

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor: 10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

## Robotické ruce pro humanoidního robota

Sebastian Matoušek

Brno 2024

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

ROBOTICKÉ RUCE PRO  
HUMANOIDNÍHO ROBOTA

ROBOTIC ARMS FOR A HUMANOID ROBOT

AUTOR Sebastian Matoušek

ŠKOLA Gymnázium Matyáše Lercha, Brno

KRAJ Jihomoravský

ŠKOLITEL prof. Ing. Roman Maršálek, Ph.D.

OBOR 10. Elektrotechnika, elektronika  
a telekomunikace

Brno 2024

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou práci na téma *Robotické ruce pro humanoidního robota* jsem vypracoval/a samostatně pod vedením prof. Ing. Romana Maršálka, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce SOČ jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Brně dne: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Sebastian Matoušek

## Poděkování

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Romanu Maršálkovi, Ph.D. za veškerou jeho podporu, kterou mi během práce na projektu poskytl. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Kolářovi, Ing. Tomáši Urbancovi, Ph.D. a Ing. Martinu Žilkovi za kontrolu elektroniky a Ing. Marku Žákovi za rady během programování robota.

Tato práce byla provedena za finanční podpory Jihomoravského kraje.



## Anotace

Tato práce navazuje na loňskou práci „*Dvounohý kráčivý robot*“, která se zabývala vytvořením dvounohého robota schopného plynulé chůze. V této práci je pozornost věnována rozšíření robota o horní končetiny a hlavovou část, čímž z dvounohého robota vznikne humanoidní robot. Také je v této práci vytvořen vlastní ekosystém modulů na bázi mikrikontroléru ESP32-C3FH4, komunikujících pomocí sériové half-duplex UART sběrnice. Moduly jsou na robotovi využity pro dosažení plynulejších pohybů, a jsou dále využitelné i v jiných projektech vyžadujících větší množství navzájem komunikujících DPS; zjednodušují propojování jednotlivých modulů a přidávají možnost přizpůsobit program modulů oproti některým komerčně dostupným variantám.

## Klíčová slova

Arnold Biped Robot, humanoidní robot, dvounohý kráčivý robot, inteligentní servomotor, ESP32, ekosystém modulů

## Annotation

This thesis expands on last year's thesis „*Bipedal Walking Robot*“, which aimed at building a two-legged robot capable of walking. In this thesis upper limbs and a head are added to the robot, thus creating a humanoid robot. Furthermore, a custom ecosystem of modules on the basis of the ESP32-C3FH4 microcontroller is created, communicating through a serial half-duplex UART bus. These modules are used to smoothen the movements of the robot and can be further used in other projects requiring the usage of numerous interconnected PCBs; they simplify the connecting of the modules and add more opportunities for customization of the program compared to some commercially available variants.

## **Keywords**

Arnold Biped Robot, humanoid robot, bipedal walking robot, intelligent servomotor, ESP32, ecosystem of modules

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Cíle práce</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Mechanická část</b>	<b>12</b>
3.1	Vývoj malých servomotorů MG90I . . . . .	12
3.1.1	Mechanika servomotorů MG90I . . . . .	12
3.1.2	Elektronika servomotorů MG90I . . . . .	13
3.2	Úpravy spodních končetin robota . . . . .	13
3.2.1	Rozšíření nášlapných ploch a tlakové rezistory . . . . .	14
3.2.2	Úprava podložky pro bezdrátové nabíjení . . . . .	14
3.3	Horní část robota . . . . .	14
3.3.1	Vrchní končetiny robota . . . . .	14
3.3.2	Trup a hlavová část . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Elektronika</b>	<b>16</b>
4.1	HAT pro řízení napájení . . . . .	16
4.1.1	Napájení modulů . . . . .	17
4.1.2	Napájení pro RPi Zero 2W . . . . .	20
4.1.3	Nabíjení akumulátorů . . . . .	21
4.2	Ekosystém modulů . . . . .	23
4.2.1	Výhody plynoucí z využití ekosystému . . . . .	24
4.2.2	Požadavky na zařízení v ekosystému . . . . .	25
4.2.3	Schéma základního modulu . . . . .	26

4.2.4	Deska pro programování modulů . . . . .	29
4.3	Modul ovládací elektroniky servomotorů . . . . .	30
4.3.1	H-můstek . . . . .	31
4.3.2	Zapojení potenciometru . . . . .	32
4.3.3	Měření napájecího napětí . . . . .	32
4.3.4	Měření proudu . . . . .	33
4.3.5	Adaptér na sběrnici . . . . .	35
4.4	Modul s inerciální měřicí jednotkou . . . . .	35
4.4.1	Připojení IMU . . . . .	36
4.4.2	Návrh schématu a kreslení tras VF . . . . .	37
4.4.3	Odporové děliče . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Výsledky práce</b>	<b>40</b>
5.1	Výsledný robot . . . . .	40
5.2	Možnosti využití ekosystému . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>43</b>
	<b>Ostatní přílohy</b>	<b>44</b>
	Literatura . . . . .	46
	Seznam zkratk . . . . .	47
	Seznam obrázků . . . . .	49
	Seznam příloh . . . . .	49
<b>A</b>	<b>Přiložená schémata zapojení</b>	<b>50</b>
<b>B</b>	<b>Přiložené nákresy desek</b>	<b>56</b>



# Kapitola 1

## Úvod

V práci „*Dvounohý kráčívý robot*“[1], na kterou tato práce navazuje, byl sestaven a naprogramován robot schopný chodit po dvou končetinách podobných lidským nohám. Jeho pohyb byl plynulý v rámci možností ohraničených např. použitými servomotory, jejichž rozjezd byl příliš trhavý pro dosažení plynulejší chůze. Koupené servomotory se nedaly přeprogramovat a tak byl, ve snaze dosáhnout plynulejší a stabilnější chůze robota, započat vývoj vlastní elektroniky do servomotorů, který vedl až k vytvoření celého vlastního ekosystému modulů.

V této práci jsou popsána rozšíření a vylepšení na robotovi, které z něho dělají humanoidního robota, přitom stále schopného chůze, zároveň je věnována pozornost samotnému ekosystému a návrhu modulů k němu kompatibilních. Výsledkem práce je tedy nejen humanoidní robot, ale i rozšiřitelný ekosystém modulů ovladatelných pomocí sériové half-duplex UART sběrnice, který je využitelný i v projektech zcela odlišných od chodících robotů.

# Kapitola 2

## Cíle práce

V minulé práci bylo cílem projektu sestavit funkčního dvounohého robota a napodobit co nejdříve plynulost a stabilitu lidské chůze. V této, navazující, práci bylo cílem jednak robota rozšířit o vrchní končetiny, kterými by byl schopen uchopovat předměty, a hlavu. Zároveň bylo zamýšleno fundamentálně změnit dosavadní elektroniku robota, a to nejen ovládací elektroniku vytvořenou v předchozí práci, ale i elektroniku v servomotorech, jež byly v první části práce koupeny.

Pozměněním ovládací elektroniky v servomotorech měl být zajištěn plynulejší pohyb servomotorů a celkově větší flexibilita v programování celého projektu; tato idea se následně proměnila v cíl vytvořit celý ekosystém, který by se celý, podobně jako původní servomotory, dal ovládat pomocí half-duplex UART sběrnice.

Jednotlivé cíle projektu jsou shrnuty následujícím výčtem:

- sestavit vrchní končetiny schopné uchopovat předměty
- sestavit hlavovou část vybavenou kamerou a LiDAR senzorem
- nahradit původní elektroniku v servomotorech vlastní elektronikou
- vytvořit elektroniku a šasi pro zmenšené servomotory použité ve vrchních končetinách a hlavové části

- sestrojit modul osazený inerciální měřicí jednotkou (IMU) splňující požadavky ekosystému

# Kapitola 3

## Mechanická část

Před popisem jednotlivých částí elektroniky budou objasněny hlavní změny v mechanické konstrukci robota, které zároveň vysvětlí některé kroky při návrhu elektroniky.

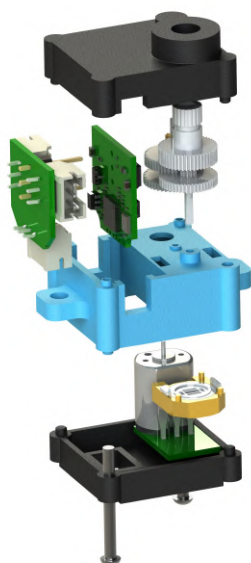
### 3.1 Vývoj malých servomotorů MG90I

Přidání vrchních končetin a hlavové části si vyžádalo vytvoření menších servomotorů, než jsou servomotory LX225. Tato nutnost plynula hlavně z důvodu vysoké hmotnosti servomotorů LX225, využívaných v spodních končetinách robota, které by neúměrně zvyšovali těžiště robota a působily, vzhledem ke svým rozměrům, neproporcionálně ke spodním končetinám.

#### 3.1.1 Mechanika servomotorů MG90I

Motor, ozubená kola a potenciometr pro určení polohy osy servomotoru jsou převzaty z komerčně dostupného servomotoru MG90, ze kterého byl také odvozen název nových servomotorů. Šasi bylo navrženo tak, aby pojmuló tyto původní díly, zároveň ale poskytovalo dostatek prostoru pro zasazení nové elektroniky.

Rozložený pohled na šasi tohoto servomotoru i s vyznačenou elektronikou je vidět na obr. 3.1.



Obrázek 3.1. Rozložený pohled na konstrukci servomotoru MG90I

### 3.1.2 Elektronika servomotorů MG90I

Elektronika, kterou jsou vybaveny servomotory MG90I, je až na jeden dodatečný díl totožná s novou elektronikou zasazenou do servomotorů LX225, která je dopodrobna popsána v části 4.3. Díl navíc, který se u MG90I nachází, je malý plošný spoj umožňující pohodlnější propojení motoru a potenciometru s ovládací elektronikou, a nebude vzhledem ke své jednoduchosti v práci probírán. Jeho schéma a nákres se nachází na konci práce v příloze A.4.

## 3.2 Úpravy spodních končetin robota

Z minulé práce zůstala nejméně pozměněná právě mechanika spodních končetin, i ta ale prošla drobnými změnami, které vycházely z návrhu některých částí elektroniky.

### **3.2.1 Rozšíření nášlapných ploch a tlakové rezistory**

Nášlapné plochy robota byly, vzhledem ke zvýšenému těžišti přidáním vrchních končetin a hlavové části, za účelem zvýšení stability při chůzi, rozšířeny jak do šířky, tak do délky. Zároveň byly přizpůsobeny tak, aby bylo možné do nich zabudovat tlakové rezistory (viz 4.4.3). Tyto tlakové rezistory jsou zapojeny na modulech s inerciální měřicí jednotkou.

### **3.2.2 Úprava podložky pro bezdrátové nabíjení**

Elektronika v podložce pro bezdrátové nabíjení zůstala identická k té v předchozí práci, nicméně rozměry byly přizpůsobeny změnám nášlapných ploch.

## **3.3 Horní část robota**

I když je podrobný popis mechanické konstrukce robota mimo zaměření této práce, budou zde pro přehled čtenáře zběžně vyjmenovány nejdůležitější nové prvky horní části robota.

### **3.3.1 Vrchní končetiny robota**

Vrchní končetiny jsou zrcadlené až na část otáčející uchopovacím zařízením, vzhledem k tomu, že servomotor MG90I v této ose není symetrický. Byly sestaveny za použití dvou servomotorů LX225, fungujících v roli ramenního kloubu, a dvou servomotorů MG90I, zastávajících roli zápěstí a manipulačního zařízení. Každá z vrchních končetin je zároveň osazena jedním modulem s inerciální měřicí jednotkou a v manipulačním zařízení robota je tlakový rezistor pro monitorování úchopu.

Model vrchní končetiny robota je vyobrazen na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2. Model levé horní končetiny robota

### 3.3.2 Trup a hlavová část

Trup robota byl oproti předchozí verzi rozšířen, nově se na něho uchycují i horní končetiny a hlavová část. Stále jsou v něm uchovávány dva LiIon akumulátory 18650, a ze zadní strany je připevněno Raspberry Pi Zero 2W i s nastavbovou deskou.

Hlavová část robota má jeden stupeň volnosti díky servomotoru MG90I, kterým je připevněna k trupu. Na hlavové části je připevněna kamera a LiDAR senzor, které mohou být natáčeny do stran. Jak kamera tak LiDAR senzor jsou zapojeny rovnou do počítače Raspberry Pi.

# Kapitola 4

## Elektronika

V této kapitole bude popsána elektronika robota i ekosystém modulů. Konkrétně bude pozornost věnována nejprve nastavbové desce (Hardware Attached on Top – HAT) na Raspberry Pi Zero 2W, napájející celého robota, osazené novým nabíjecím obvodem a zajišťující komunikaci mezi RPi Zero 2W a všemi moduly. Následně bude podrobně popsán návrh modulů do vlastního ekosystému a zároveň bude stručně popsána deska pro programování těchto modulů. Následovat budou popisy konkrétních modulů — ovládací elektroniky pro servomotory a modulu s inerciální měřicí jednotkou.

### 4.1 HAT pro řízení napájení

V předchozí práci byly využívány dva HATy – jeden pro řízení napájení a jeden pro komunikaci a stabilizaci. Funkce desky pro komunikaci a stabilizaci byla, až na převod full-duplex na half-duplex komunikace, zcela nahrazena a zdokonalena moduly s inerciální měřicí jednotkou, a tak byly obě desky spojeny do jedné. Tato jedna deska v sobě integruje napájení všech modulů, napájení RPi Zero 2W, nabíjení akumulátorů a komunikaci RPi Zero 2W s moduly. Schéma celé desky je na konci práce jako příloha A.1 a nyní budou popsány jednotlivé její části. Výsledná deska je vyobrazena na obr. 4.6.



### 4.1.1 Napájení modulů

Pro napájení koupných servomotorů je třeba napětí v rozmezí 6–8,4 V[2], které bylo v minulé práci zajištěno sériovým zapojením dvou 18650 Li-ion článků. Nicméně pro novou verzi HATu bylo zamýšleno paralelní zapojení těchto dvou článků, především pro zjednodušení jejich nabíjení a také zvýšení doby funkce robota na jedno nabití. V minulé práci totiž byla kapacita dvoučlánkového akumulátoru pouhých 2600 mAh[1], při paralelním zapojení a použití akumulátorů s vyšší kapacitou (3450 mAh) se ovšem podařilo celkovou kapacitu navýšit na 6900 mAh, tedy více než zdvojnásobit.

Vzhledem k napětí 3,7–4,2 V těchto článků ovšem bylo třeba využít regulátor, který by zajistil napájení 8,4 V pro moduly. Pro tento účel byl vybrán spínací regulátor TPS61288 se spínací frekvencí 500 kHz a maximálním proudem 15 A. Na obr. 4.1 je schéma zapojení tohoto regulátoru, které nyní bude důkladněji popsáno.

#### Vstup do regulátoru

Na vstupu se nachází blokovací kondenzátory C2 a C4, jejichž účelem je kompenzovat případné napěťové špičky[3].

Vstupní induktor byl zvolen 1,2 nH se saturačním proudem 28 A, a to hlavně jako kompromis mezi vysokým saturačním proudem a velikostí, která by se vlezla na desku. Podle výpočtů pro proud induktorem, uvedených v datovém listu regulátoru, se dá vypočítat maximální výstupní proud regulátoru, a to následujícím způsobem. Proud induktorem se spočítá jako[3]

$$I_{DC} = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{V_{IN} \cdot \eta} \quad (4.1)$$

a kmitání proudu induktorem se může pohybovat v celkovém rozsahu až

$$I_{DC} = \frac{1}{L \cdot \frac{1}{V_{OUT} - V_{IN}} + \frac{1}{V_{IN}} \cdot f_{SW}} \quad (4.2)$$

kde  $L$  je indukčnost zvolené cívky, v tomto případě  $1,2 \mu H$  a  $f_{SW}$  je spínací frekvence  $500 kHz$ . V nejhorším případě, kde  $V_{IN} = 3,7 V$ , tedy když by akumulátory byly téměř vybité, při zvoleném výstupním napětí  $8,65 V$  a předpokládané efektivitě  $90\%$  se maximální odebíraný proud induktorem spočte jako

$$I_{OUT} = \frac{(I_{DC} - \frac{1}{2} \frac{1}{L \cdot \frac{1}{V_{OUT} - V_{IN}} + \frac{1}{V_{IN}} \cdot f_{SW}}) \cdot V_{IN} \cdot \eta}{V_{OUT}}$$

$$I_{OUT} = \frac{(28 - \frac{1}{2} \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{8,65 - 3,7} + \frac{1}{3,7} \cdot 500000}) \cdot 3,7 \cdot 0,9}{8,65} \quad (4.3)$$

$$I_{OUT} \approx 10,78 A$$

Zde také vidíme, že v případě, že akumulátory budou plně nabitě, tak maximální odebíraný proud vzroste až na  $12,24 A$ .

$$I_{OUT} = \frac{(28 - \frac{1}{2} \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{8,65 - 4,2} + \frac{1}{4,2} \cdot 500000}) \cdot 4,2 \cdot 0,9}{8,65} \quad (4.4)$$

$$I_{OUT} \approx 12,24 A$$

Takový proud je pro napájení robota z předchozí zkušenosti více než dostačující, a překročení tohoto limitu hrozí jedině při prudké aktivaci všech motorů zároveň, čemuž by měl následně zabránit program.

### Výstup z regulátoru

Na výstupu z regulátoru se opět nachází blokovací kondenzátory. Pomocí odporového děliče R12 a R13 se nastavuje výstupní napětí, a to podle rovnice

$$R_1 = \frac{V_{OUT} - V_{REF} \cdot R_2}{V_{REF}} \quad (4.5)$$

kde  $V_{REF} = \frac{1859}{3083} V$ [3]. Při zvolených hodnotách rezistorů je výstupní napětí regulátoru tedy

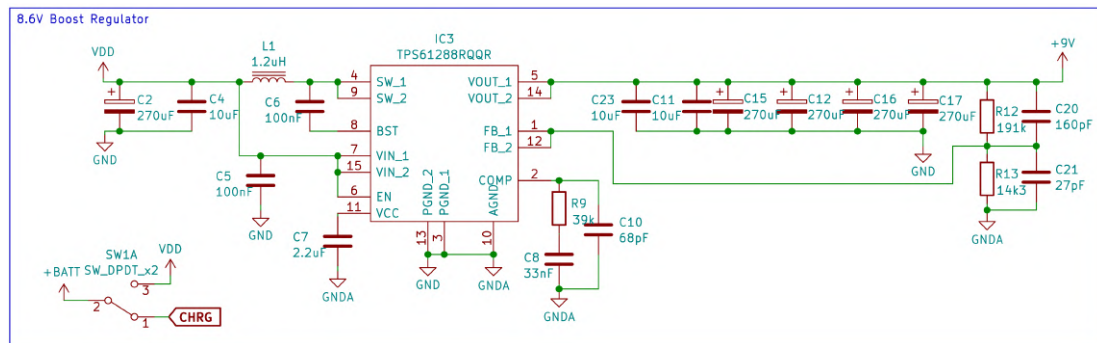
$$V_{OUT} = \frac{R_1 \cdot V_{REF}}{R_2} + V_{REF}$$

$$V_{OUT} = \frac{191000 \cdot \frac{1859}{3083}}{14300} + \frac{1859}{3083} \quad (4.6)$$

$$V_{OUT} \approx 8,65 V$$

Kondenzátor paralelně s rezistorem R13 doporučuje výrobce přidat pro eliminaci šumu v případě, že rezistor R13 je 15 kΩ a více[3], nicméně 14,3 kΩ je této hodnotě blízko, a tak byl kondenzátor do návrhu začleněn.

Pro zkrácení doby odezvy regulátoru na změnu zátěže byl také přidán kondenzátor C20[4].

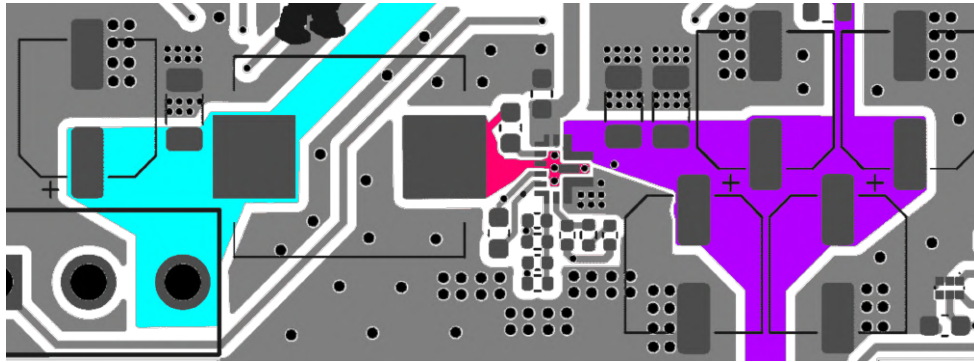


Obrázek 4.1. Schéma spínacího boost regulátoru TPS61228 z 3,7 V na 8,65 V a až 6,2 A

## Routování cest regulátoru

Správně naroutované cesty byly důležitým předpokladem pro efektivní funkci regulátoru. Postupováno bylo především podle doporučení výrobce – délka

cesty k pinu  $SW$  byla minimalizována, vstupní kondenzátory jsou blízko  $V_{IN}$  pinu a spodní strana je téměř nepřerušeně vylitá plochou  $GND$ .



Obrázek 4.2. Vyobrazení naroutovaných cest pro regulátor. Šedě vylité plochy jsou  $GND$ , světle modrá je  $V_{IN}$ , růžová  $SW$  a fialová  $V_{OUT}$ . Ze spodní strany desky se pod celým zapojením regulátoru nachází prakticky nepřetržitá plocha  $GND$ .

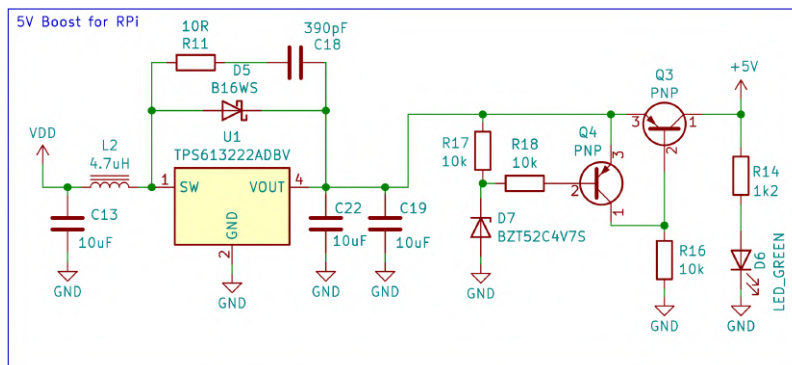
#### 4.1.2 Napájení pro RPi Zero 2W

Používaný počítač pro ovládání robota, Raspberry Pi Zero 2W, vyžaduje napájecí napětí okolo 5 V[5]. Proto byl na desku osazen ještě pevný boost regulátor, TPS613222A, z 3,7 na 5 V, s maximálním proudovým zatížením až 1,8 A[6].

Schéma zapojení regulátoru je na obr. 4.3, kde kromě vstupního induktoru a blokovacích kondenzátorů figuruje také usměrňovací schottkyho dioda pro zvýšení efektivity vzhledem k vysoké spínací frekvenci regulátoru[6], paralelně s rezistorem a kondenzátorem zapojených v sérii fungujících jako snubber[7].

Za regulátorem je ještě obvod se zenerovou diodou a dvěma bipolárními tranzistory, sloužící k odpojení napájení od RPi Zero 2W v případě, že napětí přesáhne hranici 5,2 V. To by se v praxi nemělo při vstupním napětí 3,7–4,2 V sice nikdy stát, ale při testování robota bylo jednou omylem napájecí napětí místo 4,2 V nastaveno na 8 V a RPi Zero 2W tak bylo spáleno. Proto byl,

pro zamezení případné větší škody, tento obvod také začleněn do návrhu.



Obrázek 4.3. Schéma pevného boost regulátoru TPS613222A z 3,7 V na 5 V a až 1,8 A

### 4.1.3 Nabíjení akumulátorů

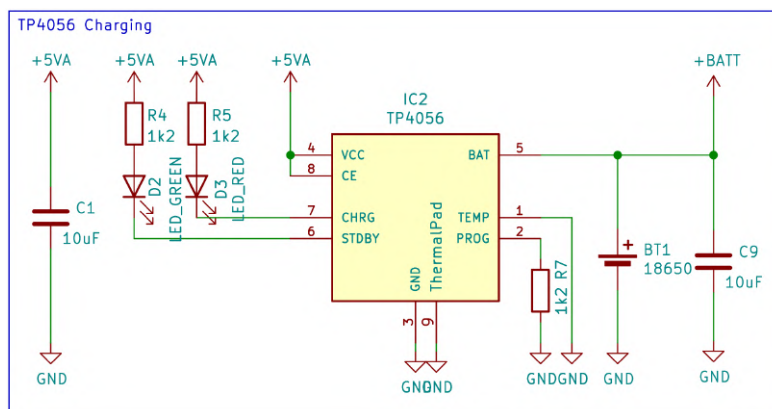
Pro nabíjení akumulátorů byl zvolen obvod TP4056 s nabíjecím proudem až 1 A. Kromě blokovacích kondenzátorů se v obvodu nachází také dvě LED diody, zelená D2, která svítí když jsou články plně nabitě, a červená D3, která svítí když probíhá nabíjení[8].

Programovací rezistor R7 slouží k nastavení maximálního nabíjecího proudu, v případě tohoto obvodu až 1 A, kterého se docílí právě pomocí rezistoru s odporem 1,2 k $\Omega$ . V zájmu minimalizace poplatků při osazování desky byla stejná hodnota rezistoru použita i u všech LED diod na desce.

### Bezdrátové nabíjení pomocí napájecích drátů pro servomotory

Minulý rok byl výstup 5 V z cívek pro bezdrátové nabíjení přiveden pomocí dvou kabelů z každé nášlapné plochy do jedné z nastavbových desek, kde bylo napětí spínané na 8,4 V pro nabíjení akumulátorů[1]<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Spínání napětí tentokrát není potřeba, vzhledem ke vstupnímu napětí integrovaného obvodu TP4056 mezi 4–8 V[8]



Obrázek 4.4. Schéma nabíjecího obvodu s integrovaným obvodem TP4056, nabíjecím proudem až 1 A a dvěma LED diodami pro vyrozumění uživatele o stavu nabíjení.

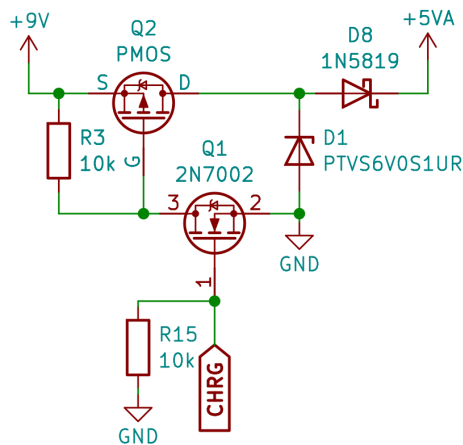
Výstupní kabely z nášlapných ploch jsou však překážkou při pohybu robota a bylo cílem se jejich použití vyhnout. Proto bylo vymyšleno zapojení na obr. 4.5. Při fungování robota je P-kanálový MOSFET Q2 vypnutý, viz obr. 4.1. Naopak při „vypnutí“ robota, tedy při přepnutí přepínače SW1A do polohy, kdy nepřivádí napájení do regulátoru, je naopak na gate Q1 přivedeno napětí z akumulátorů, tedy 3,7–4,2 V, což stáhne napětí na gate Q2 na GND a Q2 se otevře. Protože MOSFET je řízen napětím a ne proudem, mělo by toto vybíjet akumulátory jen zanedbatelným způsobem, ovšem propojí to cestu napájení servomotorů a nabíjecího obvodu. Z obou spodních servomotorů jsou vyvedeny kabely do nášlapných ploch, kde jsou připojeny přes schottkyho usměrňovací diody k nabíjecím cívkám, tak aby na výstupu z cívek při fungování robota nebylo napětí 8,6 V.

Při nabíjení pak z cívek jde nabíjecí proud skrze napájecí kabely servomotorů a modulů, a nemusí se tak používat další dva kabely z každé nohy. Samozřejmě jsou zároveň napájeny všechny moduly, nicméně nejspodnější modul s inerciální měřicí jednotkou na levé spodní končetině je zodpovědný za rozeznání procesu nabíjení pomocí fotorezistoru<sup>b</sup> a rozeslání příkazu po

<sup>b</sup>Rozpoznání nabíjení pomocí fotorezistoru je blíže popsáno v části 4.4.3

sběrnici, který dá všem ostatním mikrokontrolérům vědět, že mají přejít do deep-sleep módu, ve kterém je jejich spotřeba okolo  $5 \mu A$ [9].

Po přepnutí přepínače do polohy „*vypnout*“ může nastat situace, zvláště vzhledem k velké kapacitě blokovacích kondenzátorů na výstupu, že se přes MOSFET Q2 dostane nechtěných 8,6 V, což přesahuje maximální vstupní napětí obvodu TP4056. Pro tento případ je zde připojena TVS dioda v závěrném směru, která toto napětí omezí a na vstup nabíjecího obvodu se tak dostane max.  $V_{BR} = 7,37 V$ , což je krajní průrazové napětí diody[10][11].

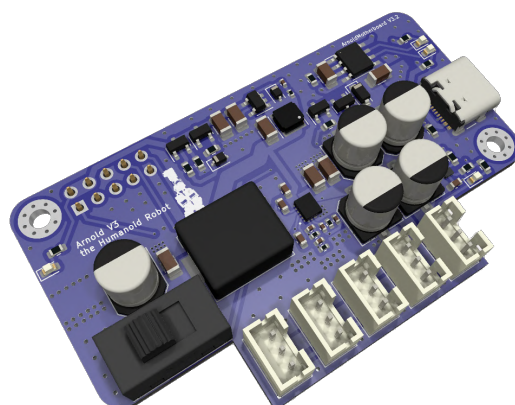


Obrázek 4.5. Schéma obvodu pro oddělení vstupu nabíjecího obvodu při fungování robota a následnému nabíjení po položení na nabíjecí podložku.

## 4.2 Ekosystém modulů

Impulz vytvořit ekosystém přišel z cíle osadit robota několika inerciálními měřicími jednotkami, které by na robotovi měřily zrychlení při chůzi. Vzhledem k tomu, že v tuto dobu už bylo zároveň cílem vytvořit vlastní ovládací elektroniku pro servomotory ovládané přes half-duplex UART, měly desky s IMU fungovat na podobném principu. Tak vznikla myšlenka vytvořit celý ekosystém modulů. Všechny moduly by měli mít stejný program<sup>e</sup> a komunikace

<sup>e</sup>jen s různými dodatky podle připojených periferií



Obrázek 4.6. HAT pro správu napájení, nabíjení akumulátorů a komunikaci s moduly<sup>c</sup>

d

s nimi by byla standardizovaná. Zároveň by ale byl zachován vysoký stupeň flexibility – uživatel by si stále mohl jak elektroniku, tak program značně přizpůsobit svým potřebám.

Vytvoření takového ekosystému bude nyní podrobněji zdůvodněno a následovat budou požadavky, které musí zařízení v ekosystému splňovat.

#### 4.2.1 Výhody plynoucí z využití ekosystému

Právě díky společné elektronice – to znamená především hlavnímu mikrokontroléru, zapojení pro komunikaci pro half-duplex UART sběrnici a regulátoru napájení – můžeme pro všechny moduly využívat stejný program a komunikační protokol, všechny moduly řetězit na jednu sběrnici a napájení, v programu všechny moduly ukládat jako jeden datový typ atd. Tímto si i u komplexních projektů s desítkami modulů zachováme přehlednost jak fyzicky – málo drátů – tak i u programování – nemusíme používat pro každý modul jinou knihovnu a samostatný program, komunikační protokol etc.



## 4.2.2 Požadavky na zařízení v ekosystému

Definování požadavků na ekosystém bylo nezbytné dělat s rozvahou – nesměl být moc svázaný pravidly, která by limitovala přidávání dalších zařízení, zároveň ale musel zahrnovat taková pravidla, která by zajistila klíčové funkce.

Následuje výčet jednotlivých stanovených požadavků na zařízení v ekosystému:

- Modul musí být založen na čipu ESP32-C3FH4. To zajišťuje kompatibilitu programu i elektroniky.
- Modul musí mít řadu pěti 1.27 mm pinů pro programování, v pořadí zleva 3,3 V, USB\_D+, USB\_D-, BOOT pin mikrokontroléru, GND. Tento bod neplatí pokud má modul osazený vlastní USB-C port pro programování<sup>f</sup>.
- Modul musí být připojitelný přes minimálně dva třípinové JST\_PH 2,0 mm konektory, v pořadí zleva GND, VIN, TX. Případně musí být připojen přes tyto tři piny k jiné desce, která dvěma nebo více takových konektorů disponuje (viz deska pro servomotor 4.3.5).
- Modul musí mít rozsah napájecího napětí minimálně 3,3-12 V.
- Modul musí být schopný komunikovat pomocí half-duplex UART sběrnice na napětí 3,3 V minimální rychlostí 115200 baud
- Modul musí být schopný odpovídajícím způsobem reagovat na příkazy ze sběrnice, vypsané v tabulce 4.1. Definice dalších příkazů už je na úvaze uživatele.

---

<sup>f</sup>Což se vzhledem k rozměrům a ceně osazení USB-C konektoru často jeví jako značně nepraktické

Číslo	Název příkazu	Popis funkce
01	ID_WRITE	Zapíše nové ID danému modulu. ID se zapíše do FLASH paměti, takže si ho moduly pamatují i po odpojení napájení.
02	TYPE_READ	Vrátí typ modulu, které jsou uživatelem definované <sup>g</sup> .
03	HIBERNATE	Po obdržení tohoto příkazu se modul přepne do deep-sleep módu, ve kterém odebírá cca 5–10 $\mu$ A.

Tabulka 4.1. Tabulka příkazů pro základní modul

### 4.2.3 Schéma základního modulu

Na základě definovaných pravidel bylo vytvořeno schéma základních částí modulu. Toto schéma zahrnuje všechny potřebné součástky pro to, aby deska z něj vycházející mohla být začleněna do ekosystému. Schéma lze dále rozšiřovat o chtěné funkce přidáním dalších součástek, které neinterferují s těmito základy, zároveň lze i toto schéma drobně upravovat<sup>h</sup>. Kompletní schéma základního modulu se nachází na konci této práce na obr. A.2.

#### ESP32-C3FH4

Toto schéma je vytvořeno okolo čipu ESP32-C3FH4. V tabulce 4.2 jsou vypsané důležité vlastnosti tohoto mikrokontroléru, které byly při tvorbě modulů využity[9].

Jak je udáno v tabulce, napájecí napětí čipu je 3,3 V, stejně tak jako maximální napětí vstupů a výstupů na všech GPIO pinech pro tento mikrokontrolér. Tento fakt diktoval nutnost použití regulátoru pro napájení modulu, tak aby z napětí až 12 V vzniklo 3,3 V pro mikrokontrolér.

Výrobce zároveň udává nutnost použít 40 MHz externí oscilátor nebo krystal pro zajištění taktovací frekvence mikrokontroléru. Ve schématu byl

<sup>h</sup>Např. změnit nebo přidat některé blokové kondenzátory, jak je tomu u servomotorů

zároveň podle požadavků výrobce přidán do série s pinem XTAL\_P 0R rezistor pro snížení dopadu krystalu na případný VF obvod[12].

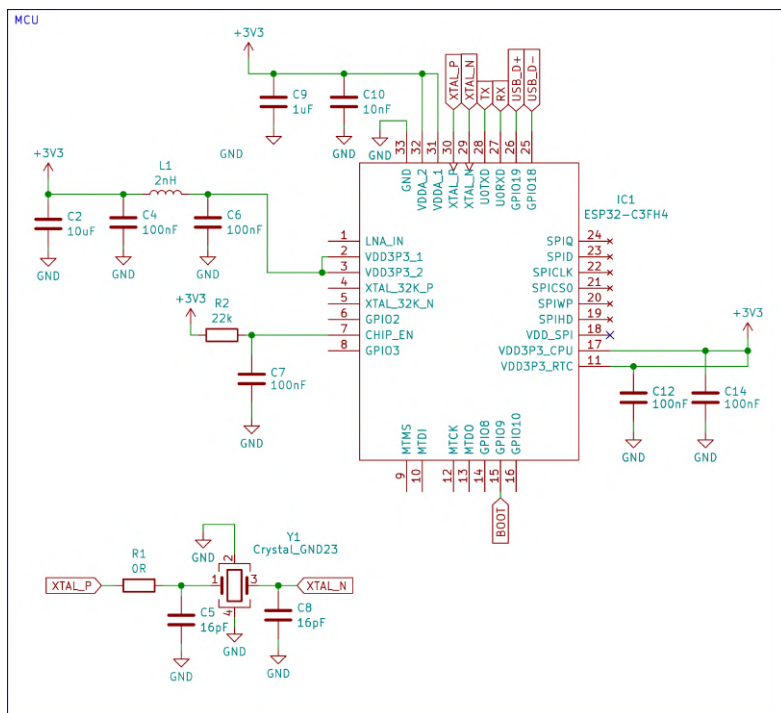
Díky využití funkce *USB Serial/JTAG Controller* tohoto čipu není třeba žádných externích součástek pro programování mikrokontroléru, jak tomu je u některých předchozích verzí ESP32 nebo u čipů ATmega. Stačí připojení pinů USB\_D+ a USB\_D- přímo na piny konektoru např. USB-C 2.0 a po připojení k počítači (a za přítomnosti vyžadovaných driverů) se mikrokontrolér zobrazí jako COM port, kam následně lze nahrát program[9].

Pro zajištění stabilního napájení je ve schématu u každého pinu digitálního napájení přidán blokovací kondenzátor o hodnotě 100 nF, u pinů pro analogové napájení je pak kromě blokovacích kondenzátorů přidán ještě LC filtr pro omezení vysokofrekvenčních harmonických kmitů[12].

Ve výsledném schématu se zapojením mikrokontroléru na obr. 4.7 se nachází ještě pullup na 3,3 V přes 22 kΩ rezistor s blokovacím kondenzátorem, který drží enable pin čipu ve stavu logické 1, na desce se pak případně dá rezistor zkratovat pro resetování mikrokontroléru. Pin GPIO9 je připojen k programovacím pinům, jedná se totiž o pin, který nastaví mikrokontrolér do boot režimu a dá se následně externě stáhnout na logickou 0. Pullup rezistor zde potřeba není, protože na pinu se nachází interní pullup[9].

napájecí napětí	3,3 V
vyžadovaná frekvence externího oscilátoru	40 MHz
interní flash paměť	4 MB
USB Serial/JTAG Controller	ano
UART	full-duplex
WiFi a BLE	ano

Tabulka 4.2. Tabulka vybraných vlastností čipu ESP32-C3FH4



Obrázek 4.7. Schéma zapojení mikrokontroléru ESP32-C3FH4 v základním modulu, s 40 MHz krystalem a LC filtrem

## Regulátor napětí

Pro zajištění napájecího napětí pro mikrokontrolér byl vybrán LDO regulátor H7233-1 s fixním výstupem 3,3 V a vstupním napětím až 15 V. Výhodou tohoto regulátoru je jeho malé pouzdro, což zajišťuje kompaktnost výsledného zapojení. I když je nevýhodou LDO regulátorů jejich nízká efektivita (při vstupu 8,6 V je jen cca 40%), nebyla vzhledem k nízké plánované spotřebě těchto modulů prioritou, naopak bylo cílem osadit vše na co nejmenší plochu.

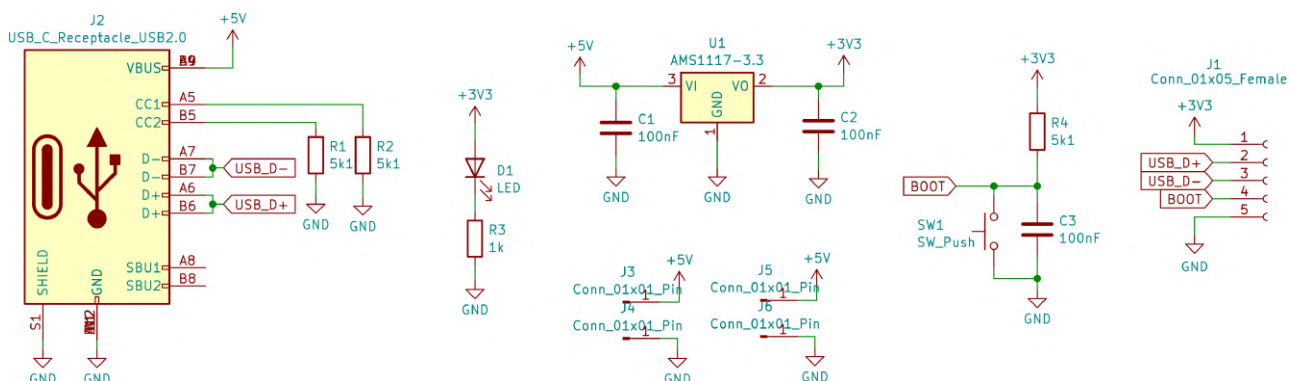
## Obvod pro konverzi full-duplex na half-duplex UART

Oproti zapojení se dvěma N-MOSFET tranzistory pro vytvoření open-drain výstupu z TX pinu mikrokontroléru z minulého roku[1] byl využit dvoukanálový buffer 74LVC2G07GM s open-drain výstupy a pullup rezistor[13]. Podle doporučení výrobců mikrokontroléru byl do série před něj dán 499 R rezistor pro potlačení 80 MHz kmitů na TX pinu[12].

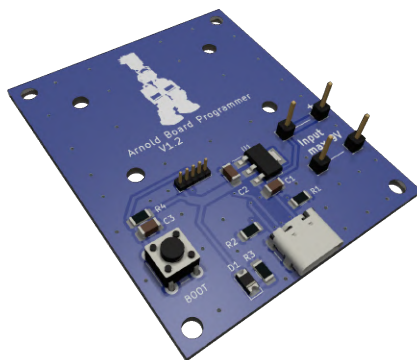
### 4.2.4 Deska pro programování modulů

Pro programování modulů, které disponují pouze pěti piny a ne přímo USB-C konektorem, byla navržena deska pro jejich pohodlné programování. Deska, jejíž schéma se nachází na obr. 4.8, po zapojení USB-C konektoru jednak napájí modul 3,3 V díky LDO regulátoru AMS1117-5.0, zároveň ho připojí k počítači, kde se modul zobrazí jako standardní COM port. Tímto se výrazně ušetří místo na desce modulu, zároveň je ale programování modulu stále pohodlné. Stačí ho nasadit na piny na desce a po naprogramování opět odejmout.

Na desce je také tlačítko, které nastaví mikrokontrolér do BOOT módu. Opět se tak ušetří místo na desce samotného modulu. Jako poslední se na programovací desce nachází piny pro připojení externího zdroje, který může mít až 12 V.



Obrázek 4.8. Schéma desky na programování modulů pomocí pětipinového konektoru



Obrázek 4.9. Deska na programování modulů pomocí pětipinového konektoru

### 4.3 Modul ovládací elektroniky servomotorů

Podle základního schématu popsaného v předchozí části se řídil vývoj jak modulů ovládací elektroniky servomotorů, tak následně i modulů s inerciální měřicí jednotkou. Cílem vývoje ovládací elektroniky pro servomotory bylo, zachovat nebo vylepšit všechny původní funkce a zároveň doplnit některé další.

Funkce, na které bylo třeba sestavit z dalších fyzických součástek obvod, byly následující:

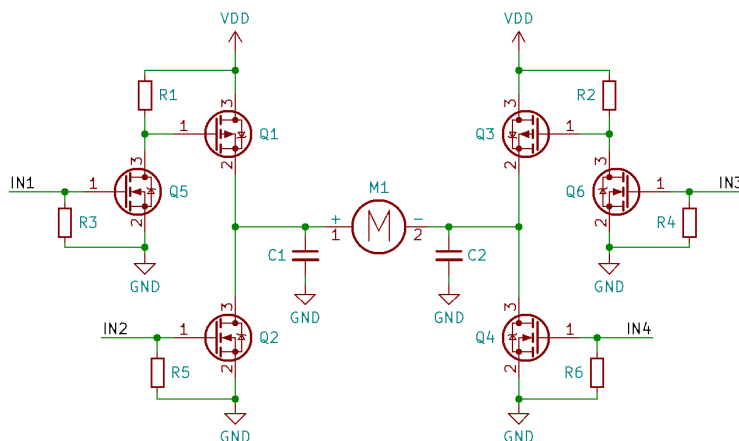
- ovládání motoru pomocí H-můstku

- zjišťování polohy osy servomotoru pomocí potenciometru
- měření napájecího napětí
- měření proudu tekoucího motorem v obou směrech<sup>1</sup>

### 4.3.1 H-můstek

Aby bylo zajištěno ovládání motoru v obou směrech byl sestaven H-můstek, který byl pro lepší přehlednost překreslen do podoby na obr. 4.10. Ze dvou P a dvou N kanálových MOSFET tranzistorů byl sestaven samotný H-můstek, pro ovládání P kanálových tranzistorů jsou využívány dva další N kanálové tranzistory Q5 a Q6. Všechny tranzistory mají 22 kΩ pullup nebo pulldown rezistor tak, aby byly bez vstupního signálu v zavřeném stavu. Dva 27 nF kondenzátory byly přidány na terminály motoru pro vyhlazení napěťových špiček.

V praxi jsou tranzistory Q1–Q4 integrované do dvou dvoukanálových výkonových součástek WSP4606A se sdíleným drainem. Schéma tohoto zapojení je vidět ve výsledném schématu celého modulu na konci práce na obr. A.3.



Obrázek 4.10. Rozložené schéma zapojení H-můstku pro ovládání motoru

<sup>1</sup>Tato funkce v původních servomotorech dostupná nebyla.

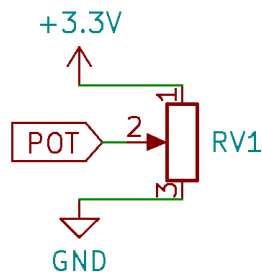
Vzhledem k poklesům v napájecím napětí, které motor vytváří, byly oproti referenčnímu schématu základního modulu přidány ještě další, tantalové blokové kondenzátory, a to konkrétně před a za LDO regulátor, k pinu vyčítajícímu hodnoty z potenciometru, a před CLC filtr analogového napájení.

### 4.3.2 Zapojení potenciometru

Potenciometr je v konstrukci servomotoru připojen přímo na osu a jeho poloha tedy přímo odpovídá natočení osy. Proto je i zapojení na desce velmi jednoduché, viz obr. 4.11. Následně se v programu úhel natočení servomotoru spočte pomocí rovnice

$$Angle = \frac{Angle_{MAX}}{Resolution_{MAX}} \cdot Analog_{IN} \quad (4.7)$$

kde  $Angle_{MAX}$  je u servomotorů LX225 240°,  $Resolution_{MAX}$  je maximální rozlišení analogového pinu a  $Analog_{IN}$  je vstupní hodnota naměřená na analogovém pinu.



Obrázek 4.11. Vyobrazení zapojení potenciometru na desce

### 4.3.3 Měření napájecího napětí

Měření vstupního napětí se provádí obdobnou technikou jako měření úhlu natočení servomotoru – pomocí analogového pinu se vyčítá napětí z odporového děliče a následně se vynásobí tak, aby se získala původní hodnota



napětí:

$$V_{IN} = Analog_{IN} \cdot \frac{V_{MAX}}{Resolution_{MAX}} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4.8)$$

kde  $Analog_{IN}$  je vstupní hodnota naměřená na analogovém pinu,  $V_{MAX}$  je maximální hodnota měřitelná na GPIO pinu ESP32-C3FH4 (tedy 3,3 V),  $Resolution_{MAX}$  je maximální rozlišení analogového pinu (v tomto případě 4095) a  $R_1$  a  $R_2$  jsou hodnoty rezistorů v děliči (22 k $\Omega$  a 7,5 k $\Omega$ ). Těmito hodnotami rezistorů zajistíme, že jsme pomocí GPIO pinu schopni měřit napájecí napětí až do 12,98 V.

#### 4.3.4 Měření proudu

Jako novinka byl na desku osazen i obvod pro měření proudu procházejícího motorem. Toto původní servomotory neumožňují, nicméně bylo cílem mít možnost tento parametr monitorovat.

Při návrhu tohoto obvodu bylo důležité nezapomenout, že se motor může otáčet oběma směry. Aby bylo možné v obou směrech vyčítat proud, byl zvolen integrovaný obvod INA181, který má pin pro referenční napětí  $V_{REF}$ , a výstup  $V_{OUT}$  je tak pro proud v jednom směru  $V_{REF} < V_{OUT} < 3,3 V$  a proud druhým směrem  $0 > V_{OUT} > V_{REF} V$ . Následuje odvození proudu motorem pomocí rovnice výstupního napětí z obvodu[14]:

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= (I_{LOAD} \cdot R_{SENSE} \cdot GAIN) + V_{REF} \\ &\quad \downarrow \\ I_{LOAD} &= \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{R_{SENSE} \cdot GAIN} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Z první rovnice vyplývá, že při nulovém proudu bude výstupní napětí rovno referenčnímu napětí  $V_{REF}$ . U používaného čipu INA181A1, který má zisk 20V/V, při referenčním napětí  $V_{REF} = 1,65 V$ , zátěži např.  $I_{LOAD} = 1 A$  a používaném rezistoru  $R_{SENSE} = 68 m\Omega$  bude výstupní napětí

$$\begin{aligned}
V_{OUT} &= (I_{LOAD} \cdot R_{SENSE} \cdot GAIN) + V_{REF} \\
V_{OUT} &= (1 \cdot 68 \cdot 10^{-3} \cdot 20) + 1,65 \\
V_{OUT} &= 3,01 V
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Protože ESP32-C3FH4 může na vstupu všech GPIO pinů mít maximálně 3,3 V, jsme obvodem schopni změřit proud až

$$\begin{aligned}
I_{MAX} &= \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{R_{SENSE} \cdot GAIN} \\
I_{MAX} &= \frac{3,3 - 1,65}{68 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \\
I_{MAX} &\approx 1,21 A
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Zároveň, protože ESP32-C3FH4 má rozlišení na analogových pinech až 12 bit, tedy hodnota 0–4095, máme tedy na kladný proud alokováno rozlišení 2048–4095 neboli 2048 bit. Pomocí tohoto obvodu jsme tedy teoreticky schopni dosáhnout rozlišení až

$$\begin{aligned}
I_{RES} &= \frac{I_{MAX}}{RES} \\
I_{RES} &= \frac{1,21}{2048} \\
I_{RES} &\approx 0,59 mA
\end{aligned} \tag{4.12}$$

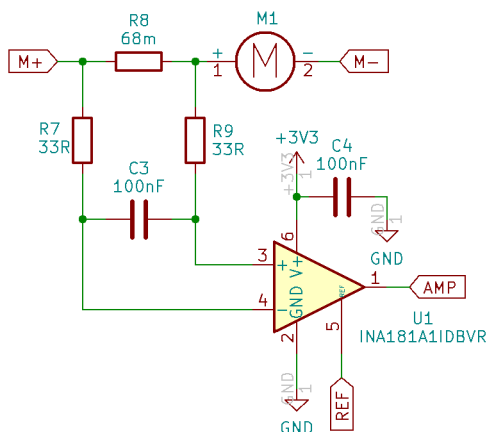
Před čip INA181 byl osazen low-pass filtr pro omezení šumu, kde se prahová frekvence spočte jako[15][16]

$$\begin{aligned}
f_{-3dB} &= \frac{1}{2\pi(R_F + R_F) \cdot C_F} \\
f_{-3dB} &= \frac{1}{2\pi(33 + 33) \cdot 100 \cdot 10^{-9}} \\
f_{-3dB} &\approx 24 kHz
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Výsledné schéma zapojení integrovaného obvodu INA181 i s low-pass filtrem je vidět na obr. 4.12. Referenčního napětí  $V_{REF} = 1,65 V$  se dosáhne pomocí napěťového děliče z napájecího napětí pro mikrokontrolér. I když

toto není ideální způsob získání referenčního napětí z hlediska přesnosti ani efektivity napájení[17], byl to způsob jak celý obvod dostat na malý prostor s nízkou výrobní cenou. Vyžadovaná přesnost není velká a bylo rozhodnuto obětovat malou část přesnosti za kompaktnost řešení.

Cesty od shunt rezistoru byly na desce vedeny jako diferenciální páry, tak aby se na nich nakumuloval co možná nejpodobnější šum.



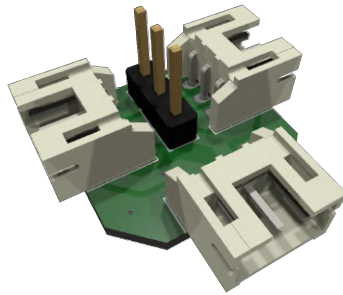
Obrázek 4.12. Schéma zapojení čipu INA181 s low-pass filtrem

### 4.3.5 Adaptér na sběrnici

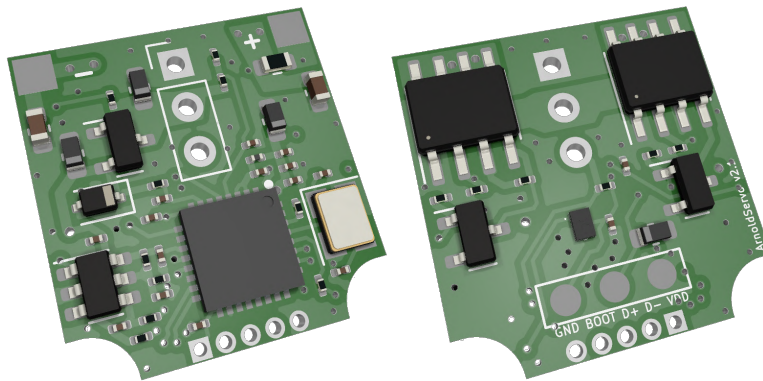
Aby deska s ovládací elektronikou pro servomotory splňovala požadavky pro začlenění do ekosystému, a aby se daly servomotory řetězit, je samotná deska (na obr. 4.14) rozšířena o druhou desku, ke které je připojena přes třípinový konektor. Rozšiřující deska s konektory má pouze propojené piny na konektorech a tak zde v práci nebude podrobně popisována, nicméně její podoba je na obr. 4.13.

## 4.4 Modul s inerciální měřicí jednotkou

Pro vyčítání zrychlení různých částí robota v šesti osách byl navržen modul osazený IMU, který kromě komunikace po half-duplex UART sběrnici



Obrázek 4.13. Deska s rozšiřujícími konektory pro desku s ovládací elektronikou na servomotory



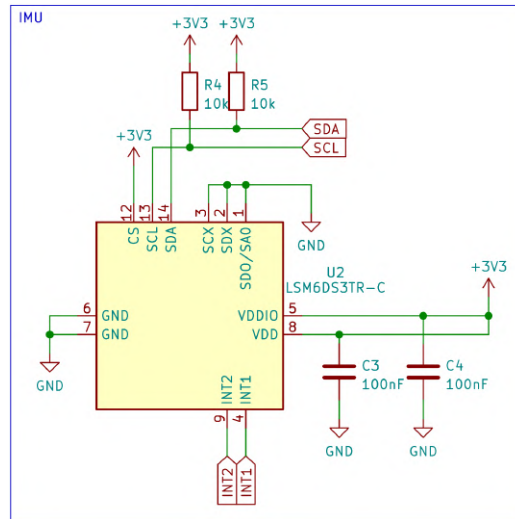
Obrázek 4.14. Finální deska ovládací elektroniky pro servomotor

disponuje i komunikací přes 2.4 GHz WiFi nebo Bluetooth. Celé schéma je vyobrazeno na konci práce (A.5).

#### 4.4.1 Připojení IMU

Modul využívá IMU LSM6DS3TR-C. S inerciální měřicí jednotkou ESP32-C3FH4 komunikuje pomocí I<sup>2</sup>C sběrnice. Tato sběrnice je u ESP32-C3FH4 dynamicky nastavitelná na jakékoliv dva GPIO piny, v tomto případě byla nastavena na piny GPIO 0 a 1. Na obou linkách sběrnice jsou připojeny 10 k $\Omega$  pullup rezistory, zároveň jsou u napájecích pinů IMU opět blokovací kondenzátory. IMU disponuje také dvěma interrupt piny, které jsou připojeny na GPIO 6 a 10. Tyto piny se dají programově nastavit tak, aby při různých

událostech byly ve stavu logické 1[18]. Obr. 4.15 znázorňuje zapojení tohoto čipu.



Obrázek 4.15. Vyobrazení zapojení potenciometru na desce

#### 4.4.2 Návrh schématu a kreslení tras VF

Pro bezdrátovou komunikaci byla použita DPS anténa SWRA117.

Protože impedance výstupu z ESP32-C3FH4 je  $(35 + j10)\Omega$ , a impedance antény je  $(50 + j0)\Omega$ , byl využit CLC filtr pro impedanční přizpůsobení, pro jehož výpočet byla využita internetová kalkulačka[19]. Získané hodnoty byly zaokrouhleny na hodnoty řady a výsledné hodnoty CLC filtru tak jsou

$$\begin{aligned} L &= 2,2 \text{ nH} \\ C_S &= 3,3 \text{ pF} \\ C_L &= 3,3 \text{ pF} \end{aligned} \tag{4.14}$$

Od pinu pro vstup antény je vedena trasa s charakteristickou impedancí  $50\Omega$ . Pro výpočet potřebné šířky trasy pro dosažení této impedance byl použit vzorec

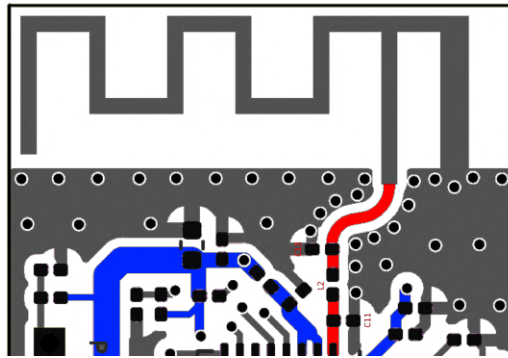
$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \cdot \ln \frac{5,98 \cdot h}{0,8 \cdot w + t} \quad [20] \quad (4.15)$$

kde  $Z_0$  je charakteristická impedace trasy,  $\epsilon_r = 4,5$  je dielektrická konstanta materiálu DPS,  $t = 0,035 \text{ mm}$  je výška nanesené vrstvy mědi,  $h = 0,2104 \text{ mm}$  je tloušťka materiálu k mezi trasou a další vrstvou mědi a  $w$  je hledaná šířka trasy. Vidíme tedy, že u použité tloušťky cesty  $0,368 \text{ mm}$  charakteristická impedace trasy bude

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{4,5 + 1,41}} \cdot \ln \frac{5,98 \cdot 0,2104}{0,8 \cdot 0,368 + 0,035} \quad (4.16)$$

$$Z_0 \approx 48 \Omega$$

Kolem trasy, zakreslené červenou v obr. 4.16, jsou umístěny zemníci prokovy pro zamezení rušení signálu. Pod vedenou trasou je dle doporučení výrobce mikrokontroléru vylitá zemní plocha, oproti tomu pod anténou žádné plochy vylité nejsou, stejně tak jako tudy nejsou vedeny žádné další trasy[12].

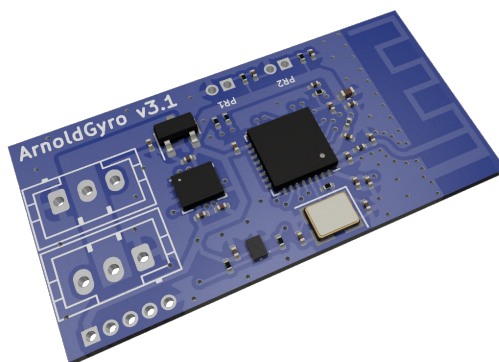


Obrázek 4.16. Impedančně kontrolovaná trasa k anténě s CLC filtrem (červeně) a trasy 3,3 V pro zajištění napájení mikrokontroléru (modře). Vylitá plocha *GND* je vyobrazena šedě.

### 4.4.3 Odporové děliče

I když provedení dvou odporových děličů, nacházejících se na modulu, je triviální, stojí za zmínku vzhledem k širokému spektru možností jejich použití.

Tyto odporové děliče jsou využívány např. v nášlapných plochách robota a gripperech, kde se nachází tlakové rezistory, pomocí kterých lze určit, jestli robot nášlapnou plochou stojí na zemi nebo ne, popř. jestli v gripperu drží předmět nebo ne. Zároveň je jeden odporový dělič na modulu na levé spodní končetině využit k připevnění fotorezistoru, kterým modul zjišťuje, jestli je na výstupu nabíjecích cívek napětí nebo ne<sup>1</sup>. Dále je možnost použít NTC rezistor pro monitorování teploty akumulátorů.



Obrázek 4.17. Finální deska modulu s inerciální měřicí jednotkou

---

<sup>1</sup>Na modulu nabíjecích cívek je umístěna LED dioda, která svítí, když se na cívce indukuje proud. Ta je přes 3D tištěný kryt, který brání vlivu vnějšího světla, nasměrována k fotorezistoru tak, aby v případě, že se robot nabíjí přes cívky, modul mohl dát signál pro vypnutí všech modulů.

# Kapitola 5

## Výsledky práce

### 5.1 Výsledný robot

Robot se skládá z 22 servomotorů, z čehož 17 je typu LX225 s vlastní elektronikou a zbylých 5 je typu MG90I. Robot je skoro 45 cm vysoký a jeho hmotnost činí cca 1,95 kg. Na robotovi se také nachází řada senzorů – 7 modulů s inerciální měřicí jednotkou, LiDAR senzor a kamera, tlakové senzory apod., data z nichž se přenáší do ovládací aplikace na počítači, která je napsána v jazyce C#. Na RPi Zero 2W na robotovi je za provozu spuštěn program v jazyce python.

Sestavený robot je vidět na obr. 5.1. Robot je schopný chůze, jejíž rychlost a plynulost je sice omezena jeho rozměry, nicméně plynulost rozjezdu a dojezdu servomotorů se povedlo vlastní elektronikou a programem vylepšit.

### 5.2 Možnosti využití ekosystému

Výsledný ekosystém se skládá z modulů na bázi ESP32-C3FH4, který poskytuje možnost zřetězeného zapojení a komunikace po pouhých třech drátech. Díky použitému obvodu na konverzi mezi full-duplex a half-duplex UART jsou moduly schopné komunikovat rychlostí až 2 250 000 baud – oproti původní rychlosti komunikace servomotorů, 115 200 baud, tedy skoro 20x





Obrázek 5.1. Obrázek výsledného robota.

rychleji. Toto umožňuje častější a rychlejší vyčítání hodnot z modulů a použití většího množství modulů než dříve. Všechny moduly využívají stejný základní program a je tak pro kohokoliv jednoduché vyvinout a začlenit do ekosystému svůj vlastní modul, kterému jen dodá další funkce navíc.

Vytvořený ekosystém se dá využít nejen pro chodícího robota sestaveného jako součást této práce, ale i pro jiné elektrotechnické projekty. Díky využití mikrokontroléru ESP32 se dá na modul navázat velké množství periférií, dodat WiFi a Bluetooth funkcionalita a přitom i přes svou kompaktní velikost nabízí poměrně velký výpočetní výkon[9]. Výsledné moduly jsou programovány v C++ a díky jednomu základnímu programu, do kterého se doplňují knihovny jednotlivých modulů se snadno programuje např. komunikace mezi různými typy modulů. Vyvinutý program pro moduly umožňuje připojení až 255 modulů na jednu sběrnici a tento limit se dá i dále navýšit, na rozdíl od

původních servomotorů.

Hlavní výhodou ekosystému jako takového je jeho modularita a možnost kompletně si přizpůsobit program modulů společně s možností řetězit moduly. Samotná deska ovládací elektroniky servomotorů je pak využitelná v případech, že u nějakého servomotoru uživateli nevyhovují dostupné funkce a chce nějaké přidat – u běžně prodávaných servomotorů, třeba právě LX225, možnost přeprogramovat servomotor většinou neexistuje, u vyvinutého modulu však ano.

Následuje krátký ilustrativní výčet možných využití tohoto ekosystému v dalších elektrotechnických projektech, s již představenými moduly nebo po vyvinutí dalších:

- Pohybliví roboti<sup>k</sup>
- Měřicí aplikace<sup>l</sup>
- Roje robotů, rojová komunikace<sup>m</sup>

---

<sup>k</sup>Zvláště u pohyblivých robotů je výhodné mít co nejméně kabelů které se mohou zamotávat do pohyblivých částí nebo zabírat moc místa. Zároveň se zde dá využít jak modul pro ovládání servomotorů, tak modul s inerciální měřicí jednotkou.

<sup>l</sup>K počítači zpracovávajícímu data se dají připojovat různé moduly pro měření odlišných veličin, počítač ale pomocí stejného programu dokáže vyčítat hodnoty ze všech modulů bez rozdílů.

<sup>m</sup>Zde se dá využít množství pinů ESP32, pomocí kterých se dají ovládat motory i senzory robota, zároveň lze pro komunikaci v roji na desku integrovat WiFi a Bluetooth. Pro WiFi a Bluetooth funkcionalitu lze přitom využít např. design již vyvinutého modulu s IMU

# Kapitola 6

## Závěr

Cílem této práce bylo rozšířit dvounohého kráčivého robota z předchozí práce o horní končetiny a hlavu – a sestavit tak humanoidního robota –, navrhnout novou elektroniku která by byla kompatibilní s nově vytvořenou mechanikou a přitom opět zajistit plynulost a stabilitu chůze.

Kvůli potřebě vytvořit menší servomotory byla navržena vlastní elektronika pro tyto nové malé, ale i původní servomotory, a následně vznikl i celý ekosystém těchto modulů společně s modulem s inerciální měřicí jednotkou.

Podářilo se vytvořit humanoidního robota (s nastavbovou deskou pro napájení modulů a nabíjení akumulátorů, vlastními moduly a programovací deskou na moduly), který je schopný chůze, uchopování předmětů a je bezdrátově ovládán z počítače pomocí nové aplikace. Celý ekosystém modulů, včetně souborů pro tisk malých servomotorů a softwaru, byl zveřejněn na platformě *GitHub*, kde je dostupný pro další projekty[21].

# Literatura

1. MATOUŠEK, Sebastian. *Dvounohý kráčivý robot* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://socv2.nidv.cz/archiv45/getWork/hash/2ab5dbf7-9360-11ed-acaf-005056bd6e49>.
2. SHENZEN HIWONDER TECHNOLOGY CO., LTD. *LX-225 Serial Bus Servo* [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: [https://drive.google.com/file/d/1pr601kQtqhHSa5RF-d3CSKa-asDpa7pb/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1pr601kQtqhHSa5RF-d3CSKa-asDpa7pb/view?usp=drive_link).
3. TEXAS INSTRUMENTS. *TPS61288 18-V, 15-A, Fully Integrated Synchronous Boost Converter* [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61288.pdf>.
4. TEXAS INSTRUMENTS. *Optimizing Transient Response of Internally Compensated dc-dc Converters With Feedforward Capacitor* [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva289b/slva289b.pdf?ts=1701600162194>.
5. RASPBERRY PI LTD. *Raspberry Pi Documentation* [online]. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#power-supply>.
6. TEXAS INSTRUMENTS. *TPS61322 6.5- $\mu$ A Quiescent current, 1.8-A switch current boost converter* [online]. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61322.pdf>.

7. MASWOOD, Ali I. *2.5 Snubber Circuits for Diode* [online]. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/snubber-circuit>.
8. NANJING TOP POWER ASIC CORP. *TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8* [online]. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>.
9. ESPRESSIF. *ESP32-C3 Series Datasheet* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf).
10. NEXPERIA. *PTVSxS1UR series 400 W Transient Voltage Suppressor* [online]. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: [https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2304140030\\_Nexperia-PTVS6V0S1UR-115\\_C294622.pdf](https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2304140030_Nexperia-PTVS6V0S1UR-115_C294622.pdf).
11. RS COMPONENTS LTD. *Everything You Need to Know About TVS Diodes* [online]. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/tvs-diodes-guide>.
12. ESPRESSIF. *ESP32-C3 Family Hardware Design Guidelines* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3\\_hardware\\_design\\_guidelines\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_hardware_design_guidelines_en.pdf).
13. ANALOG DEVICES, INC. *Using a UART to Implement a 1-Wire Bus Master* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/using-a-uart-to-implement-a-1wire-bus-master.html>.
14. TEXAS INSTRUMENTS. *INAx181 Bidirectional, Low- and High-Side Voltage Output, Current-Sense Amplifiers* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf>.

15. BRIDGMON, Jason. *INA180: Setup advice* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://e2e.ti.com/support/amplifiers-group/amplifiers/f/amplifiers-forum/647297/ina180-setup-advice>.
16. DAVIS, Nick. *An Introduction to Filters* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-filters/>.
17. TEXAS INSTRUMENTS. *Driving Voltage Reference Pins of Current-Sensing Amplifiers* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/sboa551/sboa551.pdf?ts=1702060822376>.
18. STMICROELECTRONICS. *LSM6DS3TR-C iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6ds3tr-c.pdf>.
19. ASPENCORE, INC. *Pi-Matching Impedance Network Calculator* [online]. [cit. 2023-12-31]. Dostupné z: <https://www.eeweb.com/tools/pi-match/>.
20. EVERYTHING RF. *Microstrip Impedance Calculator* [online]. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/microstrip-impedance-calculator>.
21. MATOUŠEK, Sebastian. *An ecosystem of electronics modules based on the ESP32-C3FH4 microcontroller capable of chained communication through half-duplex UART* [online]. [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://github.com/SebMatousek/ChainyModules>.

# Seznam zkratek

- DPS** deska plošných spojů. 5, 37, 38
- GPIO** General Purpose Input Output. 26
- HAT** Hardware Attached on Top. 7, 16, 17, 24
- I<sup>2</sup>C** Inter-Integrated Circuit. 36
- IMU** Inerciální měřicí jednotka. 8, 11, 23, 35, 36, 42
- LDO** Low Dropout Regulator. 29, 32
- LiDAR** Light Detection And Ranging. 10, 15, 40
- NTC** Negative Temperature Coefficient. 39
- RPi Zero 2W** Raspberry Pi Zero 2W. 7, 15, 16, 20, 40
- TVS** Transient Voltage Suppression. 23
- UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. 5, 9, 10, 23, 29, 35, 40

# Seznam obrázků

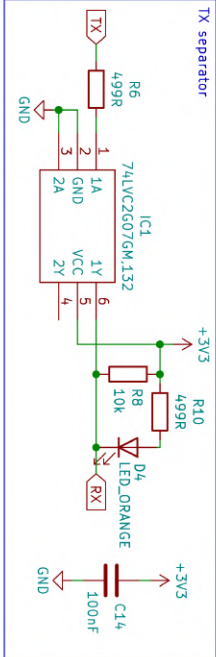
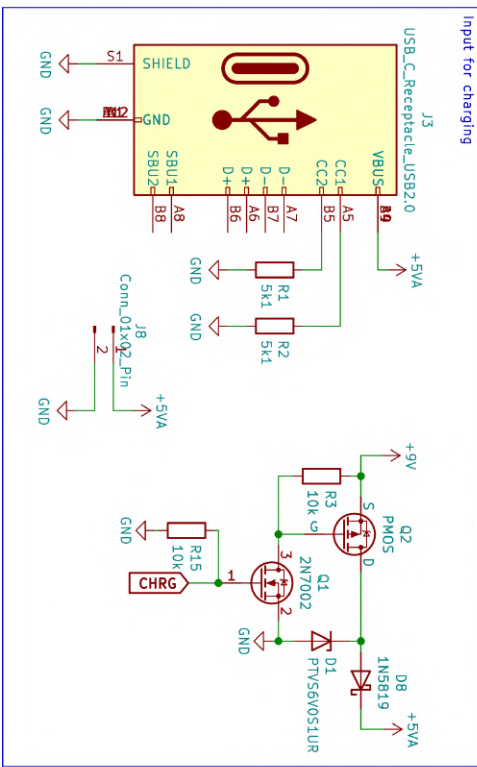
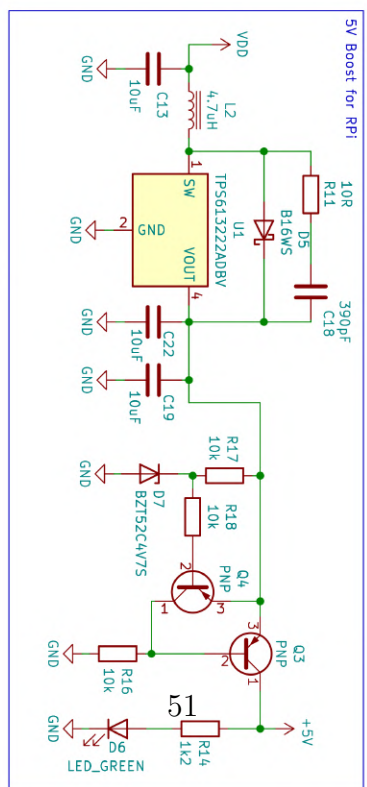
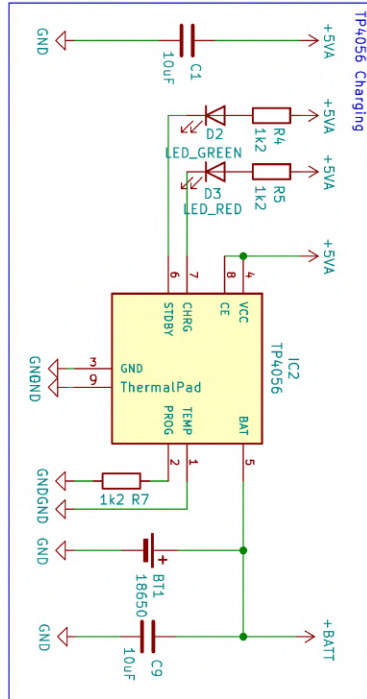
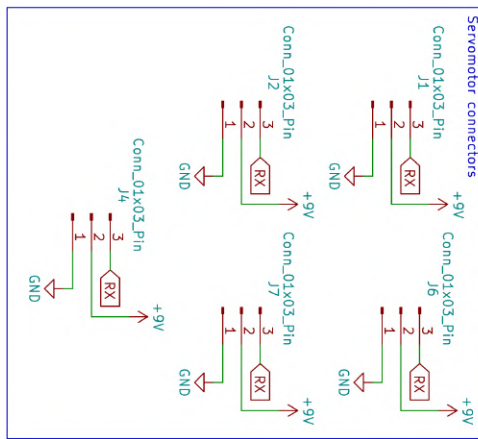
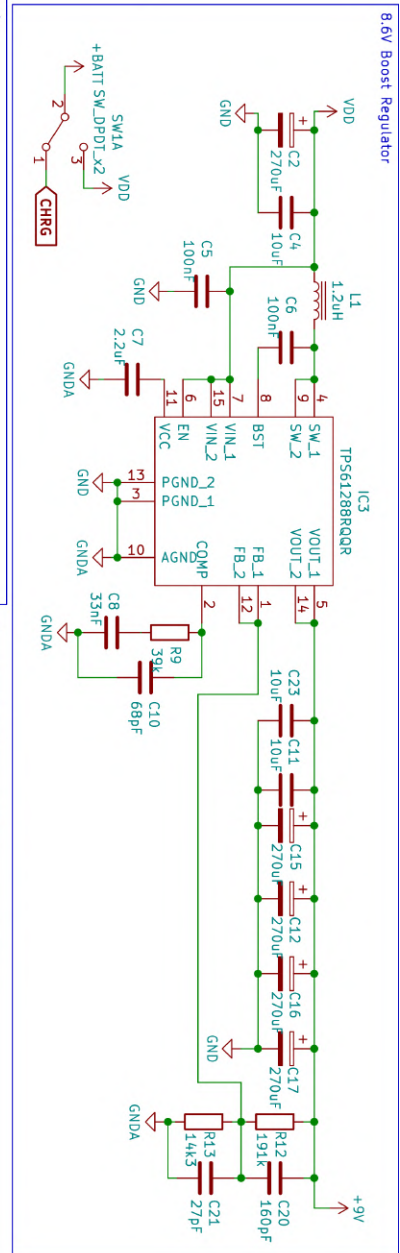
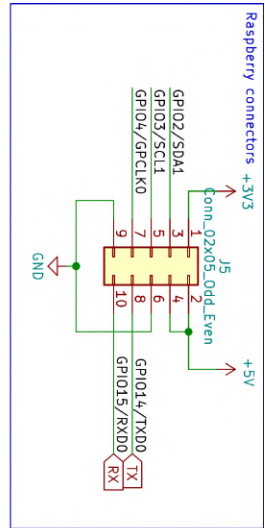
3.1	Rozložený pohled na konstrukci servomotoru MG90I . . . . .	13
3.2	Model levé horní končetiny robota . . . . .	15
4.1	Schéma spínacího boost regulátoru TPS61228 z 3,7 V na 8,65 V a až 6,2 A . . . . .	19
4.2	Vyobrazení naroutovaných cest pro regulátor. Šedě vylité plochy jsou <i>GND</i> , světle modrá je $V_{IN}$ , růžová <i>SW</i> a fialová $V_{OUT}$ . Ze spodní strany desky se pod celým zapojením regulátoru nachází prakticky nepřetržitá plocha <i>GND</i> . . . . .	20
4.3	Schéma pevného boost regulátoru TPS613222A z 3,7 V na 5 V a až 1,8 A . . . . .	21
4.4	Schéma nabíjecího obvodu s integrovaným obvodem TP4056, nabíjecím proudem až 1 A a dvěma LED diodami pro vyrozumění uživatele o stavu nabíjení. . . . .	22
4.5	Schéma obvodu pro oddělení vstupu nabíjecího obvodu při fungování robota a následnému nabíjení po položení na nabíjecí podložku. . . . .	23
24figure.caption.21		
4.7	Schéma zapojení mikrokontroléru ESP32-C3FH4 v základním modulu, s 40 MHz krystalem a LC filtrem . . . . .	28
4.8	Schéma desky na programování modulů pomocí pětipinového konektoru . . . . .	30
4.9	Deska na programování modulů pomocí pětipinového konektoru	30
4.10	Rozložené schéma zapojení H-můstku pro ovládání motoru . .	31



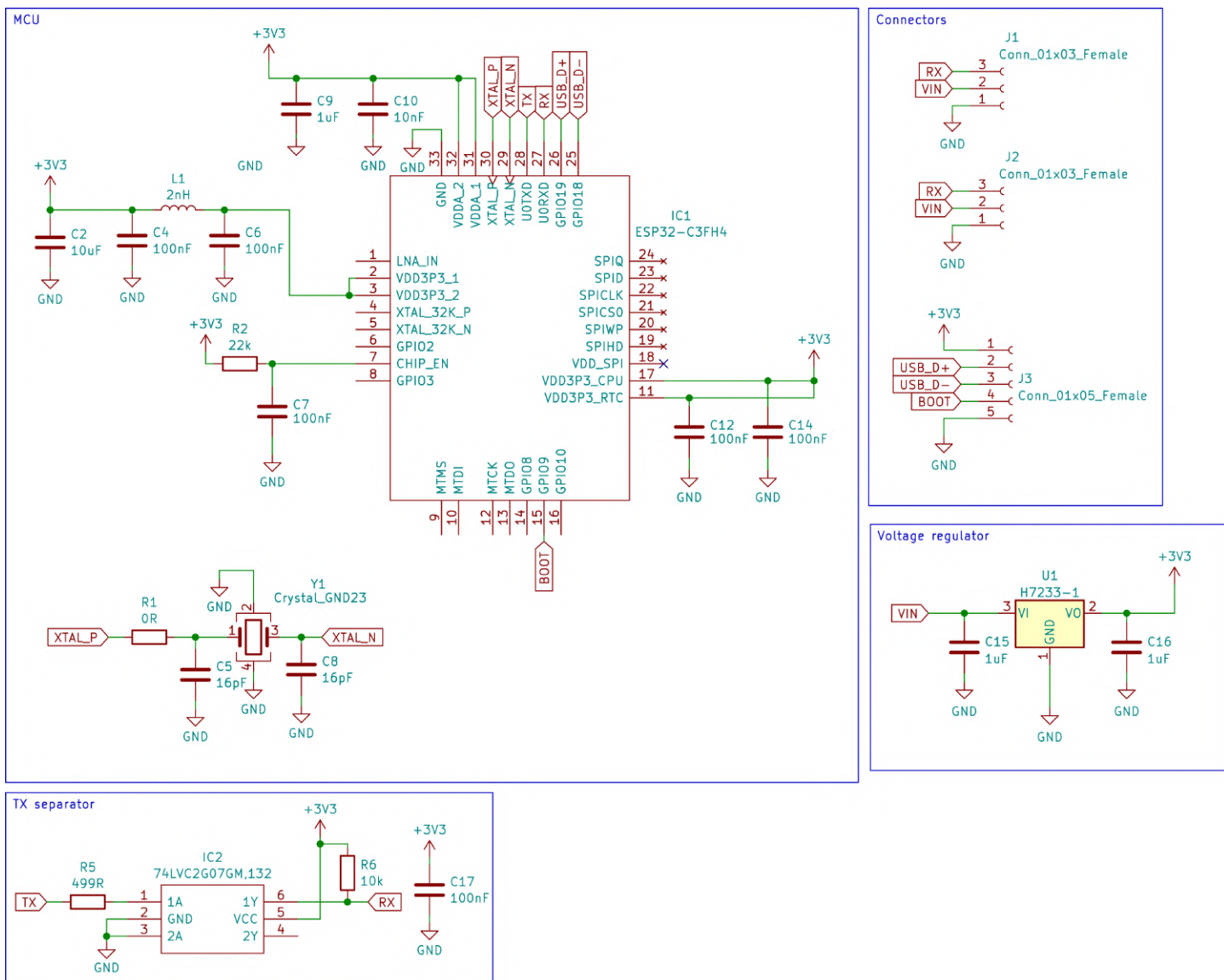
4.11	Vyobrazení zapojení potenciometru na desce . . . . .	32
4.12	Schéma zapojení čipu INA181 s low-pass filtrem . . . . .	35
4.13	Deska s rozšiřujícími konektory pro desku s ovládací elektro- nikou na servomotory . . . . .	36
4.14	Finální deska ovládací elektroniky pro servomotor . . . . .	36
4.15	Vyobrazení zapojení potenciometru na desce . . . . .	37
4.16	Impedančně kontrolovaná trasa k anténě s CLC filtrem (červeně) a trasy 3,3 V pro zajištění napájení mikrokontroléru (modře). Vylitá plocha <i>GND</i> je vyobrazena šedě. . . . .	38
4.17	Finální deska modulu s inerciální měřicí jednotkou . . . . .	39
5.1	Obrázek výsledného robota. . . . .	41
A.1	Schéma nastavbové desky s vyřešeným napájením robota a nabíjením akumulátorů . . . . .	51
A.2	Schéma základního modulu na základě ESP32-C3FH4 . . . . .	52
A.3	Schéma modulu ovládací elektroniky servomotorů . . . . .	53
A.4	Schéma desky adaptéru pro MG90I. Měřítko nákresu 1:0,308 . . . . .	54
A.5	Schéma modulu s inerciální měřicí jednotkou a anténou . . . . .	55
B.1	Nákres nastavbové desky. Měřítko 1:0,6 . . . . .	57
B.2	Nákres desky ovládací elektroniky se servomotory. Měřítko 1:0,289 . . . . .	58
B.3	Nákres desky s inerciální měřicí jednotkou. Měřítko 1:0,424 . . . . .	59

# Příloha A

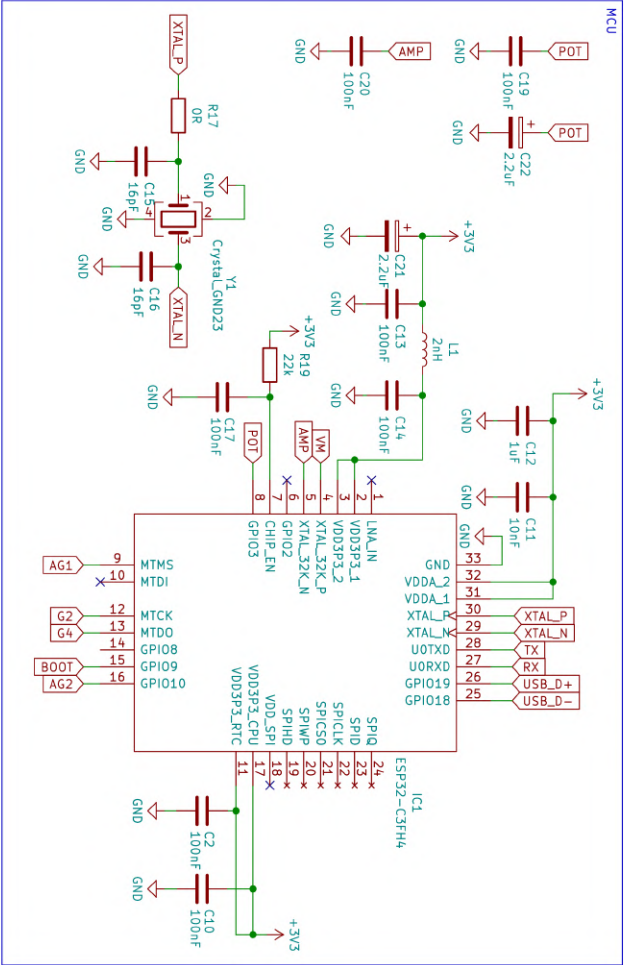
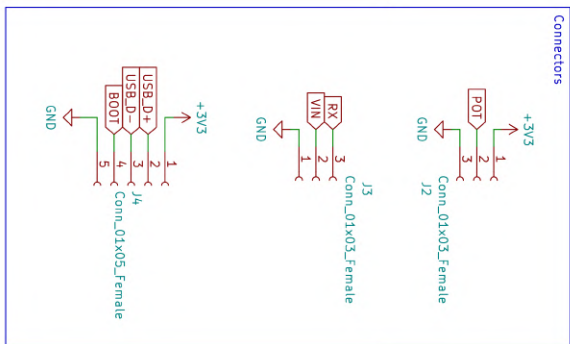
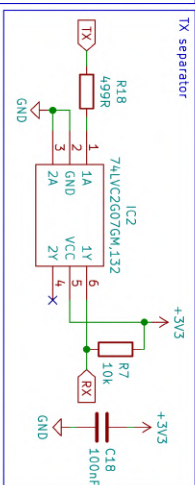
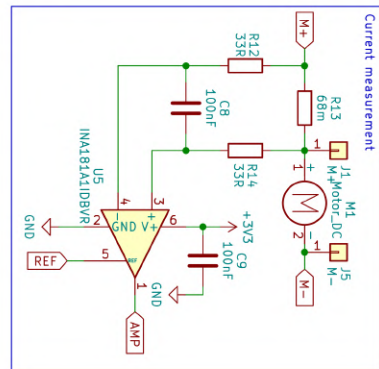
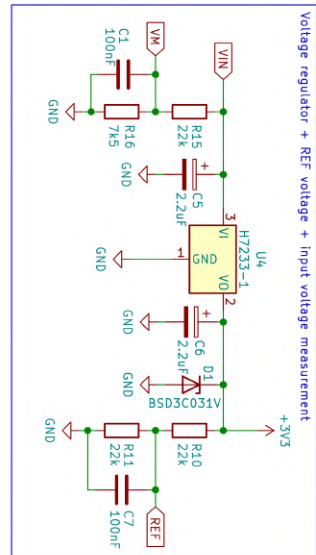
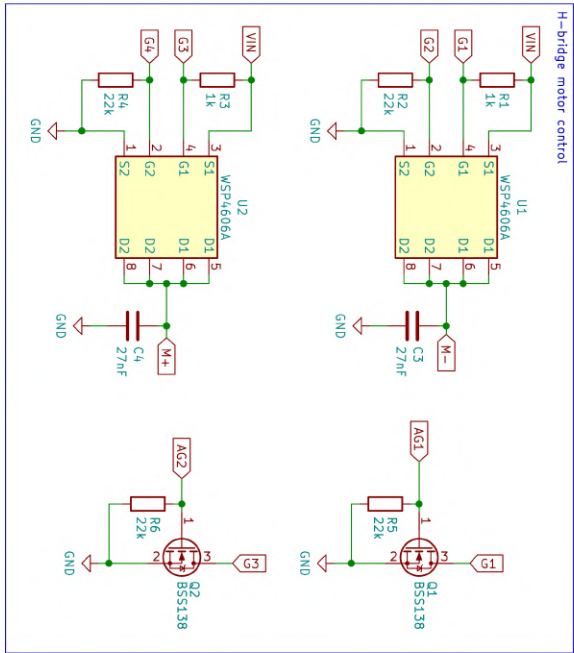
## Přiložená schémata zapojení



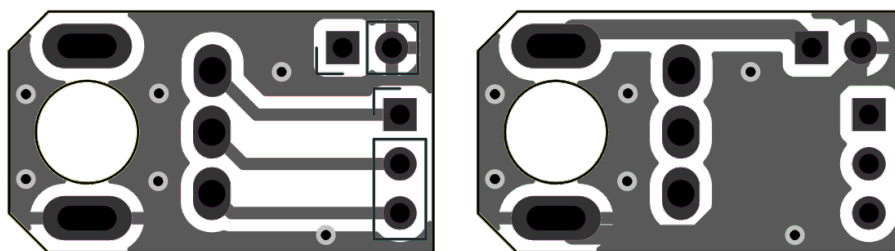
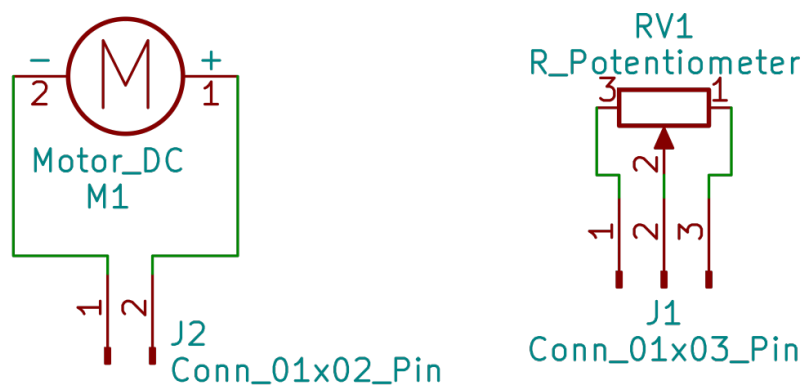
Obrázek A.1. Schéma nastavbové desky s vyřešeným napájením robota a nabíjením akumulátorů



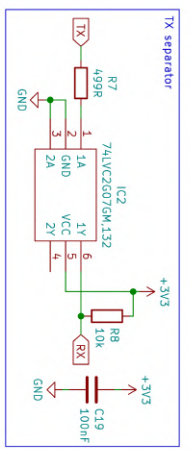
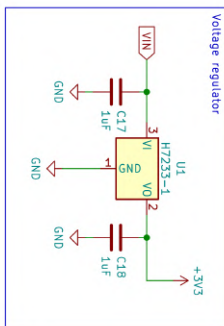
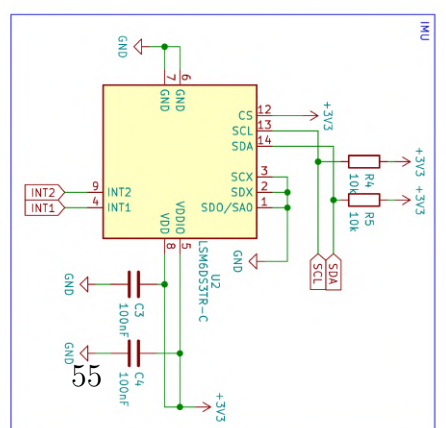
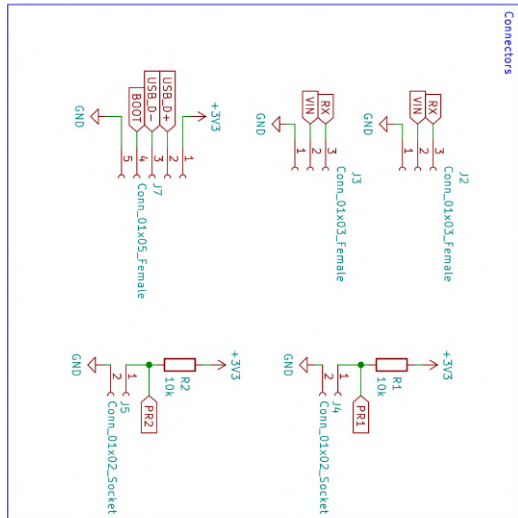
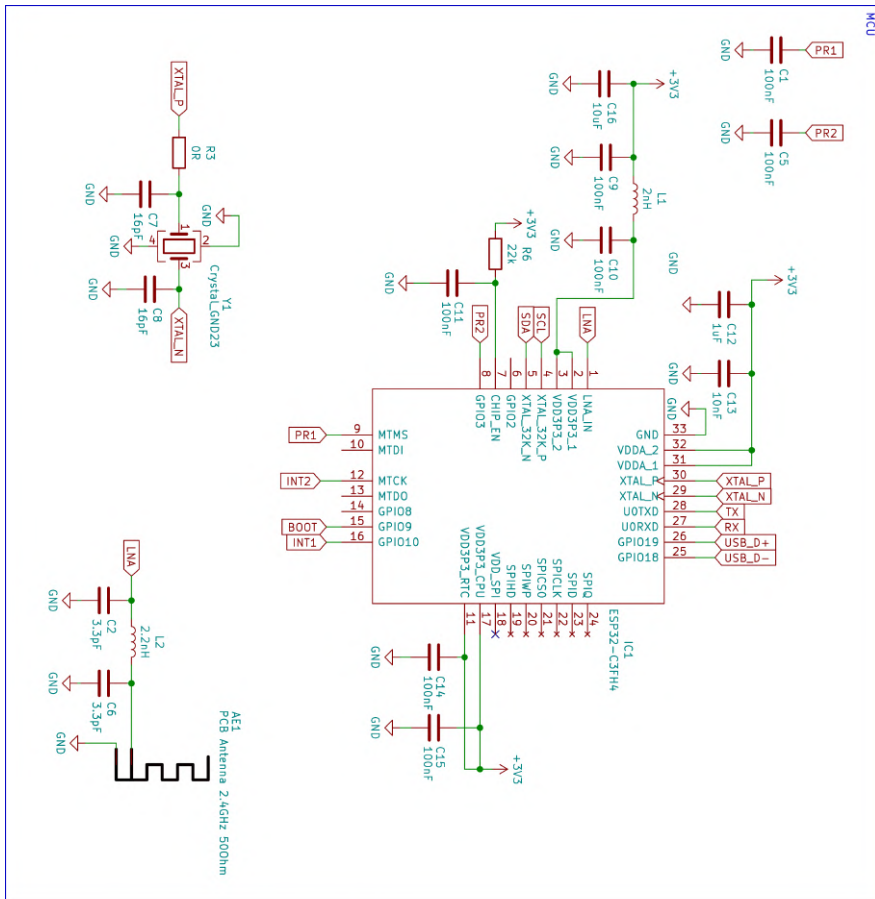
Obrázek A.2. Schéma základního modulu na základě ESP32-C3FH4



Obrázek A.3. Schéma modulu ovládací elektroniky servomotoru



Obrázek A.4. Schéma desky adaptéru pro MG90I. Měřítko nákresu 1:0,308

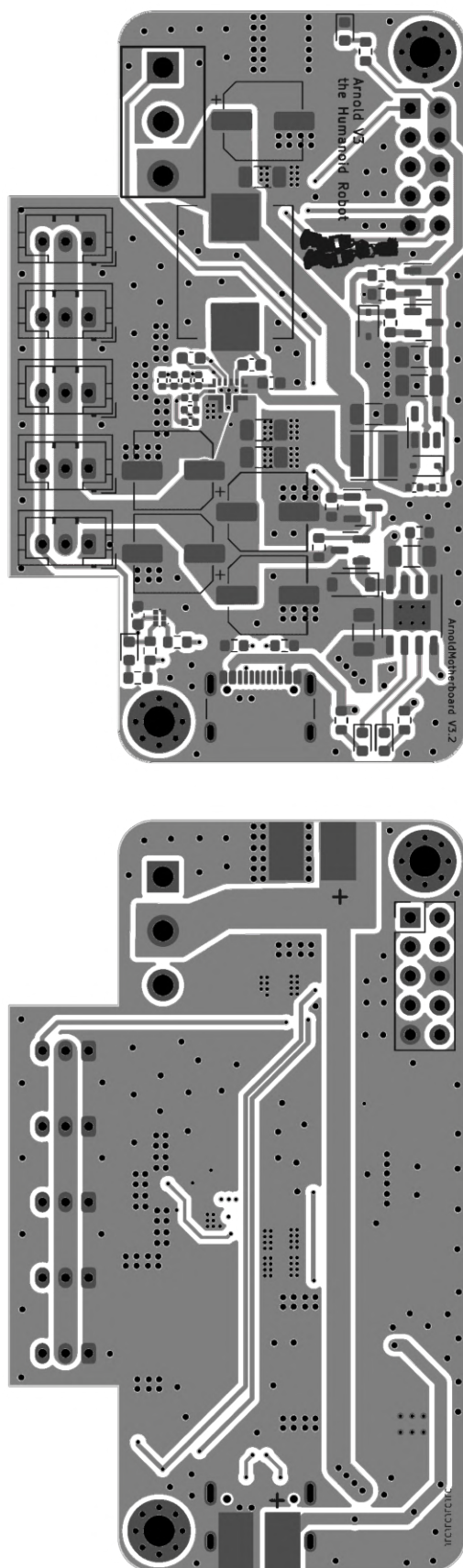


Obrázek A.5. Schéma modulu s inerciální měřicí jednotkou a anténou

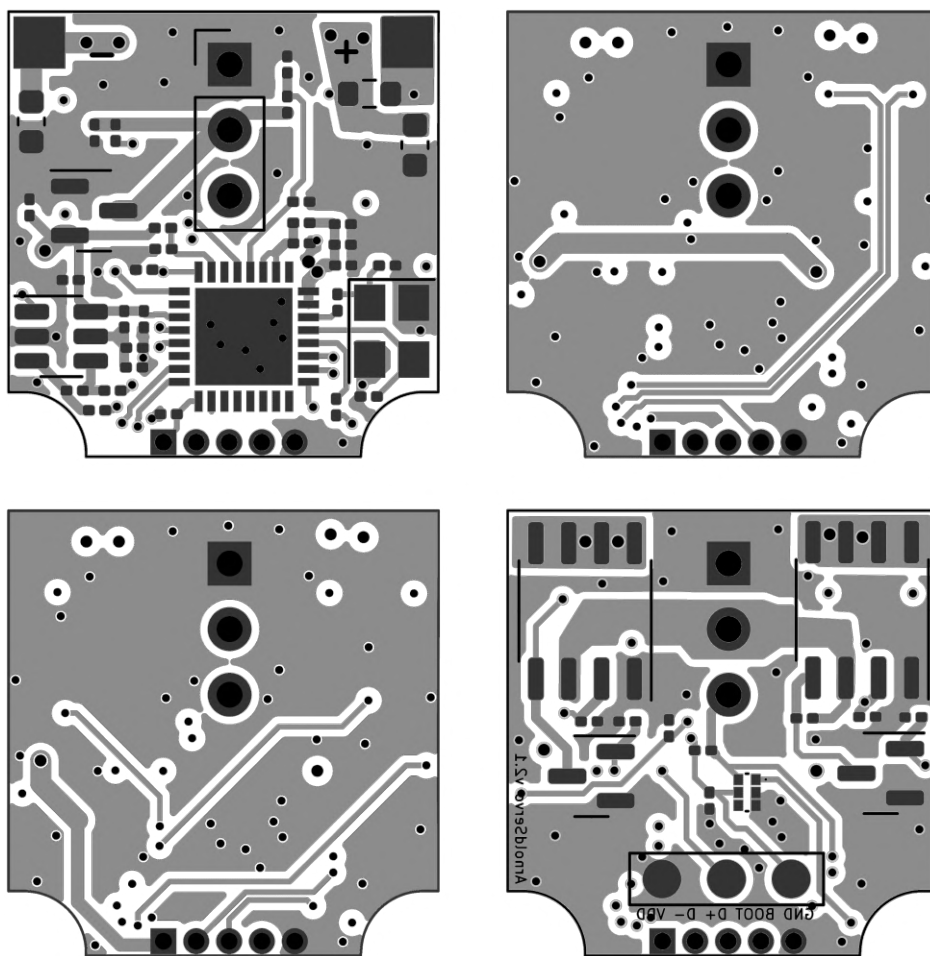
## Příloha B

### Přiložené nákresy desek

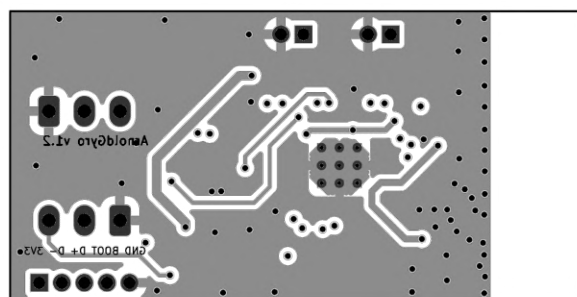
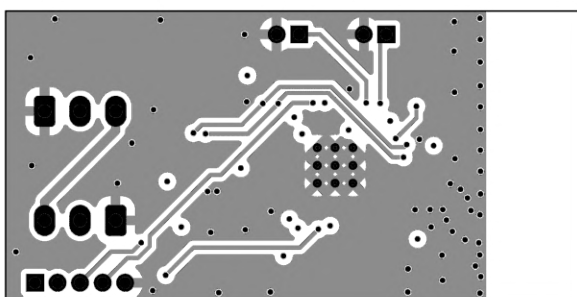
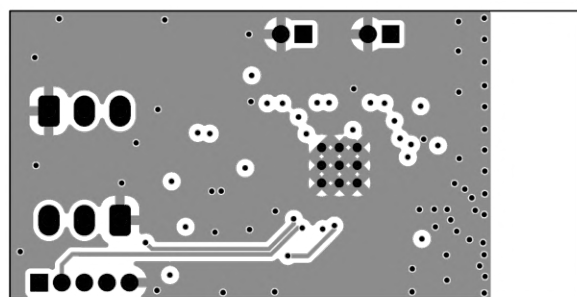
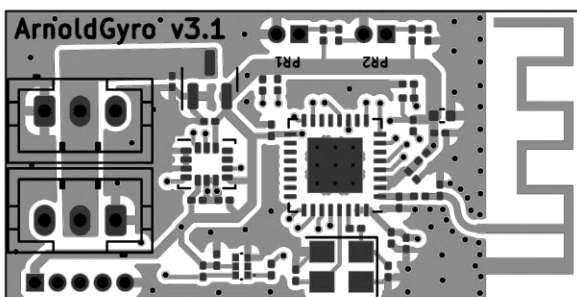




Obrázek B.1. Nákres nástavbové desky. Měřítko 1:0,6



Obrázek B.2. Nákres desky ovládací elektroniky se servomotory. Měřítko 1:0,289



Obrázek B.3. Nákres desky s inerciální měřicí jednotkou. Měřítko 1:0,424