz
$d$	vzdálenost desek kondenzátoru, m
$e$	regulační odchylka
$E_k$	kinetické energie, J
$E_p$	potenciální energie, J
$g$	tíhové zrychlení, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
$k$	poměrný diskrétní čas
$kI$	poměrný proud vinutím krokového motoru, A
$K$	váhový koeficient komplementárního filtru
$kT$	diskrétní čas, s
$l$	délka kyvadla, m
$L$	Lagrangeova funkce
$m$	hmotnost těla robota, kg
$OCR2A$	porovnávací registr čítače
$r_0$	zesílení regulátoru
$S$	plocha desek kondenzátoru, $\text{m}^2$
$S_d$	vzdálenost k detekovanému objektu, m
$SCL_f$	frekvence hodinového signálu sběrnice I2C, Hz
$t$	doba letu akustického signálu, s
$t_i$	perioda přerušení, $\mu\text{s}$
$t_c$	perioda čítání, $\mu\text{s}$
$T$	vzorkovací perioda, s
$T_I$	integrační časová konstanta, s
$T_D$	derivační časová konstanta, s

<i>TWBR</i>	registr určující frekvenci sběrnice I2C
<i>TWPS</i>	dělicí registr hodinového signálu SCL
<i>u</i>	diskrétní akční veličina
<i>v</i>	rychlost těla robota, m·s
<i>v<sub>z</sub></i>	rychlost šíření zvuku ve vzduchu, m·s <sup>-1</sup>

## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Balancující robot B-ROBOT (jjRobots, nedatováno) .....	16
Obr. 1.2 – Balancující robot BALA (M5Stack, nedatováno) .....	17
Obr. 1.3 – Vozítko Segway (Alza.cz, nedatováno) .....	18
Obr. 2.1 – Princip balancování .....	19
Obr. 2.2 – Fyzikální nákres balancujícího robota .....	20
Obr. 3.1 – Krokový motor s proměnnou reluktancí (Novák, 2005) .....	23
Obr. 3.2 – Krokový motor s permanentním magnetem (Novák, 2005).....	24
Obr. 3.3 – Hybridní krokový motor (Novák, 2005).....	24
Obr. 3.4 – Sekvence napájení fází bipolárního krokového motoru .....	25
Obr. 3.5 – Zapojení H-můstků pro řízení bipolárních krokových motorů (Novák, 2005) .....	26
Obr. 3.6 – Možnosti unipolárního zapojení krokového motoru (Novák, 2005) .....	26
Obr. 3.7 – Momentové charakteristiky unipolárně zapojeného krokového motoru (Novák, 2005).....	27
Obr. 3.8 – Sekvence napájení fází při čtyřtaktním řízení s magnetizací jedné fáze .....	28
Obr. 3.9 – Sekvence napájení čtyřfázového motoru při čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází .....	28
Obr. 3.10 – Sekvence napájení dvoufázového motoru při čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází .....	29
Obr. 3.11 – Porovnání čtyřtaktního řízení s magnetizací jedné a dvou fází (Novák, 2005).....	29
Obr. 3.12 – Sekvence napájení fází při osmitaktním řízení .....	30
Obr. 4.1 – Blokové schéma balancujícího robota .....	32
Obr. 4.2 – Rozložení pinů řídicího obvodu Arduino Mega (Arduino.cc, 2021) .....	33
Obr. 4.3 – Rozdíl mezi akcelerometrem a gyroskopem (Dadafshar, 2015) .....	36
Obr. 4.4 – Princip funkce akcelerometru (Dadafshar, 2015).....	37
Obr. 4.5 – Princip funkce senzoru pro sledování čáry .....	38
Obr. 4.6 – Princip funkce ultrazvukového snímače vzdálenosti.....	39
Obr. 4.7 – Průběh jednotlivých signálů při ultrazvukovém měření vzdálenosti (Resse, 2019) .....	40
Obr. 4.8 – Schéma zapojení ochranného obvodu baterií (laskaarduino.cz, 2021) .....	41
Obr. 4.9 – Programový nástroj pro konfiguraci dotykového displeje Nextion (Itead.cc, 2016) .....	43
Obr. 4.10 – Druhy topologií bezdrátového komunikačního rozhraní Bluetooth .....	44

Obr. 5.1 – 3D model navrženého balancujícího robota .....	46
Obr. 5.2 – Skutečná podoba sestaveného balancujícího robota.....	47
Obr. 5.3 – Schéma zapojení desky plošných spojů.....	49
Obr. 5.4 – Rozmístění součástek desky plošných spojů .....	50
Obr. 5.5 – Vylitý polygon spodní strany desky plošných spojů .....	50
Obr. 5.6 – Vylitý polygon vrchní strany desky plošných spojů .....	51
Obr. 5.7 – Pohled na osazenou desku plošných spojů .....	51
Obr. 5.8 – Naměřená data ze senzoru MPU-6050 bez filtrace .....	55
Obr. 5.9 – Naměřená data ze senzoru MPU-6050 po filtraci .....	55
Obr. 5.10 – Ukázka části programu mobilní aplikace .....	57
Obr. 5.11 – Ukázka mobilní aplikace .....	58
Obr. 5.12 – Pohled na hlavní nabídku dotykového displeje .....	61
Obr. 5.13 – Vývojový diagram periodicky se opakujícího programu .....	62
Obr. 5.14 – Blokové schéma kaskádní regulace .....	64
Obr. 5.15 – Princip pohybu robota při sledování čáry .....	66
Obr. 5.16 – Vývojový diagram přerušovací rutiny .....	68
Obr. 5.17 – Závislost generované frekvence na akčním zásahu vnitřního regulátoru.....	69
Obr. 5.18 – Robot v testovacím stojanu.....	69
Obr. 5.19 – Regulační pochod vnějšího regulátoru .....	72
Obr. 5.20 – Regulační pochod vnitřního regulátoru .....	72

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 – Poměry proudů ve fázích při mikrokrokování 1/4 (Novák, 2005) .....	31
Tab. 4.1 – Parametry krokového motoru (MotionKing Motor Industry Co., Ltd, 2006) .....	34
Tab. 4.2 – Volba mikrokrokování (Texas Instruments, 2014) .....	34
Tab. 4.3 – Parametry řadiče krokového motoru (Texas Instruments, 2014) .....	35
Tab. 4.4 – Parametry modulu GY-521 (ECLIPSERA s.r.o., 2016) .....	38
Tab. 4.5 – Parametry infračerveného senzoru (Vishay Intertechnology, Inc., 2009) .....	39
Tab. 4.6 – Parametry ultrazvukového snímače vzdálenosti (Mpja.com, nedatováno) .....	41
Tab. 4.7 – Parametry snižujícího měniče napětí (ECLIPSERA s.r.o, 2020) .....	42
Tab. 4.8 – Technická specifikace dotykového displeje (Nextion, nedatováno). .....	43
Tab. 4.9 – Výkonové třídy bezdrátové komunikace Bluetooth (Škopek, 2013) .....	45
Tab. 4.10 – Technická specifikace Bluetooth modulu (Sakul.cz, 2020) .....	45
Tab. 5.1 – Seznam použitých vstupů a výstupů .....	48
Tab. 5.2 – Rozložení svorkovnic .....	52
Tab. 5.3 – Seznam komunikovaných registrů senzoru MPU6050 (InvenSense Inc.,2013) .....	54
Tab. 5.4 – Seznam použitých AT příkazů (Sakul.cz., 2020) .....	56
Tab. 5.5 – Popis komunikovaných dat po rozhraní Bluetooth .....	58
Tab. 5.6 – Rozpoznávané kódy přijaté z dotykového displeje (Itead.cc, 2016) .....	59
Tab. 5.7 – Příklad přijaté sekvence dat z dotykového displeje .....	60
Tab. 5.8 – Funkce pro komunikaci s displejem .....	60
Tab. 5.9 – Získané parametry kaskádního regulátoru .....	71

## ÚVOD

Nynější tlak na snižování emisí, které na planetě běžné spalovací motory produkují již několik desetiletí, nahrává do karet tvůrcům dopravních prostředků, které žádné spalovací zplodiny nevytváří. Mezi ně bezpochyby patří dvoukolové elektrické dopravní prostředky pro přepravu osob na krátké vzdálenosti v řádech kilometrů. Tyto dvoukolové dopravní prostředky našly velmi rychle své uplatnění nejen u široké veřejnosti, ale i u příslušníků policie nebo zdravotnických pracovníků. Tím došlo k rozsáhlému zvýšení povědomí o robotice i mezi neodbornou veřejností.

Motivací k tvorbě této diplomové práce a sestrojení vlastního modelu pracujícího na stejném principu jako dopravní prostředek, bylo získání znalostí o principu fungování, možných omezeních a způsobu řízení a stabilizace. Navržený a sestavený model balancujícího robota bude následně možné využívat jako soustavu pro testování a implementaci různých typů regulátorů. Soustava je z pohledu regulace zajímavá svým nestabilním chováním, které je podobné modelu inverzního kyvadla.

V této práci bude navržen 3D model robota, který bude následně vytištěn na 3D tiskárně. Do těla robota bude zakomponován řídicí systém doplněný o vstupně-výstupní obvody, pomocí nichž bude možné robota stabilizovat a ovládat. Jako řídicí systém bude použita vývojová deska Arduino Mega. Pro potřeby umístění vstupně-výstupních obvodů a svorkovnic, bude navržena DPS v podobě odnímatelného modulu. Pro ovládání a nastavování robota bude použit barevný dotykový displej.

Programová část práce se bude v první řadě zabývat návrhem regulátoru, který zajistí stabilizaci robota. Dále bude vytvořeno grafické prostředí pro dotykový displej, které bude umožňovat výběr jízdních režimů a nastavování. K dálkovému ovládání robota bude vytvořena mobilní aplikace pro operační systém Android, ze které bude možné robota ovládat.

Robot bude plnit funkce stabilizace polohy, dálkového ovládání a autonomního režimu. Robot v režimu stabilizace polohy bude udržovat rovnováhu a reagovat na vzniklé poruchy. V režimu dálkového ovládání bude robot možné robota řídit z mobilního telefonu. Autonomní režim bude umožňovat sledování vyznačené černé čáry s možností zastavení před překážkou na cestě.

# 1 REŠERŠE

Hlavním zdrojem robotů balancujících na dvou kolech jsou zejména zahraniční firmy zabývající se jejich vývojem a v neposlední řadě pak nadšenci robotiky vytvářející různé modifikace svépomocí. Rozsah kvality zpracování je velmi široký. Nejobyčejnější konstrukce začínají na internetových fórech, dále pokračující přes komerčně vyráběné hračky a výukové stavebnice až po profesionální vozítka určená pro transport lidí. Tato kapitola dále blíže pojednává o balancujících robotech, které jsou dnes běžně k dostání.

## 1.1 B-ROBOT

Za tímto produktem stojí americká firma jjRobots, která si jako hlavní úkol klade popularizaci robotizace a 3D tisku. Firma na svých stránkách nabízí kromě koupě již hotového robota i kompletní zdrojové kódy a dokumentaci k sestavení včetně 3D modelu robota.

Robot je poháněn dvěma krokovými motory NEMA17, které jsou buzeny obvodem A4988. Zpětnou vazbu o náklonu poskytuje 3-osý akcelerometr a gyroskop MPU-6050. Celý robot je ovládán řídicím obvodem Arduino Leonardo a napájen z šesti tužkových baterií. Vše je umístěno uvnitř těla robota, které je vytištěno na 3D tiskárně. Pro komunikaci a ovládání je využit Wi-Fi modul 8266. K ovládání z chytrých telefonů je zdarma k dostání aplikace pro operační systém Android i iOS. Robot je zobrazen na obr. 1.1 (jjRobots, nedatováno).



Obr. 1.1 – Balancující robot B-ROBOT (jjRobots, nedatováno)



## 1.2 BALA

Jeden z produktů firmy M5Stack, která většinu svých produktů staví na celosvětově nejpopulárnějším Wi-Fi modulu ESP32. Veškerý systém je modulární a lze jej různě kombinovat. Stavebnice je určena zejména pro vzdělávací účely a lze na ni demonstrovat nespočet úloh z oblasti elektroniky (M5Stack, nedatováno).

Robot BALA je koncipován ve stylu lego stavebnice, kterou může uživatel dále softwarově upravovat nebo rozšiřovat. Firma cílí i na technicky méně zdatné uživatele, což napovídá i programovací jazyk, který je uživatelem tvořen v internetovém prohlížeči pomocí barevných bloků znázorňujících proměnné, logické funkce atd. Programování je dále možné i v prostředí Arduino IDE. Řídicí systém robota BALA je založen na platformě Arduino doplněné o shield ESP32 s Bluetooth a Wi-Fi komunikačním rozhraním. Pro grafické rozhraní je použit LCD displej o úhlopříčce 2 “. Napájení je řešeno jedním článkem integrované Li-Pol baterie o kapacitě 550 mAh. Robot BALA je uveden na obr. 1.2 (M5Stack, nedatováno).



Obr. 1.2 – Balancující robot BALA (M5Stack, nedatováno)

## 1.3 SEGWAY

Jedná se o dvoukolový samovyvažovací dopravní prostředek obsahující pouze dvě kola, stoupací plošinu a říditka, který je určen pro přepravu osob. Obr. 1.3 zobrazuje Segway s pomocnými říditky, které usnadňují manipulaci začátečníkům. Dopravní rychlost dosahuje až 20 km/h s dojezdem v řádech desítek kilometrů v závislosti na modelu. Veškerá elektronika, složená z několika gyroskopů, akcelerometrů a lithium-iontových baterií, se ukrývá v podlaze.

System je natolik bezpečný a spolehlivý díky redundantnímu zapojení řídicích obvodů (Harris, 2001).

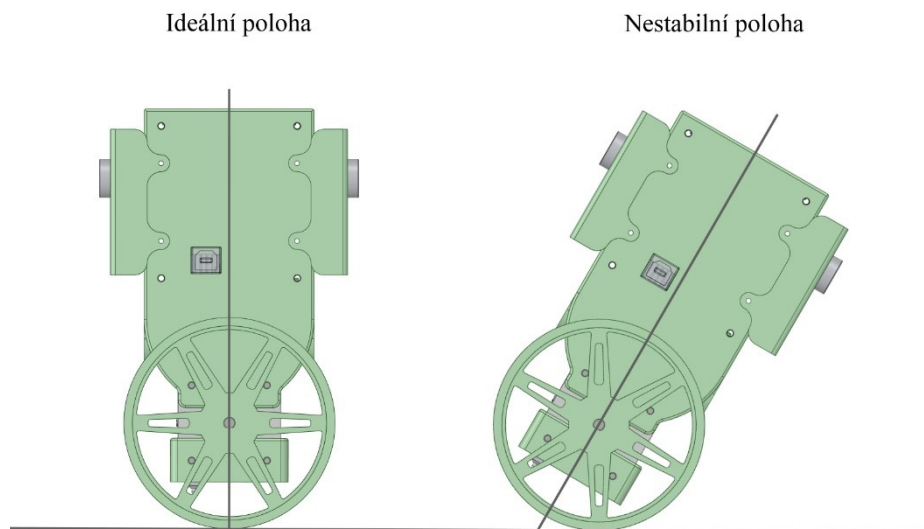
Vozítko se ovládá náklonem jezdce ve směru jízdy. Segway na základě změřeného úhlu náklonu vypočte rychlost motorů a robot se pohybuje požadovaným směrem. Brždění se provádí náklonem jezdce do protisměru jízdy. Tento dopravní prostředek nachází své uplatnění např. v rozsáhlých skladech a překladištích, kde usnadňuje pohyb obsluhy (Harris, 2001).



Obr. 1.3 – Vozítko Segway (Alza.cz, nedatováno)

## 2 INVERZNÍ KYVADLO

Inverzní kyvadlo je typickým příkladem z oblasti dynamiky, která dokonale popisuje problematiku týkající se balancujícího robota. Konstrukce robota, která je cílem této práce, je vlastně inverzní kyvadlo s rotačně pohyblivou základnou. Ideální svislé pozice je dosaženo za pomoci dvojice krokových motorů spřaženými s koly, které tvoří jediné styčné body s podložkou. Princip stabilizace je uveden na obr. 2.1.

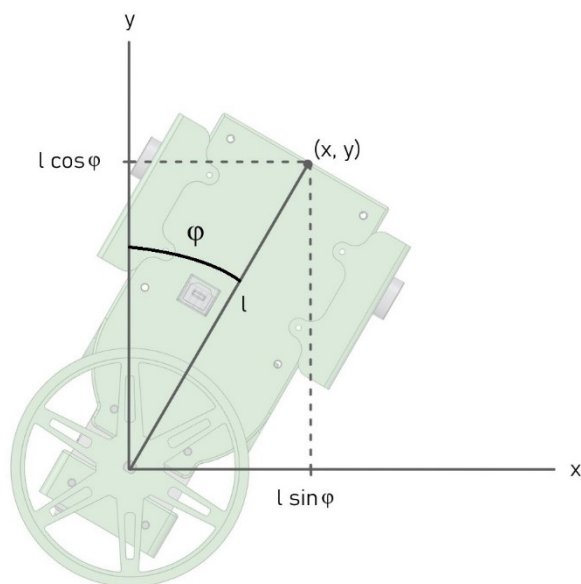


Obr. 2.1 – Princip balancování

### 2.1 MATEMATICKÝ MODEL

Pohyb balancujícího robota lze na základě přirovnání k inverznímu kyvadlu popsat pomocí matematických rovnic, které vycházejí ze známých fyzikálních zákonů. V dále uvažovaném matematickém modelu jsou zavedeny předpoklady ve formě:

- uvažování pouze translačního pohybu základny,
- zamezení prokluzu kol,
- zanedbání dynamiky měřicích, řídicích a akčních členů,
- zanedbání odstředivé a dostředivé síly vznikající při změně náklonu.



Obr. 2.2 – Fyzikální nákres balancujícího robota

Pro odvození pohybové rovnice pohybujícího se hmotného tělesa znázorněného na obr. 2.2 byla použita Lagrangeova rovnice druhého druhu. Ta je po dosazení definována jako

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) = \frac{\partial L}{\partial \varphi}, \quad (2.1)$$

kde  $L$  – Lagrangeova funkce,  
 $\dot{\varphi}$  – úhlová rychlost těla robota,  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  
 $\varphi$  – uhel náklonu těla robota,  $^\circ$ .

Lagrangeova funkce je definována jako rozdíl kinetické a potenciální energie vztahem

$$L = E_k - E_p, \quad (2.2)$$

kde  $E_k$  – kinetické energie, J,  
 $E_p$  – potenciální energie, J.

Po dosazení do základních vztahů pro potenciální a kinetickou energii získáme

$$L = \frac{1}{2} m v^2 - m g l, \quad (2.3)$$

kde  $m$  – hmotnost těla robota, kg,

$v$  – rychlost těla robota,  $\text{m}\cdot\text{s}$ ,  
 $g$  – tíhové zrychlení,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,  
 $l$  – délka kyvadla,  $\text{m}$ .

Pro výpočet celkové rychlosti těla robota potřebné pro dosazení do rovnice (2.3) je nutné nejprve definovat rychlosti v jednotlivých osách znázorněných na obr. 2.2 jako

$$\begin{aligned}
 x &= l \sin(\varphi), \\
 x' &= l \cos(\varphi) \varphi', \\
 y &= l \cos(\varphi), \\
 y' &= -l \sin(\varphi) \varphi',
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Rychlost robota je poté definována jako

$$v^2 = x'^2 + y'^2 = l^2 \varphi'^2 \cos^2(\varphi) + l^2 \varphi'^2 \sin^2(\varphi) = l^2 \varphi'^2, \tag{2.5}$$

Dosazením odvozené rychlosti do Lagrangeovy funkce popsané rovnicí (2.3) získáváme

$$L = \frac{1}{2} m l^2 \varphi'^2 - m g l \cos(\varphi), \tag{2.6}$$

Do rovnice (2.1) dosadíme zjištěnou Lagrangeovu funkci a po provedení parciálních derivací vyjádříme úhlové zrychlení těla robota vznikající gravitačním zrychlením

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \varphi} &= 0 + m g l \sin(\varphi), \\
 \frac{\partial L}{\partial \varphi'} &= m l^2 \varphi' - 0, \\
 \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \varphi'} \right) &= m l^2 \varphi'', \\
 m l^2 \varphi'' &= m g l \sin(\varphi), \\
 \varphi'' &= \frac{g}{l} \sin(\varphi),
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

kde  $\varphi''$  – úhlové zrychlení těla robota,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$  (Jeremic, 2012).

### 3 KROKOVÉ MOTORY

Krokový motor je typ elektrotechnického zařízení, které přeměňuje sekvenci pulzů stejnosměrného napětí na rotační pohyb z jedné rovnovážné polohy do druhé. Rovnovážné polohy je dosaženo magnetickým vyvážením mezi zuby statoru a rotoru (Novák, 2005).

Základními prvky krokového motoru jsou jako u většiny rotačních pohonů stator a rotor. Stator je tvořen svazkem ocelových plechů z několika vysutých pólových nástavců, na nichž se nachází vinutí jednotlivých fází. V závislosti na typu krokového motoru se mohou vysuté pólové nástavce dále dělit na zuby. Rotor je s ohledem na použitý typ motoru tvořen buď jedním kusem ocele či svazkem plechů s pólovými nástavci, nebo hřídelí z nemagnetické oceli, na které jsou nalisovány pólové nástavce s axiálně či radiálně uloženým magnetem (Novák, 2005).

K otáčení rotoru dochází po přivedení stejnosměrného proudu na vinutí cívek statoru, čímž dojde k zmagnetování pólů. Rotor v tu chvíli setrvá v rovnovážné poloze. Po přivedení stejnosměrného proudu na další vinutí v pořadí sekvence, jsou zuby rotoru magneticky přitaženy k napájeným pólům statoru, čímž dojde k pootočení (Novák, 2005).

Krokový motor tedy ke svému rotačnímu pohybu rotoru potřebuje sekvenci elektrických pulzů do statorových vinutí ve správném pořadí. Směr otáčení motoru je závislý právě na pořadí, ve kterém jsou jednotlivá vinutí statoru napájena. Rychlost otáčení rotoru je pak úměrná frekvenci, se kterou jsou vinutí napájena (Novák, 2005).

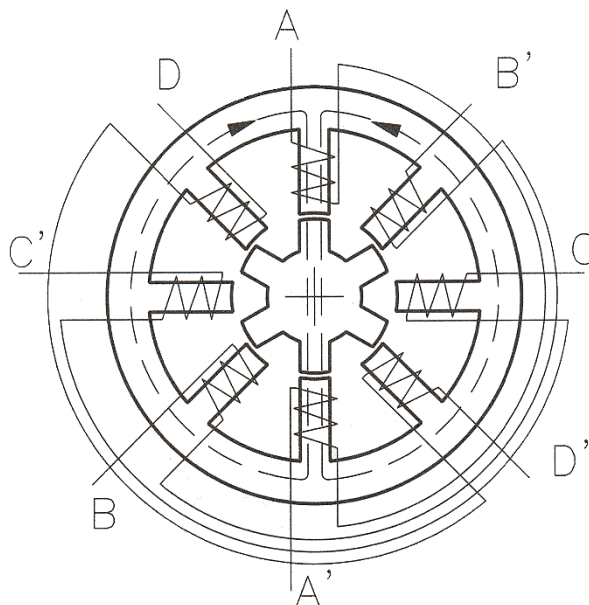
Mezi základní vlastnosti krokových motorů patří:

- přesné ovládání (natočení rotoru je funkcí počtu elektrických impulzů),
- řízení v otevřené smyčce (rychlost otáčení je funkcí frekvence elektrických pulzů),
- vysoký krouticí moment při nízkých rychlostech,
- absence mechanického komutátoru,
- jednoduchá a robustní mechanická konstrukce,
- nutnost použití řídicího prvku (Crowder, 2019).

### 3.1 KROKOVÝ MOTOR S PROMĚNNOU RELUKTANCÍ

Krokový motor s proměnnou reluktancí je známý také jako krokový motor s pasivním rotorem. Stator motoru je tvořen svazkem ocelových plechů s vysutými pólovými nástavci, na nichž jsou umístěna vinutí jednotlivých fází. Rotor může být tvořen jedním kusem ocele či stejně jako stator svazkem ocelových plechů. Rotor obsahuje pólové nástavce o stejné šířce jako stator. Vzdálenost mezi pólovými nástavci rotoru a statoru je 0,02 mm až 0,20 mm (Novák, 2005).

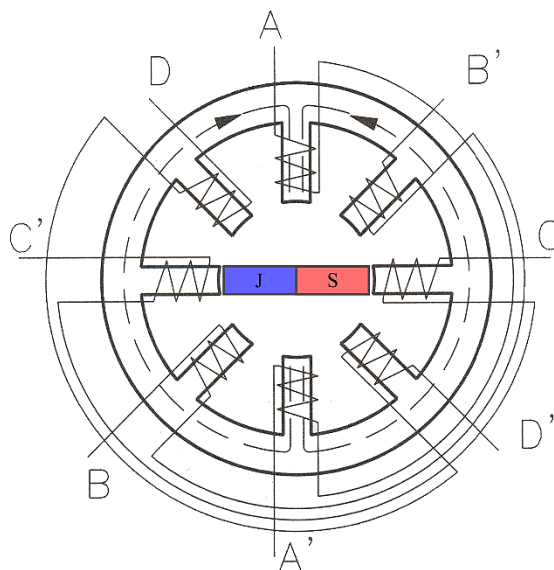
Tento typ krokového motoru patří k jednomu z nejstarších. Dnes se již tento typ motoru příliš nevyužívá kvůli vysoké velikosti jednoho kroku. Na obr. 3.1 je zobrazen řez čtyřfázovým motorem s velikostí kroku  $15^\circ$  (Novák, 2005).



Obr. 3.1 – Krokový motor s proměnnou reluktancí (Novák, 2005)

### 3.2 KROKOVÝ MOTOR S PERMANENTNÍM MAGNETEM

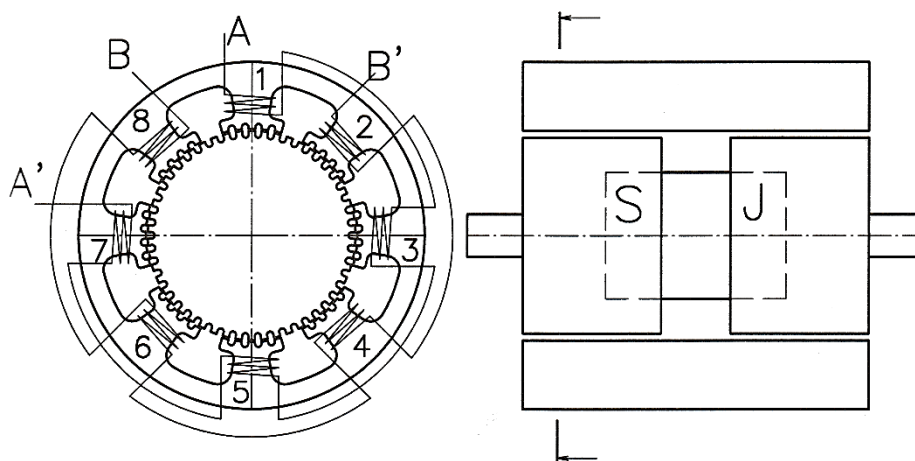
Tento typ krokového motoru má podobnou strukturu jako krokový motor s proměnnou reluktancí. Hlavním rozdílem je rotor, který má póly tvořeny radiálně uloženými permanentními magnety, které jsou znázorněny na obr. 3.2. To přináší výhodu v podobě vyššího krouticího momentu díky odpudivým magnetickým silám. Takto tvořený rotor vytváří bez přítomnosti napájecího napětí tzv. klidový stav. Motor se vyznačuje zejména nižšími krokovacími úhly a vyšším krouticím momentem než krokové motory s proměnnou reluktancí (Hughes a Drury, 2019).



Obr. 3.2 – Krokový motor s permanentním magnetem (Novák, 2005)

### 3.3 HYBRIDNÍ KROKOVÝ MOTOR

Jedná se dnes o jeden z nevyužívanějších typů krokových motorů, a proto mu bude věnována největší pozornost. Motor je schopný poskytnout vysoké krouticí momenty při velmi malých úhlových krocích. Běžný dvoufázový hybridní krokový motor s 50 zuby na statoru dosahuje přesnosti  $1,8^\circ$  (Hughes a Drury, 2019).



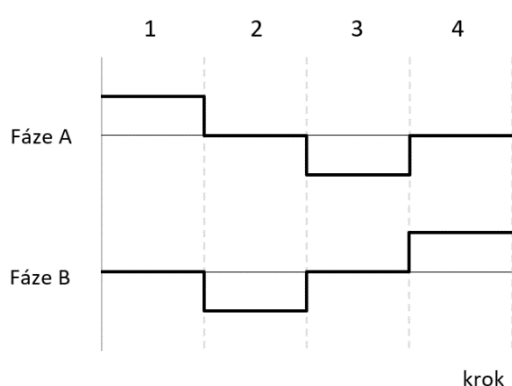
Obr. 3.3 – Hybridní krokový motor (Novák, 2005)

Stator hybridního motoru je tvořen svazkem ocelových plechů s pólovými nástavci, které se dále dělí na zuby. Na každém hlavním pólovém nástavci je umístěno vinutí cívky. Rotor je tvořen hřídelí z nemagnetické oceli, na níž jsou umístěny pólové nástavce složené



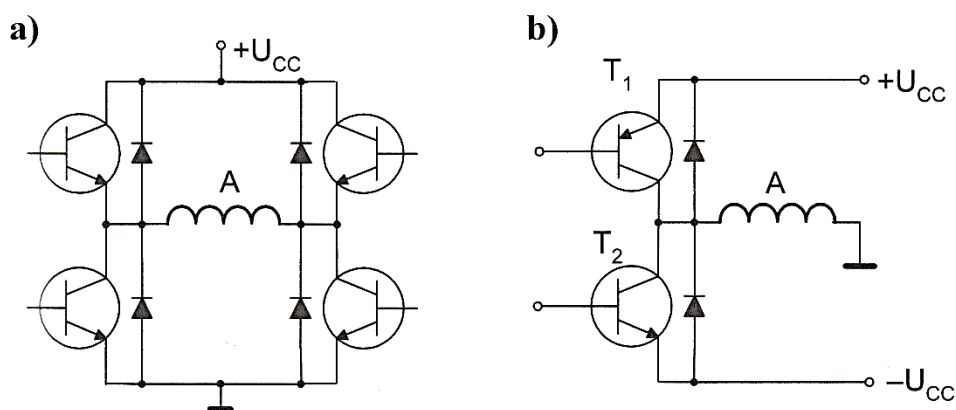
z plechů. Mezi těmito pólovými nástavci je axiálně umístěný permanentní magnet, který zajišťuje rozdílnou polaritu obou pólových nástavců. Pólové nástavce obsahují zuby o stejné šířce jako ty statorové a jsou vůči sobě pootočené tak, aby proti osám zubů jednoho nástavce byly osy drážek druhého nástavce (Novák, 2005).

Pokud žádným z vinutí statoru neprotéká proud, je motor díky permanentnímu magnetu uloženému v rotoru stabilizován v klidové poloze. Na obr. 3.3 je znázorněn dvoufázový hybridní krokový motor tvořený celkem osmi pólovými nástavci s bipolárním zapojením fází. Dvoufázové zapojení je tvořeno fází A z cívek 1, 3, 5 a 7, a dále fází B z cívek 2, 4, 6 a 8. V případě, že začne fází A protékat kladný proud, dojde ke zmagnetování statorových pólů. Podle Ampérova pravidla pravé ruky póly 1 a 5 budou zmagnetovány jižně ve směru působení na póly rotoru a póly 3 a 7 severně. Zuby rotoru jsou pak na severní straně rotoru přitahovány póly 1 a 5, zatímco na jižní straně rotoru jsou zuby přitahovány póly 3 a 7. Dalším krokem je odpojení fáze A a připojení fáze B. Volbou polaritu pro napájení fáze B je v tuto chvíli možné zvolit směr následného otočení. Pro provedení jedné otáčky ve směru hodinových ručiček by bylo nutné budít jednotlivé fáze v sekvenci uvedené na obr. 3.4 (Novák, 2005).



Obr. 3.4 – Sekvence napájení fází bipolárního krokového motoru

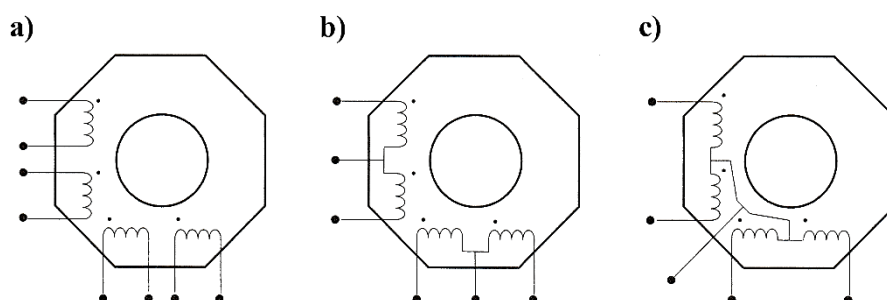
Z obr. 3.4 vyplývá, že pro řízení krokového motoru s bipolárně zapojenými fázemi je potřeba nejen přepínat napájení jednotlivých fází v daném sledu, ale i vhodně měnit směr proudu, který protéká vinutím. To lze zajistit pomocí H-můstků uvedených na obr. 3.5. Protože směr proudu protékající cívkou je závislý na její orientaci, lze docílit změny polaritu magnetického pole pólových nástavců statoru i bez nutnosti použití můstkového spínače nebo bipolárního zdroje napětí. Jedná se o motory s unipolárním zapojením fází, kde vinutí takových motorů jsou rozdělena na dvě poloviny. Na obr. 3.6 jsou uvedeny možnosti zapojení vývodů jednotlivých vinutí.



Obr. 3.5 – Zapojení H-můstek pro řízení bipolárních krokových motorů (Novák, 2005)

Rozeznáváme unipolárně zapojené motory, které mají vyvedeno:

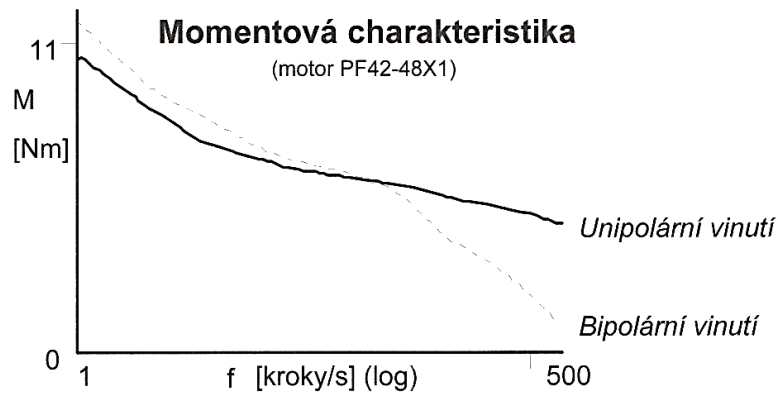
- a) osm vodičů (všechny konce vinutí vyvedeny),
- b) šest vodičů (konce obou vinutí včetně vyvedených středů),
- c) pět vodičů (konce obou vinutí se společně vyvedeným středem).



Obr. 3.6 – Možnosti unipolárního zapojení krokového motoru (Novák, 2005)

Jako nejuniverzálnější se jeví zapojení a) na obr. 3.6, kde jsou vyvedeny všechny konce vinutí. Další možností je sériové zapojení b) uvedené na obr. 3.6, které vykazuje vyšší krouticí moment při nižších otáčkách motoru. Opakem je paralelní zapojení c) na obr. 3.6, které disponuje vyšším krouticím momentem při vyšších krokovacích frekvencích (Novák, 2005).

U krokového motoru s unipolárně zapojenými fázemi je pak možnost volby buzení. Obr. 3.7 uvádí momentovou charakteristiku krokového motoru PF42-48X1, ze které je patrné, že bipolární buzení unipolárně zapojeného hybridního krokového motoru je vhodné pro nižší otáčky, kde poskytuje vyšší krouticí moment než unipolární buzení (Novák, 2005).



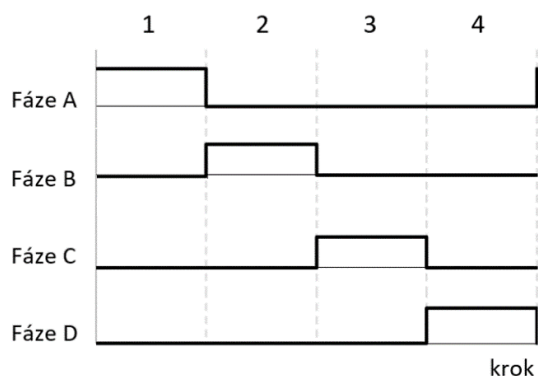
Obr. 3.7 – Momentové charakteristiky unipolárně zapojeného krokového motoru (Novák, 2005).

### 3.4 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ

Tato kapitola popisuje možné způsoby řízení výše uvedených typů krokových motorů. Bude uvedeno několik způsobů řízení včetně mikrokrokování, díky němuž jsou krokové motory používány v aplikacích vyžadujících vysokou přesnost.

#### 3.4.1 Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze

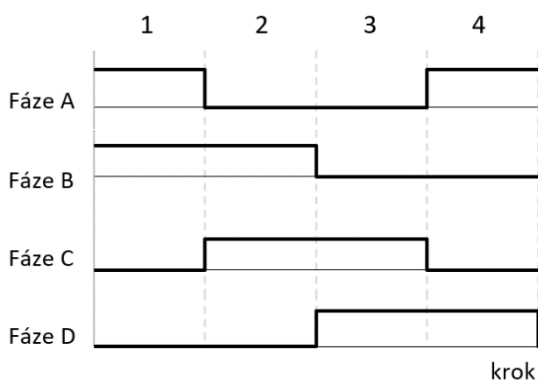
Jedná se o jeden z nejjednodušších způsobů řízení krokových motorů. Tento způsob řízení můžeme aplikovat u čtyřfázových motorů s proměnnou reluktancí nebo dvoufázových hybridních v zapojení pro unipolární buzení. Při tomto způsobu řízení není vyžadováno bipolární napájecí napětí. Řízení spočívá v postupném napájení jednotlivých fází v daném pořadí. V případě motoru uvedeném na obr. 3.1 a předpokladu, že je napájecí napětí přivedeno na vinutí fáze A, dojde k vytvoření magnetického pole, které přitáhne nejbližší pár pólových nástavců a tím k pootočení hřídele. Dalším krokem je vypnutí napájení fáze A a přivedení napětí na vinutí fáze B. Tím dojde k dalšímu pootočení hřídelí ve směru hodinových ručiček. Pro otočení o celou otáčku je potřeba čtyř kroků, respektive čtyř změn v napájení jednotlivých vinutí. Sekvence kroků je uvedena na obr. 3.8. Vždy je v jeden moment napájena pouze jedna fáze. Směr otáčení je dán pořadím napájení jednotlivých fází (Novák, 2005).



Obr. 3.8 – Sekvence napájení fází při čtyřtaktním řízení s magnetizací jedné fáze

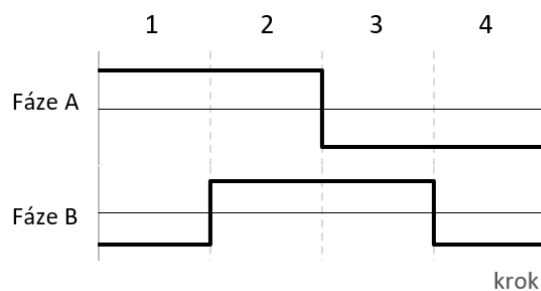
### 3.4.2 Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází

Tento způsob řízení spočívá v napájení vždy dvou sousedních fází současně. Tím dojde k přidání jedné rovnovážné polohy mezi vybuzenými sousedními fázemi. V případě použití motoru zobrazeném na obr. 3.1 dojde při současném napájení dvou sousedních fází k vychýlení hřídele o  $7,5^\circ$ . Rovnovážná pozice je při tomto typu řízení vždy mezi sousedícími pólovými nastavci statoru. Velikost kroku je v tomto případě jako u čtyřtaktního řízení s magnetizací jedné fáze  $15^\circ$ . Posloupnost napájení jednotlivých fází ve směru otáčení podle hodinových ručiček znázorňuje obr. 3.9 (Novák, 2005).



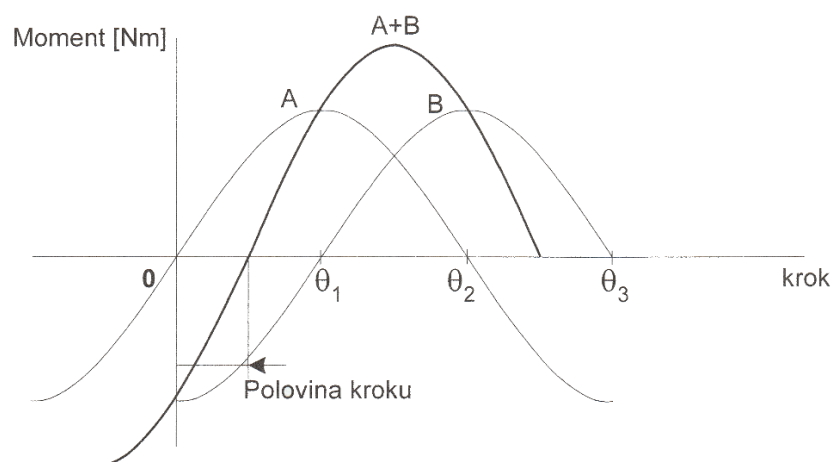
Obr. 3.9 – Sekvence napájení čtyřfázového motoru při čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází

Z obr. 3.9 je patrné, že pro řízení čtyřfázového motoru není využito bipolární napájení fází. To je možné díky samotné konstrukci čtyřfázového motoru. Při řízení dvoufázového hybridního motoru však bipolární buzení vyžadováno je. Posloupnost napájení jednotlivých fází pro takový motor uvádí obr. 3.10 (Novák, 2005).



Obr. 3.10 – Sekvence napájení dvoufázového motoru při čtyřtaktním řízení s magnetizací dvou fází

Výhodami čtyřtaktního zapojení s magnetizací dvou fází je zejména statický vazební moment, který je v porovnání s čtyřtaktním řízením s magnetizací jedné fáze vyšší. Samotné porovnání uvádí obr. 3.11. Mezi další výhody patří i vyšší strmost výsledné statické momentové charakteristiky. To se kladně projevuje na vibrace a ve výsledku i možnosti dosáhnout vyšších rychlostí motoru (Novák, 2005).



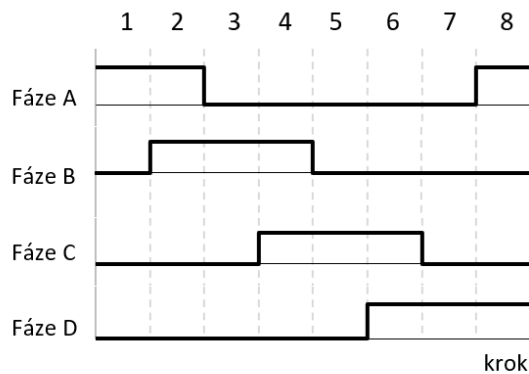
Obr. 3.11 – Porovnání čtyřtaktního řízení s magnetizací jedné a dvou fází (Novák, 2005).

### 3.4.3 Osmítaktní řízení

Osmítaktní řízení je kombinací dvou předešlých způsobů řízení. Jde tedy o spojení čtyřtaktního řízení s magnetizací jedné a dvou fází. Výsledkem je zdvojnásobení počtu kroků tím, že mezi každou rovnovážnou polohu dosaženou pomocí buzení dvou sousedních fází vložíme rovnovážnou polohu dosaženou buzením jedné fáze. Posloupnost buzení pro otáčku v jednom směru je A, AB, B, BC, C, CD, D, AD. Pro otáčení druhým směrem je posloupnost

napájení fází sestavena pouze v opačném pořadí. Sekvenci napájení fází znázorňuje obr. 3.12 (Novák, 2005).

Výhodou tohoto typu řízení je dosažení o polovinu lepší přesnosti řízení bez nutnosti zásahu do řídicích obvodů. Jediný, avšak odstranitelný problém tohoto řízení, je rozdílná velikost krouticího momentu při každém kroku. Při magnetování dvou sousedních fází je dosahováno vyššího momentu než při magnetizaci jedné fáze. Řešení tohoto problému spočívá v omezení proudu při buzení pomocí magnetizace dvou fází (Novák, 2005).



Obr. 3.12 – Sekvence napájení fází při osmitaktním řízení

### 3.4.4 Mikrokrokování

Mikrokrokování se využívá zejména v aplikacích vyžadující velmi vysokou přesnost (3D tiskárny, robotika, fototechnika, ...). Snaha je tedy dosáhnout co největšího počtu kroků na jednu otáčku. Toho lze docílit mechanicky, zvýšením počtu fází nebo zvýšením počtu zubů rotoru. Oba tyto způsoby však mají nevýhody v podobě obtížného ovládání nebo samotné výroby (Novák, 2005).

S použitím mikrokrokování lze dosáhnout zvýšení počtu kroků na jednu otáčku bez nutnosti řešit mechanické problémy. Základní myšlenka mikrokrokování vychází ze čtyřtaktního řízení pomocí magnetizace dvou fází. Tento způsob spočívá v současném buzení dvou sousedních fází stejným proudem. Mikrokrokování využívá stejného principu, avšak proudy do jednotlivých fází jsou záměrně omezovány. Tímto způsobem řízení lze dosáhnout libovolné rovnovážné polohy mezi dvěma sousedními fázemi. Poměr proudů jednotlivými fázemi při rozlišení mikrokrokování 1/4 uvádí tab. 3.1 (Novák, 2005).

Tab. 3.1 – Poměry proudů ve fázích při mikrokrokování 1/4 (Novák, 2005)

Pozice mikrokroku	Proud fáze 1	Proud fáze 2
0	$I$	0
1/4	$I$	$kI$
1/2	$I$	$I$
3/4	$kI$	$I$
1	0	$I$

Na začátku mikrokrokování prochází proud pouze fází 1 a rotor je v rovnovážné poloze s fází 1. Následuje první mikrokrok, kdy je buzeno vinutí fáze 1 velikostí proudu  $I$  a fáze 2 poměrnou velikostí proudu  $kI$ . Druhého mikrokroku je dosaženo napájením obou fází stejným proudem  $I$ . V předposledním mikrokroku je fáze 1 napájena poměrným proudem  $kI$  a fáze 2 proudem  $I$ . V posledním kroku je proudem  $I$  buzena pouze fáze 2. Poměrný proud je určen koeficientem  $k$ , který musí být v intervalu od 0 do 1 (Novák, 2005).

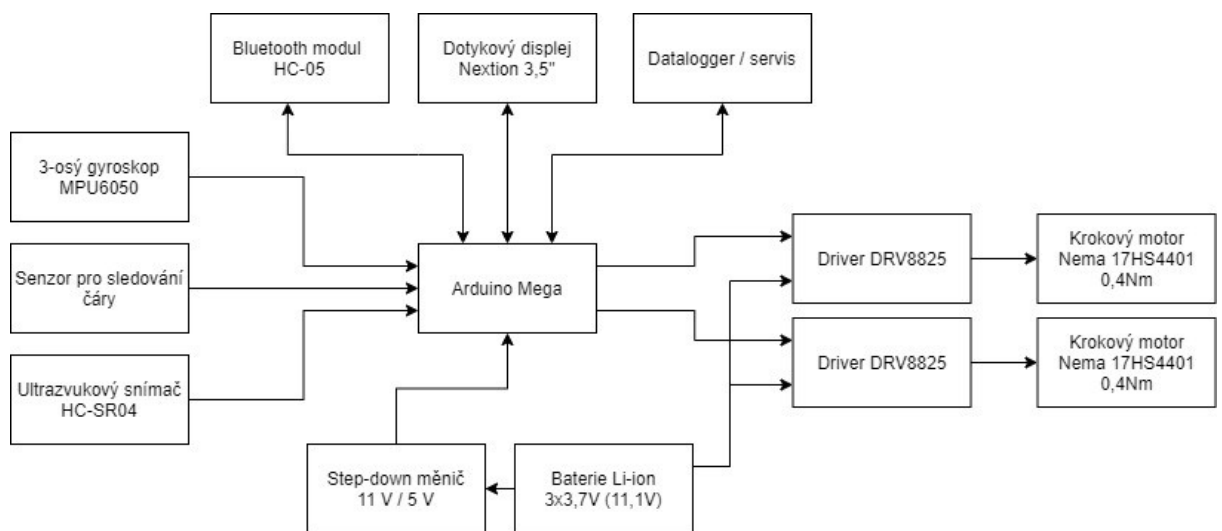
Pro řízení krokových motorů pomocí mikrokrokování je zapotřebí více hladinový napájecí zdroj s jednotlivými hodnotami proudů  $I$  a  $kI$ . K tomu lze využít speciálních integrovaných obvodů určených přímo pro řízení krokových motorů nabízející několik rozlišení mikrokrokování (Novák, 2005).

## 4 POUŽITÉ KOMPONENTY

Tato kapitola pojednává o výběru vhodných komponent pro sestavení balancujícího robota. Před samotným výběrem byla sepsána rozvaha vycházející z rešerše trhu a zadání práce. Cílem této rozvahy bylo vytvoření základní představy o pohonu, ovládní, napájení a funkci robota. Požadavky kladené na robota jsou:

- tělo robota vytištěné na 3D tiskárně,
- řídicí mikropočítač řady ATmega,
- pohon s přesným řízením,
- ovládní z dotykového displeje,
- možnost dálkového řízení robota,
- detekce kolize,
- funkce sledování čáry,
- napájení z vyměnitelných baterií.

Seznam použitých komponentů je zobrazen v rámci blokového schématu na obr. 4.1.



Obr. 4.1 – Blokové schéma balancujícího robota

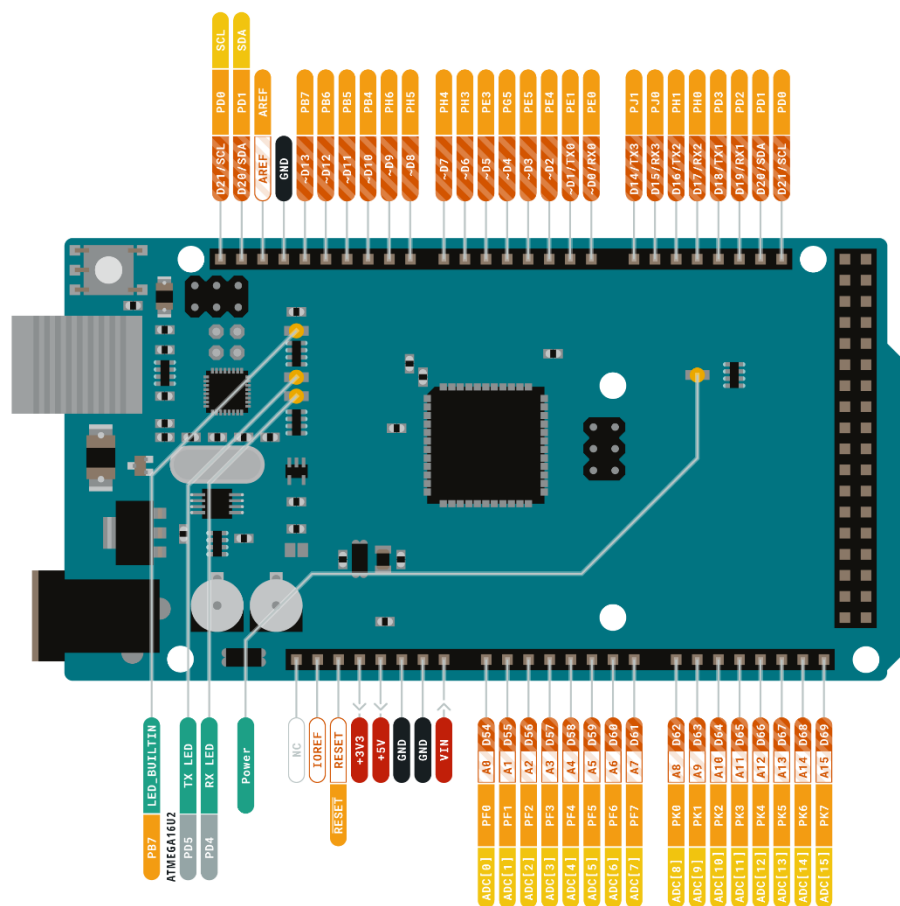
### 4.1 ŘÍDICÍ OBVOD ARDUINO

Arduino je otevřená platforma založena na mikrokontrolérech ATmega od společnosti Atmel. Mikrokontrolér příslušné desky je doplněn o oscilátor v podobě krystalu, napájecí



konektor, převodník pro komunikaci pomocí USB konektoru, vstupní a výstupní svorky, restartovací tlačítko a ICSP konektor pro připojení programátorů. Mikro počítač je programovatelný ve volně dostupném programovacím prostředí Arduino IDE programovacím jazykem C/C++ s použitím knihovny Wiring. Mikro počítač je díky standardizovaným pinům snadno rozšiřitelný o další elektronické obvody v podobě nasouvacího shieldu. Pro řízení úlohy balancujícího robota byl z důvodu počtu rozhraní UART vybrán model Arduino Mega 2560 (Arduino.cc, 2021).

Arduino Mega 2560 obsahuje 54 digitálních vstupů/výstupů (15 z nich dokáže fungovat jako PWM výstup), 16 analogových vstupů, 4 sériové rozhraní UART a 16 MHz oscilátor. Velikost paměti je 256 kB pro program, 8 kB pro proměnné a 4 kB EEPROM. Fyzické uspořádání pinů a komponentů uvádí obr. 4.2 (Arduino.cc, 2021).



Obr. 4.2 – Rozložení pinů řídicího obvodu Arduino Mega (Arduino.cc, 2021)

## 4.2 KROKOVÝ MOTOR

Pro realizaci pohonu robota byl vybrán dvoufázový hybridní krokový motor s označením NEMA 17HS4401. Pro řízení motoru je nutné bipolární buzení. Pouzdro motoru

má rozměry 42 mm x 42 mm x 40 mm. Hřídel rotoru má osu se zářezem tvaru písmena D a její délka je 24 mm. Pro uchycení motoru slouží čtyři díry na čele pouzdra se závitem M3. Technické specifikace uvádí tab. 4.1.

Tab. 4.1 – Parametry krokového motoru  
(MotionKing Motor Industry Co., Ltd, 2006)

Parametr	Hodnota
Velikost kroku	1,8°
Jmenovitý proud	1,7 A
Odpor vinutí fáze	1,5 Ω
Krouticí moment	40 N·cm
Počet vodičů	4
Hmotnost	280 g

### 4.3 ŘADIČ KROKOVÉHO MOTORU

Řízení krokového motoru zajišťuje driver DRV8825. Srdcem řadiče jsou dva H-můstky určené pro řízení bipolárních krokových motorů. Napájecí napětí pro motor může být v rozmezí 8,2 V ÷ 45,0 V. Výstupní obvod je tvořen MOSFETy s maximálním zatížením 2,5 A při 24 V (Texas Instruments, 2014). Veškeré technické informace o řadiči jsou uvedeny v tab. 4.3.

Ovládání driveru, respektive krokových motorů, je dvojicí pinů DIR a STEP. Pomocí mikropočítače připojeného na pin DIR je volen směr otáčení a s náběžnou hranou na pin STEP je vyvolán požadavek na otočení motoru o jeden krok. Počet kroků na jednu otáčku je určeno logickou kombinací pinů M0 – M2. Možné kombinace odpovídající danému krokování uvádí tab. 4.2 (Texas Instruments, 2014).

Tab. 4.2 – Volba mikrokrování (Texas Instruments, 2014)

Pin M0	Pin M1	Pin M2	Rozlišení mikrokroku
0	0	0	Plný krok
1	0	0	1/2 kroku
0	1	0	1/4 kroku
1	1	0	1/8 kroku
0	0	1	1/16 kroku
1	0	1	1/32 kroku
0	1	1	1/32 kroku
1	1	1	1/32 kroku

Řadič dále disponuje několika dalšími piny, které mají vliv na řízení motoru. Jedná se o piny RESET, ENABLE, SLEEP a FAULT (Texas Instruments, 2014).

Nastavením logické 0 na pinu RESET dojde k přivedení motoru do výchozí pozice. Veškeré povely na pin STEP jsou ignorovány, dokud není opět přivedena logická 1 na RESET. Zároveň dojde k restartování veškerých podpůrných obvodů řadiče (Texas Instruments, 2014).

Vstupní pin ENABLE s náběžnou hranou vypne oba H-můstky a veškeré impulsy přivedené na pin STEP jsou ignorovány. Veškeré logické, časovací a napájecí obvody jsou dále aktivní (Texas Instruments, 2014).

Pro uvedení motoru do klidového stavu a dosažení co nejmenší spotřeby slouží mód spánku. Mód spánku je aktivován s příchodem logické 0 na pin SLEEP a vypne veškeré podpůrné obvody zajišťující řízení motoru. Tento mód je vhodný zejména pro bateriové zařízení k úspoře energie (Texas Instruments, 2014).

Výstupní pin FAULT dává zpětnou vazbu o stavu řadiče. Logická 0 na pinu FAULT znamená, že nastala jedna ze dvou možných situací. První situací je dosažení teplotního limitu na MOSFET. Jakmile dojde k poklesu teploty, je možné řadič dále používat. Druhým scénářem je dosažení proudového limitu po dobu delší, než je implicitně nastavená v integrovaném obvodu. Pro další použití řadiče je nutné provést restart pomocí pinu RESET nebo odpojení a opětovné připojení napájecího napětí (Texas Instruments, 2014).

Tab. 4.3 – Parametry řadiče krokového motoru (Texas Instruments, 2014)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	8,2 V ÷ 45,0 V
Maximální proud	2,5 A při 24 V
Rozlišení	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Tepelná ochrana	Ano
Proudová ochrana	Ano
Nastavení proudového omezení	Ano

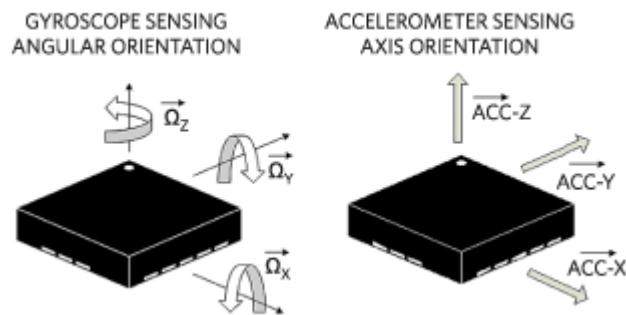
#### 4.4 SENZORY A SNÍMAČE

Správné balancování a řízení robota vyžaduje přesnou zpětnou vazbu o úhlu náklonu. K získání této informace je použit senzor s gyroskopem a akcelerometrem s šesti stupni volnosti. Mezi další důležitý snímač patří ultrazvukový snímač vzdálenosti pro detekci překážek, který bude plnit funkci kolizního systému. Poslední snímač, který robot obsahuje, je infračervený snímač určený pro autonomní režim sledování vyznačené čáry.

#### 4.4.1 Gyroskop a akcelerometr

Jedná se o dvojici snímačů, které spolu často kooperují a jsou umístěny na jednom pouzdře či čipu. V dnešní době se tyto snímače vyrábí ve velmi malém pouzdře označovaném jako MEMS. V zásadě jde o elektromechanickou kombinaci komponentů mikrometrických rozměrů, která u gyroskopů a akcelerometrů využívá druhého Newtonova pohybového zákona pro měření polohy a ten následně převádí pomocí A/D převodníku na elektrický signál (Dadafshar, 2015).

Základním rozdílem mezi gyroskopem a akcelerometrem je odlišnost měřené veličiny. Gyroskop je určen pro měření úhlové rychlosti, kdežto akcelerometr snímá lineární zrychlení. Rozdíl je patrný z obr. 4.3. Senzory, které jsou kombinací gyroskopu a akcelerometru měřící pohyb ve všech třech osách označujeme jako 6DOF (Dadafshar, 2015).



Obr. 4.3 – Rozdíl mezi akcelerometrem a gyroskopem (Dadafshar, 2015)

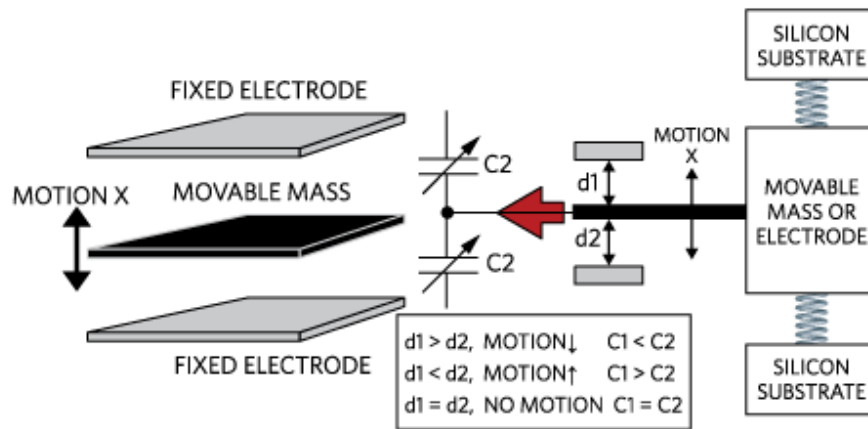
Princip měření je založen na změně kapacity kondenzátoru, ke které dojde v důsledku změny vzdálenosti desek podle vztahu

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad (4.1)$$

kde  $\varepsilon_0$  – permitivita vakua,  $F \cdot m^{-1}$ ,  
 $\varepsilon_r$  – permitivita dielektrika,  $F \cdot m^{-1}$ ,  
 $S$  – plocha překrytí desek kondenzátoru,  $m^2$ ,  
 $d$  – vzdálenost desek kondenzátoru,  $m$ .

Při působení zrychlení dochází k mechanickému pohybu zavěšeného tělesa spráženého s deskou kondenzátoru. To způsobí změnu vzdálenosti desky kondenzátorů a následně

i změnu kapacity. Změnu kapacity je poté možné pomocí elektronických obvodů vyhodnotit. Nákres uspořádání uvnitř pouzdra je uveden na obr. 4.4 (Dadafshar, 2015).



Obr. 4.4 – Princip funkce akcelerometru (Dadafshar, 2015)

Zahrnutí gyroskopu a akcelerometru do jednoho pouzdra je výhodné také z důvodu možnosti kompenzace nedostatků, kterými trpí oba snímače. Výstupní data z akcelerometru jsou zatížena šumem, zatímco data z gyroskopu trpí zejména při klidové pozici gyroskopickým driftem, kdy dochází k neustálé integraci úhlové rychlosti. Vhodnou kombinací výsledků z obou těchto snímačů lze dosáhnout poměrně přesné informace o pohybu měřeného objektu. Vhodné je použití např. komplementárního filtru, který je popsán rovnicí

$$\varphi_v = K \cdot (\varphi_v + \varphi_g \cdot dt) + (1 - K) \cdot \varphi_a, \quad (4.2)$$

kde  $\varphi_v$  – výsledný úhel náklonu, °,

$\varphi_g$  – úhel z gyroskopu, °,

$\varphi_a$  – úhel z akcelerometru, °,

$K$  – váhový koeficient (Baker, 2018).

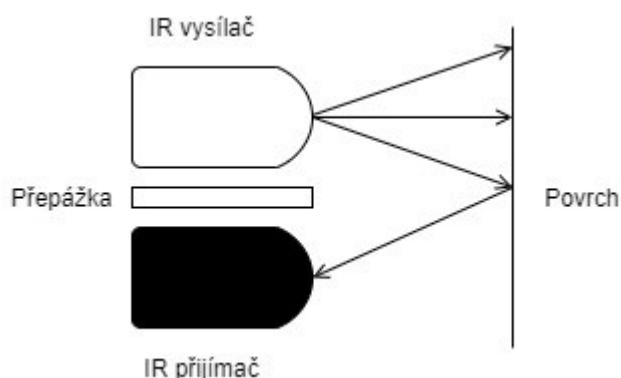
Pro stabilizaci a pohyb robota je použit senzor s gyroskopem a akcelerometrem s označením GY-521. Srdcem senzoru je integrovaný obvod MPU-6050, který obsahuje gyroskop, akcelerometr a řídicí jednotku. Řídicí jednotka umožňuje přímou práci s naměřenými daty a poskytuje tak nadřazenému systému řadu výstupních formátů zpracovaných dat. Kompletní technické specifikace uvádí tab. 4.4 (ECLIPSERA s.r.o., 2016).

Tab. 4.4 – Parametry modulu GY-521 (ECLIPSERA s.r.o., 2016)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	3 V ÷ 5 V DC
Typ snímače	MEMS, 6DOF
Rozsah gyroskopu	250, 500, 1000, 2000 °·s <sup>-1</sup>
Rozsah akcelerometru	± 2, ± 4, ± 8, ± 16 g
Rozlišení A/D převodníku	16 bitů
Komunikační rozhraní	I2C

#### 4.4.2 Senzor sledování čáry

Principem je aktivní infračervený senzor, pracující s zářením o vlnové délce 700 nm ÷ 1 mm. Základní koncept infračerveného senzoru jako detektoru překážek nebo snímače čáry, je přenos infračerveného signálu, který se od povrchu či překážky odrazí a je přijímán infračerveným přijímačem. Přijímač vyhodnotí intenzitu odraženého záření v podobě elektrického signálu, a ten je dále reprodukován k dalšímu vyhodnocení. Základní princip fungování snímače znázorňuje obr. 4.5 (Electronicshub.org, 2015).



Obr. 4.5 – Princip funkce senzoru pro sledování čáry

Funkce senzoru pro sledování čáry je závislá na barvě a materiálu povrchu. V případě povrchu černé nebo tmavé barvy dojde k úplnému či většinovému pohlcení infračerveného záření. Naopak v případě bílého a lesklého povrchu dojde k většinovému odražení dopadajícího záření do přijímače infračerveného záření. S intenzitou odraženého záření se mění elektrické vlastnosti fototranzistoru, který tvoří přijímač. Díky tomu je možné množství odraženého záření dále reprodukovat ve formě analogového nebo digitálního signálu (Electronicshub.org, 2015).

Pro úlohu sledování čáry balancujícího robota byl vybrán infračervený optický senzor

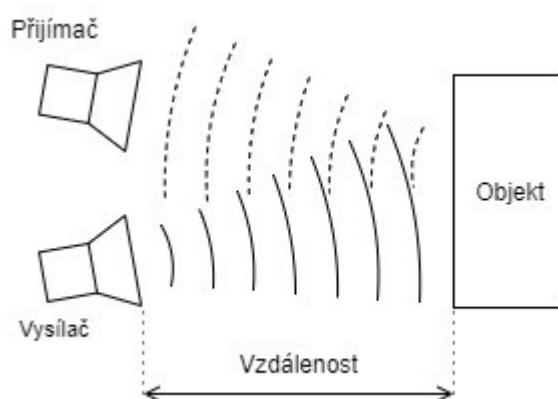
TCRT5000, jehož technické parametry uvádí tab. 4.5. Senzor je doplněný o odporový trimr a komparátor LM393 pro nastavení citlivosti digitálního výstupu.

Tab. 4.5 – Parametry infračerveného senzoru (Vishay Intertechnology, Inc., 2009)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	3,3 V ÷ 5,0 V DC
Výstup	analogový a digitální
Nastavitelná citlivost	ano
Detekční rozsah	0,2 mm ÷ 15,0 mm

#### 4.4.3 Ultrazvukový senzor vzdálenosti

Tento snímač pro svoji funkci využívá akustických vln s frekvencí nad 20 kHz, která je pro lidské ucho neslyšitelná. Princip snímače je založen na vyslání akustické vlny směrem k objektu a následnému odrazu směrem k přijímači. Grafické znázornění je uvedeno na obr. 4.6 (Reese, 2019).



Obr. 4.6 – Princip funkce ultrazvukového snímače vzdálenosti

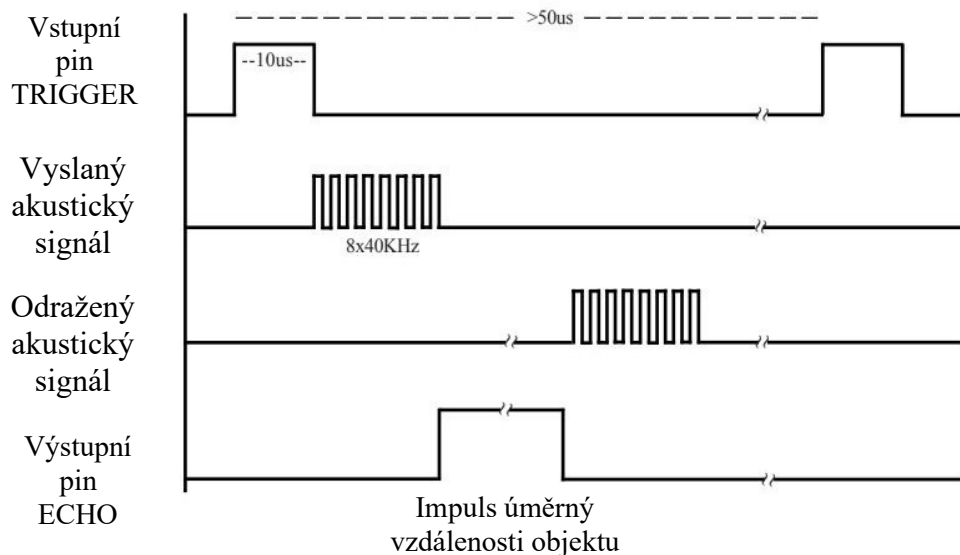
Z doby letu akustického signálu a znalosti rychlosti zvuku šířícího se ve vzduchu je možné dopočítat vzdálenost podle vztahu

$$S_d = \frac{v_z \cdot t}{2}, \quad (4.3)$$

kde  $S_d$  – vzdálenost k detekovanému objektu, m,  
 $v_z$  – rychlost šíření zvuku ve vzduchu,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  
 $t$  – doba letu akustického signálu, s (Reese, 2019).

Senzor dokáže pomocí tohoto principu poměrně přesně detekovat objekty ve vzdálenostech několika metrů. Má však i svá úskalí. Mezi ta hlavní patří proměnná rychlost zvuku v závislosti na teplotě, což činí zařízení přesná pouze při určitém rozsahu teplot. To lze odstranit přidáním teplotního snímače a následnou kompenzací ve výpočtu. Další nevýhodou tvoří objekty, které neochotně odrážejí akustický signál z důvodu svých atypických tvarů nebo malých rozměrů. V případě, že dojde objektem k pohlcení akustické vlny nebo k odrazu jiným směrem, než je přijímač, dochází k chybám (Resse, 2019).

Pro plnění funkce kolizního systému byl pro balancujícího robota zvolen ultrazvukový snímač s označením HC-SR04. Kompletní technické informace o snímači jsou uvedeny v tab. 4.6. Robot bude osazen dvojicí těchto snímačů z obou stran. Při použití se předpokládá stálá pokojová teplota eliminující různé rychlosti šíření zvuku.



Obr. 4.7 – Průběh jednotlivých signálů při ultrazvukovém měření vzdálenosti (Resse, 2019)

Pracovní cyklus snímače začíná impulsem od mikrokontroléru na pinu s označením TRIGGER po dobu minimálně  $10\mu\text{s}$ . Poté dojde k vyslání celkem osmi akustických signálů s frekvencí  $40\text{kHz}$ . Po odeslání posledního pulzu dojde ke spuštění časovače a nastavení výstupního pinu ECHO do stavu logické 1. Časovač je zastaven až s příchodem odraženého akustického signálu. Zároveň dochází k nastavení logické 0 na výstupní pin ECHO. Zaznamenaný impuls na pinu ECHO je úměrný vzdálenosti od objektu. Po uplynutí minimálně  $50\mu\text{s}$  od začátku celého cyklu je možné iniciovat nové měření. Průběh celého cyklu v podobě jednotlivých signálů je uveden na obr. 4.7 (Resse, 2019).



Tab. 4.6 – Parametry ultrazvukového snímače vzdálenosti  
(Mpja.com, nedatováno)

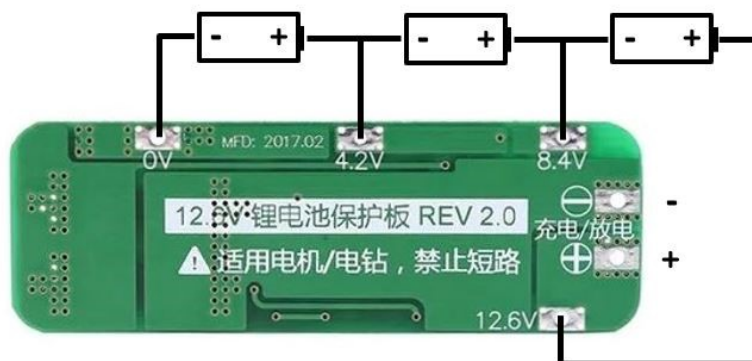
Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	5 V DC
Pracovní proud	15 mA
Frekvence akustického signálu	40 kHz
Maximální měřitelná vzdálenost	4 m
Minimální měřitelná vzdálenost	2 cm
Měřicí úhel	15°

## 4.5 NAPÁJENÍ

Při výběru napájení bylo potřeba zohlednit hranici nejnižšího možného napájecího napětí. Ta je dána řadiči krokových motorů hodnotou 8,2 V. K napájení řídicího obvodu, snímačů a dotykového displeje je vyžadováno napětí o hodnotě 5 V.

Pro napájení celého robota byly vybrány dobíjecí lithium-iontové baterie značky LG typu INR18650-M36 o kapacitě 3600 mAh s maximálním trvalým vybíjecím proudem 10 A. Baterie jsou sestaveny do série v počtu 3 kusů, což odpovídá v závislosti na stavu nabití baterií jmenovitému napětí 7,50 V ÷ 12,75 V (Kim, 2017).

Tento typ baterií je velmi citlivý na vybití. Napětí jednoho článku nesmí klesnout pod hodnotu 2,5 V, což v případě sériového spojení 3 kusů odpovídá celkovému napětí 7,5 V. Z tohoto důvodu byl vybrán ochranný obvod určený pro 3 sériově spojené baterie, který hlídá každý článek před vybitím pod napětí 2,54 V samostatně. Schéma zapojení baterií k ochrannému obvodu zobrazuje obr. 4.8. Obvod mimo jiné zajišťuje ochranu proti zkratu, přebíjení každého článku nad 4,25 V a nadproudu 20 A (laskaarduino.cz, 2021).



Obr. 4.8 – Schéma zapojení ochranného obvodu baterií (laskaarduino.cz, 2021)

### 4.5.1 Step-down měnič

K napájení řídicího systému, senzorů a ovládacích a komunikačních prvků, je vyžadováno jmenovité napětí 5 V. Snížení napětí z baterie na hodnotu 5 V zajišťuje snižující měnič napětí, jehož technické parametry uvádí tab. 4.7.

Tab. 4.7 – Parametry snižujícího měniče napětí (ECLIPSERA s.r.o, 2020)

Parametr	Hodnota
Vstupní napětí	4,75 V ÷ 23,00 V
Výstupní napětí	1,00 V ÷ 17,00 V
Výstupní proud	3,00 A
Účinnost	až 96 %
Spínací frekvence	340 kHz
Zvlnění výstupního napětí	max. 30 mV

## 4.6 OVLÁDÁNÍ A KOMUNIKACE

V této kapitole jsou blíže popsány způsoby, jakými bude robota možné ovládat a řídit. Důraz je kladen zejména na uživatelský komfort a intuitivnost při ovládání a nastavování. Z těchto důvodů byl vybrán pro nastavování a ovládání dotykový displej, který umožní přehledné grafické rozhraní mezi řídicím systémem a uživatelem. Dálkové ovládání je umožněno bezdrátovou technologií Bluetooth. Pomocí vytvořené aplikace pro operační systém Android je možné robota ovládat z mobilního telefonu.

### 4.6.1 Dotykové ovládání

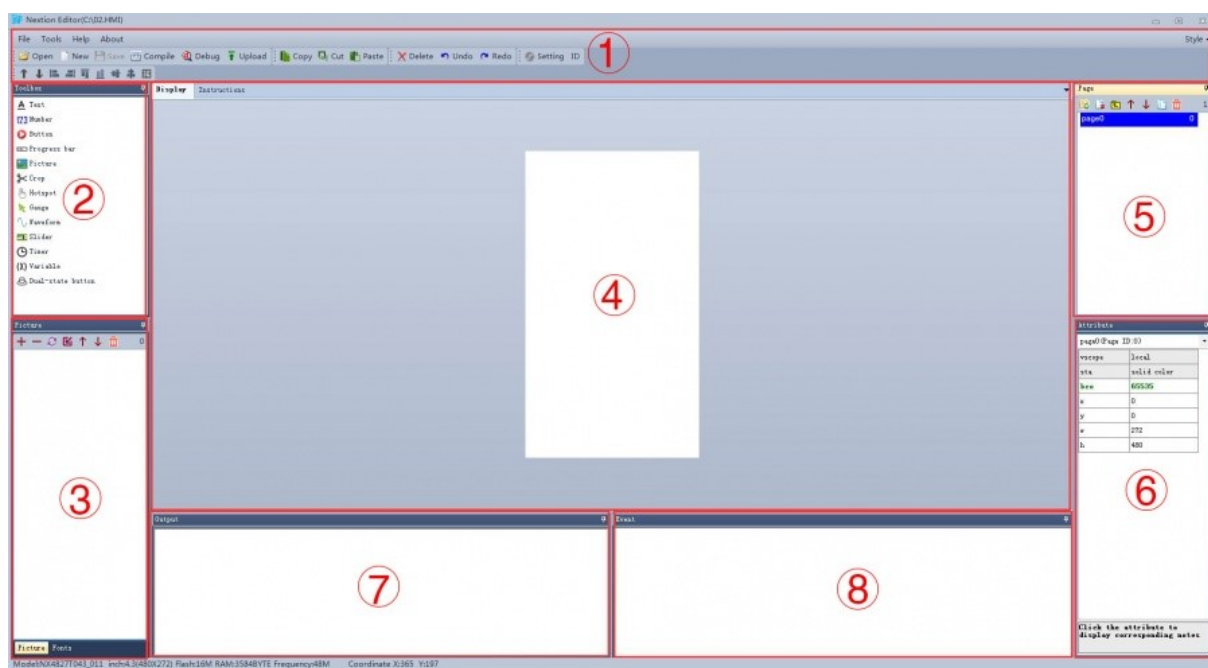
Pro dotykové ovládání byl vybrán dotykový displej značky Nextion. Tyto displeje jsou určeny zejména pro tvorbu grafického rozhraní mezi zařízením a člověkem a jsou dostupné v úhlopříčkách od 2,4“ až po 10,1“. Dotykové displeje jsou doplněné o vlastní procesorovou jednotku a paměti. Díky tomu je možné vykonávat skripty s přijatými daty přímo v displeji a snížit tím zatížení řídicího systému včetně komunikačního rozhraní. Návrh grafického prostředí, nastavování a případná tvorba skriptů probíhá ve volně dostupném editoru (Nextion, nedatováno).

Pro úlohu balancujícího robota byl vybrán a zakomponován dotykový displej NX4832T035 s úhlopříčkou 3,5“, jehož kompletní technické specifikace uvádí tab. 4.8.

Tab. 4.8 – Technická specifikace dotykového displeje (Nextion, nedatováno).

Parametr	Hodnota
Úhlopříčka	3,5“
Rozlišení	480×320 pixel
Dotyková plocha	rezistivní
Komunikační rozhraní	sériové (UART)
Počet barev	65536
Napájecí napětí	4,75 V ÷ 7,00 V
Spotřeba (max, min)	145 mA, 15 mA
Pracovní teplota	-20 °C ÷ 70 °C

K navázání komunikace po sériové lince mezi řídicím systémem Arduino a dotykovým displejem Nextion je k dispozici knihovna pro objektově orientované programování nebo kompletní sada instrukcí displeje pro sestavení vlastních funkcí. Grafický návrh displeje probíhá pomocí grafického editoru, ve kterém je na výběr z několika vytvořených objektů. Vlastnosti objektů lze nastavit v editoru nebo následně měnit programově z řídicího systému. Dále je možné nad jednotlivými objekty tvořit vlastní programové skripty, což omezí zátěž řídicí jednotky.



Obr. 4.9 – Programový nástroj pro konfiguraci dotykového displeje Nextion (Itead.cc, 2016)

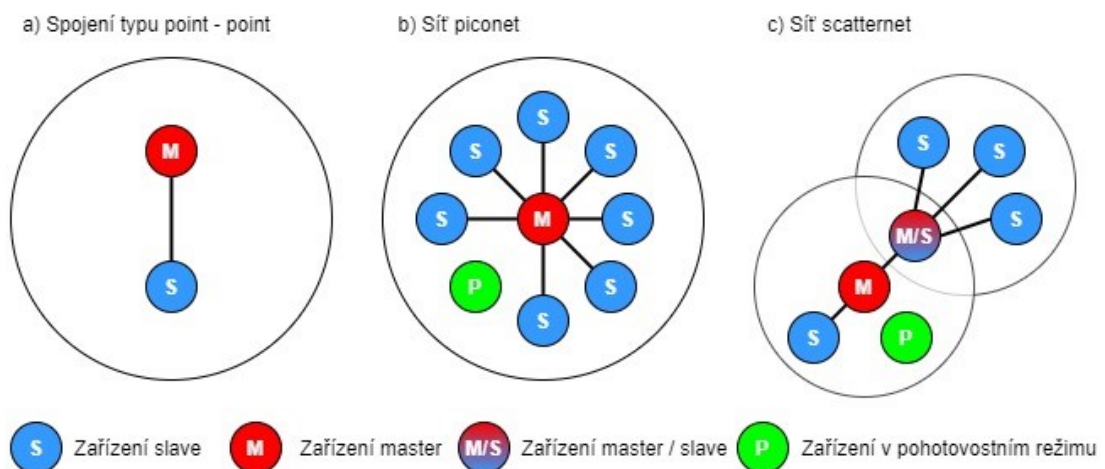
Popis grafického prostředí uvedeného na obr. 4.9:

- 1 – hlavní menu,
- 2 – seznam objektů,
- 3 – editor obrázků a písma,
- 4 – pracovní plocha,
- 5 – seznam stránek,
- 6 – vlastnosti zvoleného objektu,
- 7 – okno kompilátoru,
- 8 – prostor pro program (Itead.cc, 2016).

#### 4.6.2 Dálkové řízení

Pro dálkové řízení robota je použit bezdrátový standard Bluetooth. Jedná se o rádiovou komunikaci na krátké vzdálenosti do 100 metrů ve frekvenčním pásmu 2,400 GHz ÷ 2,483 GHz. K přenosu dat je používána metoda FHSS, která pracuje na principu rychlé změny frekvencí pro zajištění vyšší odolnosti a bezpečnosti celé sítě. Během přenosu bitů nebo bajtů tak dochází k přeskokování mezi několika frekvencemi (Škopek, 2013).

Nicméně primární bezpečnost komunikace je zajištěna párováním. Každá zařízení se pro úspěšné navázání komunikace musí navzájem spárovat pomocí tajného klíče, kterým je komunikace šifrována. Každé zařízení Bluetooth má svoji 48bitovou unikátní adresu, pod kterou vystupuje. Pro opětovné navázání komunikace již není nutné znovu provádět párování (Škopek, 2013).



Obr. 4.10 – Druhy topologií bezdrátového komunikačního rozhraní Bluetooth

Komunikační standard Bluetooth umožňuje komunikaci několika typů. Mezi hlavní patří typ bod – bod, kdy komunikují pouze dvě zařízení, z nichž jedno je v roli nadřízeného a druhé v roli podřízeného. Dále je možná komunikace až se sedmi aktivními podřízenými zařízeními, kterou řídí jeden nadřízený. Další zařízení mohou být v pohotovostním režimu. Takovému uspořádání se pak říká piconet. Jednotlivé piconet sítě spolu mohou dále komunikovat. Takové sítě jsou označovány jako scatternet. Příklady jednotlivých typů komunikačních topologií popisuje obr. 4.10 (Škopek, 2013).

Podle velikosti vysílacího výkonu jsou rozlišovány tři třídy Bluetooth zařízení s dosahem komunikace od 10 m do 100 m. Dosahy jsou uvažovány za dokonalých podmínek bez překážek. S překážkami dosah komunikace značně klesá. Seznam tříd podle výkonů uvádí tab. 4.9 (Škopek, 2013).

Tab. 4.9 – Výkonové třídy bezdrátové komunikace Bluetooth (Škopek, 2013)

Třída	Maximální výkon	Maximální dosah
I	10 mW	100 m
II	2,5 mW	50 m
III	1 mW	10 m

Pro bezdrátovou komunikaci s mobilním telefonem byl vybrán Bluetooth modul HC-05. Modul využívá pro komunikaci s řídicím systémem sériové komunikace UART. Mezi hlavní výhody patří nízká spotřeba odebíraného proudu a schopnost modulu komunikovat v režimu master i slave. Kompletní technické specifikace uvádí tab. 4.10.

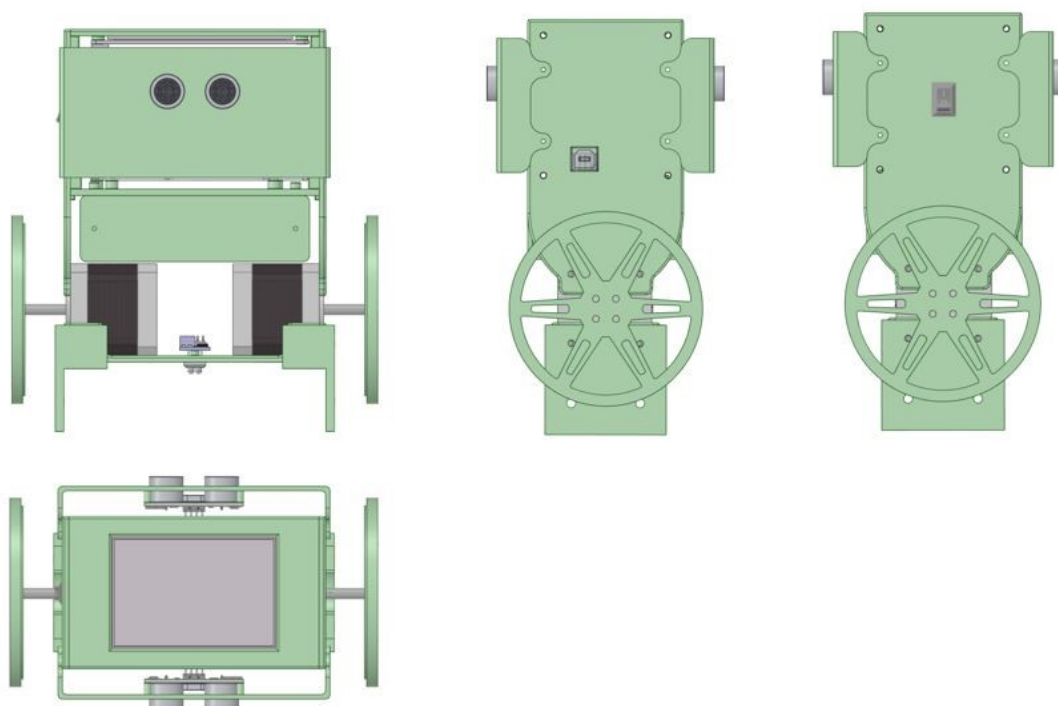
Tab. 4.10 – Technická specifikace Bluetooth modulu (Sakul.cz, 2020)

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	3,6 V ÷ 6,0 V
Proudový odběr	30 mA ÷ 40 mA
Komunikace	UART
Výkon	Třída 2 (2,5 mW)
Dosah	10 m
Režim provozu	Master / Slave
Verze Bluetooth	V2.0

## 5 REALIZACE

### 5.1 KONSTRUKCE ROBOTA

Návrh robota byl inspirován konstrukcí podobných komerčně vyráběných robotů, uvedených v kapitole 1. Návrh 3D modelu robota byl uzpůsoben rozměrům vybraných komponentů a dále pak požadavkům na rozebíratelné spoje umožňující snadnou montáž a opravu. Navržené tělo robota bylo následně vytištěno pomocí 3D tiskárny z plastového materiálu typu ABS. Návrh robota zobrazený na obr. 5.1 byl vypracován ve volně dostupném 3D CAD softwaru DesignSpark Mechanical.



Obr. 5.1 – 3D model navrženého balancujícího robota

První a nejnižší položené patro je vyhrazeno pro uložení dvojice krokových motorů a senzoru pro sledování čáry. Senzor pro sledování čáry je umístěn mezi motory a jeho infračervené diody se pro správnou funkci nachází ve výšce maximálně 20 mm od podložky. K motorům jsou dále připevněny bočnice, které jsou nosnými body dalších pater. V bočnicích jsou otvory pro vypínač a USB konektor k programování řídicí jednotky. K motorům lze v případě testování přichytit pomocné podstavy, které drží robota ve svislé poloze.

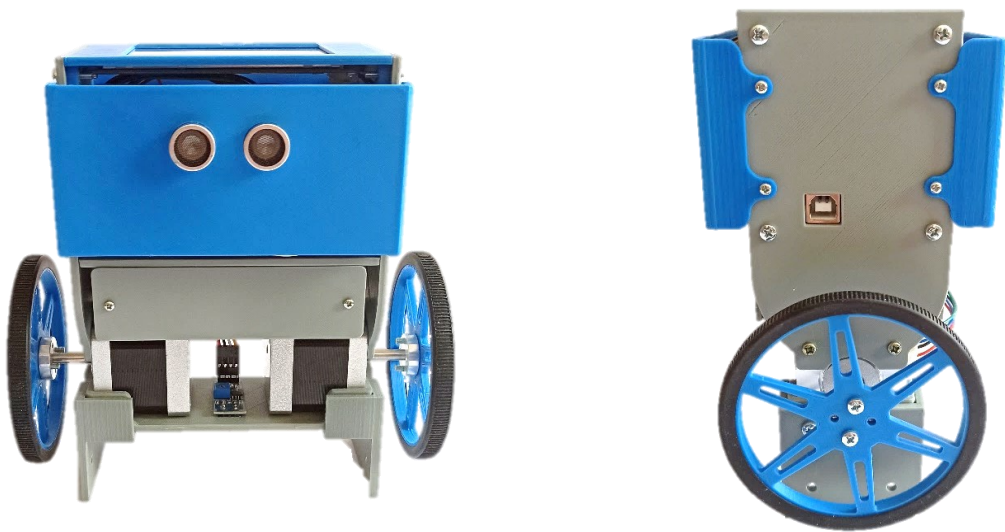
Druhé patro je upevněno k bočnicím pomocí šroubů a matic v připravených pouzdech. Ve vrchní části patra se nachází řídicí jednotka Arduino doplněná o navržený doplňující modul.

Modul obsahuje pomocné elektronické součástky a konektory pro připojení veškerých komponentů. Ve spodní části patra je umístěn bateriový box včetně ochranného obvodu. Přístup k výměně baterie je možný z obou stran pomocí odnímatelných krytů.

V prostoru nad druhým patrem jsou do bočnic pomocí samořezných šroubů připevněny kryty, ve kterých se nachází ultrazvukové snímače. Kryty tak částečně zapouzdří řídicí jednotku, aby nedošlo k jejímu poškození při provozu. Zároveň nechají dostatečné otvory pro odvod tepla, které vzniká na radičích motorů. Celá konstrukce je pak zastřešena rámečkem s dotykovým displejem pro ovládání robota. Způsob uchycení rámečku displeje k bočnicím je pomocí šroubů a matic v připravených pouzdrech.

Styčnou plochu s podložkou tvoří dvojice kol, na kterých jsou pro dosažení lepší přilnavosti nasazeny silikonové gumy. Průměr kol včetně nasazené gumy je 90 mm. Kola jsou s motorem spřažena pomocí duralové příruby, která je uchycena na hřídeli motoru.

Robot na obr. 5.2 disponuje šířkou 175 mm, výškou 177 mm a hloubkou 105 mm. Provozní váha je 1,18 kg.



Obr. 5.2 – Skutečná podoba sestaveného balancujícího robota

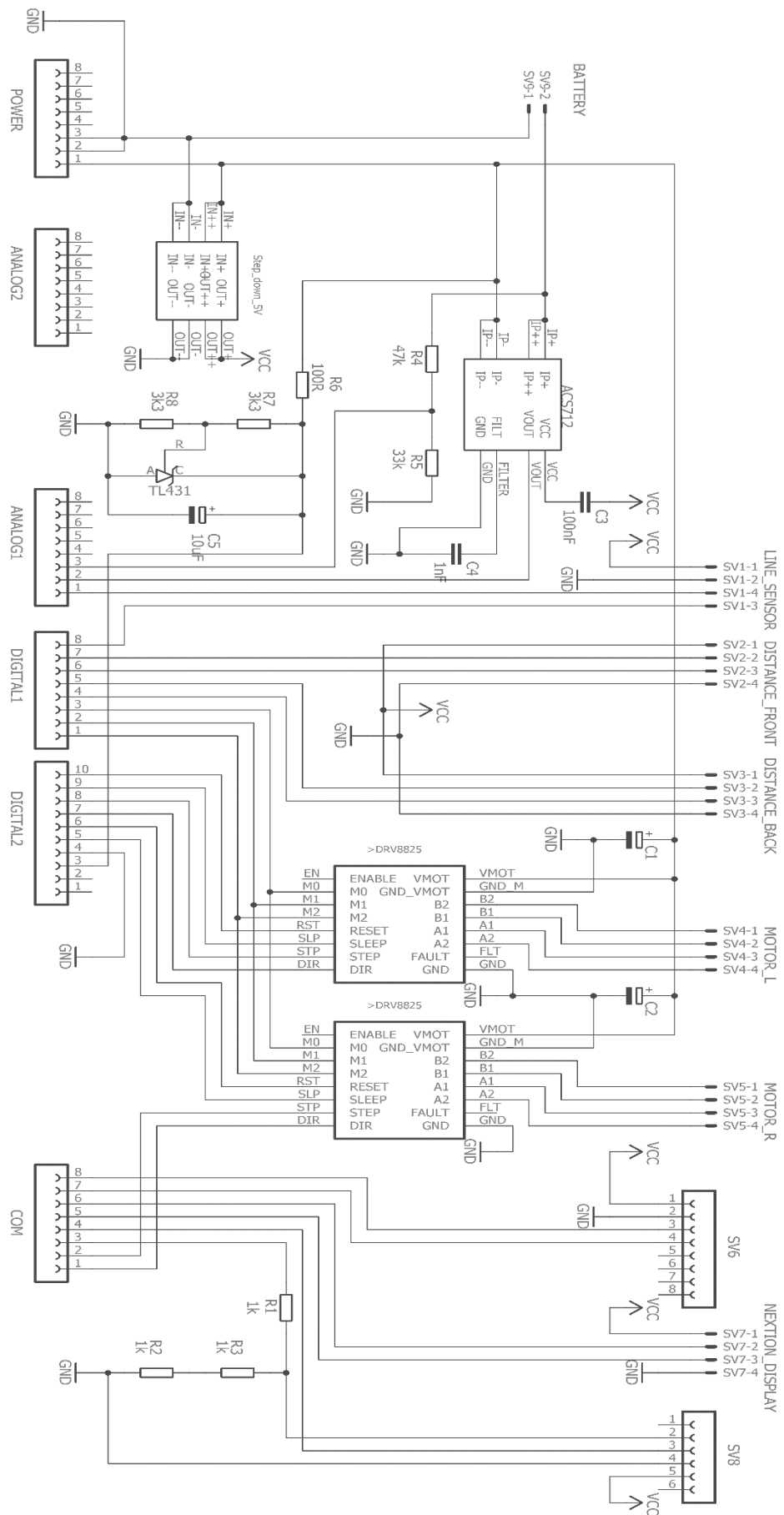
## 5.2 NÁVRH DPS

Deska plošných spojů je realizována z důvodu limitujících rozměrů jako dvouvrstvá o rozměrech 88 mm × 53 mm. Pro návrh byl použit software Eagle. Deska z části kopíruje rozložení vstupně-výstupních konektorů řídicí jednotky a je možné ji používat formou odnímatelného modulu. Veškeré komponenty jsou připojené pomocí svorkovnic a konektorů na osazenou desku plošných spojů. Seznam použitých vstupů a výstupů uvádí tab. 5.1. Na dalších stránkách je uvedeno schéma zapojení včetně rozmístění součástek, vylitého polygonu a osazené desky.

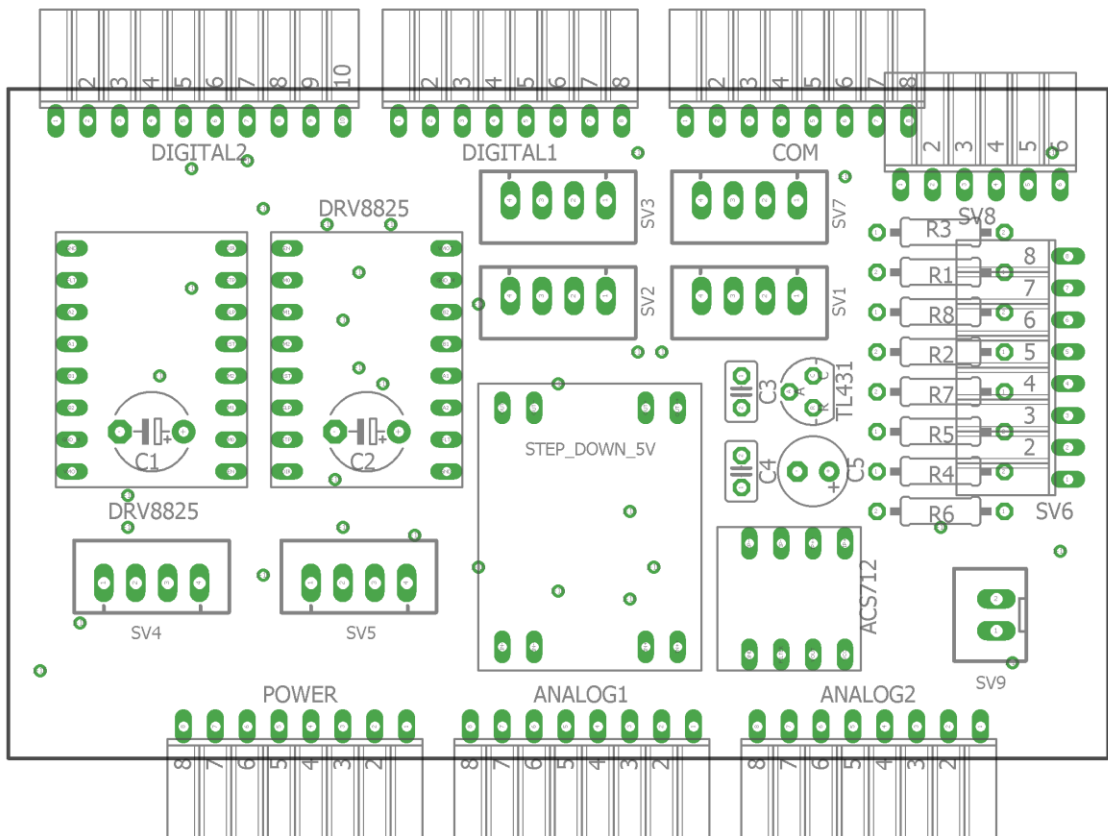
Tab. 5.1 – Seznam použitých vstupů a výstupů

Arduino pin	Zařízení	Typ signálu
Vin	Zdroj napájení	12 V
GND		0 V
A5	Snímač napětí	AIN
A6	Snímač proudu	AIN
A7	Snímač čáry	AIN
D0		DI
D1	Snímač vzdálenosti (přední)	DI / ECHO
D2		DO / TRIG
D3	Snímač vzdálenosti (zadní)	DI / ECHO
D4		DO / TRIG
D5	Driver motoru (levý + pravý)	DO / M0
D6		DO / M1
D7		DO / M2
D8	Driver motoru (levý)	DO / RST
D9		DO / SLP
D10		DO / STP
D11		DO / DIR
D12	Driver motoru (pravý)	DO / RST
D13		DO / SLP
D14		DO / DIR
D15		DO / STP
D16 / TX2	Bluetooth	RX
D17 / RX2		TX
D18 / TX1	Dotykový displej	RX
D19 / RX1		TX
D20 / SDA	Gyroskop / akcelerometr	SDA
D21 / SCL		SCL

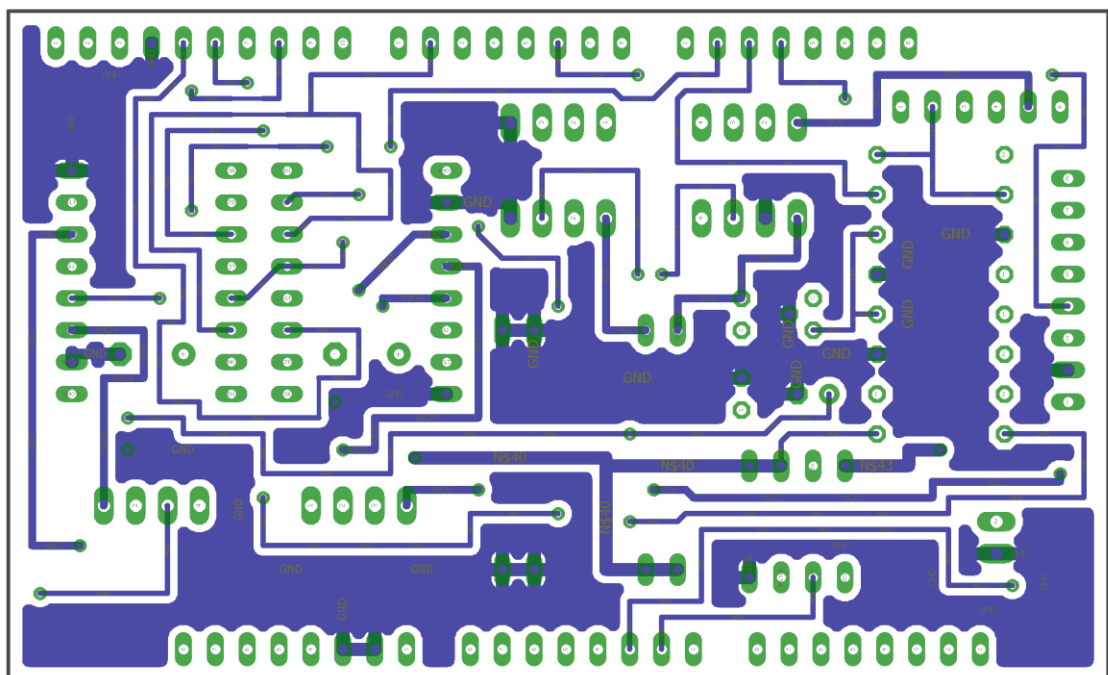




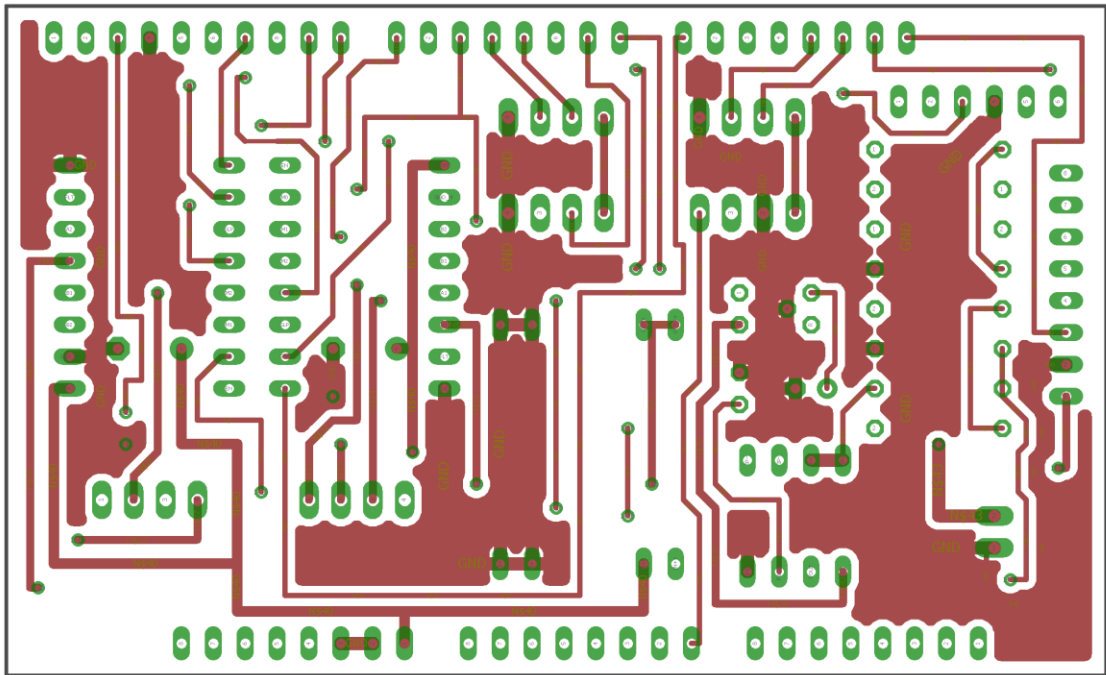
Obr. 5.3 – Schéma zapojení desky plošných spojů



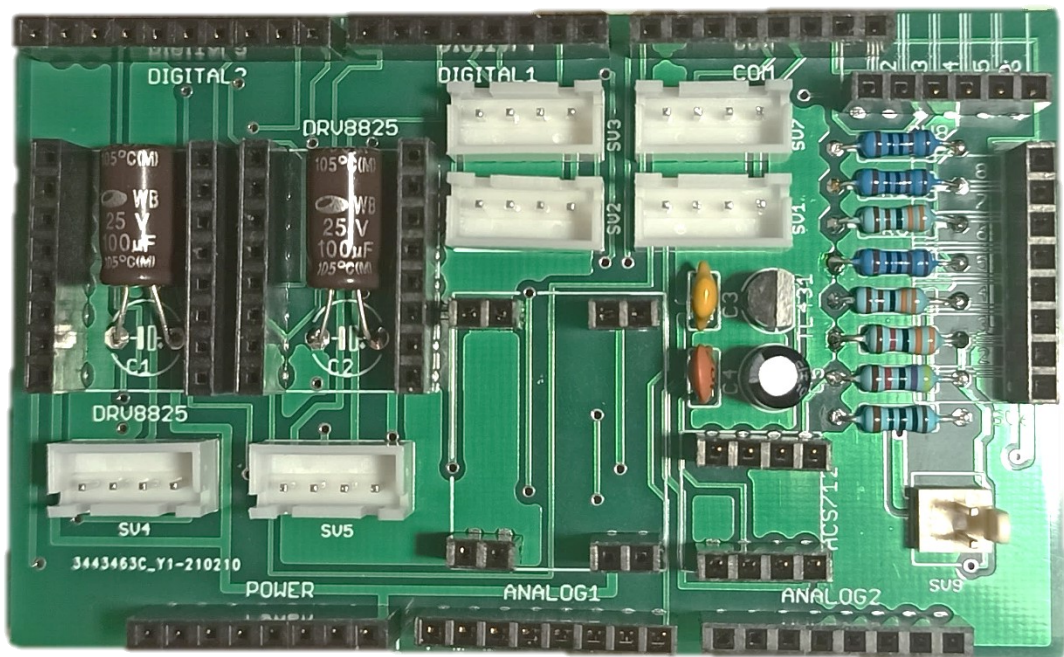
Obr. 5.4 – Rozmístění součástek desky plošných spojů



Obr. 5.5 – Vylitý polygon spodní strany desky plošných spojů



Obr. 5.6 – Vylitý polygon vrchní strany desky plošných spojů



Obr. 5.7 – Pohled na osazenou desku plošných spojů

Svorkovnice určené pro připojení komponent jsou na DPS označeny formou bílého textu a jejich rozložení koresponduje s tab. 5.2. Svorkovnice jsou realizovány jako nezáměnné.

Tab. 5.2 – Rozložení svorkovnic

Název svorkovnice	Zařízení	Pin	Typ signálu
SV1	Snímač čáry	1	VCC
		2	GND
		3	AO
		4	DO
SV2	Snímač vzdálenosti (přední)	1	VCC
		2	ECHO
		3	TRIGGER
		4	GND
SV3	Snímač vzdálenosti (zadní)	1	VCC
		2	ECHO
		3	TRIGGER
		4	GND
SV4	Motor levý	1	Cívka A
		2	Cívka A
		3	Cívka B
		4	Cívka B
SV5	Motor pravý	1	Cívka A
		2	Cívka A
		3	Cívka B
		4	Cívka B
SV6	Gyroskop / akcelerometr	1	VCC
		2	GND
		3	SCL
		4	SDA
SV7	Dotykový displej	1	VCC
		2	RX
		3	TX
		4	GND
SV8	Bluetooth	2	RX
		3	TX
		4	GND
		5	VCC

### 5.3 KONFIGURACE ŘADIČE KROKOVÉHO MOTORU

Při oživování řadiče došlo v první řadě podle technické dokumentace k doplnění elektrolytického kondenzátoru před napájecí svorky řadiče. Jeho funkcí je eliminovat zvlnění vstupního napětí. Zapojení je uvedeno celkovém schématu zobrazeném na obr. 5.3.

Dále bylo nastaveno proudové omezení krokového motoru. Pomocí integrovaného odporového trimru na řadiči a ampérmetru vloženému do série mezi řadič a vinutí krokového motoru byl nastaven maximální proud vinutím na hodnotu 1.5 A. Z důvodu tepelných ztrát vznikajících na řadiči byl modul doplněn hliníkovým chladičem.

Řadič je používán v režimu mikrokrokování s rozlišením 1/4 kroku. Výsledný krok krokového motoru je 0,45°, čemuž odpovídá 800 kroků na otáčku. Volbu mikrokrokování je možné díky navržené desce plošných spojů měnit programově z řídicí jednotky pro oba řadiče zároveň. Spolu s volbou mikrokrokování byly separátně zachovány logické signály pro restartování řadiče a uvedení řadiče do režimu spánku pro snížení spotřeby.

### 5.4 MĚŘENÍ ÚHLU POMOCÍ GYROSKOPU A AKCELEROMETRU

Jedná se o dvojici snímačů umístěných na jednom senzoru, který poskytuje klíčové informace o náklonu robota. Z pohledu regulační smyčky je žádoucí, aby data z těchto snímačů byla vyčítána co nejrychleji a nebyla zatížena gyroskopickým driftem nebo šumem z akcelerometru. Z těchto důvodů byla tomuto modulu věnována největší pozornost při jeho nastavování.

Pro dosažení vyšší rychlosti čtení dat ze snímačů byla navýšena rychlost hodinového signálu sběrnice I2C. Z technické dokumentace použitého mikroprocesoru je zřejmé, že rychlost sběrnice se nastavuje pomocí hodnoty zapsané do registru TWBR. Výpočet frekvence hodinového signálu je dán vzorcem

$$SCL_f = \frac{CPU_f}{16 + 2(TWBR)4^{TWPS}}, \quad (5.1)$$

kde  $SCL_f$  – frekvence hodinového signálu sběrnice I2C, Hz,

$CPU_f$  – taktovací frekvence procesoru, Hz,

$TWBR$  – registr určující frekvenci sběrnice I2C,

$TWPS$  – dělicí registr hodinového signálu SCL (Microchip Technology Inc., 2020).

Za použití nulové hodnoty dělicího registru TWPS a hodnoty registru TWBR = 12 byla nastavena frekvence hodinového signálu sběrnice na 400 kHz.

K vyšší rychlosti čtení dat byla uzpůsobena i komunikace s modulem. Komunikace probíhá pouze za použití univerzální knihovny pro komunikaci po sběrnici I2C „Wire.h“, pomocí které je omezena datová vytiženost sběrnice na nezbytně nutnou.

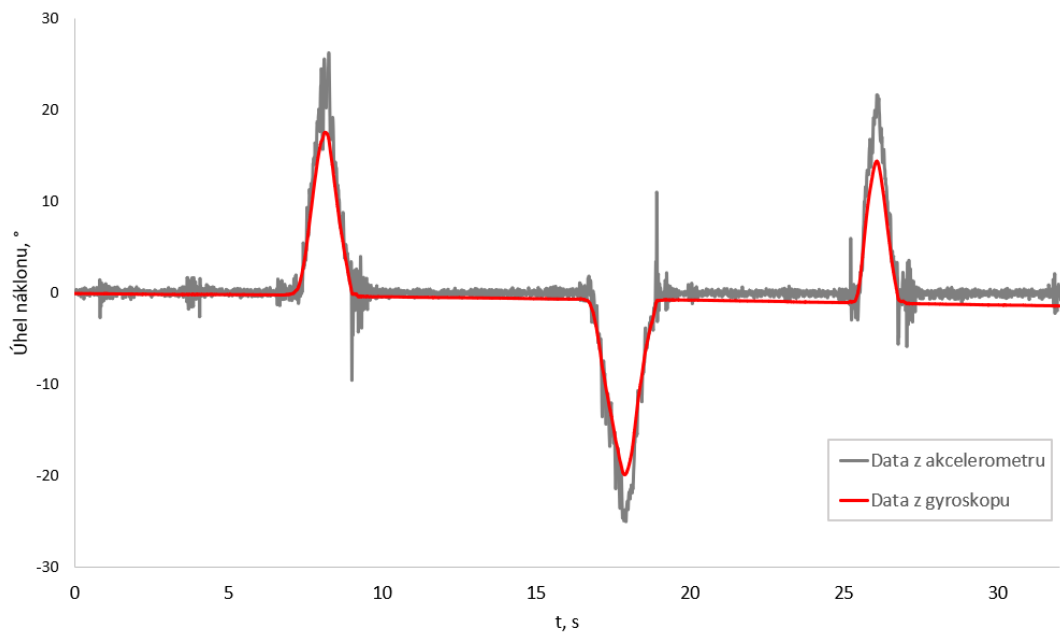
Tab. 5.3 – Seznam komunikovaných registrů senzoru MPU6050 (InvenSense Inc., 2013)

Hexadecimální adresa	Název registru	Operace	Funkce
6B	PWR_MGMT_1	Zápis	Restart senzoru
1A	CONFIG	Zápis	Nastavení frekvenčního filtru
1B	GYRO_CONFIG	Zápis	Nastavení rozsahu gyroskopu
1C	ACCEL_CONFIG	Zápis	Nastavení rozsahu akcelerometru
3B až 3C	ACCEL_XOUT	Čtení	Výstup akcelerometru pro osu X
3D až 3E	ACCEL_YOUT	Čtení	Výstup akcelerometru pro osu Y
3F až 40	ACCEL_ZOUT	Čtení	Výstup akcelerometru pro osu Z
41 až 42	TEMP_OUT	Čtení	Výstup z teplotního snímače
43 až 44	GYRO_XOUT	Čtení	Výstup gyroskopu pro osu X

Pomocí registrů, uvedených v tab. 5.3, byl nakonfigurován rozsah gyroskopu  $\pm 250 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$  a rozsah akcelerometru  $\pm 2 \text{ g}$ .

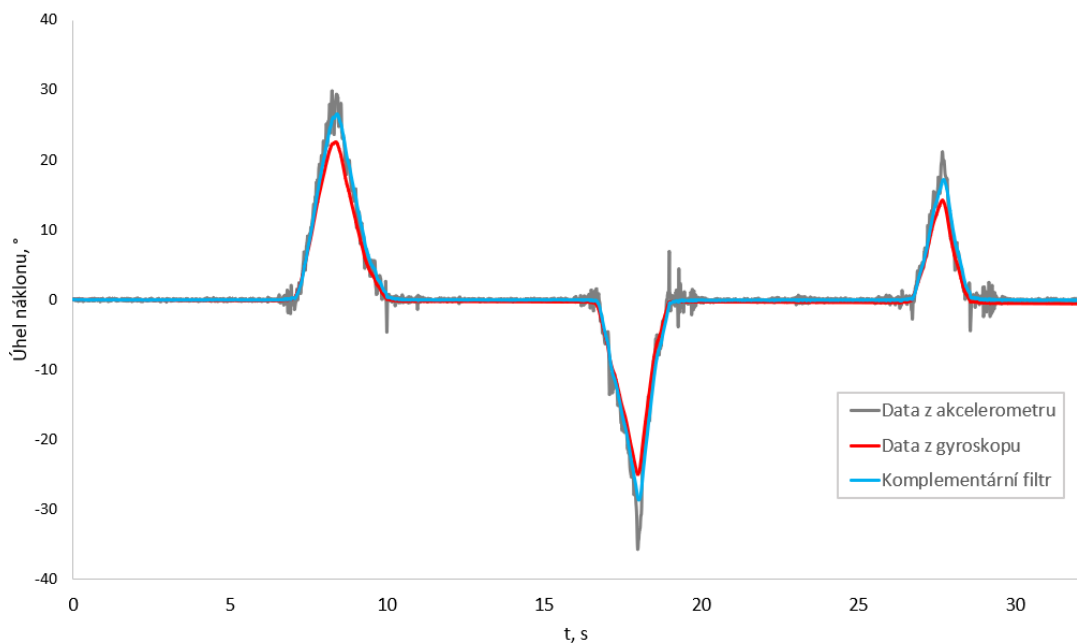
Z naměřeného průběhu, zobrazeného na obr. 5.8, jsou patrné zmíněné nedostatky obou snímačů. Senzor byl na začátku měření položen v klidové poloze na podložce a poté třikrát vychýlen v pracovním rozsahu robota. Na konci měření byl opět vrácen do původní polohy. Gyroskopický snímač reagoval na změny velmi rychle bez většího šumu. Nicméně již od začátku měření se začal projevovat jemný drift, který na konci měření dosahoval zásadní odchylky od skutečného úhlu náklonu. Rychlost odezvy akcelerometru byla velmi podobná gyroskopu, avšak míra zašumění byla několikanásobně větší. Na konci pokusu po uložení senzoru na původní místo vykazoval akcelerometr podobné hodnoty jako na začátku měření.

Zmíněné nedostatky byly vyřešeny komplementárním filtrem na úrovni řídicího systému. Komplementární filtr po vhodném nastavení poměru mezi daty z gyroskopu a akcelerometru potlačí gyroskopický drift a šum z akcelerometru. Bylo testováno několik poměrů, z nichž nejlepšího výsledku bylo dosaženo při hodnotě  $K = 97$ . Pro výpočet byla použita rovnice (4.2).



Obr. 5.8 – Naměřená data ze senzoru MPU-6050 bez filtrace

Z důvodu šumu pocházejícího z akcelerometru, který se vyskytoval i po použití komplementárního filtru, byl dodatečně aktivován nízkofrekvenční digitální filtr. Filtr byl zaveden na úrovni senzoru, který se nastavuje pro akcelerometr i gyroskop zároveň. Zápísem hodnoty 3 do registru CONFIG byl aktivován filtr o frekvenci 44 Hz pro akcelerometr a 42 Hz pro gyroskop. Průběh získaný po aplikaci obou filtrů uvádí obr. 5.9 (InvenSense Inc., 2013).



Obr. 5.9 – Naměřená data ze senzoru MPU-6050 po filtraci

## 5.5 DÁLKOVÉ OVLÁDÁNÍ

Veškerá komunikace, která probíhá po bezdrátovém standardu Bluetooth, je ovládána z řídicího systému po sériovém protokolu USART. Bluetooth modul však oproti řídicímu systému používá TTL logiku, kterou bylo potřeba sjednotit. Konverze logických úrovní byla řešena jednosměrně přidáním napěťového děliče mezi vysílací pin řídicího systému a přijímací pin Bluetooth modulu. Z pohledu přijímacího pinu řídicího systému dochází k rozeznání vysoké a nízké logické úrovně bez jakékoliv úpravy. Schéma zapojení Bluetooth modulu včetně napěťového děliče je uvedeno na obr. 5.3.

### 5.5.1 Konfigurace bluetooth modulu

Nastavení modulu je možné pouze přes sériovou linku. Modul byl konfigurován v režimu pro jednorázové nastavení. Aktivace tohoto režimu byla provedena přivedením napájecího napětí mimo jiné i na pin EN a přidržením integrovaného tlačítka na modulu při zapínání. Aktivace režimu nastavení je signalizována pravidelnou periodou blikání integrované červené LED. Rychlost sériové linky je v tomto režimu implicitně nastavena na hodnotu 38400 bps s jedním stop bitem a nulovou paritou. K opuštění konfiguračního režimu dojde při dalším restartování v běžném zapojení.

Pro konfiguraci byl použit převodník USB/TTL připojený k PC na kterém byl spuštěn terminál pro přenos sériových dat. Konfigurace probíhá formou AT příkazů. Modul při konfiguraci v případě správné syntaxe a provedení příkazu odpoví výpisem „OK“. Seznam použitých AT příkazů ke konfiguraci je uveden v tab. 5.4.

Tab. 5.4 – Seznam použitých AT příkazů (Sakul.cz., 2020)

Příkaz	Funkce
AT	Ověření navázané komunikace
AT+NAME=ROBOT	Nastavení jména zařízení
AT+PSWD=2021	Nastavení hesla pro párování
AT+ROLE=0	Nastavení modulu do režimu slave
AT+UART=115200,0,0	Nastavení sériového rozhraní na rychlost 115200 bps, 1 stop bit a paritu 0

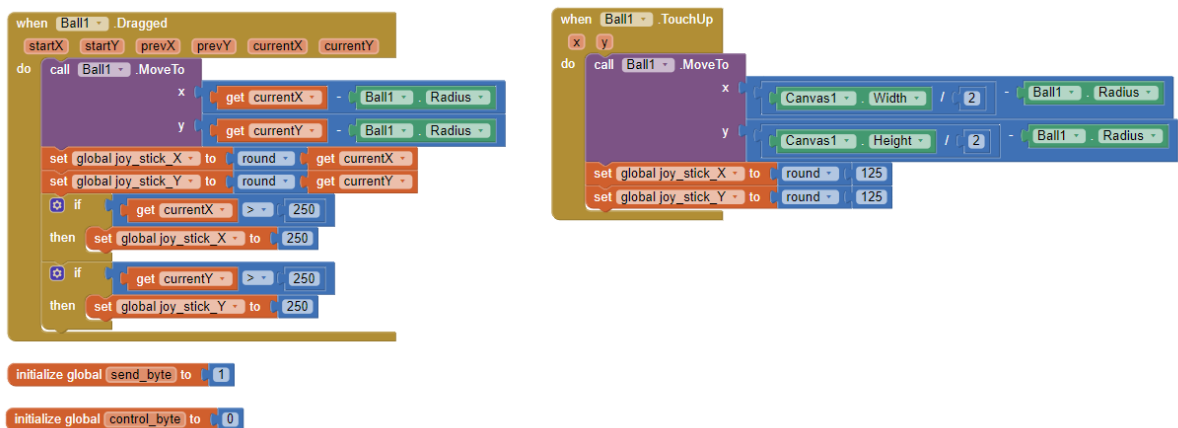


## 5.5.2 Mobilní aplikace

K návrhu a programování byla použita volně přístupná webová aplikace MIT App Inventor určená k tvorbě mobilních aplikací pro operační systémy Android a iOS.

Tvorba aplikace byla rozdělena na dvě části. V první části byly nastaveny základní vlastnosti aplikace (název, logo, orientace, pozadí...) a pomocí komponent sestaveno grafické prostředí, které umožní dálkové řízení robota. V druhé části byl pomocí bloků vytvořen program, který je vykonáván na základě vzniklých událostí.

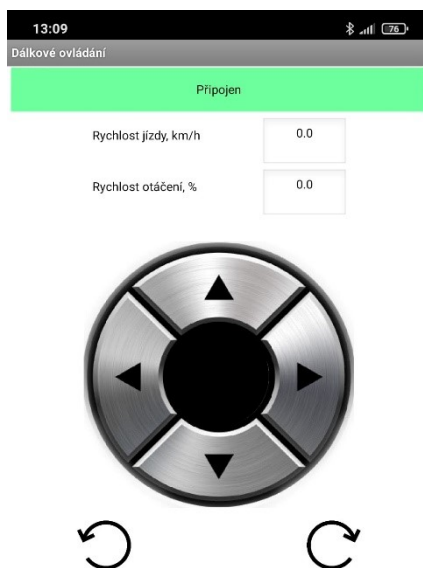
Tvorba programu probíhala přidáním požadovaných komponent aplikace v grafické části návrhu označované jako „Designer“, kde byly atributy komponent nadefinovány do výchozích hodnot a vhodně pojmenovány. V druhé části návrhu označované jako „Blocks“ byl z grafických bloků dříve vybraných komponent sestaven program. Každá komponenta nabízí předem vytvořené události a metody. Vzhledem k povaze komponenty je nabízeno několik událostí, které mohou při dotykovém ovládní nastat a dále pak metody k zápisu nebo navrácení hodnoty vybraného atributu. Dále jsou v nabídce standardní matematické, rozhodovací a logické funkce v podobě grafických bloků. Ukázka části vytvořeného programu je znázorněna na obr. 5.10.



Obr. 5.10 – Ukázka části programu mobilní aplikace

V horní části vytvořené aplikace se nachází tlačítko pro navázání komunikace s robotem. Předpokladem k úspěšnému navázání komunikace je předchozí spárování prostřednictvím jedinečného klíče. Název zařízení, pod kterým robot vystupuje, Bluetooth adresa a jedinečný klíč včetně QR kódu pro stažení mobilní aplikace je umístěn v uživatelském rozhraní robota v menu „Bluetooth“. V případě úspěšného navázání komunikace se tlačítko pro navázání komunikace zbarví do zelena a popis se změní na „Připojen“. V opačném případě

dojde ke zbarvení červenou barvou s nápisem „Odpojen“. Ukázka aplikace s úspěšně navázanou komunikací je uvedena na obr. 5.11.



Obr. 5.11 – Ukázka mobilní aplikace

Dominantním prvkem aplikace je ovladač, který umožňuje plynulý posuvný a otáčivý pohyb robota v prostoru. Z pracovní oblasti ovladače je periodicky snímána aktuální pozice pohyblivé části ovladače a následně na úrovni řídicího systému vypočítána požadovaná rychlost jízdy a zatáčení. Data se souřadnicemi X a Y jsou do řídicího systému odesílána s periodou 5 ms. Dále jsou do řídicího systému ke zpracování odesílány dvě binární hodnoty, které indikují požadavek na otáčení robota na místě. Seznam a popis odesílaných dat v dekadickém tvaru do řídicího systému je uveden v tab. 5.5.

Tab. 5.5 – Popis komunikovaných dat po rozhraní Bluetooth

Pořadí bajtu	1	2	3	4
Obsah bajtu	255	0 až 250	0 až 250	0 až 2
Význam	Indikace začátku zprávy	Souřadnice X ovladače	Souřadnice Y ovladače	1 = Otočení vlevo 2 = Otočení vpravo

## 5.6 OVLÁDÁNÍ DOTYKOVÝM DISPLEJEM

Dotykový displej tvoří hlavní rozhraní mezi uživatelem a řídicím systémem ovládající robota. Komunikaci zajišťuje sériové rozhraní UART, které bylo upraveno na rychlost 115200 bps s jedním stop bitem a nulovou paritou. Konfigurace displeje byla provedena ve volně dostupném editoru zobrazeném na obr. 4.9. V editoru se odehrává veškerá tvorba projektu od nastavení rychlosti komunikace přes tvorbu jednotlivých obrazovek včetně rozmístění komponent až po definování vlastností jednotlivých objektů. Projekt následně prošel kompilací a byl vygenerován obraz projektu na SD kartu, pomocí které byl projekt nahrán do displeje.

Grafické rozhraní je členěno na jednotlivé strany, mezi kterými lze přepínat. Každá strana má své jedinečné označení, podle kterého řídicí systém rozpozná, na které straně se displej zrovna nachází. Strany jsou dále tvořeny jednotlivými objekty, kde každý objekt má v rámci dané strany své unikátní označení, kterým je komunikován. Vlastnosti komponent lze upravovat v editoru nebo ovládat z řídicího systému.

### 5.6.1 Komunikační protokol

Komunikace mezi displejem a řídicím systémem byla implementována jako obousměrná a je založená na instrukční sadě uvedené v technické dokumentaci výrobce. Data z displeje jsou zasílána na základě událostí a jsou rozpoznávaná pomocí prvního bajtu v hexadecimálním tvaru. Seznam vybraných rozpoznávaných kódů uvádí tab. 5.6.

Tab. 5.6 – Rozpoznávané kódy přijaté z dotykového displeje (Itead.cc, 2016)

Přijatý bajt v hexadecimálním tvaru	Význam
65	Událost stisku komponenty
66	Událost na změnu stránky
86	Přechod do režimu spánku
87	Probuzení displeje z režimu spánku

Za prvním identifikačním bajtem se dále vyskytují bajty informací v hexadecimálním tvaru, které poskytují bližší informace k dané události a také o konci zprávy. Vzor zprávy zasláné displejem na situaci změny stránky a následného stisku tlačítka uvádí tab. 5.7.

Tab. 5.7 – Příklad přijaté sekvence dat z dotykového displeje

Číslo bajtu	Obsah bajtu v hexadecimálním tvaru	Význam
1	66	Událost změny stránky
2	03	Aktuální strana je 3
3	FF	Zakončovací sekvence
4	FF	
5	FF	
6	65	Událost stisku komponenty
7	03	Strana události je 3
8	1A	Číslo stisknuté komponenty je 26
9	01	Událost stisku
10	FF	Zakončovací sekvence
11	FF	
12	FF	

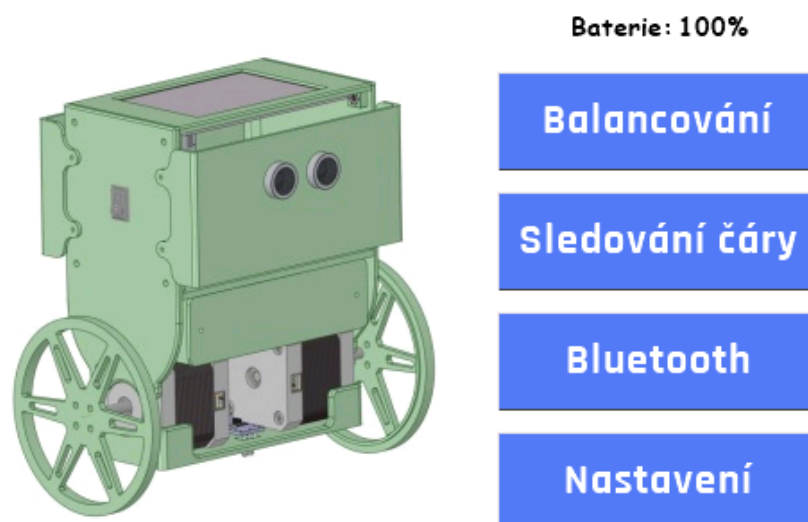
Pro zasílání zpráv a zobrazování aktuálních hodnot na dotykovém displeji bylo na straně řídicího systému vytvořeno několik funkcí, kterými je možné přistupovat k jednotlivým vlastnostem zvolených objektů. Funkce využívají znalostí o aktuální stránce a jedinečném číslu objektu, na základě kterých je sestavena textová zpráva a odeslána na sériovou linku.

Tab. 5.8 – Funkce pro komunikaci s displejem

Funkce	Formát zprávy	Význam
send_text	<name> + <.txt=> + <text>	Poslání textové informace
send_value	<name> + <.val=> + <value>	Poslání číselné hodnoty
visible	<vis > + <name> + <, > + <value>	Skrytí / zobrazení objektu
send_command	<message> + FF + FF + FF	Odeslání zaobalené zprávy

## 5.6.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je tvořeno celkem z pěti stran, z nichž první strana zobrazená na obr. 5.12 je věnována hlavní nabídce. Zbylé čtyři strany jsou určeny k ovládání a nastavování robota.



Obr. 5.12 – Pohled na hlavní nabídku dotykového displeje

Hlavní úlohou robota je balancování, kterému je věnována samostatná obrazovka, ze které je možné sledovat vybrané měřené hodnoty, ovládat robota a provádět kalibraci.

Strana pro sledování čáry je věnována nastavení rychlosti a dvoustavovému regulátoru, který je pro sledování použit. Je zde také možnost sledování důležitých měřených hodnot.

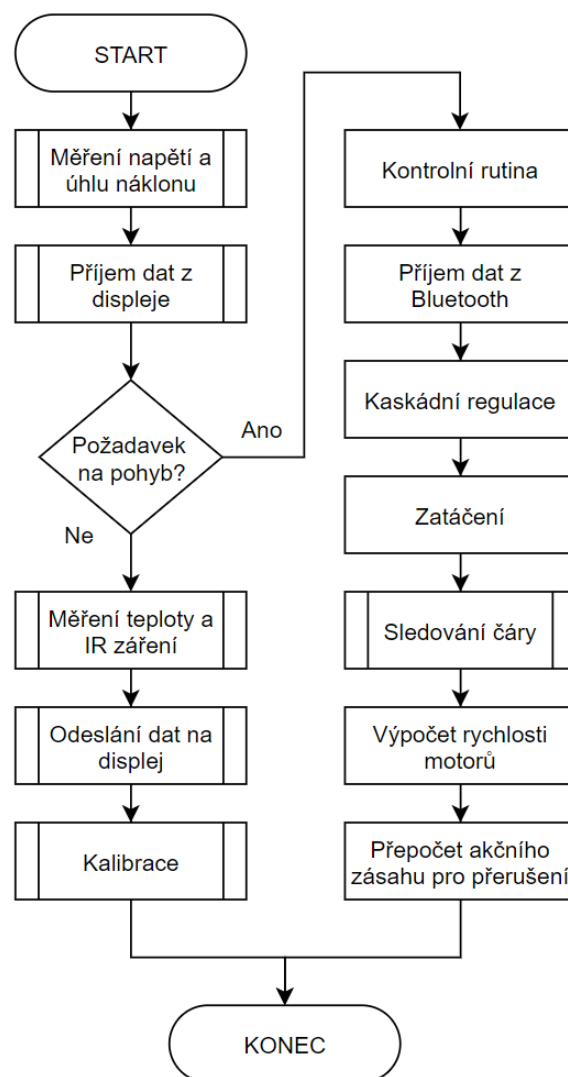
Pro ovládání robota z mobilního telefonu pomocí rozhraní Bluetooth byla vytvořena strana, kde jsou veškeré důležité informace pro spojení a párování se s robotem. Je zde vložen QR kód s odkazem na stažení vytvořené mobilní aplikace, název zařízení, adresa modulu a heslo pro párování s dalšími Bluetooth zařízeními. Na straně nastavení je k dispozici nastavení parametrů regulátoru vnitřní a vnější regulační smyčky, které určují klíčové vlastnosti při stabilizaci a pohybu robota. Ukázka a podrobný popis jednotlivých stran je uveden v uživatelském manuálu, který je součástí přílohy této diplomové práce.

## 5.7 TVORBA PROGRAMU PRO ŘÍDICÍ SYSTÉM

Pro tvorbu řídicího programu mikropočítače byl použit volně dostupný program Arduino Software (IDE). Programování probíhá v jazyce C/C++ s použitím knihovny Wiring.

Řídicí program je rozdělen do dvou částí. První část programu, označovaná jako „setup“, se provede pouze jednou po startu nebo restartu řídicího systému a probíhá zde definice vstupů a výstupů, deklarace a inicializace globálních proměnných, nastavení komunikačních rozhraní, inicializace a nastavení čítače, povolení přerušení a čtení z dat EEPROM. Po vykonání první části přejde mikroprocesor k periodickému vykonávání části druhé označované jako „loop“.

Základem periodicky se opakující části navrženého programu jsou dva režimy, mezi kterými rozhoduje uživatel svojí volbou na dotykovém displeji. Vývojový diagram periodicky se opakující smyčky „loop“ je uveden na obr. 5.13.



Obr. 5.13 – Vývojový diagram periodicky se opakujícího programu

První a zároveň výchozí režim po zapnutí je režim určený k nastavování a konfiguraci. Řadiče krokových motorů jsou v tomto režimu uvedeny do režimu spánku a motory jsou v beznapětovém stavu. Zároveň probíhá měření napětí, úhlu náklonu, teploty a analogové hodnoty z IR snímače. Řídicí systém tyto naměřené hodnoty odesílá do dotykového displeje, kde jsou v závislosti na zvolené obrazovce zobrazovány. Dále je možné v tomto režimu z obrazovky displeje „Balancování“ provádět kalibraci gyroskopu a akcelerometru. Robota je pro kalibraci nutné umístit do statické pozice a stisknout tlačítko kalibrace. Systém následně 200× vyčte data ze senzoru, vytvoří z nich aritmetický průměr a uloží je do EEPROM. Tyto kompenzační hodnoty jsou dále používány při každém výpočtu úhlu náklonu a určují tak bod stability, který je stěžejní pro výpočet kaskádního regulátoru. Poslední funkcionalita se nachází na obrazovce „Nastavení“ a umožňuje dvojicí tlačítek jednotlivě editovat vybrané parametry kaskádního regulátoru. Parametry jsou ukládány do EEPROM ihned po opuštění obrazovky.

Druhý režim je určen k pohybu robota, který je možný třemi způsoby. Základním pohybem je stabilizace a udržování robota ve vzpřímené poloze. Stabilizaci zajišťuje kaskádní regulátor, kterému je věnována samostatná kapitola. Další pohyby robota, jako je dálkové ovládání nebo sledování čáry, jsou z pohledu regulace realizovány pomocí žádaných a poruchových veličin a budou popsány dále v textu.

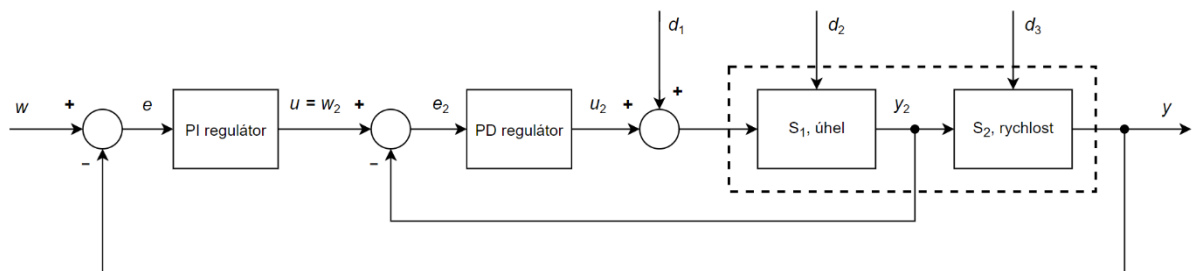
Prvním bodem při provádění algoritmu pro režim pohybu je provedení kontrolní funkce. Tato část programu provádí kontrolu podmínek nutných k zahájení pohybu. První podmínkou je kontrola příznaku nízkého napětí baterie, aby se zamezilo vybití baterie pod dovolenou hranici. Druhou podmínkou nutnou pro zahájení pohybu je postavení robota do výchozí polohy. Výchozí poloha je poloha, ve které byl robot naposledy zkalibrován. Pohyb může začít pouze pokud se robot nachází v rozmezí  $\pm 0,5^\circ$  od této polohy. Další nutnou podmínkou je pohyb robota pouze ve vymezené pracovní oblasti. Ta je definována v rozsahu  $\pm 30^\circ$  náklonu od výchozí polohy. Pokud dojde k vychýlení robota mimo meze definovaného rozsahu, je to identifikováno jako pád, motory přejdou do beznapětového stavu a na displeji se zobrazí výzva k postavení robota do výchozí polohy. Poslední podmínkou je požadavek od uživatele. Požadavek od uživatele na zahájení nebo ukončení pohybu je sledován při každém průběhu smyčky v samostatné funkci pro příjem dat od dotykového displeje. Princip detekce požadavku je uveden v kapitole 5.6.1.

Příjem dat z Bluetooth modulu je prováděn pouze za předpokladu, že je na obrazovce „Bluetooth“ uživatelem povolen. To je z důvodu nežádoucího ovládání z cizího zařízení. V případě povolení komunikace dojde nejdříve ke smazání dosavadních dat uložených ve vyrovnávací paměti sériového rozhraní. Dále se v přijímací funkci čeká na přijetí bajtu

s dekadickým obsahem 255, který značí začátek zprávy. V dalších krocích dojde k naplnění pole přijatými hodnotami a jejich zpracování pro další použití. Seznam a pořadí přijímaných hodnot je uveden v tab. 5.5.

### 5.7.1 Režim balancování a dálkového ovládání

Pro stabilizování robota s možností plynulé regulace rychlosti byl navržen kaskádní regulátor obsahující dvě zpětnovazební smyčky. Vnitřní regulační smyčka zajišťuje regulaci úhlu náklonu. Vzhledem k integračnímu charakteru soustavy je vnitřní smyčka tvořena PD regulátorem a zpětná vazba o úhlu náklonu je zajištěna kombinací měřených dat z gyroskopu a akcelerometru. Vnější regulační smyčka tvořena PS regulátorem řídí rychlost pohybu robota. Zpětná vazba o rychlosti otáčení motorů je vzhledem k vlastnostem krokových motorů zavedena formou matematického výpočtu z frekvence pulzů pro řadiče krokových motorů. Postup výpočtu je vysvětlen v kapitole 5.7.3. Vnitřní smyčka je vzhledem k vnější smyčce několikanásobně rychlejší. Blokové schéma navržené kaskádní regulace je uvedeno na obr. 5.14.



Obr. 5.14 – Blokové schéma kaskádní regulace

Žádanou hodnotou vnější smyčky je možné ovládat rychlost dopředného pohybu v režimech dálkového ovládání nebo sledování čáry. PS regulátor vnější smyčky generuje akční zásah, který je zároveň žádanou hodnotou vnitřní regulační smyčky. Vnitřní regulační smyčka tak reaguje na podnět žádané hodnoty uživatele úhlem náklonu robota. Požadovaný úhel náklonu je realizován akčním zásahem vnitřního PD regulátoru v podobě změny frekvence pulzů pro řadiče krokových motorů. Rotační pohyb robota je realizován jako porucha vstupující do vnitřní regulační smyčky. Akční zásah vypočtený vnitřním PD regulátorem je rozdělen pro každý motor zvlášť. Vhodným zavedením poruchové veličiny do akčních zásahů pro jednotlivé motory dojde k otáčivému pohybu robota. Hodnota poruchové veličiny je při dálkovém ovládání určována uživatelem z mobilní aplikace. V případě sledování čáry pak hodnotu



poruchové veličiny určuje dvoustavový regulátor. Dále na soustavu působí poruchy náhodné v podobě různých nerovností podložky nebo nárazů, které jsou znázorněné na obr. 5.14 jako poruchy úhlu náklonu nebo rychlosti.

K tvorbě jednotlivých regulátorů v programovém prostředí Arduino Software (IDE) byl použit předpis diskrétního PSD regulátoru v přírůstkovém tvaru, který je obecně definován jako

$$u(kT) = u[(k-1)T] + r_0 \left\{ e(kT) - e[(k-1)T] \frac{T}{T_I} e(kT) \right\} + r_0 \left\{ \frac{T_D}{T} [e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T]] \right\}, \quad (5.2)$$

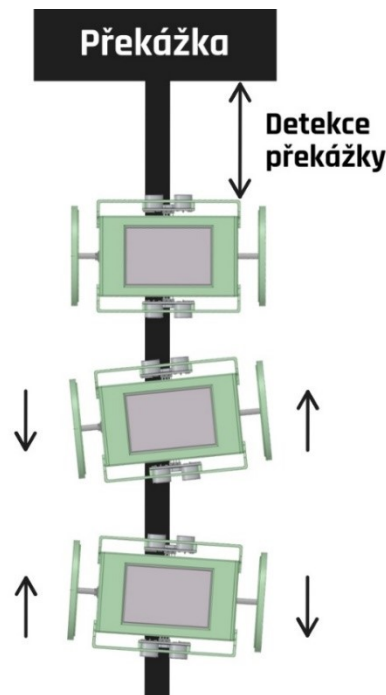
kde  $k$  – poměrný diskrétní čas,  
 $T$  – vzorkovací perioda, s,  
 $kT$  – diskrétní čas,  
 $u$  – diskrétní akční veličina,  
 $r_0$  – zesílení regulátoru,  
 $e$  – regulační odchylka,  
 $T_I$  – integrační časová konstanta, s,  
 $T_D$  – derivační časová konstanta, s.

Výhodou realizace regulátoru pomocí přírůstkového tvaru je minimální paměťová náročnost. V paměti je uchovávan pouze minulý akční zásah a regulační odchylky z předchozích dvou iterací (Balátě, 2003).

### 5.7.2 Autonomní režim

Ovládáním žádané hodnoty vnějšího regulátoru a působením poruchové veličiny na vnitřní regulační obvod byl vytvořen autonomní režim, ve kterém robot sleduje čáru a reaguje na překážky v cestě. Základem autonomního režimu je stabilizace robota pomocí kaskádního regulátoru. Rychlost dopředného pohybu robota při sledování čáry je na volbě uživatele a do kaskádního regulačního obvodu vstupuje jako žádaná hodnota vnějšího regulačního obvodu. Zatačení je implementováno jako porucha působící na vnitřní regulační obvod a je řízena uzavřeným regulačním obvodem s dvoustavovým regulátorem. Zpětná vazba je tvořena infračerveným senzorem, který snímá množství odraženého infračerveného záření od podložky. Množství odraženého infračerveného záření je do řídicího systému přivedeno v podobě

bezrozměrové analogové hodnoty. Parametry dvoustavového regulátoru lze uživatelsky nastavovat na dotykovém displeji.



Obr. 5.15 – Princip pohybu robota při sledování čáry

Princip pohybu robota v autonomním režimu při sledování čáry uvádí obr. 5.15. Robot při svém pohybu ve skutečnosti sleduje okraj čáry, respektive přechod mezi černou čarou a podložkou. Dvoustavový regulátor na základě nastavené žádané hodnoty včetně nastavitelného pásma necitlivosti rozhoduje o pohybu robota do stran. Pohyb směrem doprava je vytvořen zvýšením otáček levého a zároveň snížením otáček pravého motoru. Pohyb opačným směrem je vytvořen inverzní logikou. O udržování dopředné rychlosti se stará vnější smyčka kaskádního regulátoru. V případě překážky na čáře byl implementován algoritmus, pomocí kterého dokáže robot před překážkou spolehlivě zastavit a informovat o překážce uživatele. Systém proti kolizi je tvořen dvěma úrovněmi. První úroveň pro zabránění nárazu je eliminace žádané hodnoty dopředné rychlosti. Tímto způsobem je dosaženo při nízkých rychlostech bezpečného zastavení ve vzdálenosti 25 cm až 40 cm před překážkou. Druhou úroveň pro zabránění nárazu do překážky je zahájení protipohybu. V případě, že je překážka blíže než 25 cm, dojde k postupné integraci žádané hodnoty dopředné rychlosti v záporných číslech a robot přejde do protipohybu. Jakmile se robot dostane do vzdálenosti nad 25 cm od překážky, je protipohyb zastaven a robot čeká na odstranění překážky. Pohyb robota je znovu zahájen, pokud ve vzdálenosti do 40 cm není detekována žádná překážka.

### 5.7.3 Realizace akčního zásahu regulátoru

Otáčky krokových motorů jsou přímo úměrné frekvenci pulzů přichozích na řadiče krokových motorů. S každým pulzem dojde s použitým mikro-krokováním 1/4 k otočení motoru o úhel  $0,45^\circ$ . Ke generování přesné frekvence pulzů byla vytvořena přerušovací funkce, která je pomocí 16bitového čítače volána každých  $50 \mu\text{s}$ . Konfigurace čítače byla provedena pomocí registrů TIMSK2, TCCR2A, TCCR2B a OCR2A. Zápisem logické 1 do bitu OCIE2A v registru TIMSK2 bylo povoleno vyvolání přerušení v případě shody obsahu čítače a porovnávacího registru OCR2A. Pro vymazání obsahu čítače po dosažení shody s registrem OCR2A byla do bitu WGM21 v registru TCCR2A zapsána logická 1. Rychlost čítání byla zápisem logické 1 do bitu CS21 v registru TCCR2B nastavena na 2 MHz. Pro výpočet hodnoty porovnávacího registru OCR2A, která odpovídá vzhledem k rychlosti čítání časovému úseku  $50 \mu\text{s}$ , byl použit výpočet

$$OCR2A = \frac{t_i}{t_c} - 1 = \frac{50}{0,5} - 1 = 99, \quad (5.3)$$

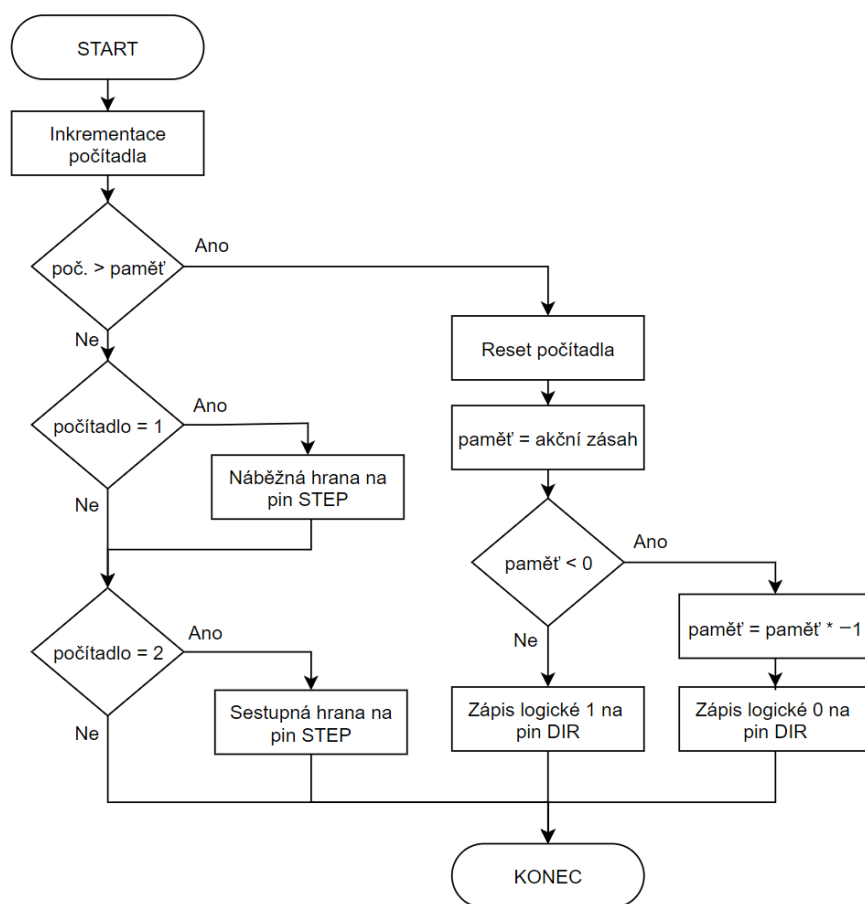
kde  $OCR2A$  – porovnávací registr čítače,

$t_i$  – perioda přerušení,  $\mu\text{s}$ ,

$t_c$  – perioda čítání,  $\mu\text{s}$  (Microchip Technology Inc., 2020).

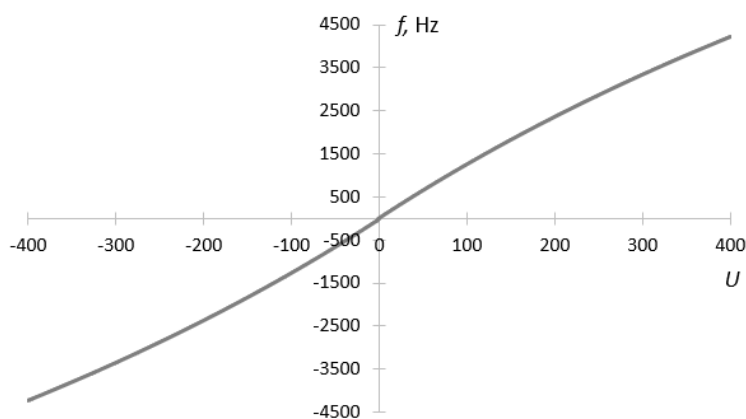
Algoritmus přerušovací funkce je uveden na obr. 5.16. Vývojový diagram popisuje obecný tok programu. Ve skutečnosti přerušovací funkce obsahuje tento program dvakrát za sebou z důvodu rozdílné velikosti akčního zásahu pro levý a pravý motor.

Prvním krokem algoritmu je inkrementace proměnné počítadla. Poté se porovnává, zda proměnná počítadla dosahuje větší hodnoty než proměnná, do které je zapisován přepočtený akční zásah regulátoru. V případě, že došlo k přetečení počítadla nad hodnotu přepočteného akčního zásahu, je počítadlo vynulováno a do proměnné „paměť“ se zapíše nový přepočtený akční zásah. Zároveň proběhne na základě znaménka proměnné „paměť“ k určení směru otáčení motoru. V případě prvního volání přerušovací funkce od zápisu do proměnné „paměť“ dojde k zaslání logické 1 na pin STEP, která dává povel na otočení motoru o jeden krok. V druhém volání od zápisu do proměnné „paměť“ dojde k zapsání logické 0 na pin STEP a pin je připraven pro další iterace. Délka generovaného pulzu tedy odpovídá délce periody volání přerušovací funkce.



Obr. 5.16 – Vývojový diagram přerušovací funkce

Výsledný akční zásah, vypočtený vnitřním regulátorem, je omezen na hodnotu  $\pm 400$ . Z doby volání přerušovací smyčky a hodnoty akčního zásahu, respektive hodnoty proměnné „paměť“, byla zjištěna doba mezi generovanými pulzy. Závislost doby mezi pulzy a velikostí akčního zásahu je lineární. Nicméně z důvodu následné nepřímé úměry mezi časem a frekvencí je závislost frekvence pulzů na akčním zásahu nelineárního průběhu. To by vedlo k nutnosti používat několik sad parametrů regulátoru pro dané pracovní oblasti. Z toho důvodu byl zaveden přepočít, který zajistí lineární závislost frekvence na akčním zásahu z regulátoru. Přepočít vychází z předpisu lineární funkce a zavedení nepřímé úměry mezi akčním zásahem a dobou mezi pulzy. V programovém prostředí Excel byl pro celý pracovní rozsah regulátoru vytvořen kalkulátor, pomocí kterého lze čtveřicí nastavitelných parametrů modelovat zesílení soustavy. Kalkulátor je součástí přílohy této práce. Výsledná závislost akčního zásahu regulátoru na frekvenci pro řadiče krokových motorů je uvedena na obr. 5.17. Pracovní rozsah generované frekvence byl zvolen v rozsahu  $26 \text{ Hz} \div 4,2 \text{ kHz}$ , který při krokování  $0,45^\circ$  odpovídá pracovním rychlostem robota  $0,03 \text{ km/h} \div 5,36 \text{ km/h}$ .



Obr. 5.17 – Závislost generované frekvence na akčním zásahu vnitřního regulátoru

Ze zavedeného přepočtu vychází zároveň výpočet zpětné vazby pro vnější regulační smyčku. Rychlost robota stanovená výpočtem vztaženým na frekvenci a průměr kol robota velmi přesně odpovídá skutečné rychlosti pohybu. Pracovní rozsah motorů byl experimentálně zvolen tak, aby nedocházelo ke ztrátám v motoru, které by mohly ovlivňovat správnost výpočtu.

## 5.8 OVĚŘENÍ FUNKCE

Ověření funkce navrženého řešení bylo prováděno nejdříve ve zkušebním stojanu, který byl vyroben pro potřeby testování. Stojan s robotem je zobrazen na obr. 5.18.

Při prvotním testování byly simulovány různé situace, ke kterým může při běžném provozu robota dojít. Zároveň byly sledovány reakce obou regulátorů, respektive krokových motorů.



Obr. 5.18 – Robot v testovacím stojanu

Tím došlo k eliminaci pádů způsobených prvotními chybami v řídicím programu, které by mohly způsobit poškození plastové konstrukce.

### 5.8.1 Nastavení parametrů uzavřené regulační smyčky

Při prvních pokusech o balancování robota byl implementován samostatný PD regulátor, který byl nastavený metodou pokus-omyl. Tato metoda byla zvolena z důvodu minimálních znalostí o vlastnostech této nestabilní soustavy. Nastavení regulátoru probíhalo postupným zvyšováním zesílení regulátoru až do chvíle, kdy robot nezačal být stabilní v oblasti nulové žádané hodnoty. Zvyšování zesílení probíhalo při vyřazené integrační a derivační složce. Po nalezení hodnoty zesílení, při které byl robot stabilizován, došlo ke snížení zesílení o přibližně 20 % nalezené hodnoty a dále postupnému snižování integrační časové konstanty, která na zvýšení stability měla vzhledem k integračnímu charakteru soustavy negativní vliv. Kvalita regulace byla v tuto chvíli uspokojivá, kromě poruch, na které robot reagoval velmi pomalu a docházelo k pádům. Postupným zvyšováním derivační složky bylo dosaženo rychlejších reakcí na poruchy a celkovému zlepšení stabilizace robota. Dále došlo k zavedení mrtvého pásma o velikosti  $\pm 0,5\%$  z akčního zásahu, který je omezen na rozsah  $\pm 400$ . Zavedení mrtvého pásma se příznivě projevilo u malých akčních zásahů, při kterých docházelo k vibracím nesoucím se do celé konstrukce, čímž byl negativně ovlivňován měřící řetězec. Soustava byla nyní stabilizovaná z pohledu úhlu náklonu. Z pohledu rychlosti byl robot neřízený, což způsobovalo při zavedení poruch ustálení rychlosti v řádech až desítek vteřin.

Pro zavedení stabilizace robota z pohledu rychlosti byl použit kaskádní regulátor, jehož blokové schéma je znázorněno na obr. 5.14. Při implementaci kaskádní regulace byly zachovány získané parametry pro již nastavený PD regulátor úhlu náklonu. Při nastavení vnějšího regulátoru rychlosti byla opět použita metoda pokus-omyl. Před nastavením regulátoru vnější smyčky byla orientačně nastavena vzorkovací perioda vnější smyčky o řád vyšší než vzorkovací perioda vnitřní smyčky. Dále byl omezen akční zásah vnějšího regulátoru na rozsah  $\pm 4^\circ$ . Postup nastavení parametrů regulátoru probíhal stejně jako u vnitřní smyčky postupným zvyšováním zesílení regulátoru za vyřazené integrační a derivační složky. Po nalezení hodnoty zesílení, při které byl robot stabilní z pohledu rychlosti, byla za použití 75 % nalezeného zesílení postupně snižována integrační složka, dokud nebylo dosaženo nekmitavého průběhu měřené veličiny. Zavedení D složky v tomto případě nepřineslo žádné pozitivní vlastnosti, a proto byla trvale vyřazena. Robot byl v tuto chvíli z hlediska rychlosti stabilizován. Stabilizace rychlosti je výhodná zejména z pohledu nerovností podložky, které robot

automaticky kompenzuje takovým úhlem náklonu, který odpovídá žádané rychlosti. Další výhodou je také uživatelská možnost ovládat robota v jednotkách rychlosti. Hodnoty získaných parametrů regulátorů uvádí tab. 5.9.

Tab. 5.9 – Získané parametry kaskádního regulátoru

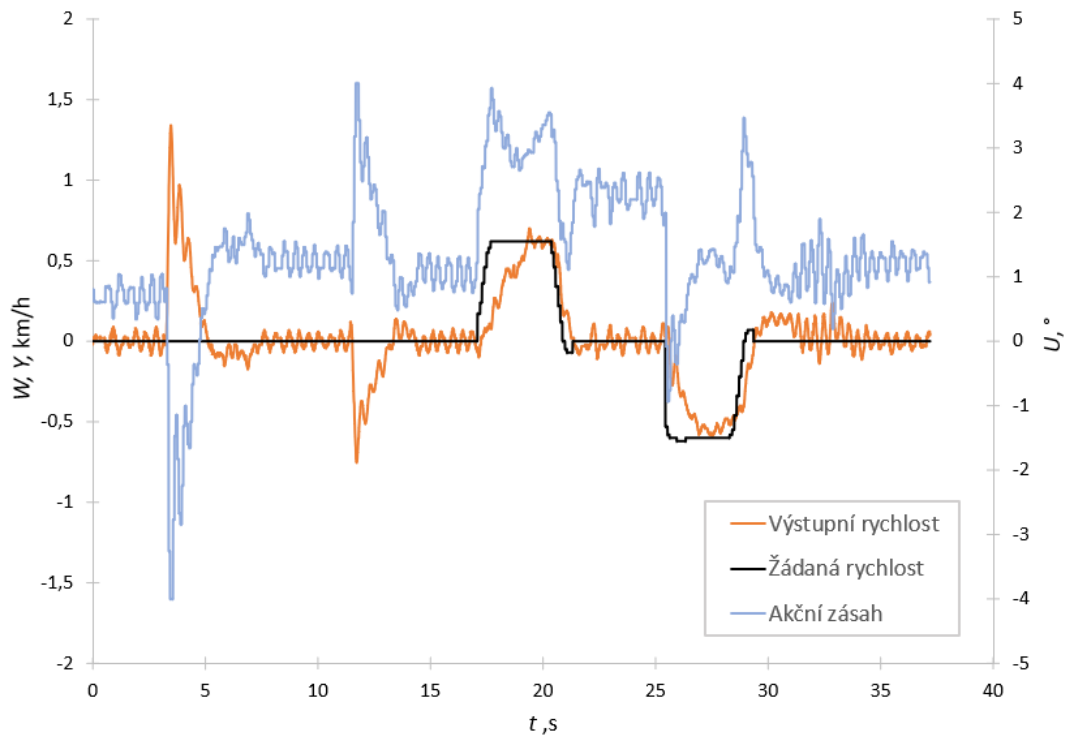
Regulátor	Parametr	Hodnota	Jednotka
Regulátor vnitřní smyčky	P	4,30	°
	S	0,06	s
	D	7,00	s
	T <sub>k</sub>	5000,00	μs
Regulátor vnější smyčky	P	6,50	km/h
	S	3,30	s
	D	0,00	s
	T <sub>k</sub>	60000,00	μs

## 5.8.2 Dosažené výsledky

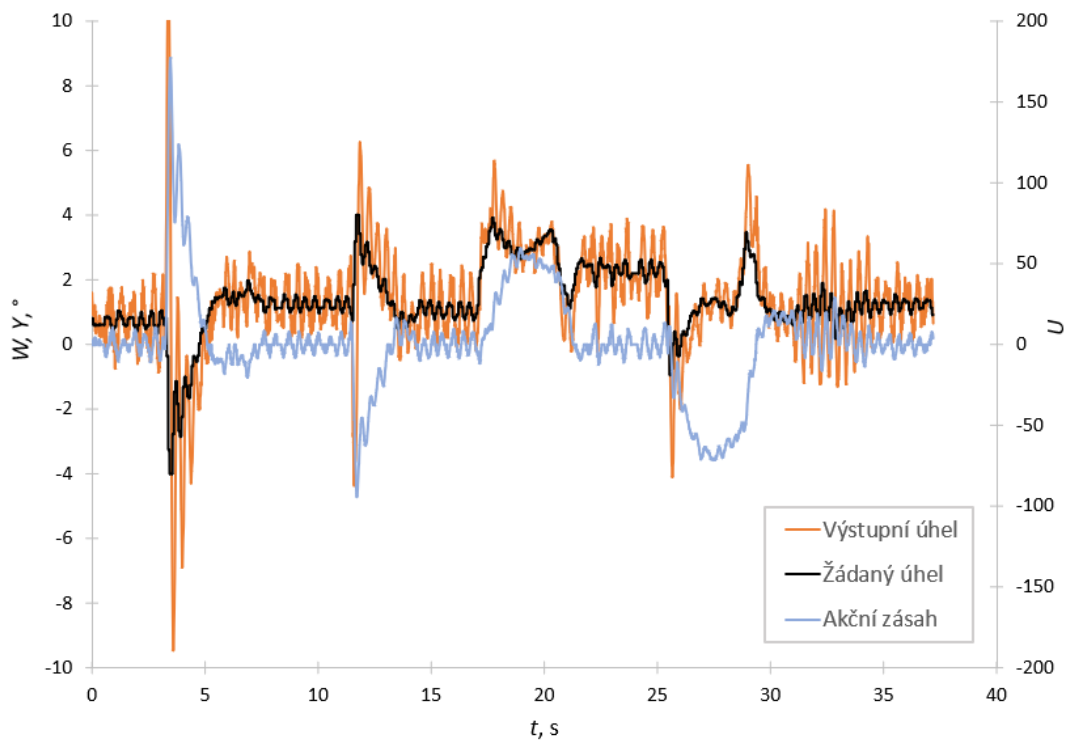
Pro testování navrženého kaskádního regulátoru byla vytvořena sekvence událostí, která prověří reakce robota na vzniklé poruchy a změny žádané hodnoty. Testování probíhalo na nerovné pokojové podlaze z linolea. Robot tak při testování musí kompenzovat nerovnosti pokojové podlahy.

Testovací sekvence byla zahájena stabilní pozicí robota s žádanou hodnotou rychlosti 0 km/h. V čase 3,5 s došlo k zavedení poruchové veličiny v podobě vychýlení ze zadní strany robota. K zavedení další poruchy došlo v čase 12 s, kdy byl robot postrčen z čelní strany. V čase 17 s následovala změna žádané hodnoty na rychlost 0,6 km/h po dobu 3 s. Poté byl robot stabilizován a v čase 25,5 s následovala změna žádané hodnoty na rychlost -0,6 km/h po dobu 3 s. Sekvence končí v čase 37 s stabilizací robota s žádanou hodnotou rychlosti 0 km/h. Regulační pochody kaskádního regulátoru z testovací sekvence jsou uvedeny na obr. 5.19 a obr. 5.20.

Ze zaznamenaných regulačních pochodů je patrná dostatečně rychlá odezva robota na poruchy vzniklé nerovnostmi podložky nebo umělým vychýlením. Robot zároveň dostatečně rychle reaguje na změnu žádané hodnoty od uživatele z mobilního telefonu. V průběhu testovací sekvence bylo dosaženo průměrné regulační odchylky rychlosti 0,11 km/h a regulační odchylky úhlu náklonu 0,77°.



Obr. 5.19 – Regulační pochod vnějšího regulátoru



Obr. 5.20 – Regulační pochod vnitřního regulátoru



## 6 ZÁVĚR

Výsledkem této práce je vyrobený model balancujícího robota založený na stejném principu jako dvoukolové dopravní prostředky typu segway. Robot plní úlohy stabilizace polohy, dálkového řízení a autonomního režimu. Tím bylo úspěšně splněno zadání této diplomové práce.

K realizaci robota byl na základě rešerše vytvořen 3D návrh robota, který byl později vytištěn na 3D tiskárně. Z důvodu potřeby komunikace se vstupně-výstupními moduly byla navržena a vyrobena deska plošných spojů ve formě odnímatelné nadstavby pro řídicí systém Arduino. Pohon robota zajišťuje dvojice krokových motorů, jejichž princip je podrobně popsán v kapitole 3.

V průběhu tisku a sestavování jednotlivých součástí robota vzniknul požadavek na úpravu návrhu uchycení kol a tvorbu stojanu. Původní plánované uchycení ve formě dutého čepu s vnitřní drážkou se projevilo jako nedostatečné z důvodu prokluzování hřídele motoru. Přepracované uchycení využívá příruby umístěné na ose krokového motoru, ke které jsou kola připevněna čtveřicí šroubů. Testovací stojan byl vytvořen z hliníkových profilů spojených pomocí šroubů. Stojan složí pro potřeby prvotního testování navržených algoritmů a pro přesnou kalibraci robota.

K ovládání robota bylo vytvořeno uživatelské rozhraní na dotykovém displeji, který je integrován v navrženém těle robota. Popis ovládání dotykového displeje je uveden v uživatelském manuálu, který je součástí této práce ve formě přílohy. K dálkovému ovládání robota slouží vytvořená mobilní aplikace pro zařízení s operačním systémem Android.

Z provedené testovací sekvence je zřejmé, že robot byl pomocí navrženého regulačního algoritmu stabilizován a dostatečně rychle reaguje na změnu žádané rychlosti nebo vzniklé poruchy. Stabilizace robota je zajištěna navrženou kaskádou regulátorů, pomocí které je možné řízení robota v jednotkách rychlosti. K nastavení parametrů regulátorů byla z důvodu minimálních znalostí o soustavě použita metoda pokus – omyl.

Navržený robot je z pohledu měření a regulace velmi zajímavou soustavou pro návrh a implementaci různých typů regulátorů. Další vývoj robota by mohl být směřován cestou umělé inteligence, pomocí které by dokázal mapovat neznámý 2D prostor. Dále by bylo vhodné rozšíření mobilní aplikace, pomocí které by bylo možné zobrazovat regulační pochody apod.

## POUŽITÁ LITERATURA

- 19605-UT ULTRASONIC RANGING MODULE*. [on-line]. Mpja.com. West Palm Beach. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.mpja.com/download/HC-SR04.pdf>.
- 17HS Stepper Motor -42mm(1.8 degree)*. 2006. [on-line]. MotionKing Motor Industry Co., Ltd. Changzhou City. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: [http://www.motionking.com/show\\_products\\_detail.asp?ID=8&fenlei\\_id=2&products=17HS%20Stepper%20Motor%20-42mm\(1.8%20degree\)](http://www.motionking.com/show_products_detail.asp?ID=8&fenlei_id=2&products=17HS%20Stepper%20Motor%20-42mm(1.8%20degree)).
- About Us*. [on-line]. M5Stack. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://shop.m5stack.com/pages/about-us>.
- Arduino Mega 2560 Rev3*. [on-line]. Arduino. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://store.arduino.cc/mega-2560-r3>.
- ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V*. 2020. [on-line]. Microchip Technology Inc. [cit. 2021-04-28]. Dostupné na: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>.
- B-robot EVO 2: Assembly guide*. [on-line]. jjRobots. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.jjrobots.com/b-robot-evo-2-assembly-guide/>.
- BAKER, B. *Apply Sensor Fusion to Accelerometers and Gyroscopes*. 2018. [on-line]. Digi-Key Electronics. Thief River Falls. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.digikey.com/en/articles/apply-sensor-fusion-to-accelerometers-and-gyroscopes>.
- BALA ESP32 Development Mini Self-balancing Car*. [on-line]. M5Stack. Shenzhen. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://m5stack.hackster.io/products/bala-esp32-development-mini-self-balancing-car>.
- BALÁTEĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha: BEN – technická literatura. 663 s. ISBN 80-7300-020-2.
- BASIC SERIES INTRODUCTION*. [on-line]. Nextion. Shenzhen. [cit. 2021-04-28]. Dostupné na: <https://nextion.tech/basic-series-introduction/>.
- Bezdrátové moduly - Bluetooth HC-05*. 2020. [on-line]. Sakul.cz. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.sakul.cz/bluetooth-hc-05/n/>.
- CROWDER, R. 2019. *Electric Drives and Electromechanical Systems (Second Edition)*. Oxford: Butterworth-Heinemann. 322 s. ISBN 9780081028841.
- DADAFSHAR, M. *ACCELEROMETER AND GYROSCOPES SENSORS: OPERATION, SENSING, AND APPLICATIONS*. 2015. [on-line]. Maxim Integrated Products, Inc. Dallas. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/5/5830.html>.
- DRV8825 Stepper Motor Controller IC*. 2014. [on-line]. Texas Instruments. Dallas. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf?ts=1619444394318>.
- Gyroskop + akcelerometr*. 2016. [on-line]. ECLIPSERA s.r.o. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/134/1500635992.pdf>.

- HARRIS, T. *How Segways Work*. 2001. [on-line]. HowStuffWorks. Venice. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/ginger.htm>.
- HUGHES, A.; DRURY, B. 2019. *Electric Motors and Drives (Fifth Edition)*. Oxford: Newnes. 511 s. ISBN 9780081026151.
- IR SENSOR. 2015. [on-line]. ElectronicsHub.org. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.electronicshub.org/ir-sensor/>.
- JEREMIC, F. *Derivation of Equations of Motion for Inverted Pendulum Problem*. [online]. 1-31, 2012. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <http://www.cas.mcmaster.ca/~qiao/courses/cs4xo3/presentations/InvPend.pdf>.
- KIM, Y. *Rechargeable Lithium Ion Battery Model : INR18650 M36T 12.50Wh*. 2017. [on-line]. LG Chem, Ltd. [cit. 2021-04-28]. Dostupné na: <https://www.nkon.nl/sk/k/m36.pdf>.
- Mini step-down měnič. 2020. [on-line]. ECLIPSERA s.r.o. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://dratek.cz/docs/produkty/1/1186/1524639436.pdf>.
- MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2. 2013. [on-line]. InvenSense Inc. Sunnyvale. [cit. 2021-04-28]. Dostupné na: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.
- Nextion editor. 2016. [on-line]. ITEAD Wiki. [cit. 2021-04-28]. Dostupné na: [https://www.itead.cc/wiki/Nextion\\_Editor\\_Quick\\_Start\\_Guide](https://www.itead.cc/wiki/Nextion_Editor_Quick_Start_Guide).
- NOVÁK, P. 2005. *Mobilní roboty*. Praha: BEN – technická literatura. 243 s. ISBN 80-7300-141-1.
- Ochrana li-ion baterie 3S 20A. *laskarduino.cz*. 2021. [online]. *laskarduino.cz*. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.laskarduino.cz/ochrana-li-ion-baterie-3s-20a/>.
- REESE, L. *The working principle, applications and limitations of ultrasonic sensors*. 2019. [on-line]. MICROCONTROLLERTIPS. [cit. 2021-04-28]. Dostupné na: <https://www.microcontrollertips.com/principle-applications-limitations-ultrasonic-sensors-faq/>.
- Reflective Optical Sensor with Transistor Output. 2009. [on-line]. Vishay Intertechnology, Inc. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.vishay.com/docs/83760/tcrt5000.pdf>.
- Segway - jak to funguje. [on-line]. Alza.cz. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://www.alza.cz/sport/segway-jak-to-funguje>.
- ŠKOPEK, P. *Techbox: Bluetooth sjednotilo bezdrátovou komunikaci*. 2013. [on-line]. 24net s.r.o. Praha. [cit. 2021-04-27]. Dostupné na: <https://mobilenet.cz/clanky/techbox-bluetooth-sjednotilo-bezdratovou-komunikaci-12085>.

## **PŘÍLOHY**

**A – CD**

**B – Uživatelský manuál**

**Příloha k diplomové práci**

Balancující robot

Bc. Pavel Prokop

**CD**

## **OBSAH**

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF.
- 2 Úplný zdrojový kód aplikace mikropočítače, aplikace pro mobilní telefon a dotykového displeje.
- 3 Výrobní dokumentace zařízení (schéma zapojení a návrh desky plošných spojů, 3D model).
- 4 Soubor s kalkulátorem a naměřenými a zpracovanými daty v prostředí Excel.
- 5 Video s ukázkou funkcí robota.

**Příloha k diplomové práci**

Balancující robot

Bc. Pavel Prokop

**UŽIVATELSKÝ MANUÁL**

**OVLÁDÁNÍ ROBOTY**

## OBSAH

	Seznam ilustrací .....	B – 3
	Seznam tabulek .....	B – 4
	ÚVOD .....	B – 5
1	UVEDENÍ DO PROVOZU .....	B – 6
1.1	BATERIE .....	B – 6
1.2	KALIBRACE .....	B – 7
1.3	NASTAVENÍ PARAMETRŮ REGULÁTORŮ .....	B – 8
1.4	MOBILNÍ APLIKACE .....	B – 9
2	FUNKČNÍ REŽIMY .....	B – 10
2.1	REŽIM BALANCOVÁNÍ .....	B – 10
2.2	REŽIM DÁLKOVÉHO OVLÁDÁNÍ .....	B – 11
2.3	AUTONOMNÍ REŽIM .....	B – 11
3	VLASTNOSTI A SPECIFIKACE .....	B – 13



## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Hlavní menu .....	B – 6
Obr. 1.2 – Výměna baterií .....	B – 7
Obr. 1.3 – Menu balancování a kalibrace robota .....	B – 8
Obr. 1.4 – Nastavení parametrů regulátorů.....	B – 8
Obr. 1.5 – Mobilní aplikace .....	B – 9
Obr. 2.1 – Detekce pádu robota .....	B – 10
Obr. 2.2 – Povolení Bluetooth komunikace.....	B – 11
Obr. 2.3 – Nastavení parametrů pro sledování čáry .....	B – 12
Obr. 2.4 – Detekce překážky .....	B – 12

## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 3.1 – Seznam vlastností a specifikací robota .....	B – 13
---	--------

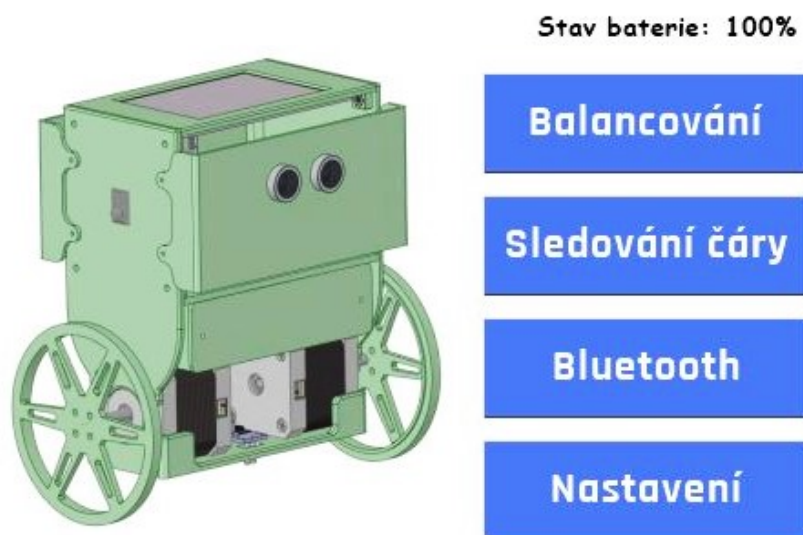
# ÚVOD

Tento uživatelský manuál je určen k seznámení uživatele s možnostmi a vlastnostmi, kterými robot disponuje. V první kapitole jsou popsány body, které jsou nutné k zahájení správné funkce robota. Jedná se o výměnu baterií, kalibraci robota do výchozí polohy, editaci parametrů regulátorů a nastavení mobilní aplikace pro dálkové ovládání. Druhá kapitola blíže popisuje jednotlivé jízdní režimy, které robot umožňuje. Obě zmíněné kapitoly jsou doplněny o skutečné obrázky z navrženého uživatelského prostředí dotykového displeje nebo mobilní aplikace. V poslední kapitole je uvedena tabulka shrnující důležité vlastnosti a technické parametry robota.

# 1 UVEDENÍ DO PROVOZU

Zapínání robota je pomocí kolébkového vypínače umístěném na pravém boku robota. Přepnutím vypínače do polohy „I“ dojde k přívodu napájecího napětí z baterie na veškeré obvody a robot se zapne ve výchozím stavu. Ve výchozím stavu jsou motory v beznapětovém stavu a pomocí dotykového displeje je možné provádět nastavování robota nebo volbu jízdního režimu. Ukázka obrazovky displeje po zapnutí je uvedena na obr. 1.1. Vypínání robota se provádí přepnutím vypínače do polohy „0“. Pro omezení vypínacího proudu vypínače není vhodné vypínání v režimu jízdy.

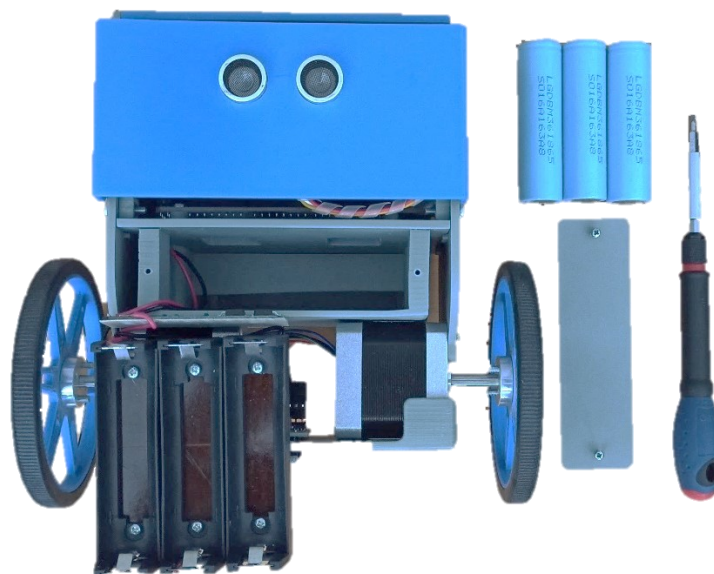
Na levém boku robota je vyveden USB konektor mikropočítače umožňující zápis regulacních pochodů nebo aktualizaci řídicího programu.



Obr. 1.1 – Hlavní menu

## 1.1 BATERIE

Robot k napájení využívá 3 sériově spojené baterie Li-Pol typu 18650 s celkovou kapacitou 3,6 Ah. Baterie jsou znovu dobíjitelné pomocí jakékoliv nabíječky vhodné pro tento typ baterií. Baterie jsou doplněny o ochranný obvod, který zajišťuje ochranu jednotlivých článků před zkratem, nadproudem a vybitím. V případě vybití jednoho článku pod úroveň 2,54 V již nebude možné robota zapnout. Stav baterií je také hlídán řídicím programem, který periodicky sleduje stav baterií a v případě nízkého stavu nedovolí přechod do jízdního režimu, při kterém dochází k největšímu odběru energie. Výměna baterií se provádí z čelní strany robota sejmutím krytu pomocí dvou šroubů a vysunutím bateriového boxu. Při výměně baterií je nutné respektovat polaritu označenou na patičkách. Ukázka z výměny baterií je uvedena na obr. 1.2.



Obr. 1.2 – Výměna baterií

## 1.2 KALIBRACE

Pro správné chování robota je důležité definovat výchozí polohu, kdy je robot z pohledu úhlu náklonu stabilní. To se provádí kalibrací v testovacím stojanu, který zaručí nehybnost robota po dobu kalibračního výpočtu. Při nesprávně provedené kalibraci může docházet k nekontrolovanému pohybu robota nebo pádům. Výchozí poloha je také nezbytnou podmínkou pro zahájení jakéhokoliv jízdního režimu. Režim jízdy je aktivován, pouze pokud se robot nachází v intervalu  $\pm 0,5^\circ$  od výchozí polohy. Od výchozí polohy je také vztažena detekce pádu, která je aktivována, pokud je úhel náklonu mimo rozsah  $\pm 30^\circ$  od výchozí polohy.

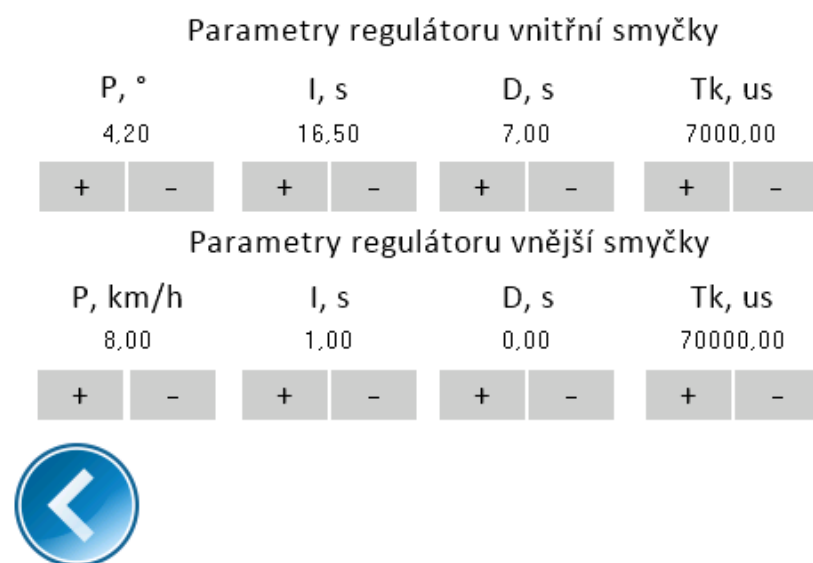
Kalibrace se provádí na obrazovce „Balancování“ stisknutím modrého tlačítka „Kalibrace“. Ve chvíli stisku by měl být robot umístěn nehybně v testovacím stojanu. Kalibrace provede výpočet odchylek, které se budou používat při dalších výpočtech úhlu náklonu. Získané odchylky jsou na konci kalibračního procesu uloženy do EEPROM, a díky tomu není potřeba provádět kalibraci při každém zapnutí. Kalibraci je třeba opakovat v případě, že došlo k pádu či nárazu, při kterém mohlo dojít k pohybu senzoru úhlu náklonu. Ukázka obrazovky s tlačítkem kalibrace je uvedena na obr. 1.3.



Obr. 1.3 – Menu balancování a kalibrace robota

### 1.3 NASTAVENÍ PARAMETRŮ REGULÁTORŮ

Parametry regulátorů zásadně ovlivňují chování a reakce robota v jízdních režimech. Parametry lze uživatelsky editovat na obrazovce „Nastavení“ pomocí dvojice tlačítek pod každým z parametrů. Inkrementace a dekrementace pomocí tlačítek je možná o předem nastavený neměnitelný krok, který byl vzhledem k soustavě vyhodnocen jako dostačující. U každého z regulátorů je možné editovat parametr P, I, D a  $T_k$ . Ukázka obrazovky nastavení je uvedena na obr. 1.4. Parametry jsou po návratu do hlavního menu automaticky uloženy do paměti pro použití i po restartu.

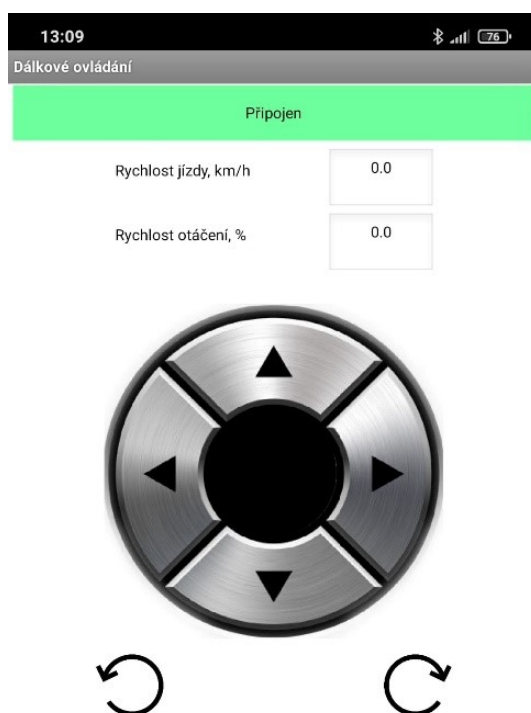


Obr. 1.4 – Nastavení parametrů regulátorů

## 1.4 MOBILNÍ APLIKACE

Pro dálkové ovládání robota byla vytvořena aplikace pro mobilní telefony s operačním systémem Android a podporou bezdrátového rozhraní Bluetooth v2.0 a vyšší. Aplikace je dostupná z odkazu umístěném ve formě QR kódu na dotykovém displeji v menu „Bluetooth“. Pro instalaci aplikace je nutné v operačním systému Android jednorázově udělit povolení k instalaci aplikací z neověřených zdrojů. V menu dotykového displeje „Bluetooth“ je mimo jiné uveden název a adresa, pod kterým zařízení vystupuje a dále také bezpečnostní klíč pro spárování se. Spárování je nutné provést v nastavení telefonu před samotným spuštěním aplikace. Po spuštění mobilní aplikace je nutné provést výběr zařízení, se kterým má aplikace komunikovat. To se provádí tlačítkem „Vyhledat zařízení“, kde v menu nabídky vybereme zařízení ROBOT. V případě úspěšné navázání komunikace se tlačítko v horní části podbarví zeleně a zobrazí nápis „Připojen“. V opačném případě dojde k podbarvení červenou barvou a zobrazení nápisu „Odpojen“.

Ovládání robota probíhá tažením černého kruhového objektu po pracovní ploše ovladače, čímž lze zajistit plynulý pohyb ve dvou osách. V prostoru nad ovladačem jsou zobrazovány okamžité žádané hodnoty rychlosti jízdy a zatáčení. K otáčení robota při nulové žádané rychlosti je pod ovladačem umístěna dvojice tlačítek. Pohled na aplikaci nabízí obr. 1.5.



Obr. 1.5 – Mobilní aplikace

## 2 FUNKČNÍ REŽIMY

Robot umožňuje pohyb v několika jízdních režimech. Základem pohybu a ovládání robota, bez ohledu na zvolený režim, je vždy kaskádní regulátor. Tento regulátor umožňuje řídit robota žádanou hodnotou v rychlostních jednotkách. To je výhodné zejména z uživatelského hlediska, kdy není nutné v případě různého sklonu podložky manuálně hledat úhel náklonu, který by odpovídal požadované rychlosti. Jednotlivé režimy a jejich specifika jsou blíže popsány v dalších kapitolách.

### 2.1 REŽIM BALANCOVÁNÍ

Jde o první a základní režim, ve kterém je robot řízen na nulovou hodnotu žádané rychlosti. Zahájení režimu se provádí z menu dotykového displeje „Balancování“ zobrazeném na obr. 1.3 pomocí tlačítek „Start“ a „Stop“. Zároveň je možné z této obrazovky provádět kalibraci, která je blíže popsána v kapitole 1.2.

K zahájení balancování dojde po stisku tlačítka „Start“ a umístění robota  $\pm 0,5^\circ$  od výchozí polohy. V případě pádu, respektive vychýlení robota mimo rozsah  $\pm 30^\circ$  od výchozí polohy dojde k zastavení regulace, motory přejdou do beznapětového stavu a na displeji se zobrazí informační proužek znázorněný na obr. 2.1. Balancování znovu začne ihned po postavení robota do polohy  $\pm 0,5^\circ$  od výchozí polohy. Zastavení režimu balancování se provádí tlačítkem „Stop“.



Obr. 2.1 – Detekce pádu robota



## 2.2 REŽIM DÁLKOVÉHO OVLÁDÁNÍ

Režim dálkového ovládání robota poskytuje veškeré vlastnosti a funkce jako režim balancování s rozdílem možnosti ovládání z mobilního telefonu. Postup instalace a ovládání mobilní aplikace popisuje kapitola 1.4 této přílohy. Před zahájením dálkového ovládání je nutné z bezpečnostních důvodů povolit na dotykovém displeji v menu „Bluetooth“ komunikaci s mobilním telefonem. Ukázku povolené komunikace uvádí obr. 2.2.



Obr. 2.2 – Povolení Bluetooth komunikace

## 2.3 AUTONOMNÍ REŽIM

Autonomní režim spočívá v automatickém sledování předem vyznačené černé čáry s možností detekce překážky v cestě, na kterou robot reaguje zastavením před překážkou. Konfigurace a ovládání robota v tomto režimu je možné z menu „Sledování čáry“, které je k vidění na obr. 2.3. Před zahájením režimu je nutné vhodně nastavit parametry pro regulaci. Prvním parametrem je rychlost dopředného pohybu, který bude robot po celou dobu udržovat. Dalším parametrem je rychlost otáčení, která určuje, jak rychle bude robot na odchylky od žádané hodnoty reagovat. Dalším parametrem je zmíněná žádaná hodnota. Nastavení provádíme postavením robota tak, aby prostředek snímače byl přesně na okraji vyznačené černé čáry. Následně odečteme aktuální hodnotu z infračerveného snímače a použijeme ji jako hodnotu žádanou. Posledním parametrem je pásmo necitlivosti neboli hystereze. Tu volíme v závislosti na požadované kvalitě regulace s ohledem na tloušťku vyznačené čáry. Všechny zmíněné parametry jsou při stisku tlačítka návratu do hlavního menu zapsány do paměti k použití i po restartu.



Obr. 2.3 – Nastavení parametrů pro sledování čáry

Zmíněná detekce kolize překážky a následné zastavení před ní je zavedeno dvěma úrovněmi. V první úrovni dojde při detekci překážky ve vzdálenosti menší než 40 cm k potlačení požadované rychlosti a robot přejde do režimu balancování. Jakmile dojde k odstranění překážky, robot znovu přejde do vykonávání režimu. V druhé úrovni je v případě vzdálenosti k překážce menší než 25 cm zaveden protipohyb, kterým robot plynule přejde do první úrovně kolizního systému a vyčkává na odstranění překážky. Informace o detekci překážky je uživateli zobrazena na displeji v podobě informačního proužku znázorněném na obr. 2.4.



Obr. 2.4 – Detekce překážky

### 3 VLASTNOSTI A SPECIFIKACE

Výpis seznamu klíčových vlastností a technických specifikací uvádí tab. 3.1.

Tab. 3.1 – Seznam vlastností a specifikací robota

Jízdní režimy	Balancování, dálkové ovládání, autonomní režim
Ovládání	Dotykový displej, bluetooth
Dosah ovládání	10 m
Maximální rychlost jízdy	3 km/h
Náhradní díly	Ano, 3D tisk
Ochrany	Proti zkratu, vybití a nadproudu
Baterie	3x dobíjecí Li-Pol, typ 18650
Výdrž	40 minut jízdy
Kapacita baterie	3,6 Ah
Zálohování parametrů	Ano (EEPROM)
Váha	1,2 kg
Rozměry	Š: 175 mm, V: 177 mm, H: 105 mm