

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor: 10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Dvounohý kráčivý robot

Sebastian Matoušek

Brno 2023

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

DVOUNOHÝ KRÁČIVÝ ROBOT

BIPEDAL WALKING ROBOT

AUTOR	Sebastian Matoušek
ŠKOLA	Gymnázium Matyáše Lercha, Brno
KRAJ	Jihomoravský
ŠKOLITEL	Ing. Marek Žák
OBOR	10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Brno 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou práci na téma *Dvounohý kráčivý robot* jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Marka Žáka 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 Ing. Marku Žákovi za veškerou jeho podporu a všechny čas, který do mě svou pomocí s prací vložil a díky kterému jsem byl schopen vyřešit všechny zádrhly, které se při práci vyskytly. Také bych chtěl poděkovat PhDr. Stanislavu Zajíčkovi za stylistickou a gramatickou kontrolu práce.

Anotace

Tato práce se zabývá vytvořením dvounohého kráčivého robota, návrhem a osazením jeho řídicí elektroniky a popisem vyvinutého softwaru pro osazené kontroléry. Výsledný robot je schopen samostatné chůze a automatické stabilizace.

Klíčová slova

Arnold Biped Robot, kráčivý robot, dvounohý robot, inteligentní servomotor

Annotation

This thesis deals with the creation of a bipedal walking robot, the design and assembly of its' electronics and the description of developed controller software. The resulting robot is capable of independent walking and automatic stabilization.

Keywords

Arnold Biped Robot, walking robot, bipedal robot, intelligent servomotor

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíle	9
3	Mechanická konstrukce robota	10
3.1	Výběr servomotorů	10
3.2	Analýza konstrukce servomotorů	12
3.3	Samotná konstrukce	13
4	Elektronická konstrukce robota	16
4.1	Řídicí elektronika	17
4.2	Akumulátory	18
4.2.1	Energetická hustota	18
4.2.2	Nabíjení	18
4.2.3	Dostupnost	19
4.3	Servomotory	19
4.3.1	Komunikace	19
4.3.2	UART protokol	23
4.3.3	Vlastní modul pro komunikaci se servomotory	24
4.4	HAT s kontrolérem na servomotory	25
4.4.1	ATmega328P	26
4.4.2	IMU MPU6050	27
4.4.3	Obvod pro komunikaci se servomotory	28
4.4.4	Převodník úrovní	30

4.4.5	Obvod pro měření teplot na akumulátorech	32
4.4.6	Externí programátor mikrokontroléru	32
4.5	Napájecí HAT	33
4.5.1	LDO regulátor	33
4.5.2	Nabíjecí obvod	34
4.6	Výroba a osazení DPS	39
5	Software	41
5.1	Aplikace	41
5.2	Program robota	43
6	Výsledky práce	44
7	Závěr	47
	Ostatní přílohy	48
	Literatura	50
	Seznam zkratk	51
	Seznam obrázků	53
	Seznam příloh	53
A	Schéma HAT s mikrokontrolérem	54
B	Schéma napájecího HAT	56

Kapitola 1

Úvod

V oboru robotiky se dnes vyvíjí množství robotů zaměřených na usnadnění či dokonce nahrazení lidské práce v nejrůznějších odvětvích, od rozvážení zásilek po záchranné akce. Jelikož je prostředí kolem nás přizpůsobeno tomu, aby se v něm pohybovali lidé, může být pro systémy pohybující se na kolech či pásech obtížné vykonávat činnosti, které člověk za pomoci dvou končetin zvládne přirozeně a efektivně. V některých případech proto mohou být výrazně efektivnější humanoidní roboti, tedy roboti podobající se svou konstrukcí stavbě lidského těla.

Už od dětství mě fascinovali roboti, kteří se dokázali pohybovat po dvou nohách, a simulovat tak lidskou chůzi. Proto jsem se rozhodl navrhnout a zprovoznit vlastního dvounohého kráčivého robota, který by byl schopen samostatného pohybu.

V této práci bude čtenář seznámen nejprve s konstrukcí robota, dále bude vysvětlena jeho elektronická část a aplikace vyvinutá k ovládání a monitorování robota. Ke konci se práce bude věnovat parametrům a praktickým výsledkům sestaveného robota.

Kapitola 2

Cíle

Cílem tohoto projektu je sestavit funkčního, dvounohého kráčivého robota, kterého bude následně možné rozšířit o horní končetiny a hlavu. Mým hlavním cílem bylo napodobit co nejvěrněji plynulost a stabilitu lidské chůze.

Konkrétně jsem si stanovil tyto cíle, které projekt musel splňovat:

- dvě nohy, po kterých se robot bude pohybovat
- rozměry v měřítku s lidským tělem
- přirozená, plynulá a stabilní chůze robota
- tvorba 3D modelu za účelem simulace a 3D tisku jednotlivých dílů
- vytvořit vlastní plošný spoj vlastnoručně osazený SMD součástkami
- možnost následného rozšíření o horní končetiny a hlavu
- vývoj vlastní počítačové aplikace, která bude schopna bezdrátově monitorovat a ovládat robota

Kapitola 3

Mechanická konstrukce robota

Před vývojem elektroniky robota bylo nejprve nutné sestrojít mechanickou konstrukci skládající se ze dvou končetin, po kterých se robot bude pohybovat, a trupu, který ponese elektroniku a bude sloužit jako platforma pro budoucí nástavby.

Vývoj mechaniky spočíval v návrhu takové konstrukce robota, která by umožnila pohyb i zatačení v co nejvíce směrech – čím více bude směrů, do kterých se robot může pohybovat, tím plynulejší a přirozenější bude jeho výsledná chůze.

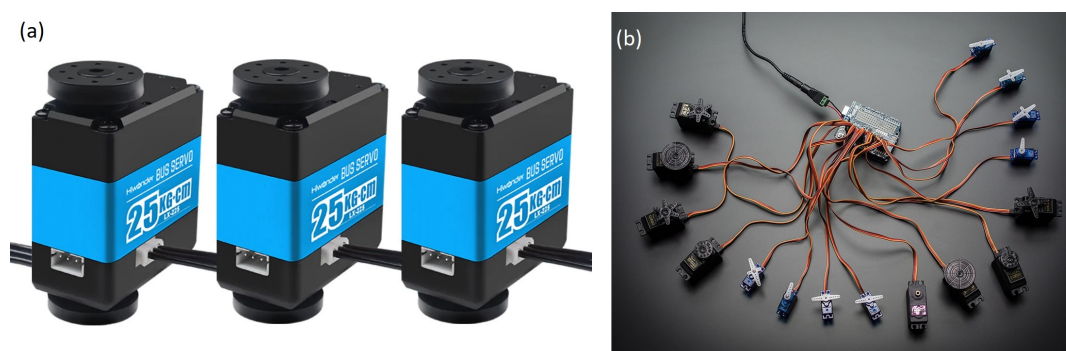
Tato kapitola se věnuje návrhu konstrukce a její následné realizaci pomocí 3D tisku.

3.1 Výběr servomotorů

Nejpodstatnější součástí konstrukce robota jsou servomotory, které zajišťují jeho pohyb. Proto bylo důležité vybrat takové motory, které by robota unesly a zároveň byly dostatečně přesné a neovlivňovaly tak přes příliš stálost jeho chůze. Čím výše v konstrukci je servomotor umístěn, tím méně hmotnosti musí nést, naopak servomotory umístěné úplně ve spodní části konstrukce mohou v určitou chvíli nést celou hmotnost robota. I v takovém případě ale musí být schopny bez problému se pohybovat, aby nijak neomezovaly

funkčnost celého systému.

Společně s důrazem na sílu bylo třeba také dbát na skutečnost, že každý další servomotor s sebou nese nutnost dalšího kabelu, sloužícího ke komunikaci a napájení. Proto byly v konstrukci využity tzv. inteligentní servomotory – speciální pohonné jednotky komunikující po sériové sběrnici, umožňující zřetěžené zapojení. Servomotory se tak dají ovládat i pomocí jediného kabelu (viz obrázek 3.1).

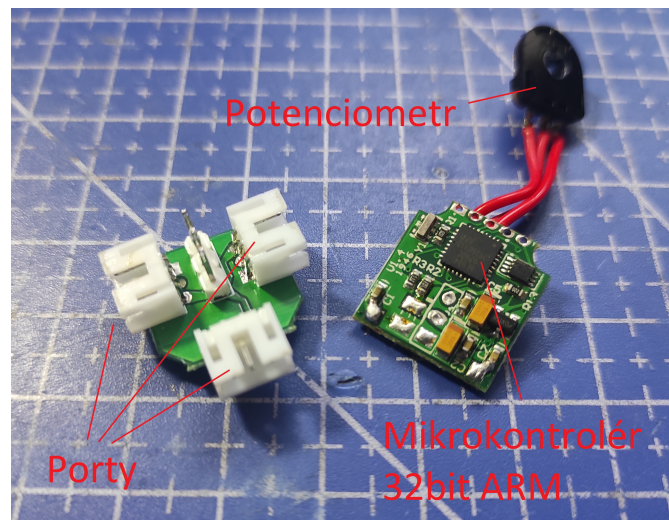


Obrázek 3.1. Možnosti zapojení servomotorů. (a) Řetězené zapojení servomotorů^a, (b) tradiční zapojení^b.

Tyto požadavky výběr velice zúžily, jelikož druhů těchto servomotorů není, v cenové kategorii dostupné pro tento projekt, mnoho. Nakonec byl pro tento účel zvolen servomotor LX-225, který má kroutivý moment přibližně 2,45 N.m a je možné zřetězit až 254 jednotlivých servomotorů za sebou. Tato výkonnost nicméně znamená, že servomotory potřebují napájecí napětí okolo 8 V a v blokováném stavu, tz. servomotor je natolik zatížen, že se nedokáže pohnout, proud až 3–4 A. Vzhledem ke skutečnosti, že těchto servomotorů robot používá 13, mohl by teoreticky celkový proud v robotovi v součtu s ostatní elektronikou dosáhnout až 40 A, nicméně v praxi proud nepřesahuje 4 A – nedochází totiž k blokaci servomotorů, které, pokud by narazily na překážku v podobě nějaké části končetiny, jednoduše tuto končetinu zlomí.

^aPřevzato z: <https://hiwonder.hk/products/hiwonder-lx-225-serial-bus-servo-25kg-high-torque-data-feedback#gallery-4>, 08.02.2023.

^bPřevzato z: <https://cdn-shop.adafruit.com/970x728/1411-00.jpg>, 08.02.2023.



Obrázek 3.3. DPS servomotorů LX-225

3.3 Samotná konstrukce

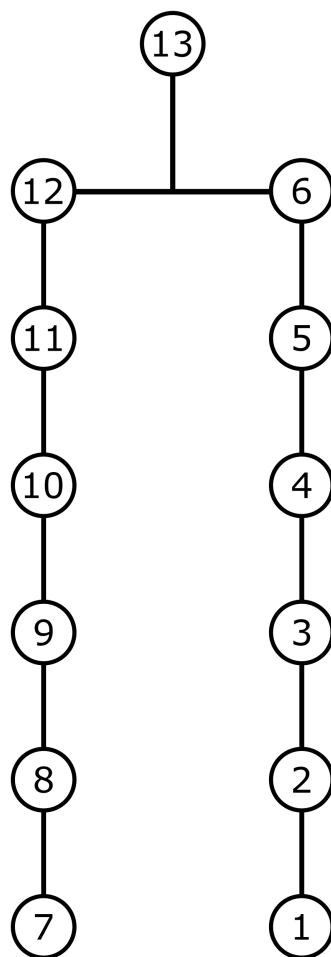
Při konstrukčním návrhu robota bylo důležité hlavně to, aby se robot byl schopný pohybovat do všech nutných směrů. Jako výborná inspirace sloužila lidská noha, nicméně komplexita této lidské končetiny musela být omezena na několik jednotek serv, aby návrh byl proveditelný.

Konstrukce robota byla modelována v programu SolidWorks 2021. Výsledný robot sestává ze dvou symetrických končetin zakončených širokou nášlapnou plochou, jež lépe zachovává stabilitu robota při chůzi. Na dvou končetinách je připevněn trup, nesoucí elektroniku robota (obr. 3.4).



Obrázek 3.4. 3D model robota v CAD programu

Celý robot používá 13 servomotorů – 6 pro každou končetinu a jeden v trupu –, a má tedy celkem 13 stupňů volnosti. Konstrukci robota lze popsat acyklickým grafem jako na obrázku 3.5, jedná se tedy o otevřený kinematický řetězec[2].



Obrázek 3.5. Kinematický graf robota

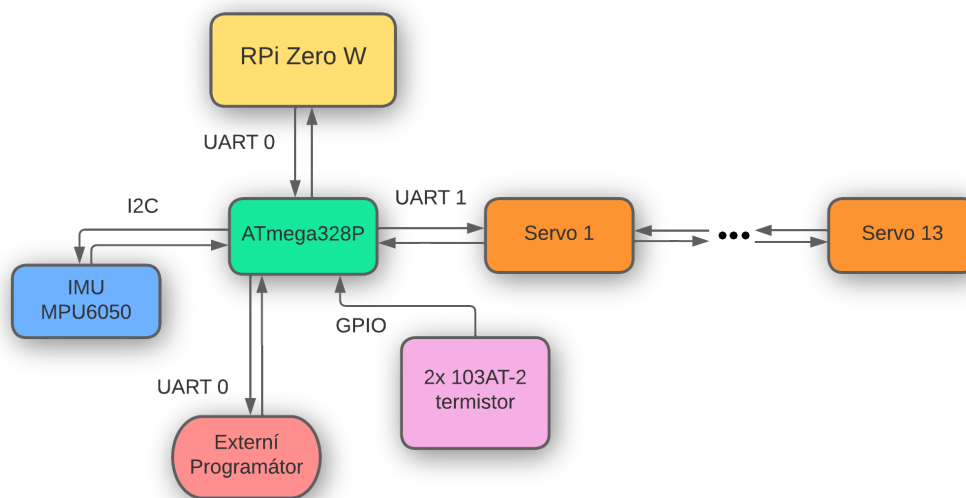
Všechny potřebné mechanické části byly následně vytištěny na 3D tiskárně Prusa MK3S a robot byl sestaven do své finální podoby za použití šroubů a matic, díky čemuž je možné robota kompletně rozebrat. Na bok končetin byly umístěny tři tištěné svorky pro uchycení kabeláže servomotorů.

Kapitola 4

Elektronická konstrukce robota

Paralelně s mechanikou byla vyvíjena i elektronika robota. Především bylo důležité se rozhodnout, jakým způsobem bude robot ovládán, jak vyřešit komunikaci se servy a jak zařídit napájení, které by zajistilo dostatečně dlouhou funkčnost robota.

Blokové schéma na obr. 4.1 znázorňuje všechny zapojené periferie robota. Řídicí jednotkou je zde Raspberry Pi Zero W, na které běží program a ke které se dá přistupovat přes WiFi pomocí SSH protokolu. Tento mikroprocesor dále komunikuje pouze s mikrokontrolérem ATmega328P přes UART sběrnici, a tento mikrokontrolér zajišťuje zbytek komunikace s periferiemi. K těm se řadí všech 13 servomotorů, IMU MPU6050 a dva termistory 103AT-2 pro měření teploty akumulátorů.



Obrázek 4.1. Blokové schéma logických prvků robota

4.1 Řídicí elektronika

Už ze začátku bylo zřejmé, že robota bude třeba ovládat bezdrátově. Také bylo nutné použít takový mikrokontrolér/mikroprocesor, který dokáže komunikovat pomocí UART sběrnice, jelikož se pomocí tohoto protokolu ovládají servomotory.

Jako řídicí elektroniku jsem nakonec vybral Raspberry Pi Zero W. Pro tento projekt jsou důležité následující parametry tohoto mikroprocesoru:

- možnost bezdrátového připojení po SSH
- UART sběrnice
- kompaktní rozměry
- možnost přidání dalších náročných periférií (např. kamery)
- schopnost spustit program vysokoúrovňového programovacího jazyka

4.2 Akumulátory

Jelikož měl robot být schopen chodit samostatně, bylo nutné vybavit ho akumulátory, které by ho napájely a daly by se umístit na konstrukci robota. K tomuto byl původně zvolen Li-Po akumulátor se jmenovitým napětím 7,4V, aby zvládl napájet servomotory bez nutnosti konverze – ta by totiž za velkých proudů měla poměrně vysoké ztráty a byly by na ni potřeba výkonné součástky s chladičem, který by měl velké rozměry, a zabíral by tak místo na plošném spoji. Také byl plán akumulátory umístit spolu s elektronikou nad končetiny, tím pádem jakákoliv hmotnost navíc (např. chladiče) posunuje těžiště robota nahoru, čemuž byl cíl se vyhnout.

Li-Po akumulátor byl posléze nahrazen dvěma sériově zapojenými Li-Ion akumulátory Murata US18650VTC5A[3] ze tří hlavních důvodů:

- Li-Ion mají větší energetickou hustotu
- Li-Po akumulátory se těžko nabíjí
- Akumulátory typu 18650 jsou velmi běžné

4.2.1 Energetická hustota

Čím více energie se dá uložit do akumulátoru, tím déle bude schopen napájet robota. Díky větší energetické hustotě Li-Ion akumulátorů byla celková hmotnost akumulátoru snížena z 80 g na 50 g (2x 25 g) a kapacita navýšena z 2500 mAh o dalších 100 mAh.

4.2.2 Nabíjení

Součástí elektroniky robota měl být i nabíjecí obvod umožňující robota nabíjet bez nutnosti vyjmout akumulátory.

Nicméně Li-Po akumulátory, pokud jsou nabíjeny či balancovány nesprávně, mohou snadno explodovat, a i když je tomu tak i u Li-Ion akumulátorů, je toto nebezpečí nepoměrně menší[4][5]. Existuje mnoho integrovaných obvodů a kompaktních modulů na nabíjení Li-Ion akumulátorů, na

Li-Po akumulátory je doporučeno používat výhradně k tomu určené profesionální nabíjecí stanice, jinak hrozí nebezpečí požáru či exploze.

4.2.3 Dostupnost

Akumulátory 18650 jsou velmi rozšířené a dají se tak sehnat poměrně levně s dobrými vlastnostmi. To je výhodné jednak proto, že lze, v případě potřeby, dokoupit akumulátory s větší kapacitou, a jednak proto, že akumulátorů lze mít několik za stejnou cenu co jeden Li-Po akumulátor a v případě potřeby nějaký článek nahradit.

4.3 Servomotory

Servomotory u robota představují svaly a klouby. Umožňují pohyb robota, nicméně na rozdíl od lidských kloubů mají pouze jeden stupeň volnosti – umí se pohybovat pouze v jednom směru. Toto omezení je potřeba vzít v potaz při návrhu konstrukce robota, jelikož výrazně omezuje směry pohybu jednotlivých částí končetin robota. Také mají oproti svalům horší poměr mezi výkonem a hmotností, s čímž je také nutné počítat při návrhu.

4.3.1 Komunikace

Komunikace se servy LX-225 probíhá po UART sběrnici. Servomotor a počítač, který ho ovládá, si mezi sebou posílají tzv. pakety – jedná se o instrukce pro motor, nebo naopak informace pro počítač. Jednotlivé instrukce pro servomotor jsou vidět na obr. 4.3. Pozorný čtenář si může povšimnout, že v seznamu jsou i instrukce mající v názvu zkratku LED, a měly by tedy mít co do činění s ovládáním LED diod v servomotoru. Tyto instrukce jsou pro tento servomotor nicméně nadbytečné – od stejného výrobce jsou i jiné motory, které mají zabudovanou RGB LED diodu, nicméně servomotor LX-225 žádnou nemá.

Formát instrukcí

Nyní bude představen formát instrukcí pro servomotory. Instrukce používají všechny stejný formát, který umožňuje zakódovat všechna potřebná data.

Header	ID number	Data Length	Command	Parameter	Checksum
0x55 0x55	ID	Length	Cmd	Prm 1... Prm N	Checksum

Obrázek 4.2. Formát instrukce pro servomotor

Instrukce vždy začíná dvěma byty 0x55. Tyto dva byty si můžeme představit jako jakési upozornění, které dá všem motorům vědět, že přichází nějaká instrukce určená pro servomotory. Další byte je ID servomotoru. Tento byte servomotor dělá tím, čím je – umožňuje poslat všem servům jednu instrukci po stejném drátu, nicméně vykoná ji pouze ten servomotor, které má stejné ID jako v instrukci. Čtvrtý byte je délka instrukce, do níž se započítávají všechny byty od čtvrtého dále. Například instrukce

Header		ID	Data Length	Cmd	Checksum
0x55	0x55	0x01	0x03	0x0C	0xFA

má délku 3, jelikož po čtvrtém bytu následují ještě další dva. Pátý byte je číslo instrukce. Další čtyři byty jsou dobrovolné parametry (1 parametr = 2 byty) k instrukcím, např. na jakou pozici se má servomotor pohnout a s jakou rychlostí. Poslední byte je pak checksum – kontrolní součet všech bytů sloužící k ověření správnosti doručení (pokud je tento údaj nesprávný, servomotor instrukci jednoduše zahodí, protože se stala nějaká chyba v komunikaci a bylo by potencionálně nebezpečné, kdyby ji motor provedl).

Instrukce pro servomotor s ID 1, aby se nastavil na pozici 500 (rozsah servomotoru je 0–1000, který pokrývá 240°) rychlostí 800 (rychlost říká, za jak dlouho by servomotor urazil celý svůj rozsah v ms), by pak vypadala následovně:

Header		ID	Len	Cmd	Parametr 1		Parametr 2		Sum
0x55	0x55	0x01	0x07	0x01	0xF4	0x01	0x52	0x03	0xAC

Read instrukce

Servomotor dokáže odpovídat na různé dotazy, např na jaké pozici je, jaké má vstupní napětí atd. Nikdy však neposílá tyto informace samovolně, vždy se ho musíme prvně dotázat nějakou z instrukcí (v tabulce 4.3 označeny příponou _READ). Informace zpět ze servomotoru poté mají obdobný formát jako instrukce pro servomotor (opět 4.3). Pošle header, svoje ID, číslo instrukce na kterou odpovídá, délku odpovědi (opět délka od tohoto bytu dál) a v následujících bytech pošle data v odpovědi na dotaz (pozice, napětí, teplota, ...) a poslední byte je jako vždy checksum.

Command name	Command value	Length
SERVO_MOVE_TIME_WRITE	1	7
SERVO_MOVE_TIME_READ	2	3
SERVO_MOVE_TIME_WAIT_WRITE	7	7
SERVO_MOVE_TIME_WAIT_READ	8	3
SERVO_MOVE_START	11	3
SERVO_MOVE_STOP	12	3
SERVO_ID_WRITE	13	4
SERVO_ID_READ	14	3
SERVO_ANGLE_OFFSET_ADJUST	17	4
SERVO_ANGLE_OFFSET_WRITE	18	3
SERVO_ANGLE_OFFSET_READ	19	3
SERVO_ANGLE_LIMIT_WRITE	20	7
SERVO_ANGLE_LIMIT_READ	21	3
SERVO_VIN_LIMIT_WRITE	22	7
SERVO_VIN_LIMIT_READ	23	3
SERVO_TEMP_MAX_LIMIT_WRITE	24	4
SERVO_TEMP_MAX_LIMIT_READ	25	3
SERVO_TEMP_READ	26	3
SERVO_VIN_READ	27	3
SERVO_POS_READ	28	3
SERVO_OR_MOTOR_MODE_WRITE	29	7
SERVO_OR_MOTOR_MODE_READ	30	3
SERVO_LOAD_OR_UNLOAD_WRITE	31	4
SERVO_LOAD_OR_UNLOAD_READ	32	3
SERVO_LED_CTRL_WRITE	33	4
SERVO_LED_CTRL_READ	34	3
SERVO_LED_ERROR_WRITE	35	4
SERVO_LED_ERROR_READ	36	3

Obrázek 4.3. Seznam instrukcí pro servomotor

Write instrukce

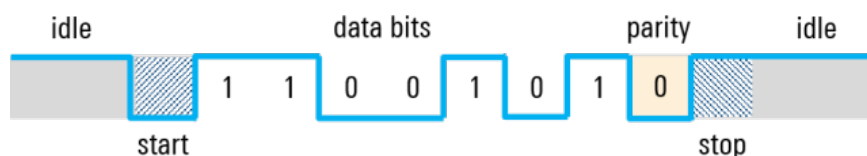
Díky zabudované paměti jsou servomotory schopné ukládat si určité hodnoty, např. odchylku od pozice, limity (třeba že se nesmí otočit pod pozici 200, omezujeme tedy jejich funkční rozsah). Tyto hodnoty se zapisují pomocí instrukcí s příponou _WRITE. Můžeme pomocí nich ukládat tyto hodnoty:

- rychlost otáčení
- id servomotoru
- odchylku
- limity (spodní a horní)
- omezení vstupního napětí (jak minimum tak maximum)
- maximální pracovní teplotu
- mód servomotoru (poziční ovládání/kontinuální otáčení)

4.3.2 UART protokol

UART značí Universal Asynchronous Receiver-Transmitter a, jak už název napovídá, jedná se o protokol pro asynchronní komunikaci, tz. nepotřebuje časovací pulz (tzv. clock)[6]. Je to poměrně prostý protokol a pro komunikaci využívá pouze dva piny. Tyto piny se nazývají RX (sloužící pro příjem dat) a TX (sloužící pro posílání dat). Jak je vidět z obrázku 4.4, je výchozí stav sériové sběrnice logická 1. Když chce jedna strana poslat nějaká data, musí tuto logickou jedničku stáhnout na 0.

Existují tři hlavní módy komunikace. Jednak simplex, kde data posílá pouze jedna strana, half-duplex, při které mohou posílat data obě strany – ne však zároveň – a full-duplex, u které mohou posílat data obě strany zároveň.



Obrázek 4.4. Příklad přenosu dat pomocí UART protokolu. Převzato z [6].

4.3.3 Vlastní modul pro komunikaci se servomotory

Servomotory LX-225, které používám, komunikují pomocí half-duplex, jelikož mají pro komunikaci k dispozici pouze jeden drát (zbylé dva jsou napájení a země).

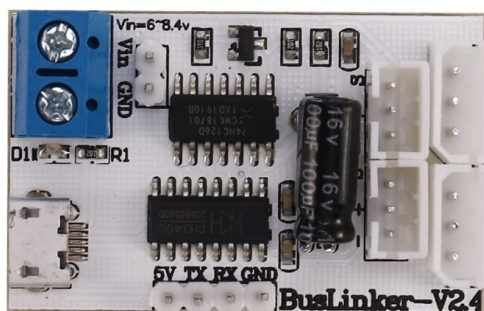
Pro účel převodu full-duplex UART komunikace (nejběžnější mód) slouží modul výrobce (4.5). Jeho úkolem je, společně s překladem USB protokolu, používaného pro ovládání motorů počítačovou aplikací přes USB kabel, převést UART komunikaci z full-duplex na half-duplex.

Nicméně tento modul byl velice nespolehlivý a často nefungoval správně. Proto jsem se rozhodl ho nahradit.

Nahrazení softwarově

Nejjednodušší řešení pro nahrazení modulu by bylo softwarové, protože pár řádků kódu je levnější a efektivnější než stejně funkční řešení pomocí další elektroniky. Spojení pinů RX a TX společně se softwarovým filtrováním komunikace by zcela odstranilo nutnost používat původní modul.

^bPřevzato z: <https://hiwonder.hk/products/hiwonder-ttl-usb-debugging-board>, 08.02.2023.



Obrázek 4.5. Modul pro komunikaci se servy^b. Tento modul byl dodán společně se servomotory, nicméně kvůli své nespolehlivosti byl nahrazen čipem ATmega328P na vlastní desce plošných spojů.

Toto řešení fungovalo ve směru z mikroprocesoru do servomotorů. Servomotorům je ale možné poslat i příkazy, na které odpoví, a lze se jich tak dotazovat na jejich polohu, vstupní napětí atd. Když se ale Raspberry takto „zeptalo“ serv, stávalo se, nestihlo zpětný signál od serva zachytit, což znemožňovalo spolehlivé čtení hodnot.

Nahrazení hardwarově

Proto bylo navrženo komplexnější, hardwarové řešení. Místo použití původního modulu byl použit mikrokontrolér ATmega328P[7] – ze začátku používán v podobě Arduina Pro Mini – který řídil komunikaci místo modulu od výrobce servomotorů.

4.4 HAT s kontrolérem na servomotory

Brzy se nicméně ukázala nepraktičnost mít mikrokontrolér zapojený jednotlivými kabely a visící volně ve vzduchu. Následoval tedy návrh vlastního plošného spoje, který byl osazen čipem ATmega328P. Tento plošný spoj se dá připojit přímo na vyvedené piny používaného mikroprocesoru, čímž vznikl takzvaný HAT. Plošný spoj byl navržen tak, aby obrysem kopíroval rozměry

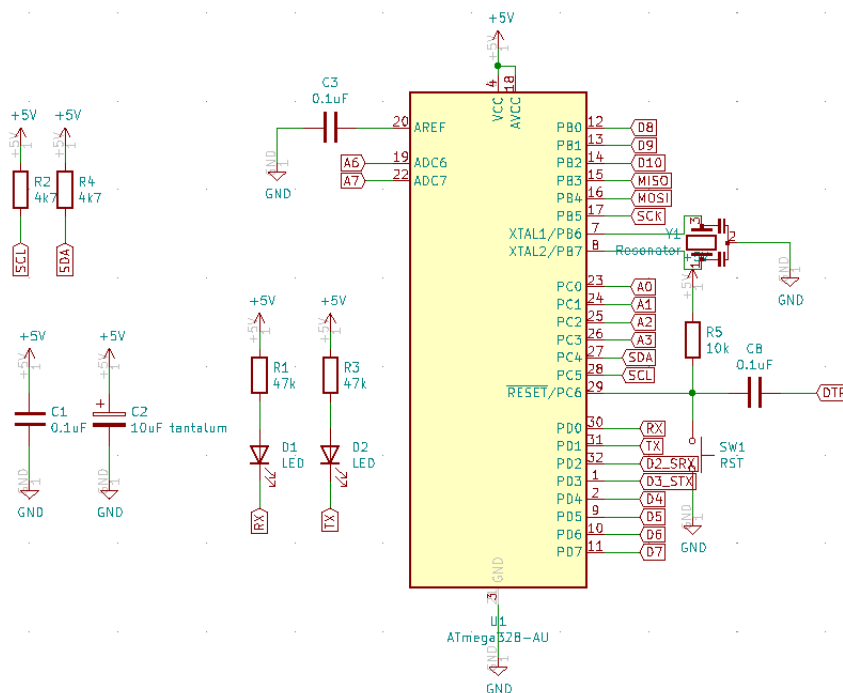
RPi Zero W a dal se na něho jednoduše nasadit a uchytit.

Nyní budou popsány jednotlivé části HATu.

4.4.1 ATmega328P

Hlavní částí plošného spoje je samotný mikrokontrolér, který byl osazen v podobě TQFP-32 čipu. Tento mikrokontrolér nicméně potřebuje několik externích prvků, aby mohl fungovat[8]. Jedním z nich je 16 MHz krystal. Zde byl, pro úsporu prostoru na DPS, využit keramický oscilátor (na schématu Y1) již obsahující krystal a dva kondenzátory nutné pro jeho funkčnost.

LED diody D1 a D2 jsou připojeny na piny RX a TX, přes které probíhá komunikace s RPi Zero W. Vždy, když se na daném pinu sběrnice objeví bitová 0 (sběrnice UART je pull-up, když tedy neprobíhá žádná komunikace, je na ní 5 V), rozsvítí se, a signalizují tak, že právě probíhá komunikace. Stejnými diodami budou v budoucnu nejspíš osazeny i piny D2 a D3, které slouží k ovládní servomotorů.



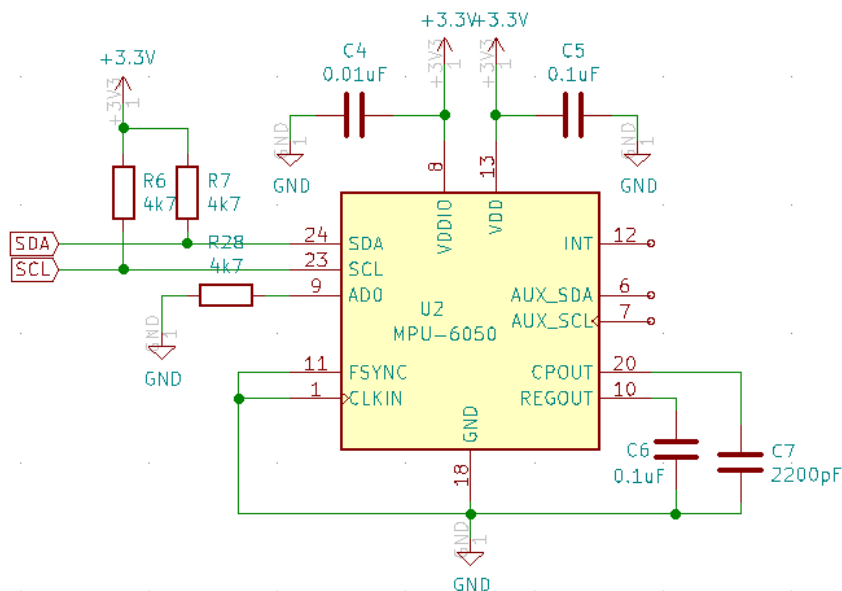
Obrázek 4.6. Schéma mikrokontroléru ATmega328P

Kondenzátory C1 a C2 a C3 slouží pro vyhlazování napěťových špiček, rezistory R2 a R4 jako pull-up rezistory pro I²C sběrnici. Rezistor R5, kondenzátor C8 a spínač SW1 dohromady fungují jako obvod pro resetování mikrokontroléru. Uživatel může zmáchnout spínač a resetovat tak mikrokontrolér, popř. je nahrávací obvod schopný mikrokontrolér resetovat pomocí vyvedeného pinu. Bez tohoto obvodu by nebylo možné nahrát program do mikrokontroléru, není však klíčový pro jeho další funkci.

4.4.2 IMU MPU6050

Spolu s arduinem byla na plošný spoj osazena také inerciální měřicí jednotka (IMU) MPU6050, která v sobě kombinuje gyroskop, akcelerometr a kompas. S tímto gyroskopem komunikuje mikrokontrolér ATmega328P pomocí I²C sběrnice. Tato IMU byla zvolena pro její kompaktnost a běžnosti využití, díky čemuž je k ní dispozici dostatek dokumentace.

K IMU je připojeno několik pasivních součástí (C4–7, R6, R7, R28) které zajišťují spolehlivou funkci a komunikaci s mikrokontrolérem.

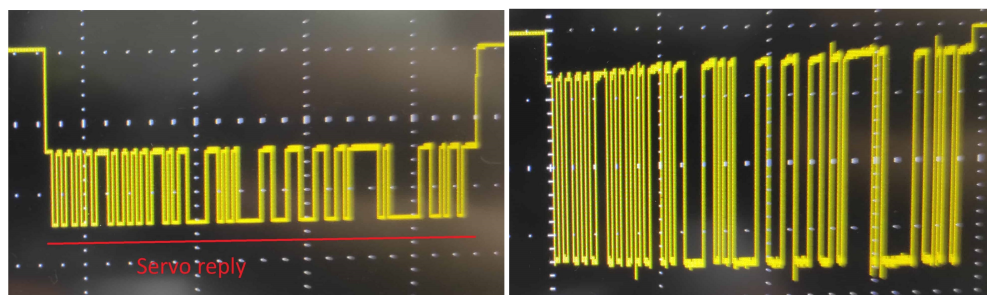


Obrázek 4.7. Schéma obvodu s IMU MPU6050

4.4.3 Obvod pro komunikaci se servomotory

U komunikace s motory se vyskytl ještě jeden problém. Pin TX je tzv. push-pull – to znamená, že když na sběrnici neputují žádná data, drží ji ve stavu high. Servomotory ale nebyla schopna tento pull-up překonat a stáhnout sběrnici na logickou nulu, což ve výsledku zamezovalo komunikaci ve směru ze servomotorů k mikrokontroléru.

Na obr. 4.8 je možné si povšimnout, jak vypadá komunikace zaznamenaná pomocí osciloskopu, když komunikace probíhá v pořádku (nalevo) oproti tomu jak vypadá signál, když TX drží sběrnici ve stavu logické 1.



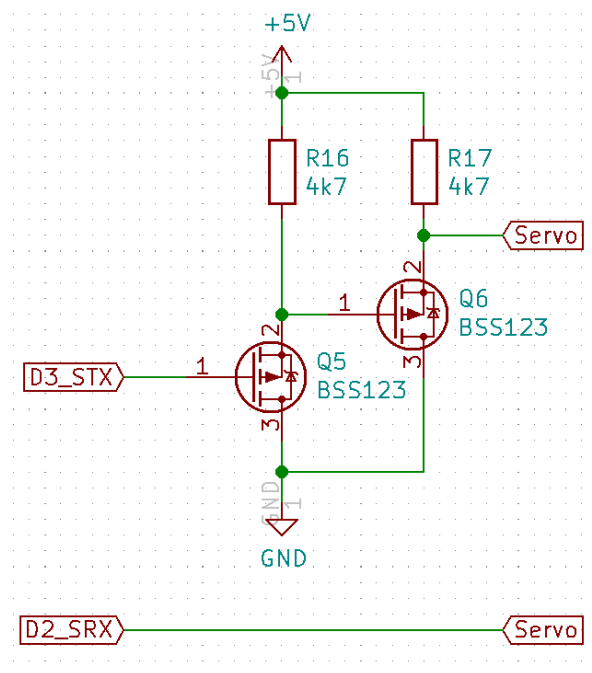
Odpověď serva připojeného na modul

Odpověď serva připojeného na push-pull TX pin

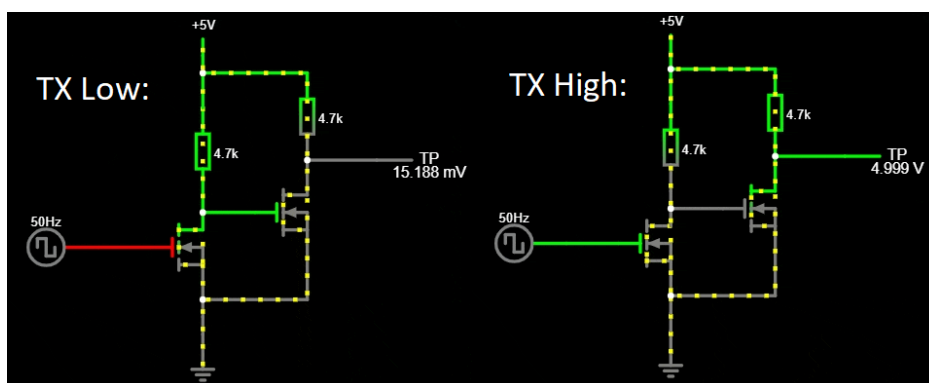
Obrázek 4.8. Snímky komunikace se servem z osciloskopu

Po rešerši na internetu se jevily dvě možnosti – zařídit programově, aby TX pin nebyl push-pull, nýbrž open-drain (nedržel by sběrnici ve stavu high), nebo vyřešit problém hardwarově pomocí izolace TX pinu. Po dalším hledání bylo zjištěno, že ATmega328P nemá možnost TX pin programově nastavit na open-drain, a proto bylo opět zvoleno hardwarové řešení[9].

Na schématu 4.9 je znázorněn obvod využitý pro zmíněnou izolaci TX. Využívá dva N-kanálové MOSFET tranzistory (BSS123) a dva 4700Ω rezistory. RX je připojeno přímo k pinu servomotorů. Tento obvod byl před výrobou DPS testován použitím online simulátoru[10]. Simulaci obvodu je možné zobrazit [zde](#).



Obrázek 4.9. Schéma zapojení pro izolaci TX

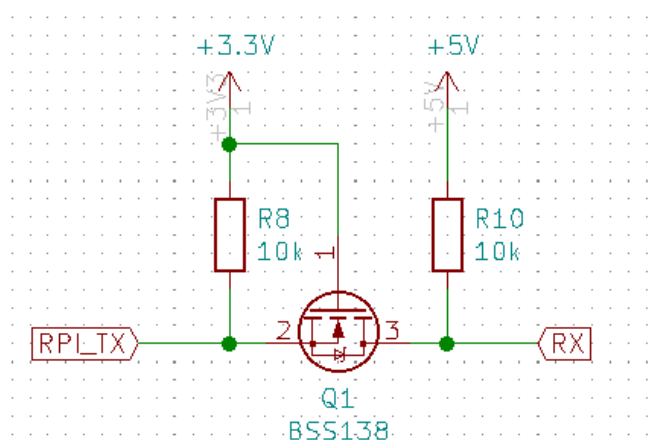


Obrázek 4.10. Simulace zapojení na obr. 4.9.

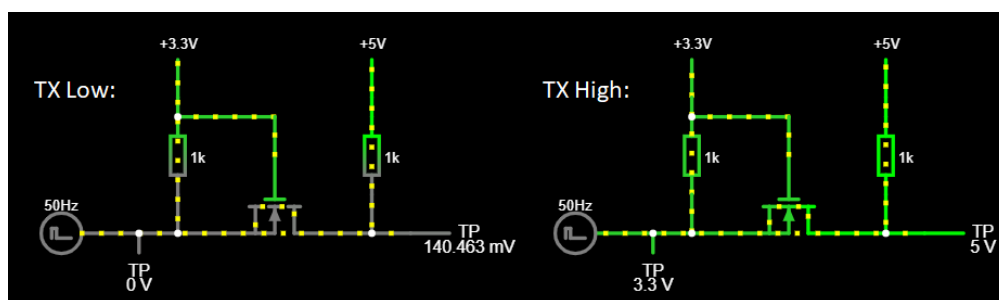
4.4.4 Převodník úrovní

Protože napětí sběrnic se u mikroprocesoru RPi Zero W a mikrokontroléru ATmega328P liší (3,3V a 5V v tomto pořadí), bylo nutné zakomponovat do DPS tzv. převodník úrovní. Toto zapojení (4.11) obsahuje jeden MOS-

FET (BSS138) a dva $10\text{k}\Omega$ rezistory a převádí jednotlivé signály, které jím prochází, na korespondující napětí tak, aby jim koncová zařízení rozuměla. Simulace tohoto obvodu je vidět na obr. 4.12. Nižší napěťová úroveň je vždy připojena na gate tranzistoru (nezáleží na tom, jestli je to zrovna RX či TX) a takovéto obvody plošný spoj obsahuje čtyři – jak pro převádění signálu TX z 3,3 V na 5 V, tak zpět z TX 5 voltového mikrokontroléru na 3,3 V, a to jak pro RPi Zero W, tak pro IMU MPU6050.

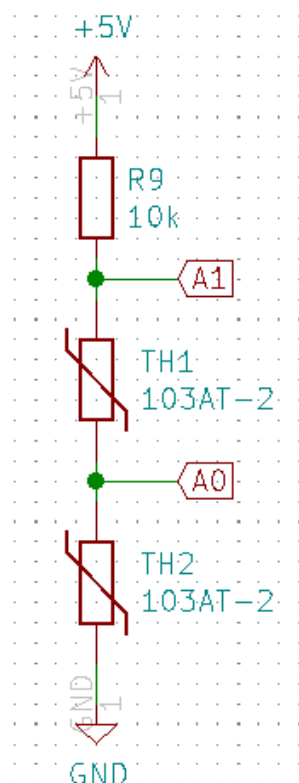


Obrázek 4.11. Schéma zapojení převodníku úrovní



Obrázek 4.12. Simulace zapojení na obr. 4.11

4.4.5 Obvod pro měření teplot na akumulátorech



Obrázek 4.13. Zapojení termistorů na monitorování teploty akumulátorů

Servomotory jsou schopné měřit teplotu svého šasi, nicméně i akumulátory se při větší zátěži zahřívají – každý akumulátor byl proto vybaven termistorem monitorujícím jejich teplotu. Zvolen byl termistor 103AT-2[11] s dobrým teplotním rozsahem a malým pouzdrem, které se snadno dalo uchytit k akumulátorům.

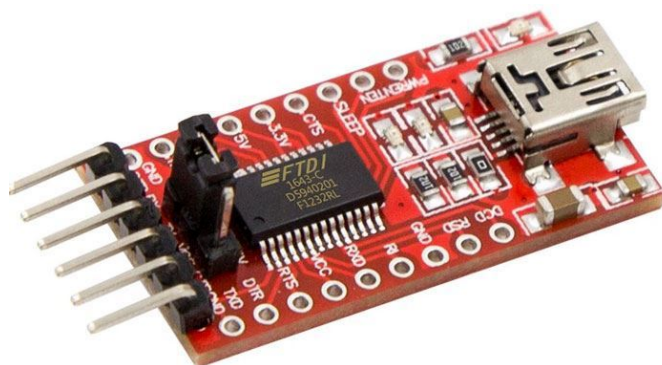
Termistory byly uchyceny na člancích akumulátoru, nebyly zapájeny přímo na DPS, kde tak byly pouze vyvedené plošky a termistory k nim jsou připojeny přes kabely. Zapojení termistorů do obvodu je vidět na obr. 4.13. Jedná se o zdvojený dělič napětí, ze kterého je vyčítáno napětí U_1 na analogovém pinu A1 a U_2 na pinu A0. Odpor obou termistorů je poté spočten rovnicemi:

$$R_1 = -(10k\Omega * (U_1 - U_2)) / (U_1 - 5)$$

$$R_2 = -(10k\Omega * U_2) / (U_1 - 5)$$

4.4.6 Externí programátor mikrokontroléru

Pro nahrání kódu do čipu ATmega328P je nutný integrovaný obvod pro překlad z USB protokolu na UART, např. CH340 nebo FT232RL. Na podobný čip nicméně nebyl na dps dostatek prostoru a je tak namísto něho používán externí programátor (využívající podobný obvod) a ten se v případě nahrávání kódu pomocí šesti pinů připojí do desky. Externí programátor používaný k nahrávání programu do robota je vidět na obr. 4.14.



Obrázek 4.14. Externí programátor^c. Tento externí programátor byl použit k programování čipu ATmega328P na vlastním DPS.

4.5 Napájecí HAT

Společně s návrhem HATu pro mikrokontrolér a jeho periferie byl navržen i druhý HAT nesoucí součástky pro napájení veškeré elektroniky – RPi Zero W, prvního HATu i servomotorů.

Z důvodu úspory místa na první desce a hrozbě poměrně vysokých proudů při zaseknutí servomotorů (přes 20A) byly na tuto desku umístěny také konektory na servomotory, jejichž napájecí cesty tak nemusely být vedeny kolem drobných elektronických součástek a oscilátoru.

Vzniklá deska je nakonec čtyřvrstvá místo běžné dvouvrstvé desky, aby se na ni všechny spoje vešly. Využití čtyř vrstev také umožnilo vést čtyři výkonové trasy pro napájení servomotorů místo dvou, čímž se více rozložil napájecí proud.

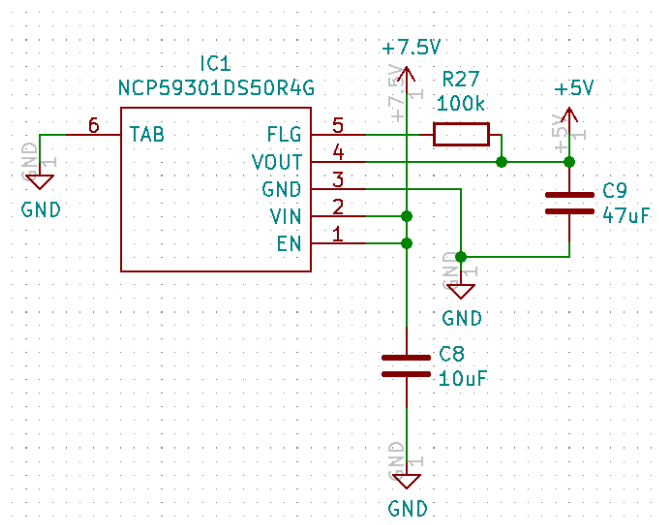
4.5.1 LDO regulátor

Napětí na akumulátorech se pohybuje okolo 7,4–8,6 V, napájení RPi Zero W však na 3,3 V a ATmega328 má napájecí napětí stanovené na 5 V. K tomuto účelu byl na DPS osazen fixní LDO regulátor. Tento typ regulátorů slouží

^cPřevzato z: <https://www.hadex.cz/img/zbozi/m435b.jpg>, 08.02.2023.

k efektivnímu převodu napětí s malým napěťovým rozdílem mezi vstupem a výstupem[12].

Regulátor z řady NCP59300 má fixní výstupní napětí 5 V, kterým lze přímo napájet jak mikrokontrolér, tak RPi Zero W. I když má totiž mikroprocesor logickou úroveň na 3,3 V, lze napájet i pomocí 5 V díky vestavěnému regulátoru.



Obrázek 4.15. Schéma zapojení regulátoru NCP59301DS50R4G

Regulátor má výstupní proud až 3 A, což bohatě stačí pro napájení řídicí elektroniky, jelikož RPi Zero W odebírá okolo 250–350 mA a mikrokontrolér se zbytkem elektroniky má minimální odběr.

4.5.2 Nabíjecí obvod

Aby se akumulátory daly nabíjet bez nutnosti vyjmutí, byl pro druhou DPS navržen nabíjecí obvod. Tento obvod má několik navzájem propojených částí, které budou čtenáři nyní představeny.

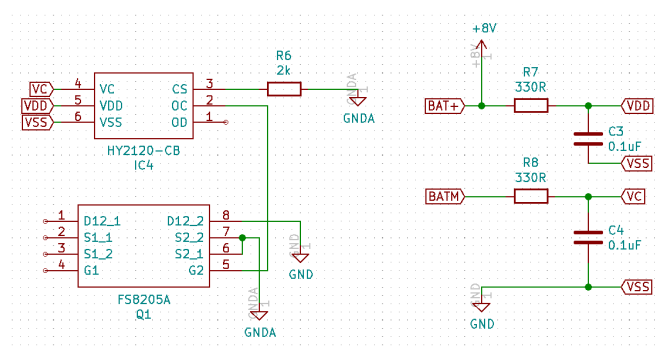
Samotný nabíjecí obvod

Nejdůležitější částí celého zapojení je samozřejmě elektronika nabíjející a monitorující akumulátor. Vzhledem k sériovému zapojení článků akumulátoru bylo nutné buď použít dvě stejná zapojení a nabíjet každý článek zvlášť, nebo použít obvod schopný nabíjet více sériově zapojených článků.

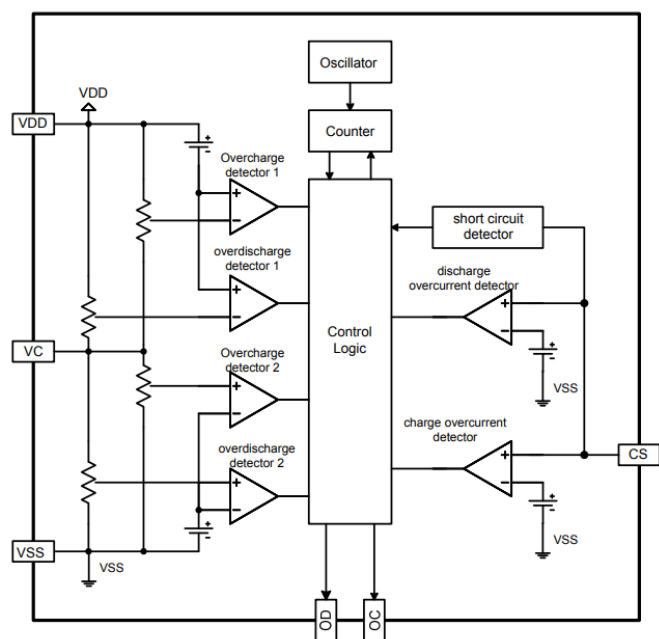
Nakonec byla, obzvlášť kvůli úspoře místa na DPS, zvolena druhá možnost a byl použit čip HY2120 (4.17). Tento integrovaný obvod monitoruje napětí na každém z článků a po jejich nabití pinem OC odpojí MOSFET tranzistorem nabíjecí napětí od akumulátorů. Má také funkci na monitorování podvybití článků a přílišného proudu, tyto funkce však na DPS nejsou využívány.

Nevýhodou tohoto obvodu je, že akumulátor nabíjí tím napětím, které dostává na vstup, to znamená, že při nabíjení přes USB C osazené na desce se musí vstupních 5 V regulovat na požadované nabíjecí napětí, tedy cca 8,4 V. Velkou výhodou však je, že vzhledem k principu funkce nabíjení obvod nijak neomezuje nabíjecí proud, který je tím pádem omezen pouze použitým tranzistorem a regulátorem.

Jako tranzistor ke spínání jsem použil výkonový dvoukanálový MOSFET FS8205A.



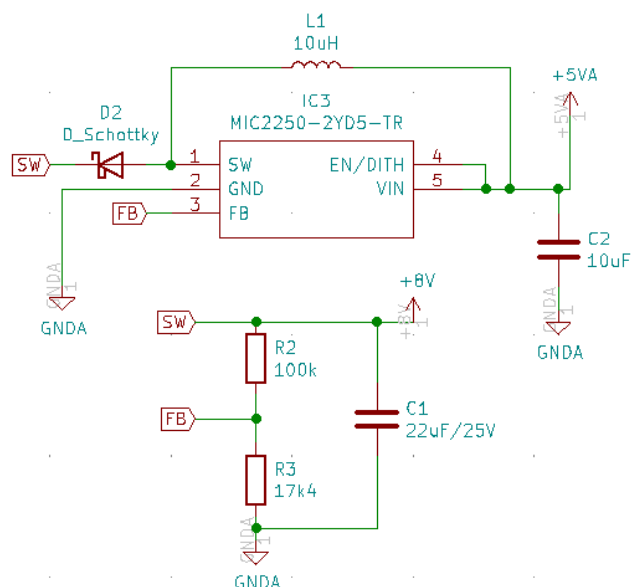
Obrázek 4.16. Schéma nabíjecího obvodu



Obrázek 4.17. Blokové schéma integrovaného obvodu HY2120. Převzato z [13].

Zesilovací spínaný regulátor

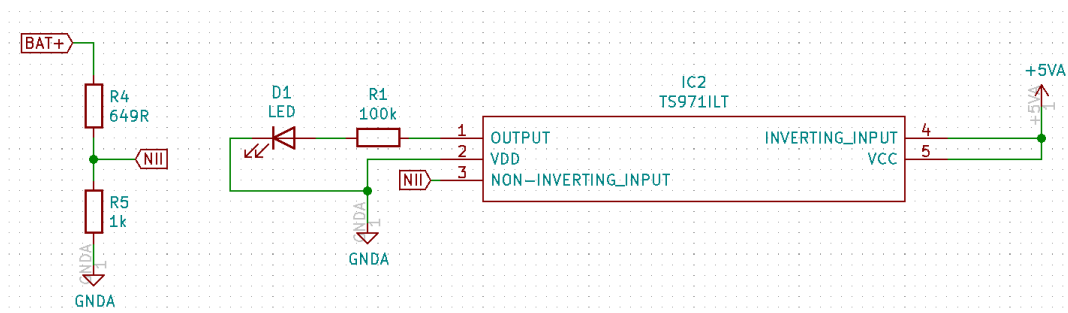
Vzhledem k předchozí zmíněné skutečnosti, že je potřeba spínat napětí 5 V na 8,4 V, byl použit nastavitelný spínaný regulátor MIC2250 s rozsahem vstupního napětí 2,5–5 V a výstupního napětí až 32 V. Tento regulátor je schopný dodávat proud až 2 A, což je naprosto vyhovující hodnota s ohledem na šetrnost vůči akumulátorům.



Obrázek 4.18. Schéma spínaného regulátoru

Operační zesilovač

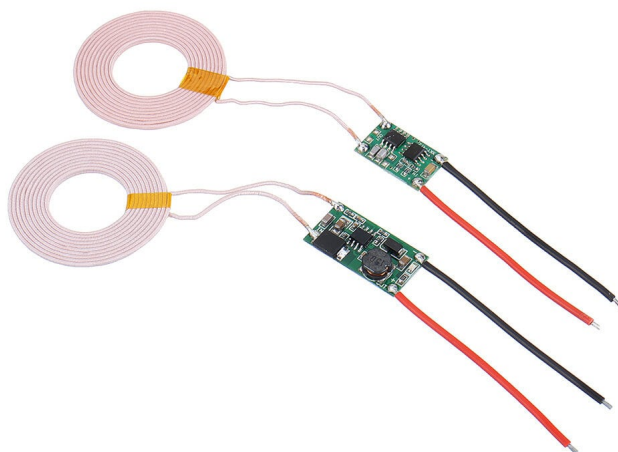
Aby uživatel věděl, že akumulátor byl plně dobit, byl k nabíjecímu obvodu přidán operační zesilovač TS971ILT, který, jak napětí na akumulátorech dosáhne 8,4 V (5 V na operačním zesilovači, dosažených pomocí děliče napětí), rozsvítí LED na DPS.



Obrázek 4.19. Schéma operačního zesilovače

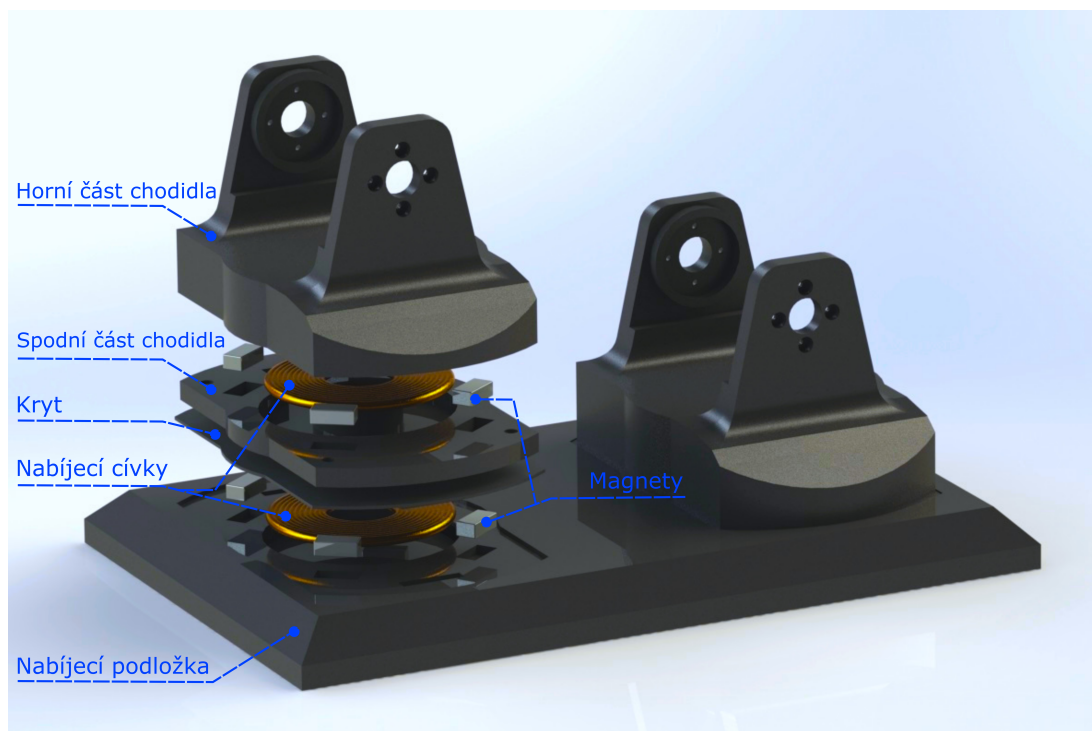
Cívky

Ve spotřebitelské elektronice je v dnešní době trend vybavit zařízení bezdrátovým nabíjením, které umožňuje snadné nabíjení bez nutnosti připojení kabelu, nahrazeného externí stanicí. A tak byl, společně s nabíjecím obvodem, kráčivý robot vybaven i párem nabíjecích cívek – jedna v každé nášlapné ploše – a magnety, které, přichytivše robota spolehlivě na správné místo podložky, které je osazené dalšími dvěma cívkami, zajišťují spolehlivé nabíjení robota. Nabíjecí proud robota není bezdrátovým nabíjením nijak omezen (každá z cívek má maximální proud 2 A), a nabíjecí proud je tak stejný jako při drátovém nabíjení. Navíc se výstupní napětí cívek shoduje s tím z USB-C osazeného na DPS a nijak tedy nekomplikuje nabíjecí obvod.



Obrázek 4.20. Modul pro bezdrátové nabíjení^d. Dva takovéto moduly byly instalovány v nohou robota a v nabíjecí podložce.

^dPřevzato z: <https://ifuturetech.org/wp-content/uploads/2022/03/5V-2A-Wireless-Power-Supply-Transmitter-Receiver-Charging-Coil-Module-01.jpg>, 08.02.2023.

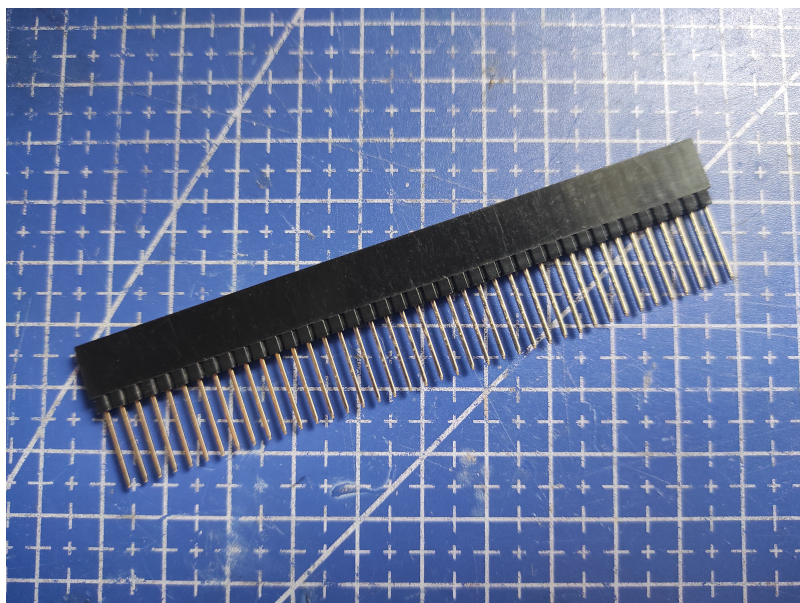


Obrázek 4.21. Rozložený pohled nabíjecí podložky

4.6 Výroba a osazení DPS

Kompletní schémata obou plošných spojů jsou v příloze A a B. Tato schémata byla následně převedena v nákresy plošných spojů, které byly odeslány do výroby do firmy JLCPCB.

HAT s mikrokontrolérem byl ručně osazen za použití mimo jiné i horkovzdušné pistole, umožňující osazení součástek jako ATmega328P či MPU6050. Druhá deska byla osazována oboustranně, jelikož se všechny SMD součástky nevměstnaly na jednu stranu desky. Obě desky byly také opatřeny speciálními konektory kombinujícími jak piny, tak dutinky (4.22), které umožňují zapojit do sebe více desek.



Obrázek 4.22. Oboustranné konektory pro zapojení více desek

Kapitola 5

Software

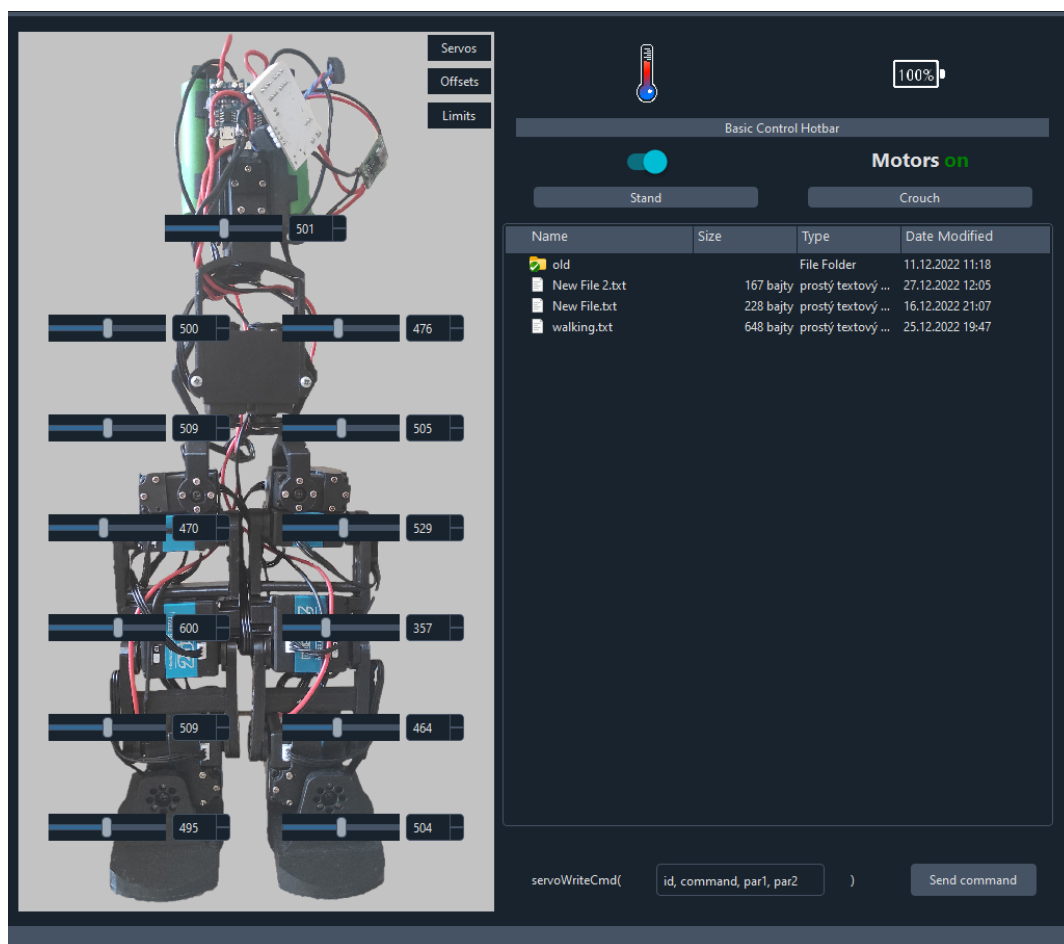
Každý mikrokontrolér i mikroprocesor, aby plnil svůj účel, potřebuje program. Program robota je rozdělen na dvě hlavní části – program robota samotného a aplikace, za pomocí které se dá robot ovládat z počítače. Aplikace byla vyvinuta hlavně s cílem usnadnit programování chůze robota a umožnit monitorování klíčových hodnot jako zbývající kapacitu akumulátoru a jeho teplotu, stejně tak jako parametry servomotorů.

5.1 Aplikace

Aplikace na robota byla programována jazykem C++ v prostředí Qt Creator. Hlavními funkcionalitami této aplikace jsou:

- 3 záložky s možností přepínání mezi polohami, limity a offsety servomotorů
- možnost vytvářet soubory specifikující jednotlivé polohy robota v čase
- podprogram na vytváření map, určující jednotlivé kroky robota a jejich směr
- možnost zobrazit teplotu servomotorů a akumulátorů
- příkazový řádek umožňující poslat příkaz na UART sběrnici

Robot se ovládá pomocí této aplikace zadáváním jednotlivých poloh servomotorů a délky jejich trvání, které se pak zpětně dokážou vykonat. Velká výhoda tohoto způsobu programování spočívá v tom, že je možné robotovi „ukázat“, jak má krok provést (nastavit ho do dané polohy a poté vyčíst pozice všech servomotorů, na což je v aplikaci funkce), čímž lze docílit plynulého a přirozeného pohybu.



Obrázek 5.1. Aplikace na ovládání robota



Obrázek 5.2. Mapa pro zakreslení jednotlivých kroků robota

5.2 Program robota

Program robota se dále dělí na program pro RPi Zero W a program mikrokontroléru. Ten první byl napsán v jazyce python, ten druhý pak v opět v C++. Program pro mikroprocesor RPi Zero W komunikuje s aplikací a obsahuje algoritmy spojené s chůzí robota, program pro mikrokontrolér pak přeposílá data na UART sběrnici a komunikuje s IMU, data z níž posléze posílá do mikroprocesoru, stejně tak jako vyčtené teploty článků akumulátoru.

Kapitola 6

Výsledky práce

Tato kapitola se věnuje výstupům práce a parametrům finální verze robota. Výsledný robot je přes 40 cm vysoký a má rozpětí nohou cca 15 cm. Jeho hmotnost s akumulátory činí cca 1400 g. Podrobné rozměry jsou uvedeny na obr. 6.2 a 6.1.

Po zapnutí robota se řídicí mikroprocesor automaticky připojí na bezdrátovou síť WiFi. Následně se k němu lze připojit pomocí SSH protokolu a spustit ovládací program (tento krok může mikroprocesor vykonat automaticky, při testování to ale bylo nežádoucí, a tato funkce tak nebyla implementována). Ten komunikuje s počítačem, na kterém běží ovládací aplikace. Robot pošle aplikaci aktuální stav servomotorů a senzorů, které se zobrazí uživateli.

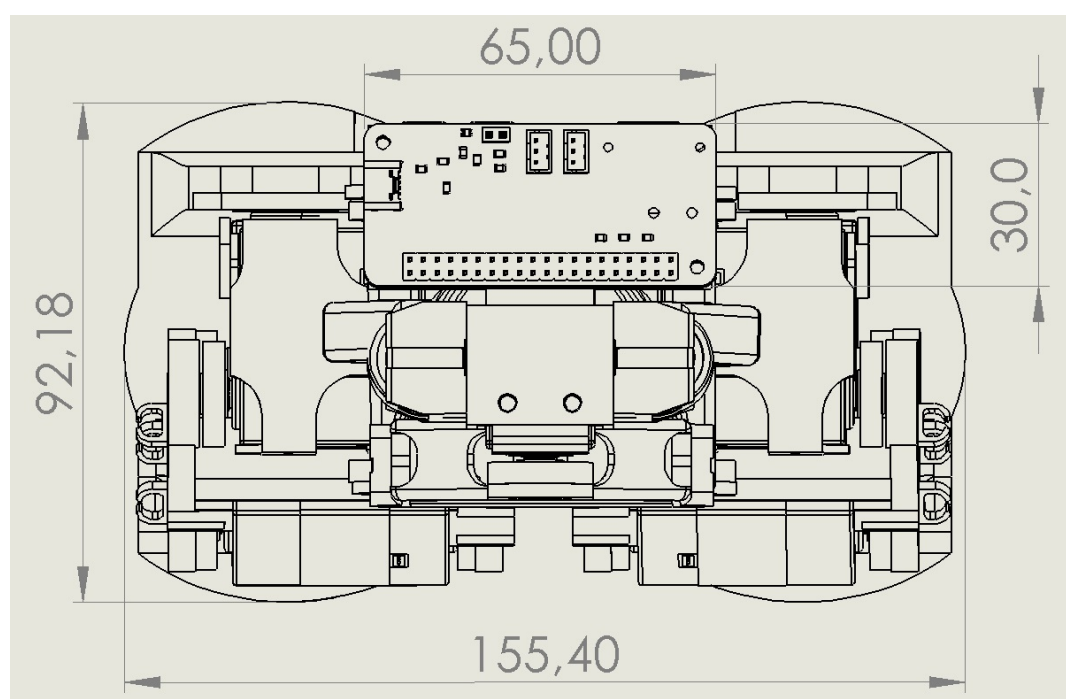
V aplikaci je dále možné vytvářet nové sekvence pohybů nebo spouštět již uložené sekvence. Také je možné v mapě naplánovat dráhu, po které se robot bude pohybovat – v takovém případě robot vždy vyhodnotí každý další krok a natočí se dle potřeby. Robot při procházení dráhy využívá předem naučené sekvence kroků, které vhodně kombinuje a upravuje dle potřeby, aby se natáčel o daný úhel.

Kvůli snížení pravděpodobnosti kolize končetin či jejich částí je pohyb každého servomotoru omezen na povolený rozsah hodnot, které je možné změnit v aplikaci. Dále je možné upravit nulovou polohu za použití tzv. offsetů. Tato funkcionalita je využívána pro kompenzaci nedokonalostí kon-

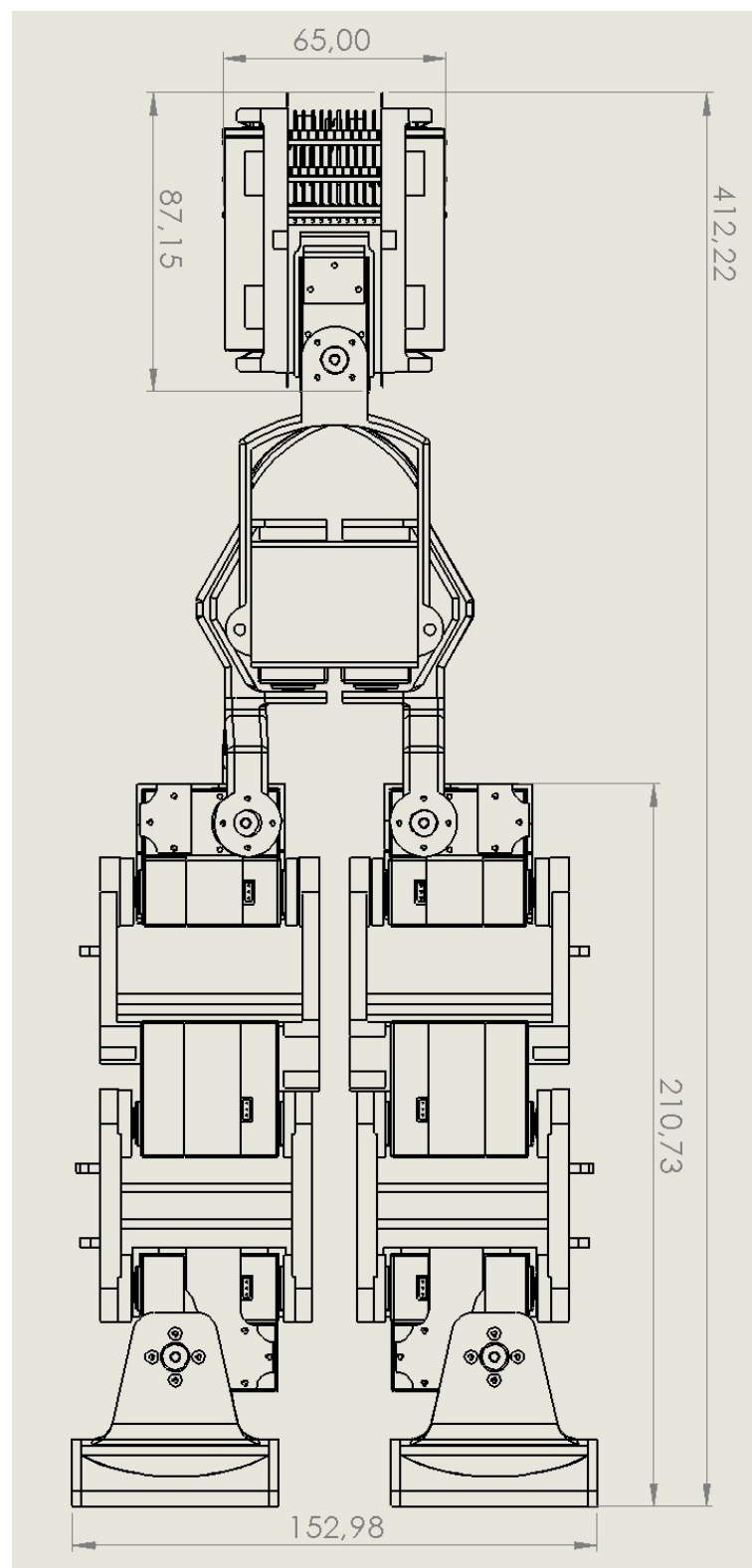
strukce robota, čímž se dá robot vhodně zkalibrovat do základního postavení.

V ovládací aplikaci je také možné zobrazit teploty jednotlivých servomotorů a akumulátorů, které jsou aplikací pravidelně aktualizovány.

Dále je sledováno napětí na akumulátorech, které se zobrazuje v uživatelském rozhraní jako zbývající procentuální hodnota kapacity akumulátoru. Robot na plné nabití vydrží v pasivním provozu několik hodin, při aktivní chůzi pak okolo hodiny.



Obrázek 6.1. Vrchní pohled na robota



Obrázek 6.2. Přední pohled na robota

Kapitola 7

Závěr

Cílem této práce bylo sestavit a zprovoznit dvounohého kráčivého robota schopného chůze podobné té lidské. Vývoj robota byl rozdělen na následující části:

1. Nejříve bylo nutné vybrat vhodné servomotory a navrhnout konstrukci robota, která by byla schopná stabilní chůze. Tato konstrukce byla modelována v programu SolidWorks 2021, kde se model dal v průběhu projektu dále upravovat a vylepšovat. Zároveň model umožnil vytisknout celou konstrukci na 3D tiskárně a ta tak byla lehká, avšak pevná.
2. K mechanické konstrukci byly zvoleny elektronické součástky vhodné pro její ovládání. Tyto součástky byly nejprve pouze připevněny na robota šroubky či lepidlem, aby bylo možné chůzi robota testovat.
3. Po ověření funkčnosti obvodu byly navrženy a vyrobeny dva plošné spoje, na které byly součástky osazeny, čímž se stal spolehlivějším a odolnějším nejen obvod, ale i celý robot (např. v případě pádu).
4. Robot byl oživen programem pro mikroprocesor a mikrokontrolér nacházející se na plošných spojích.
5. Pro jednodušší a přívětivější učení chůze robota byla navržena aplikace pro počítač, která komunikuje s robotem bezdrátově, a robota tak lze

vzdáleně ovládat a monitorovat.

Podařilo se mi vytvořit funkčního kráčivého robota a aplikaci pro jeho řízení. Robot je schopen přirozené, plynulé a spolehlivé chůze a automatické stabilizace. Díky naprogramované aplikaci je robot snadno ovladatelný a je možné ho jednoduše monitorovat a učit novým pohybům.

Celá robotická konstrukce je kompatibilní s jakoukoliv řídicí elektronikou disponující UART sběrnici, oba vytvořené plošné spoje jsou kompatibilní s piny většiny mikroprocesorů z rodiny Raspberry (RPi 3B, 4B, Zero, ...). Robot vyžaduje napájecí napětí 7,4–8,6 V, v klidovém stavu odebírá proud okolo 350 mA, při chůzi pak standardně proud nepřekračuje 2 A.

Náklady na stavbu robota nepřekračují 10 000 Kč, celkové náklady na vývoj se pohybovaly okolo 16 000 Kč. Tato práce se zabývá první částí projektu Arnold Biped Robot, která se zaměřila na funkčnost spodních končetin a základní řídicí elektroniky. V budoucnu se plánuje zaměřit na druhou část projektu, která bude obsahovat návrh a zprovoznění horních končetin a hlavy současně s optimalizací řídicí elektroniky, a sestavím tak skutečného humanoidního robota.

Literatura

1. LIGIUS. *Inside stuff - JJRC H6C quadcopter* [online]. [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://hackcorrelation.blogspot.com/2015/02/inside-stuff-jjrc-h6c-quadcopter.html>.
2. SMUTNÝ, Vladimír. *Robotika - Úvod do kinematiky* [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/kinematika-notecz.pdf>.
3. NKON. *Sony / Murata US18650VTC5 2600mAh - 30A* [online]. [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://eu.nkon.nl/sony-us18650vtc5-flat-top.html?gclid=CjwKCAiAwomeBhBWEiwAM43YIDaLc0b9DjgnwChr5NG21LgTpke0pMBwE>.
4. WEN, Jianwu et al. *A Review on LIBs Safety Issues: Existing Problems and Possible Solutions* [online]. [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/asp/me/2012/00000002/00000003/art00002#>.
5. GIBBS, Andrew. *The Gibbs guide to Lithium Polymer batteries* [online]. [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: http://www.gibbsguides.com/PDFs/Lipo_Guide_v2_m3a.pdf.
6. ROHDE AND SCHWARZ USA, INC. *Understanding UART* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/oscilloscopes/educational-content/understanding-uart_254524.html.

7. ATMEL. *ATmega328P* [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf.
8. YASINZAI. *Arduino Pro Mini Board Schematics 100% Explained* [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://adduino.com/arduino-pro-mini-board-schematics-100-explained/>.
9. MAJERLE, Tilen. *Hardware UART connection with sensor* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://docs.majerle.eu/projects/lwow/en/latest/user-manual/hw-connection.html#id1>.
10. FALSTAD. *Electronic Circuit Simulator* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://www.falstad.com/circuit/>.
11. MOUSER ELECTRONICS. *High Precision Thermistor* [online]. [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/362/semitec_atthermistor-1202913.pdf.
12. TOSHIBA. *Basics of low dropout LDO regulators* [online]. [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/eu/semiconductor/knowledge/e-learning/basics-of-low-dropout-ldo-regulators/chap1/chap1-3.html>.
13. HYCON TECHNOLOGY. *HY2120 Data Sheet 2-Cell Lithium-ion/Lithium Polymer Battery Packs Protection ICs* [online]. [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1139802/HYCON/HY2120.html>.

Seznam zkratek

DPS deska plošných spojů. 7, 13, 26, 29, 30, 32–35, 37–39, 52

HAT Hardware Attached on Top. 6, 7, 25, 26, 33, 39, 53–57

I²C Inter-Integrated Circuit. 27

IMU Inerciální měřicí jednotka. 6, 16, 27, 28, 31, 43, 52

LDO Low Dropout Regulator. 7, 33

Li-Ion Lithium-Ion. 18

Li-Po Lithium-Polymer. 18, 19

RPi Zero W Raspberry Pi Zero W. 16, 17, 26, 30, 31, 33, 34, 43

SSH Secure Shell. 16, 17, 44

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. 6, 16, 17, 19, 23, 24, 26, 32, 41, 43, 48, 52

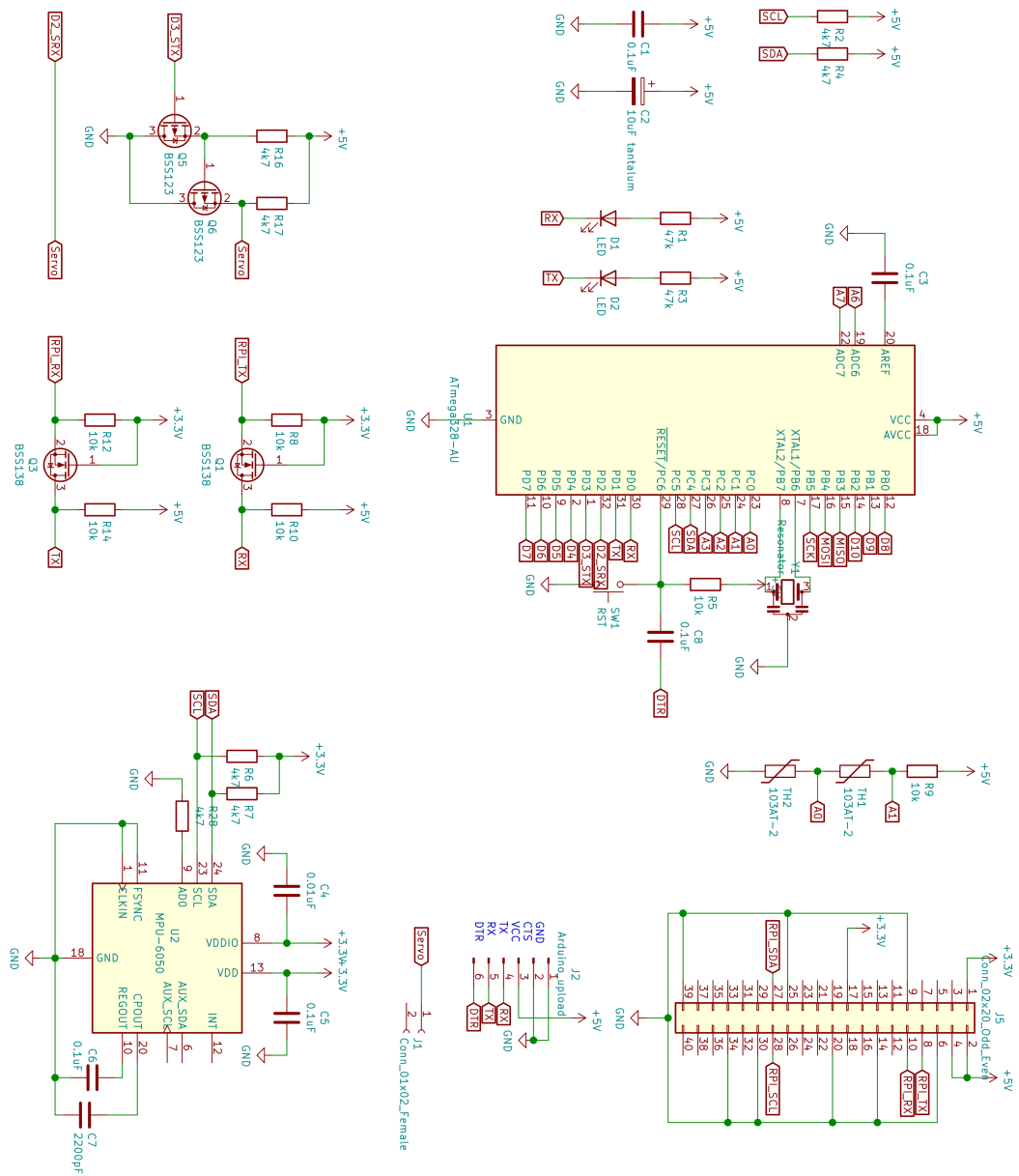
Seznam obrázků

3.1	Možnosti zapojení servomotorů	11
3.2	Všechny díly servomotoru LX-225	12
3.3	DPS servomotorů LX-225	13
3.4	3D model robota v CAD programu	14
3.5	Kinematický graf robota	15
4.1	Blokové schéma logických prvků robota	17
4.2	Formát instrukce pro servomotor	20
4.3	Seznam instrukcí pro servomotor	22
4.4	Příklad přenosu dat pomocí UART protokolu. Převzato z [6]. .	24
4.5	Modul pro komunikaci se servy	25
4.6	Schéma mikrokontroléru ATmega328P	27
4.7	Schéma obvodu s IMU MPU6050	28
4.8	Snímky komunikace se servem z osciloskopu	29
4.9	Schéma zapojení pro izolaci TX	30
4.10	Simulace zapojení na obr. 4.9.	30
4.11	Schéma zapojení převodníku úrovní	31
4.12	Simulace zapojení na obr. 4.11	31
4.13	Zapojení termistorů na monitorování teploty akumulátorů . .	32
4.14	Externí programátor	33
4.15	Schéma zapojení regulátoru NCP59301DS50R4G	34
4.16	Schéma nabíjecího obvodu	35
4.17	Blokové schéma integrovaného obvodu HY2120. Převzato z [13].	36
4.18	Schéma spínaného regulátoru	37

4.19	Schéma operačního zesilovače	37
4.20	Modul pro bezdrátové nabíjení	38
4.21	Rozložený pohled nabíjecí podložky	39
4.22	Oboustranné konektory pro zapojení více desek	40
5.1	Aplikace na ovládání robota	42
5.2	Mapa pro zakreslení jednotlivých kroků robota	43
6.1	Vrchní pohled na robota	45
6.2	Přední pohled na robota	46
A.1	Schéma 1. HATu	55
B.1	Schéma 2. HATu	57

Příloha A

Schéma HAT s mikrokontrolérem



Obrázek A.1. Schéma 1. HATu

Příloha B

Schéma napájecího HAT

