



**Středoškolská technika 2015**  
Setkání a prezentace prací středoškolských  
studentů na ČVUT

**Klára - experimentální autonomní robot**  
(Claire - Experimental self-governing robot)

Petr Pacner

Gymnázium Broumov, Hradební 218, Broumov 550 01

# **Klára - experimentální autonomní robot**

(Claire - Experimental self-governing robot)

Autor: Petr Pacner

Škola: Gymnázium Broumov  
Hradební 218  
550 01 Broumov

Konzultanti: Pavel Jakoubek  
Jan Hadrava

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval oběma konzultantům, panu Pavlu Jakoubkovi za obětavou pomoc a podnětné připomínky při stavbě mechanické konstrukce robota a Janu Hadravovi za rady a podnětné připomínky k robotovému softwaru. Dále bych chtěl poděkovat panu Miloši Drapačovi a jeho firmě Elektro Drapač s.r.o. a také firmě BSB z Hejtmánkovic za pomoc při výrobě některých dílců určených pro stavbu projektu.

Velké Poříčí .....

.....

(podpis autora)

## **ABSTRAKT**

Práce obnáší stavbu mobilního autonomního robota zkonstruovaného na čtyřkolovém podvozku se skid-steeringem včetně výběru jeho elektroniky a vytvoření základního softwaru k aktivnímu manévrování mezi překážkami. Součástí je také potřebná teorie diferenciálně řízeného podvozku a linearizace senzoru Sharp.

Robot využívá centrálně řízený elektronický systém postavený na platformě jednodeskového počítače Raspberry Pi (B+) s operačním systémem Linux. Je propojen přes sběrnici UART a I<sup>2</sup>C s přídatnými moduly pro řízení serv, motorů a pro získávání dat z okolí implementovanými triangulačními infračervenými senzory a magnetickými inkrementálními enkodéry.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Robot, Diferenciální řízení, Skid-steering, Infračervený senzor, Enkodér, Servo, Mikroprocesor, SBC, UART, I<sup>2</sup>C, Linearizace

## **ABSTRACT**

This documentary takes a look at the designing of mobile self-governing robot constructed on four wheels skid-steering carriage including electronic access and also creating the basic software facility to avoid the barriers. The summary involves required theory about differential steering and linearization of sensor Sharp.

The robot has a central controlled system built on SBC Raspberry Pi (B+) running operation system Linux. It's wired by UART bus and I<sup>2</sup>C to additional modules for servo and motor controlling and to gather environment data from implemented triangulation infrared sensors and magnetic incremental encoders.

## **KEYWORDS**

Robot, Differential steering, Skid-steering, Infrared sensor, Encoder, Servo, Microprocesor, SBC, UART, I<sup>2</sup>C, Linearization

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>1 Mobilní autonomní robot</b>	<b>6</b>
1.1 Definice . . . . .	6
1.2 Kinematické modely . . . . .	6
1.2.1 Diferenciální řízení a skid-steering . . . . .	7
1.2.1.1 Definice . . . . .	7
1.2.1.2 Teorie diferenciálního řízení . . . . .	7
<b>2 Mechanická konstrukce</b>	<b>9</b>
2.1 Podvozek . . . . .	9
2.1.1 Pohon . . . . .	9
2.1.2 Popis konstrukce . . . . .	9
2.2 Robotické rameno . . . . .	11
2.2.1 Popis konstrukce . . . . .	11
2.2.1.1 Horizontální pohyb . . . . .	11
2.2.1.2 Vertikální pohyb . . . . .	12
2.2.1.3 Uchopovací modul . . . . .	12
2.2.2 RC Servomotor . . . . .	12
2.2.2.1 Princip funkce . . . . .	12
2.2.2.2 Úprava servomotoru . . . . .	13
<b>3 Elektronika</b>	<b>14</b>
3.1 Deska AddPU . . . . .	14
3.2 Ovládání servomotoru . . . . .	15
3.3 Ovládání motorů . . . . .	15
3.4 Senzory . . . . .	16
3.4.1 Infračervené triangulační senzory . . . . .	16
3.4.1.1 Linearizace . . . . .	18
3.4.2 Inkrementální enkodéry . . . . .	20
3.5 Napájení . . . . .	21
<b>4 Software</b>	<b>22</b>
4.1 Sít zařízení . . . . .	22
4.2 Operační mód . . . . .	23
4.2.1 Popis módu . . . . .	23
4.2.2 Filtrace senzoru Sharp GP2Y0A21 . . . . .	23
<b>Závěr</b>	<b>24</b>
<b>Literatura</b>	<b>25</b>
<b>Přílohy</b>	<b>28</b>

# ÚVOD

Práce popisuje část projektu s názvem „Experimentální autonomní robot Klára“, který vznikl v roce 2012 za účelem zdokonalit se v interdisciplinárním oboru mobilní robotiky a jehož cílem bylo vyprojektovat a vyrobit celého mobilního autonomního robota schopného manévrovat mezi překážkami, najít v prostoru předdefinovaný předmět a dovézt jej na zadané místo.

Později jsem se rozhodl napsat tuto práci a projekt tím uveřejnit, abych motivoval zájemce o tento obor a vzhledem k malému množství dostupné literatury v lokálních knihovnách jim zároveň poskytl podklady pro začátek.

Obsahem práce měl být původně cíl projektu, ovšem v důsledku nedostatku finančních zdrojů a omezenému času není projekt zcela dokončen, proto je práce zaměřena jen na část zabývající se pohybem robota v prostoru. Robot tedy nevyužívá svůj celkový potenciál, kterým disponuje.

Osnova práce je rozdělena do čtyř částí; na část teoretickou s popisem problematiky, část popisující mechanickou konstrukci, část s elektronikou a část se softwarem. Každá z částí je dále rozdělena na podrobnější podkapitoly a v případě tématů probraných v předešlých kapitolách jsou v textu umístěny křížové odkazy.



Obr. 1: 3D model robota

# 1 MOBILNÍ AUTONOMNÍ ROBOT

## 1.1 Definice

Mobilní autonomní robot [1] je zařízení, postavené ve většině případů na bázi synchronizace mechanických a elektronických celků. Základní vlastností těchto zařízení je jejich schopnost přemísťování se v prostoru. Jsou proto vybaveny různými typy senzorů, které jim umožňují vnímat své okolí. Vlastní autonomie spočívá v rozhodování řešení situace bez lidské pomoci podle naměřených dat z čidel, čímž dokáží na své okolí působit.

## 1.2 Kinematické modely

Podle typu prostředí, do kterého je robot určen, jsou využívány různé kinematické modely. Při pohybu po zemi jsou ve většině případů využita kola nebo pásy, pokud se má robot pohybovat v obtížnějším terénu.

Roboty pohybující se na zemi po kolech lze rozdělit na holonomní (holonomic) a neholonomní (non-holonomic) [2] podle toho, kolik dokáží ovládat a kontrolovat stupňů volnosti. Holonomní robot může kontrolovat všechny pohyby možné ve dvou-dimenzionálním prostoru, tzn. může se pohybovat ve směru osy  $x$ ,  $y$  a rotovat kolem osy  $z$ . Tito roboti jsou také nazýváni jako všesměroví a jejich podvozek nabízí maximální flexibilitu v pohybu. V případě neholonomních robotů, kterým je také robot Klára, je kontrolováno méně stupňů volnosti než je počet potřebný pro uskutečnění libovolného pohybu v daném prostoru. Touto vlastností se vyznačují dvě základní metody, které se využívají v praxi. Jednak řízení Ackermanovo (automobil), kdy se změna směru provádí vytočením kol, a diferenciální.

Při výběru metody řízení robota Kláry jsem se přiklonil k variantě diferenciálního řízení. Tato metoda není příliš náročná na konstrukci a je možné ji dobře uplatnit ve stísněných prostorech, neboť se podvozek dokáže otočit téměř na jednom bodě, což svědčí o velké obratnosti robota. Metoda má také své nevýhody. V případě zatáčení se kola smýkají, jsou vystavena nadměrnému opotřebení. To je však zanedbatelné při váze daného robota. V důsledku smýkání je také obtížné určit přesně jeho střed otáčení, který závisí na tom, které kolo se právě smýká. Proto musela být konstanta  $b$  určující rozchod kol zjištěna experimentálně.

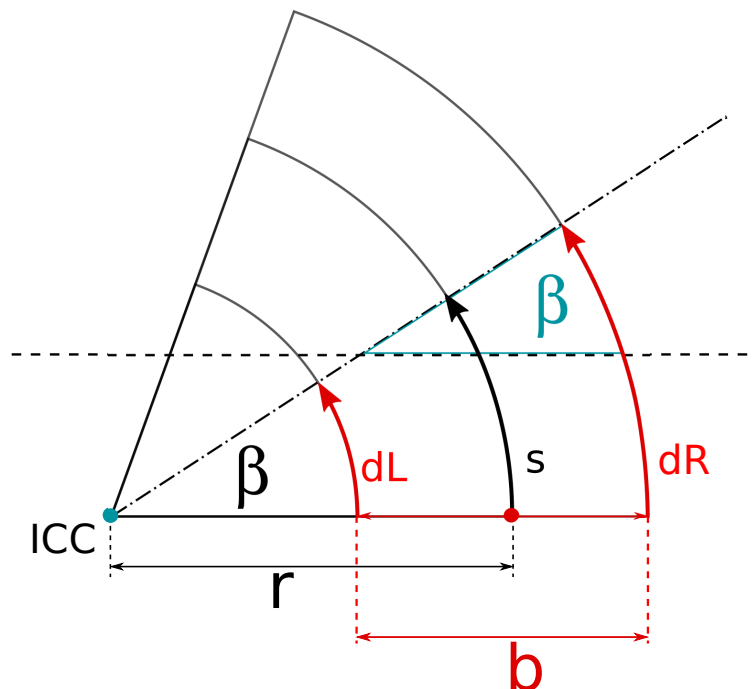
## 1.2.1 Diferenciální řízení a skid-steering

### 1.2.1.1 Definice

Kinematický model diferenciálního řízení [3] je metoda řízení využívaná většinou u malých neholomických robotů. U větších robotů, kteří se pohybují po čtyřech a více kolech, se užívá název skid-steering neboli řízení smykem. Jde o stejný princip jako u diferenciálního řízení, kde je koncepce robota zkonstruována na dvou kolech usazených v ose na protilehlých bocích podvozku. Každé kolo je ovládáno zvlášť, čímž je realizována změna směru. Rádus zatáčení je dán poměrem rychlostí otáček jednotlivých kol.

### 1.2.1.2 Teorie diferenciálního řízení

Podvozek mění směr pokaždé, když se změní poměr rychlostí mezi koly na obou stranách. Pohybuje se vždy s poloměrem  $r$  nebo přímočaře ( $r \rightarrow \infty$ ). Střed této kružnice se zde nazývá ICC, neboli Instantaneous Center of Curvature. Aby robot mohl plynule objet překážku v určité vzdálenosti, je tento údaj velmi užitečný. Vzorce byly odvozeny na základě vzorců na stránce robotika.cz [4].



Obr. 1.1: Model diferenciálního řízení

Obrázek (obr. 1.1) zobrazuje robota jako červenou úsečku zakončenou šipkami, které představují kola na jeho bocích. Střed úsečky  $b$  vyznačuje střed rozchodu.



Pro výpočet poloměru otáčení za předpokladu, že robot zná aktuální uraženou vzdálenost středního bodu, vyjdeme ze vztahu pro výpočet délky oblouku kružnice (1.1).

$$s = r \cdot \theta \quad (1.1)$$

Rovnice vyjadřuje závislost délky oblouku kružnice  $s$  na úhlu  $\theta$  (v radiánech) a jejím poloměru  $r$ . Úpravou této rovnice získáme rovnici (1.2).

$$r = \frac{s}{\theta} \quad (1.2)$$

Pro výpočet poloměru kružnice je tedy nutné znát dráhu ujetou robotem a úhel jeho aktuálního natočení, pro které platí rovnice (1.3) a (1.4). Obě vycházejí ze znalosti uražené vzdálenosti kol na pravé i levé straně zjištěné z enkodérových dat [[3.4.2]].

$$s = \frac{dR + dL}{2} \quad (1.3)$$

Vzorec (1.3) vyjadřuje závislost celkové uražené vzdálenosti  $s$  středním bodem na vzdálenosti ujeté koly  $dL$  a  $dR$  na obou bocích podvozku v daném okamžiku. Podobně je možné vyjádřit změnu úhlu natočení. K tomu je však třeba ještě o jeden údaj více, který udává rozchod kol  $b$ .

$$\tan \beta = \frac{dR - dL}{b} \quad (1.4)$$

Dosazením rovnic (1.3) a (1.4) do rovnice (1.5) byl vytvořen vzorec k výpočtu poloměru otáčení z enkodérových dat. Jelikož budou data čtena z enkodéru ve velmi krátkých intervalech, je možné napsat vzorec bez funkce tangens, neboť funkce tangens pro malé úhly roste téměř lineárně.

$$r = \frac{b \cdot (dR + dL)}{2 \cdot (dR - dL)} \quad (1.5)$$

Rovnice (1.5) platí jen v případě, že je rychlost obou kol různá a za předpokladu, že žádné kolo neprokluzuje, a tudíž je úhlová rychlost kol na obou bocích stejná.

## 2 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Konstrukci robota tvoří dva základní celky; podvozek postavený na čtyřech kolech a robotické rameno s robotickou rukou. Jejich velikost byla zvolena tak, aby bylo možné vytisknout tvar navržený na počítači na papír formátu A4 a vyrobit jej v domácích podmínkách. Ukázalo se však, že by se při výrobě ložiskových osazení nasčítaly odchylky všech dílů tak, že by se s velkou pravděpodobností nepodařilo sesadit díly dohromady, aby hřídele, ložiska a ozubená soukolí byla v určených osách. Rozhodl jsem se proto nechat vyříznout jednotlivé polotovary na fríze s přesně vyznačenými otvory, abych mohl polotovary v domácích podmínkách sestavit a upravit do současné podoby.

Robot je majoritně vyroben ze dvou základních materiálů; hliníku a komatexu (bílá houževnatá hmota s mikroskopickými bublinkami, velmi lehká s hustotou ( $\rho = 0.47 - 0.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Důvodem použití komatexu byla snadná dostupnost, nenáročné opracování, jednoduchá oprava materiálu v případě poškození dílu nebo chyby při výrobě. Zatímco z komatexu je vyrobena většina dílů, hliník je v konstrukci zastoupen na místech, která zpevňují dané části konstrukce nebo vyžadují materiálovou pevnost a jeho povrchovou tvrdost.

### 2.1 Podvozek

#### 2.1.1 Pohon

Robota uvádějí do pohybu dva stejnosměrné motory na jmenovité napětí 12V od firmy Pololu [5]. Jedná se o motory s vestavěnou převodovkou 18.75:1 a integrovaným magnetickým inkrementálním enkodérem, což výrazně zjednodušilo konstrukci podvozku, neboť nemusely být instalovány speciální úchyty na enkodérové čipy a magnetické kotouče na hřídel motorů.

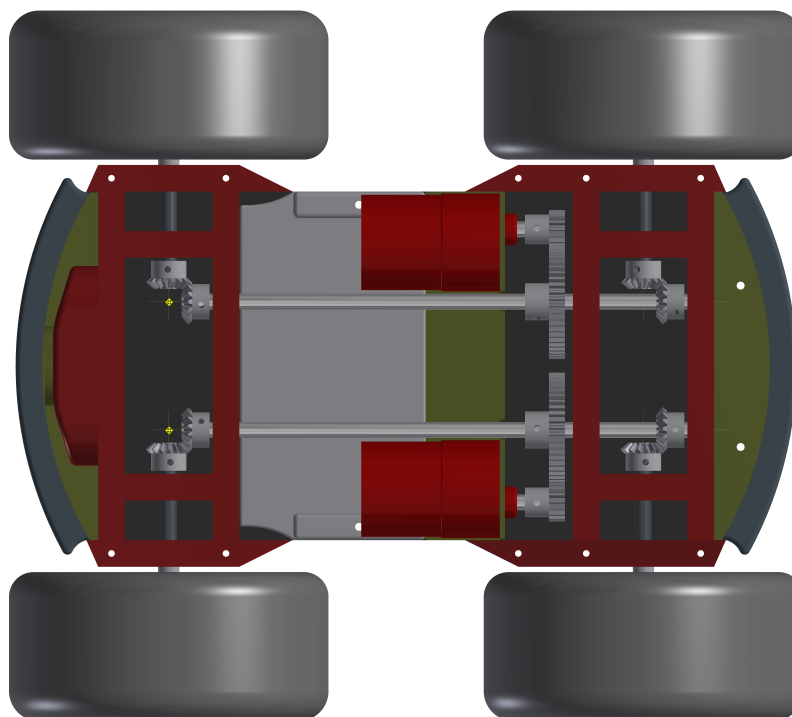
Stejnoseměrné motory byly vybrány, protože se dokáží otáčet i při nízkých otáčkách, což umožňuje robotovi mnohem větší flexibilitu při jeho pohybu a řízení.

#### 2.1.2 Popis konstrukce

Robot je určen pro pohyb na povrchu rovném nebo jen s mírnými nerovnostmi, na které stačí tlumení výstelkami v pneumatikách. Z těchto důvodů nebylo nutné projektovat systém odpružení, který by zkomplikoval výrobu.

Základem je hliníková deska o síle 2 mm s našroubovanými komatexovými stojnami, v nichž jsou uložena ložiska.

Podvozek lze rozdělit do tří sekcí. Obě krajní sekce mají stejný účel. Jsou zde kuželová



Obr. 2.1: Přenos kroutícího momentu

soukolí (modul 1) s ozubením pod úhlem  $45^\circ$  a s převodovým poměrem  $1 : 1$ , která přenáší kroutící moment z hlavních hřídelů na každou hřídel kola. Tyto hlavní hřídele o průměru  $6\text{ mm}$  procházejí po délce podvozku celou zadní sekci a končí v sekci přední.

Ve střední části podvozku je prostor rozdělen hliníkovým uložením motorů. Za tímto uložením je úzký prostor vyhrazený pro převody (modul 0.8, převodový poměr  $1 : 3.2$ ) spojující motor a hlavní hřídele, které byly vyrobeny na zakázku, čímž bylo dosaženo, maximálního využití dostupného prostoru. Řešení bylo vhodné i z finančních důvodů.

Ve zbývající části je prostor k uložení elektroniky. U bočních stěn vnitřního prostoru jsou umístěny elektromotory [[2.1.1]] a na hlavních hřídelích jsou zde segrovky zajišťující hřídele proti nežádoucímu posuvu.

Hřídele kol procházejí přes dvě ložiska ven z podvozku, aby se hřídele s koly nevyklázovaly a držely směr. Jsou vymezeny distanční trubičkou mezi vnitřním ložiskovým kroužkem a zajištěny šestihranným unašečem kola. Zamezují posuvu hřídele směrem do převodové skříně, kde by mohl vážně poškodit kuželové převody. Unašeče jsou zajištěny kolíkem a proti jeho vysunutí z díry je po obvodu natažena gumička. Na unašečích jsou nasazena kola a zabezpečena samojistícími matkami.

## 2.2 Robotické rameno

Robotické rameno jsem nechtěl vyprojektovat ve stylu současných robotických hraček, které nerozlišují aktivní člen jako motor nebo servomotor od konstrukčního prvku. To je velmi časté právě u robotických ramen malých rozměrů, kde se přímo na hřídel serva upevní jednotlivé díly konstrukce, které ji drží pohromadě. Jsou tak vystavovány silám, na které nejsou stavěné. Snažil jsem se proto navrhnout rameno tak, aby byly tyto členy v konstrukci odděleny.

### 2.2.1 Popis konstrukce

Robotické rameno, které je inspirováno proporcemi jednotlivých částí lidské paže, má 5 stupňů volnosti. Jeho konstrukce je tvořena třemi nezávislými pákami, spojenými jednoosými klouby. Celé rameno je usazeno na otočném podstavci.

Velikost pák je optimalizována tak, aby bylo možné rameno částečně složit dohromady a ušetřit množství zabraného prostoru. Každý z kloubů je vybaven kuličkovými ložisky, aby se páka dokázala v kloubech plynule pohybovat kolem daného hřídele a nedocházelo zde ke zbytečným ztratám tažné síly. Konečná páka ramene je od dvou předchozích zkonstruována odlišně. Využívá část své váhy jako protizáváží, což zlepšuje její chování a snižuje tak celkové zátížení servomotoru. Zakončení páky tvoří otvor s ložisky a procházejícím hřídelem, na kterém se otáčí uchopovací modul nebo jakákoliv jiná násada upravená pro daného robota.

#### 2.2.1.1 Horizontální pohyb

Základem podstavce ramene je deska připevněná na podvozek. Na její spodní straně je upevněn potenciometr, jehož hřídel prochází deskou a slouží jako hřídel pro rotující talíř s ramenem. Mimo to plní potenciometr také funkci zpětné vazby. Do vrchní části desky je vyříznutý kruh, ve kterém je usazené ozubené kolo. Po obvodu kruhu je rozmístěno 6 malých válečků, které slouží jako axiální ložisko a zabraňují tak poškození hřídele při pohybu ramene, kdy se mění pozice jeho těžiště.

Na rotujícím talíři jsou upevněny dva infračervené triangulační senzory [[3.4.1]] posunuty vůči sobě po obvodu o 180°. Pohyb rotačního talíře je zajištěn servomotorem GO-13 od firmy Pelikán. Servomotor rotuje kolem stacionárně upevněného ozubeného kola na spodní desce. Pro tuto úlohu musel být servomotor nejprve upraven [[2.2.2.2]]. Při testování otáčení ramene se vyskytly komplikace s vysokým valivým třením, jež bylo způsobeno deformací výrobního materiálu komatexu. Řešením bylo nalepení hliníkového proužku po obvodu rotačního talíře a zakoupení servomotoru s naddimenzovaným tahem  $2.4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

### 2.2.1.2 Vertikální pohyb

Rameno uvádí do pohybu 6 servomotorů. Tři z nich ovládají pohyby vertikální. Ty jsou uchyceny na otočném talíři a na hlavní a koncové páce. Servomotory přenášejí síly přes ozubená kola s přímým ozubením a převodovým poměrem 1 : 1, aby se zachovala maximální velikost výchylek. Výjimkou je páka vycházející přímo z otočného talíře, kde je servomotor připevněn rovnou na jednu stranu páky.

Důležitým faktorem pro výběr servomotorů byla cena a velikost jejich tahu. Bylo proto rozhodnuto zakoupit servomotory od firmy Hobbyking s označením HK15288A a tahem  $9 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$ . To bylo však slabé pro otáčení nejspodnější páky, která nese největší zátěž. Proto byl vybrán servomotor JX s označením PDI-5521MG a tahem  $20.32 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Pro otáčení uchopovacího modulu se cenově a výkonově projevil jako nejvhodnější servomotor Pelikán GO-13 s tahem  $2.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Později se také uplatnil z důvodů své malé hmotnosti i pro pohyb uchopovacího modulu.

### 2.2.1.3 Uchopovací modul

Bází uchopovacího modulu je hliníková deska se zahnutým okrajem v její zadní části. Modul slouží k upevnění unašeče, který je zajištěn střížným kolíkem. Uprostřed desky je obdélníkový otvor pro servomotor napojený na lineární vedení rozvádějící pohyb přes táhla na robotické čelisti. Pro lepší adhezi mezi čelistmi a zvedaným předmětem byl na obě styčné plochy nalepen pruh pěny.

Pro výrobu uchopovacího modulu byla prioritou jednoduchost jednotlivých dílů. Neměl jsem možnost nechat jednotlivé díly vyrobít laserem, a proto jsem byl nucen je vyrobit sám v domácích podmínkách. To způsobilo nadměrné vůle v osách táhel. Východiskem z problému bylo upravení malé části kuličkového výsuvu pro stolní zásuvky a jeho vložení do konceptu modulu. Ten zajistil, aby se táhla na obou stranách pohybovala stejně rychle a aby jejich pohyb byl plynulý.

## 2.2.2 RC Servomotor

Tato zařízení jsou rotační aktuátory používané často v R/C modelářině a robotice. Umožňují ovládat a kontrolovat úhel natočení hřídele servomotoru, jeho akceleraci a rychlost. Mohou být rozděleny podle způsobu pohybu hřídele na lineární, kdy se výstupní hřídel posouvá po přímce, a rotační, kdy hřídel rotuje. V případě robota Kláry jsou použity jen rotační servomotory.

### 2.2.2.1 Princip funkce

Vnitřní stavbu RC servomotoru [6] tvoří sofistikovaná výpočetní jednotka, potenciometr, převodovka a elektromotor. Díky potenciometru je možné nastavit výstupní

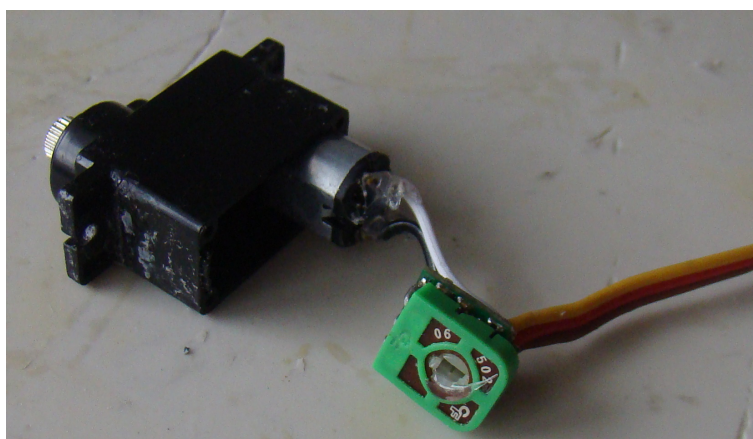
hřídel servomotoru do konkrétní polohy, poněvadž se jedná o takzvaný absolutní enkodér, kde pro každou hodnotu zpětné vazby je odpovídající pozice hřídele. Toho využívá výpočetní jednotka, jež je mozkiem celého servomotoru. Přijímá PWM signál od uživatele, dekoduje jej, roztáčí vestavěný motor, a kontroluje výstupní hodnotu zpětné vazby s hodnotou zaslou uživatelem.

Po přijetí požadované pozice se servomotor začne otáčet, přičemž kontroluje potenciometr a dorovnává jeho hodnotu na hodnotu požadovanou. Jestliže jsou stejné, servomotor dále nic nenastavuje, dokud nedostane nový příkaz. V případě, že se hřídel vnější silou vychýlí z požadované pozice, začne pozici opět dorovnávat.

### 2.2.2.2 Úprava servomotoru

K rotaci ramene kolem osy  $z$  bylo třeba použít motor s převodovkou. Ukázalo se, že nejjednodušším řešením bude použití upraveného servomotoru, který má již převodovku implementovanou, dokáže být regulován bez přídavné elektroniky a z finančního hlediska je levnější než malé motory s převodovkou.

Úpravu jsem provedl na již otestovaném servomotoru GO-13. Bylo třeba odpojit potenciometr od A/D převodníku řídicí jednotky a na jeho místo zapojit trimr jako napěťový dělič s celkovým odporem  $5\text{ k}\Omega$ , který byl zvolen podle odporu původního potenciometru. Zabraňuje tak změně zpětnovazebné hodnoty při otáčení hřídele servomotoru. Trimr byl nastaven stacionárně do střední polohy, aby na převodníku bylo nativně napětí  $2.5\text{ V}$  odpovídající šířce pulzu  $1.5\text{ ms}$ , a robot tak mohl využívat plnou rychlost otáčení výstupní hřídele v obou směrech.



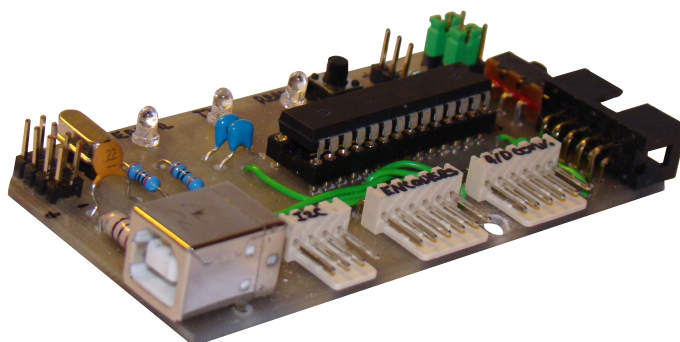
Obr. 2.2: Napájený trimr na desku servomotoru

## 3 ELEKTRONIKA

Robota je možné zapnout nebo vypnout jedním přepínačem. Vzhledem k tomu, že elektronikou robota může procházet maximální proud kolem 20 A. Nebylo možné sehnat přepínač s požadovanými rozměry, který by byl schopen přenést proud výše uvedené hodnoty. Zvolil jsem proto způsob spínání obvodu přes autorelé, jež je aktivováno kolébkovým přepínačem a je nadimenzováno na maximální proud 30 A.

### 3.1 Deska AddPU

Deska AddPU (additional processing unit) slouží majoritně jako spojovací člen mezi inkrementálními magnetickými enkodéry [[3.4.2]] a centrálním počítačem. Při pohybu robota se hodnota enkodérů stále mění, proto je nutné tyto senzory pravidelně kontrolovat. To není dost dobře možné v operačních systémech, kde se užívá metoda multitaskingu. Ta rozdělí jednotlivé procesy na vlákna a naplňuje jejich pořadí podle jejich priority (systémové procesy mají nejvyšší prioritu). Zavedením přídatného modulu do jádra systému by bylo možné tento problém vyřešit, to by však bylo časově náročné.



Obr. 3.1: Deska AddPU

Deska disponuje vyvedenými vstupy do A/D převodníku pro čtení dat reflexních senzorů, které zatím robot nevyužívá. Její rozměry byly určeny tak, aby ji bylo možné vyrobit tonerovou metodou a zároveň vyhovovaly rozměrům vyhrazeného prostoru. Řídící jednotkou celého modulu je mikročip AVR ATmega8 [7] od firmy Atmel, 8-bitový mikročip s nativní frekvencí 1 Mhz. Ta však nestačila při komunikaci s centrálním počítačem, proto byl mikročip přetaktován s pomocí interního krystalu na 8 Mhz. Mimo to je zde k dispozici také patice pro externí krystal. Ten může mít podle dokumentace hodnotu až 16 Mhz.

Mikročip disponuje integrovaným rozhraní TWI (Two wire interface). Jedná se o jiné

pojmenování rozhraní I<sup>2</sup>C z licenčních důvodů. Program je zaváděn do paměti Flash, což je zprostředkováno přes ISP rozhraní. Jako pojistka proti vzniku napěťových rozdílů v případě, že je deska připojena na dva zdroje, zde slouží dva jumpery, které musí být přenastaveny při zápisu programu z počítače. Napájení je zajištěno pulzním stabilizátorem na 5 V. U těchto stabilizátorů vzniká rušení, které by mohlo ovlivnit výpočty A/D převodníku. Byl proto použit LC člen, jehož parametry jsem zvolil podle datasheetu [7]. Deska AddPU poskytuje napájení centrálnímu počítači, proto je vybavena vystupním konektorem USB standard-B. Zprávu o průběhu programu dávají tři kontrolní LED. Oranžová barva informuje o inicializaci přerušení, červená kontrolka informuje o spuštěném programu a modrá bliká při přenosu dat přes sběrnici.

## 3.2 Ovládání servomotoru

Plošné spoje vyrobené v domácích podmínkách byly nejen náročné na výrobu, ale vznikaly u nich snadno přechodové odpory zapříčiněné kyselinou, jež vytvořila malé trhliny v mědi. Z tohoto důvodu byl k řízení servomotorů zakoupen modul Mini-Maestro12 [8] od firmy Pololu. Jde o zařízení s dvanácti kanály, které mohou být nezávisle nastaveny do tří módů: A/D převodník s rozlišením 10-bitů, R/C PWM generátor signálů a digitální výstup. Robot využívá jen dva módy. Čtyři kanály slouží jako vstupy 10ti bitového A/D převodníku pro infračervené trinagulační senzory, ostatní jsou pak nastaveny do módu pro ovládání servomotorů. Kromě toho je možné na stránkách výrobce volně stáhnout software k real-time řízení jednotlivých kanálů, což bylo v průběhu stavby velmi prospěšné hlavně k testování pohybu robotického ramene a podvozku.

Maestro lze propojit s počítačem přes mini USB nebo sběrnici UART. Přes tu komunikuje s centrálním řídicím počítačem s použitím Pololu protokolu.

Napájení desky je zprostředkováno dvěma zdroji. Jedním zdrojem je Raspberry Pi, přes které je vedeno napětí 5 V z AddPU k celé řídicí jednotce. Druhým napájení je spínaný zdroj na 6 V, který dokáže propustit až 5 A. Je napojen na napájecí piny servomotorů, jimž tak zvládne dodat dostatek výkonu k jejich pohybu.

## 3.3 Ovládání motorů

Řízení motorů je zprostředkováno ovladačem Sabertooth 2x5 [9]. Ovladač je schopen kontrolovat nezávisle na sobě dva motory na 6 – 18 V, nepřetržitě umožňuje každému z nich dodávat proud až 5 A. Sabertooth byl vybrán, neboť může být řízen signálem z modelářské elektroniky (signal 1-2ms).



Centrální počítač disponuje jen dvěma sběrnici, tudíž bylo nutné propojit ovladač motorů s deskou Mini-Maestro12. To je docíleno dvěma signálními vodiči a dvěma vodiči propojujícími GND obou zařízení.

Sabertooth může být napájen 6-12ti článkovými NiCd, NiMh bateriemi nebo 2-4 články Li-pol. Mimo to dokáže při změně směru chvilkově zpětně nabíjet baterie, čímž šetří energii.

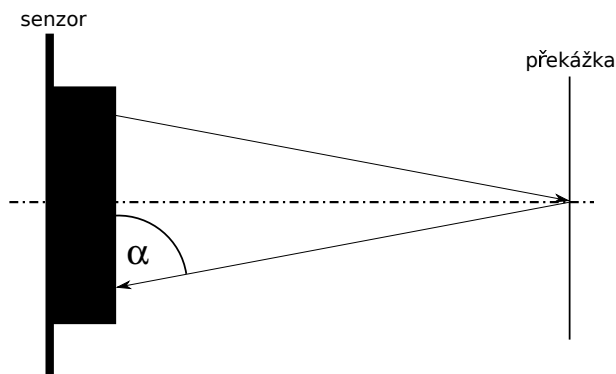
Na desce se nachází čtyři šroubovací svorkovnice. Tři se dvěma kontakty, pro výstup na motory a vstup napájení z baterie, a jedna se čtyřmi kontakty pro zapojení napájecích vodičů, které mohou v případě potřeby vést napětí z interního stabilizátoru BEC na 5 V do R/C přijímače nebo podobných zařízení, a vstupních vodičů signálních. Dále jsou zde umístěny dvě LED, které sdělují různé stavy, které v dané situaci nastaly, a panel se šesti kodovacími přepínači pro nastavení různých režimů.

### 3.4 Senzory

Na robotovi jsou nainstalovány dva typy senzorů. Jsou to triangulační infračervené senzory, které byly vybrány na základě nízké pořizovací ceny, a magnetické inkrementální enkodéry. Ty jsou součástí motorů.

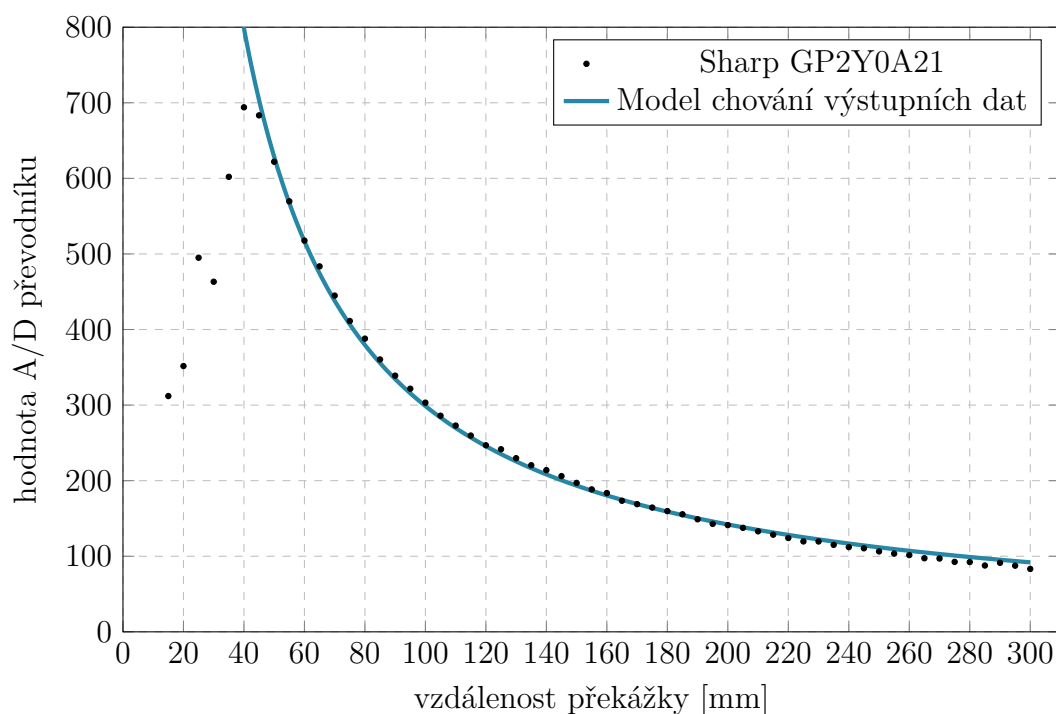
#### 3.4.1 Infračervené triangulační senzory

Tento typ senzorů měří vzdálenost triangulací s pomocí infračerveného světla [10]. V senzoru je umístěna infračervená LED a lineární CCD pole jako detektor odraženého paprsku. Infračervené paprsky emitované LED procházejí do prostoru. Když narazí na překážku, odrazí se zpět ve směru detektoru. Vytvoří se tak trojúhelník s vrcholy v bodě odrazu a v místech detektoru a LED.



Obr. 3.2: Odražený paprsek od překážky dopadající pod úhlem na CCD v senzoru

Úhel dopadajícího světla závisí na vzdálenosti překážky od senzoru. Příchozí světlo prochází čočkou, která nasměruje světlo na lineární CCD pole. Senzor pak může určit úhel podle množství dopadlých paprsků. Výhodou této metody měření vzdálenosti je její minimální ovlivnitelnost okolním světlem a barvou překážky. Pro robota byl vybrán infračervený triangulační senzor s označením GP2Y0A21 od firmy Sharp [11]. Jedná se o senzor s analogovým výstupem.

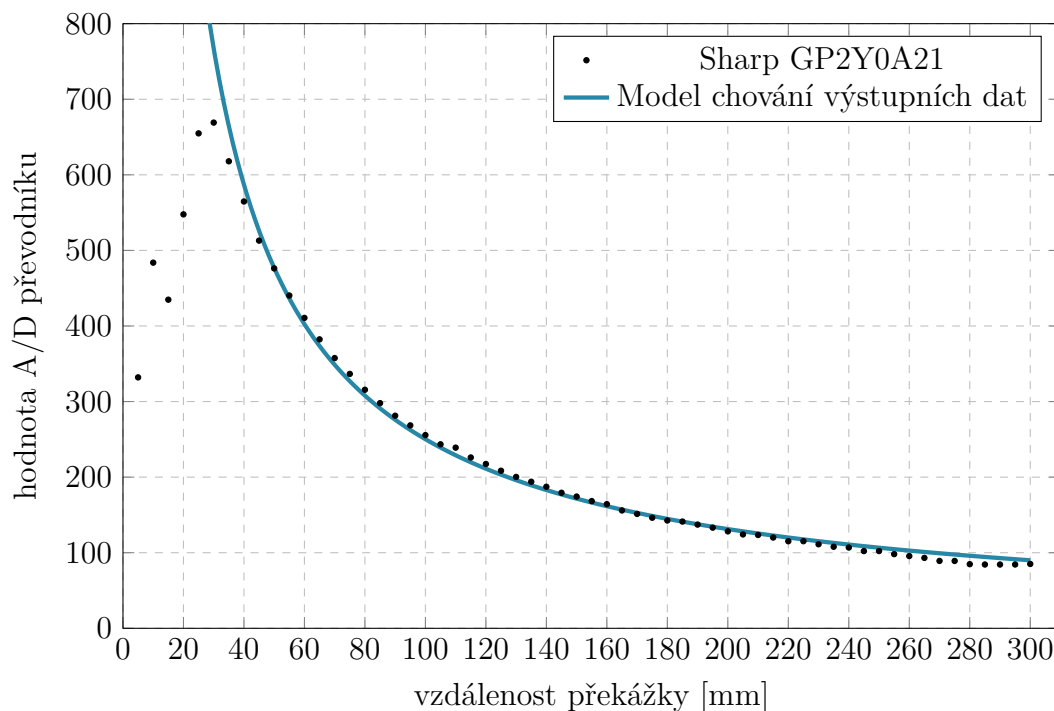


Obr. 3.3: Závislost hodnoty A/D převodníku na vzdálenosti

Graf (obr. 3.3) zobrazuje výstupní charakteristiku hodnot senzoru změřenou 10ti bitovým A/D převodníkem v závislosti na vzdálenosti překážky. Černé body v grafech naznačují jednotlivá měření a modrá lomená funkce znázorňuje teoretický model chování senzoru.

Výstup senzoru není stabilní. Hodnoty jednotlivých měření jsou rozdílné, i přestože se vzdálenost nemění. Odchylka měření se pohybuje v rozmezí 1 až 25 jednotek, což znamená, že lze měřit jen přibližnou vzdálenost překážky. K získání jednotlivých bodů v grafu bylo provedeno 60 měření po půl centimetru a u každého vypočten aritmetický průměr z 500 hodnot.

Vzdálenost od překážky lze spočítat z grafu naměřených výstupních dat, to ovšem obvykle vyžaduje počítání v plovoucí čárce, což je velmi náročné na výpočet. Z tohoto důvodu, aby bylo možné senzor využít v zařízeních s nižším výpočetním výkonem, výrobce doporučuje naměřená výstupní data zlinearizovat.



Obr. 3.4: Závislost vzdálenosti na hodnotě z A/D převodníku s filtrem

Před linearizací bylo nutné vytvořit nejvhodnější graf výstupních dat tak, aby výsledná rovnice dokázala vrátit vzdálenost s přesností  $\pm 1$  centimetr. To nebylo možné provést bez filtrace dat, neboť data výstupu se neustále měnila. Byl proto vytvořen filtr [[4.2.2]], který zajistil stabilitu výstupu a s ním naměřená nová data. To bylo provedeno podobným způsobem jako u předchozího grafu. Program měřil postupně 500 hodnot a aplikoval filtraci na každých dvacet naměřených čísel. Vyfiltrované hodnoty nakonec zprůměroval.

Charakteristika výsledného grafu je mírně odlišná od grafu prvního (obr. 3.3). V klesající části grafu jsou vyhlazena některá místa. Bylo experimentálně zjištěno, že jej lze mnohem lépe proložit než graf předchozí.

### 3.4.1.1 Linearizace

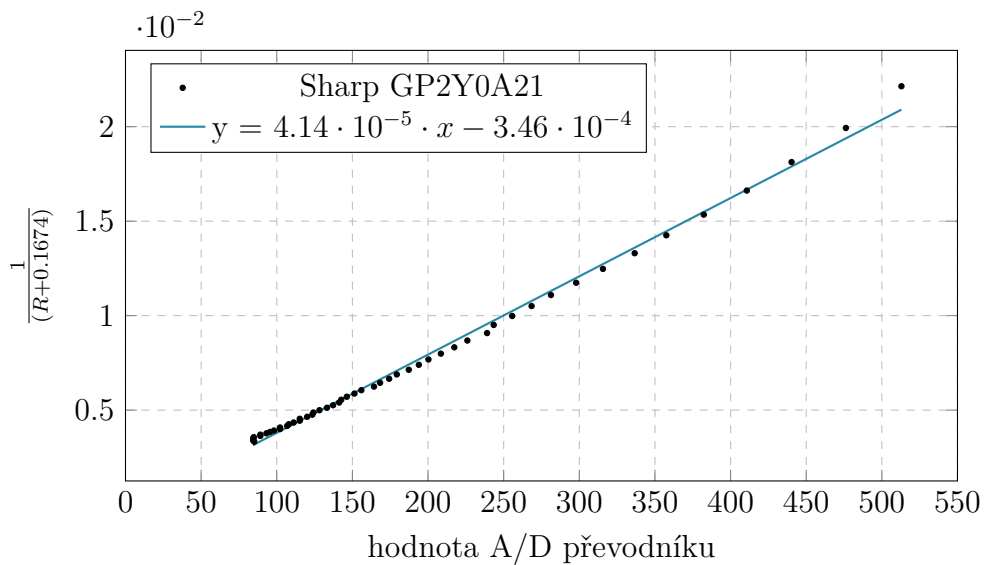
Linearizaci výstupu jsem provedl na základě linearizačních vzorců, které výrobce senzoru uvádí na svých webových stránkách [12]. Z naměřených dat v grafu (obr. 3.4) bylo vyňato prvních šest hodnot, neboť je možné zlinearizovat jen část grafu hyperbolického charakteru. Výsledná funkce bude tedy definována jen v určitém oboru hodnot.

$$V = \frac{1}{R + k} \quad (3.1)$$

Prvním krokem bylo zjistit konstantu  $k$ . Podle vzorce (3.1), kde  $V$  představuje hodnotu A/D převodníku a  $R$  je vzdálenost. Výpočet byl proveden v programu gnuplot, kde konstanta  $k$  vyšla  $k = 0.167377$ .

$$V = \frac{1}{R + 0.167377} \quad (3.2)$$

Zpětným dosazením těchto hodnot do rovnice (3.2) nabudou výstupní data téměř lineárního charakteru (obr. 3.5). Z tohoto důvodu je možné data proložit lineární regrezní přímkou, jež zlinearizovaná data nahradí.



Obr. 3.5: Zlinearizovaný výstup

Pro výpočet je tedy možné vycházet ze vzorce lineární funkce (3.3), do které je za proměnnou  $y$  dosazen vzorec pro linearizaci výstupních dat (3.1) a za proměnnou  $x$  hodnota A/D převodníku.

$$y = m \cdot x + b \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{R + k} = m \cdot V + b \quad (3.4)$$

$$R = \frac{1}{mV + b} - k \quad (3.5)$$

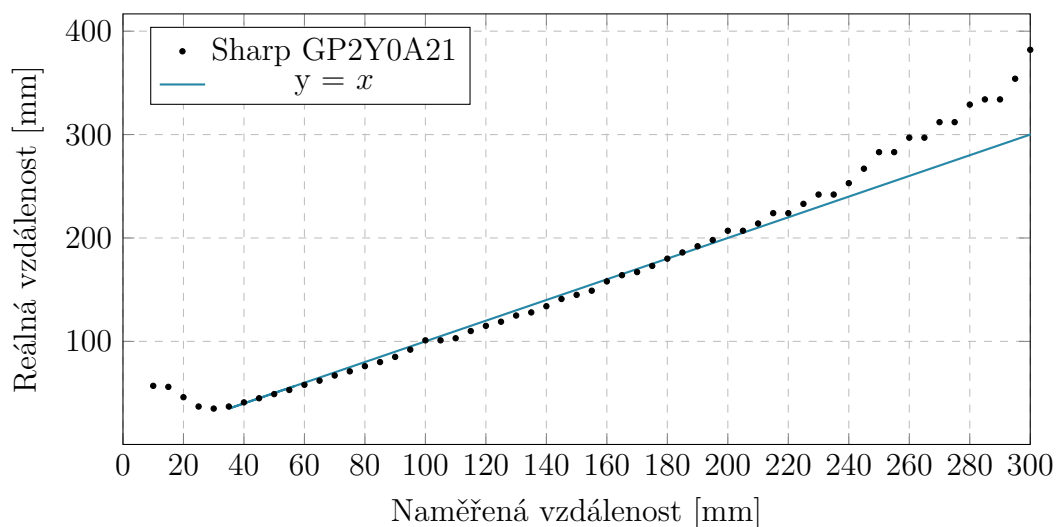
Vzorec (3.5) je možné efektivně využít pouze na zařízeních, která dokáží provádět výpočty s plovoucí čárkou. Proto jej výrobce upravil do vzorce (3.6), fungujícího pro celočíselné matematické operace, kde platí, že  $m' = \frac{1}{m}$  a  $b' = \frac{b}{m}$ .

$$R = \frac{m'}{(V + b')} - k \quad (3.6)$$

Po těchto úpravách platí mezi vzdáleností od překážky  $R$  a hodnotou A/D převodníku  $V$  závislost v rovnici (3.7).

$$R = \frac{24141}{(V - 8)} - 0.17 \quad (3.7)$$

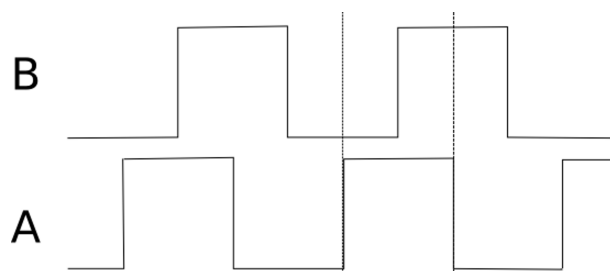
Senzor dokáže měřit vzdálenost pouze v rozmezí hodnot, které byly zlinearizovány. To ovšem není úplně přesné, proto byly hranice korektního měření určeny experimentálně, což bylo velmi efektivní řešení. Výsledkem byl graf (obr. 3.6), kde jsou jednotlivá měření naznačena body a lineární přímka určuje ideální stav, kdy se reálná hodnota naměřená metrem rovná výstupní hodnotě senzoru.



Obr. 3.6: Graf závislosti vzdálenosti změřené senzorem na reálné vzdálenosti

### 3.4.2 Inkrementální enkodéry

Inkrementální enkodéry slouží ke snímání vzdálenosti a směru otáčení. Díky pravidelnému vyčítání hodnot lze také s jejich pomocí měřit i rychlost. To je zprostředkováno kotoučem, který je upevněn na hřídeli (kola, motoru...) s pravidelně se opakujícími



Obr. 3.7: Fázově posunuté signály inkrementálního enkodéru

vyznačenými dílkami a dvěma snímači, které jsou vůči sobě posunuty o  $90^\circ$ . Při otočení hřídele tak vzniknou dva grafy (obr. 3.7) fázově posunutých signálů A a B.

Robot využívá enkodéry založené na stejném principu snímání. Jedná se o magnetické inkrementální enkodéry [13] skládající se ze dvou hallových sond a magnetického kotouče. Výrobce udává 64 změn za jednu otáčku hřídele enkodéru, což znamená 1200 změn za jednu otáčku hřídele převodovky.

### 3.5 Napájení

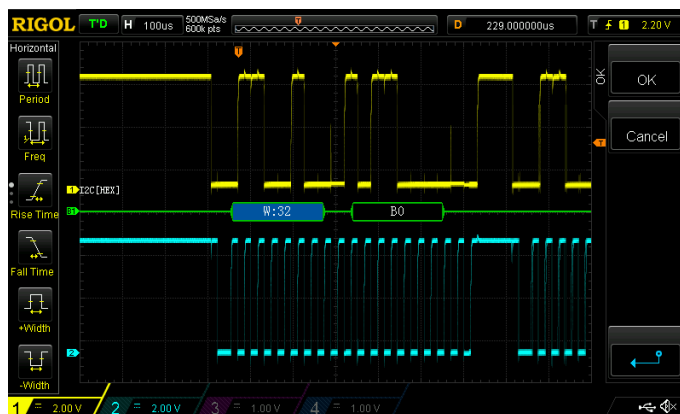
Robot je napájen jednou tříčlánkovou Li-Pol baterií s napětím kolem  $12\text{ V}$  a kapacitou  $2500\text{ mAh}$ , která byla vybrána na základě malých rozměrů a malé hmotnosti. Její napětí bylo potřeba stabilizovat na  $6\text{ V}$  pro napájení servomotorů. K tomu bylo nutné vyrobit stabilizátor, který dokáže stabilizovat  $12\text{ V}$  na  $6\text{ V}$ , přičemž může propustit až  $5\text{ A}$ . Při použití slabších zdrojů se vyskytly komplikace s napájením servomotorů. Jednalo se o modelářský stabilizační a ochranný obvod BEC, který byl nadimenzován jen na  $2\text{ A}$ . Velmi malá proudová ochrana způsobovala padání robotického ramene při větší zátěži. Musel být tudíž dokoupen stabilizátor na  $6\text{ V}$ , který dokáže servomotorům potřebný proud dodat. Při použití lineárního třibodového stabilizátoru by to znamenalo ztrátu až  $30\text{ W}$ . Z tohoto důvodu byl použit spínaný stabilizátor [14] od firmy BEL, který byl využit také pro napájení AddPU. Tento typ stabilizátorů se používá pro stabilizaci napětí v případech, že je vstupní napětí mnohem vyšší než potřebné výstupní, neboť se jejich účinnost pohybuje kolem 80-95%.

## 4 SOFTWARE

### 4.1 Síť zařízení

Robot disponuje centralizovanou sítí. Hlavním mozkiem je počítač Raspberry Pi [15], jednodeskový počítač s nainstalovaným systémem Linux (Raspbian squeeze, ver. kernelu 3.18), který komunikuje s modulem AddPU [[3.1]] a Mini Maestro 12 [[3.2]] přes sběrnice I<sup>2</sup>C [16] a UART [17]. Byl vybrán na základě snadné dostupnosti a podpory knihoven [18] pro ovládání sběrnice.

Sběrnice I<sup>2</sup>C byla vyvinuta firmou Philips. Z licenčních důvodů se u AVR mikročipů používá název TWI (Two Wired Interface). Sběrnice využívá k přenosu dat dva vodiče SCL – hodinový signál a SDA – datový vodič. Narozdíl od sběrnice UART, která může propojit jen dvě zařízení, I<sup>2</sup>C je schopné jich propojit až 127. Je často využívána pro přenos na krátké vzdálenosti nebo tam, kde komunikuje zařízení rychlejší se zařízením pomalejším. To je zajištěno funkcí clock-stretching, tzn. když je zařízení pomalejší, může si podržet hodinový signál na logické nule a celou komunikaci pozdržet. Zde se vyskytl problém při programování AddPU. Raspberry funkci clock-stretching nepodporuje a udržuje stále stejný hodinový pulz. To může způsobit různé deformace zasílaných dat. Například, že se poslední bit nebo více bitů neodešle. Tento problém byl vyřešen snížením frekvence hodinového pulzu vysílaného masterem na hodnotu 3200 baudů a zvýšením taktovací frekvence ATmega8.



Obr. 4.1: Komunikace na sběrnici I<sup>2</sup>C mezi AddPU a Raspberry Pi

V případě UART se jedná také o sériovou komunikaci ovšem asynchronní, kde se komunikace zprostředkovává rovněž jako u I<sup>2</sup>C na dvou vodičích; Tx – k vysílání dat, Rx – k přijímání dat. Na žádném však není hodinový pulz. Výhodou této metody je, že může přenos probíhat v obou směrech zároveň.

## 4.2 Operační mód

### 4.2.1 Popis módu

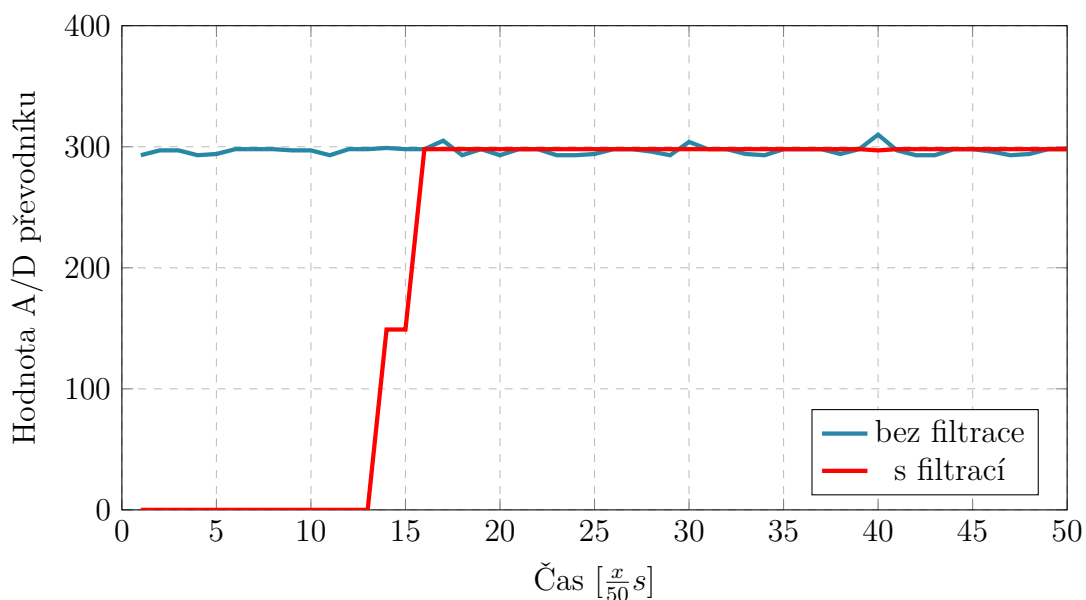
Po sepnutí přepínače si robot načte data ze všech senzorů do paměti, aby zjistil cesty možného pohybu. V případě, že je více možností, rozhodne se podle priority pravé strany. To znamená, když vpravo nebude překážka, zabočí vpravo, jeliže bude, pak zabočí vlevo. Pokud všechny senzory kromě zadního zaznamenají překážku, robot bude couvat. V ostatních případech preferuje pohyb vpřed.

### 4.2.2 Filtrace senzoru Sharp GP2Y0A21

Výstup těchto senzorů je velmi nestabilní. Proto bylo třeba vytvořit algoritmus k docílení jeho stability.

Otestoval jsem tři způsoby filtrace; výpočet mediánu, aritmetický průměr a zjištění nejčastější hodnoty. Testování ukázalo, že nejstabilnější výstup má poslední metoda. Algoritmus této metody změří a načte 20 čísel do pole. Během načítání kontroluje jaké číslo má nejvyšší zastoupení v poli a to pak vypíše na výstup. Jakmile se pole naplní, začnou se jednotlivé hodnoty přepisovat novými a algoritmus se opakuje.

Graf znázorňuje měření s filtrem a bez filtru s frekvencí  $50\text{ Hz}$  po dobu jedné sekundy. Na grafu s filtrovaným výstupem je možné pozorovat, jak se data mění na stabilní hodnotu, to je zapříčiněno převažující hodnotou nula v prázdném poli.



Obr. 4.2: Stabilita sensorového výstupu



## ZÁVĚR

V rámci práce bylo dosaženo základního vytčeného cíle. Byla vyprojektována a sestavena mechanická konstrukce robota s elektronickým osazením a základním programem pro pohyb. Robot však ještě z časových a finančních důvodů není dokončen. V budoucnu bude vytvořen program k ovládání robotického ramene, které bude vybaveno reflexními senzory umístěnými na manipulační robotické ruce, aby se dokázala správně rozevřít a uchopit dané těleso. Ke čtení výstupních dat reflexních sensorů je nutné vyrobít plošný spoj se zesilovačem signálů. Ty budou měřeny přes A/D převodník. Nakonec bude zprovozněno otáčení celého ramene nezávisle na podvozku. Tím bude zajištěna nejen vyšší flexibilita při manipulaci s ramenem, ale i možnost měření vzdáleností v různých směrech bez nutnosti natáčení celého podvozku. To umožní robotu ohlížet se po okolí v různých směrech i při jízdě.



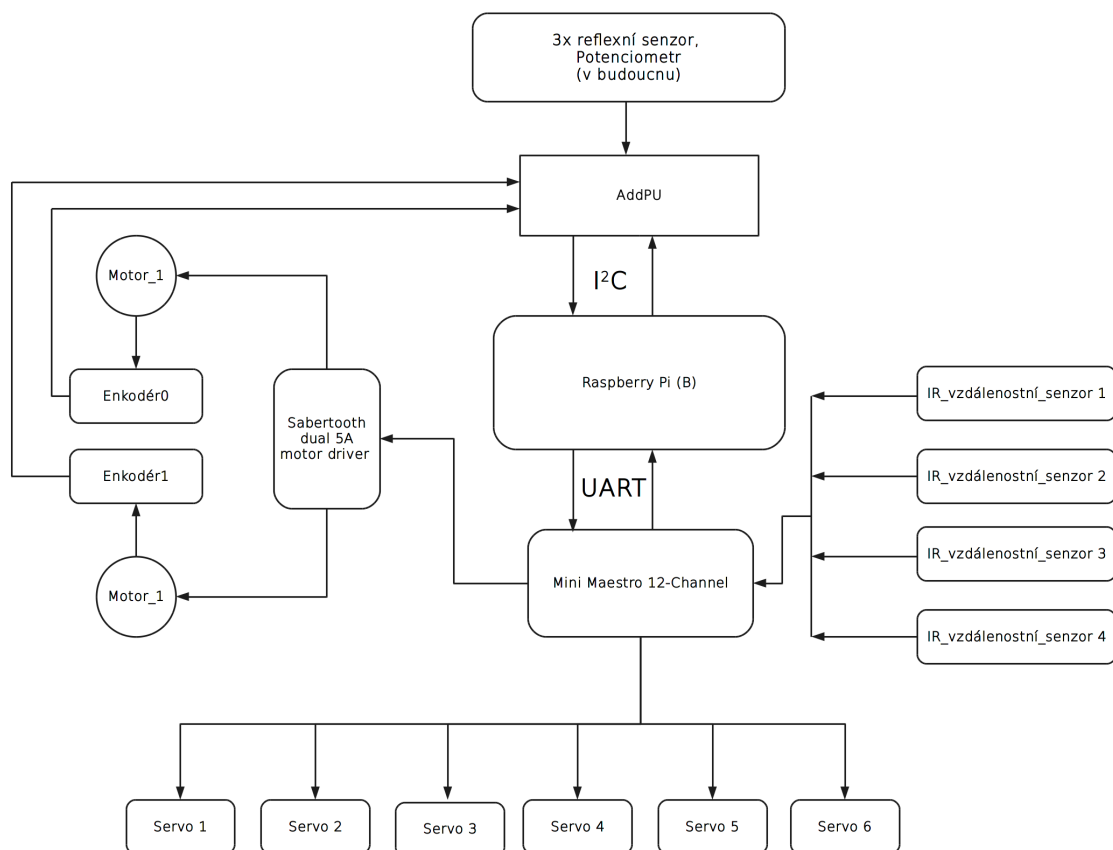
Obr. 4.3: Robot

## LITERATURA

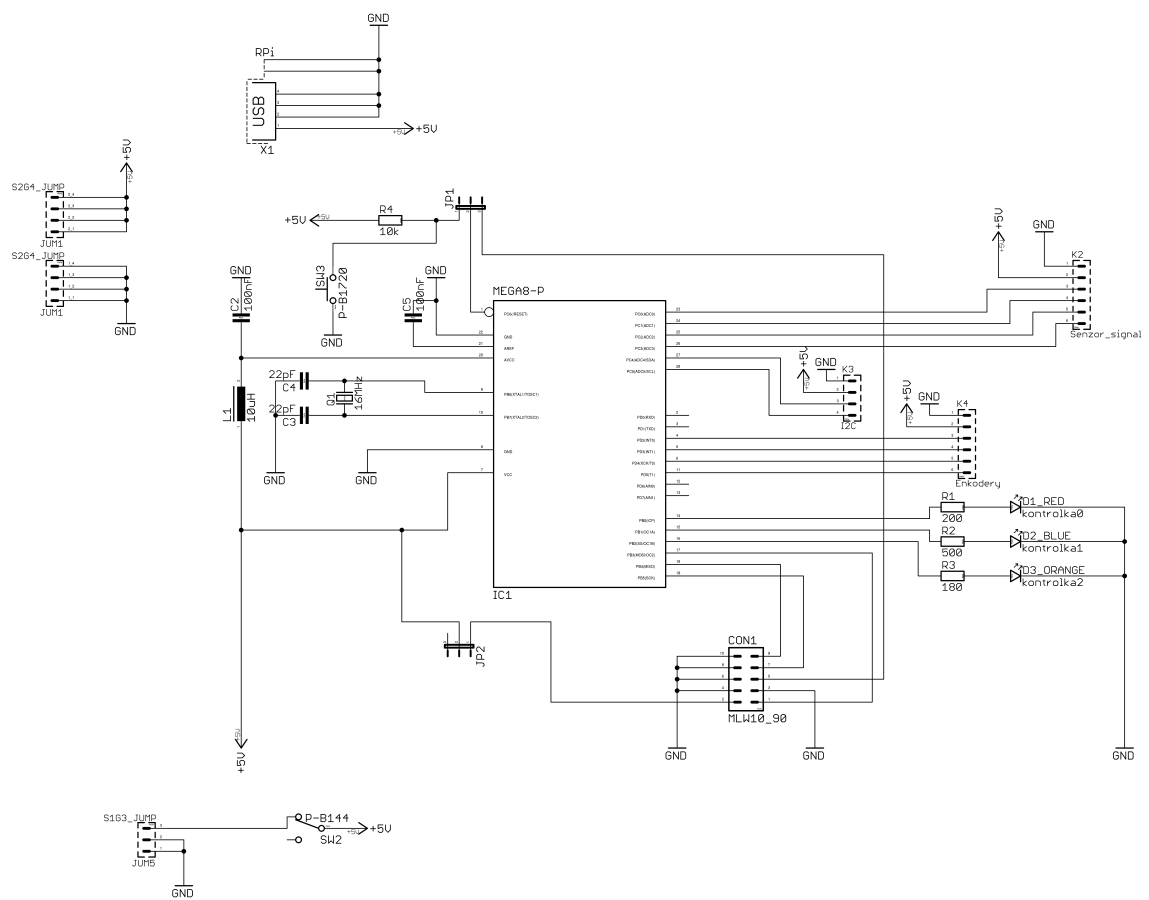
- [1] DLOUHÝ, Martin a Zbyněk Winkler. Co je to robot?. *robotika.cz*. [online]. 22.1.2005 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<http://robotika.cz/guide/robot/cs>>
- [2] KOŠNAR, Karel. *Mobilní robotika*. [online]. České vysoké učení technické v Praze, [2007] [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <<http://www.roznovskastredni.cz/dwn1/pel2007/06/Kosnar.pdf>>
- [3] Wheel Control Theory.*robot platform*. [online]. 2010-2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <[http://www.robotplatform.com/knowledge/Classification\\_of\\_Robots/wheel\\_control\\_theory.html](http://www.robotplatform.com/knowledge/Classification_of_Robots/wheel_control_theory.html)>
- [4] WINKLER, Zbyněk. Odometrie. *robotika.cz*. [online]. 5.12.2005 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<http://robotika.cz/guide/odometry/cs>>
- [5] 19:1 Metal Gearmotor 37Dx52L mm with 64 CPR Encoder. *Pololu Robotics & Electronics*. [online]. ©2001-2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<https://www.pololu.com/product/1442>>
- [6] How RC Servos Works. *PCBheaven*. [online]. 19.6.2009 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <[http://pcbheaven.com/wikipages/How\\_RC\\_Servos\\_Works/](http://pcbheaven.com/wikipages/How_RC_Servos_Works/)>
- [7] Datasheet ATmega8. *Atmel Corporation*. [online]. ©2013 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <[http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8\\_L\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf)>
- [8] Pololu Maestro Servo Controller User's Guide. *Pololu Robotics & Electronics*. [online]. ©2001-2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<https://www.pololu.com/docs/0J40>>
- [9] Sabertooth 2x5 User's Guide. *DimensionEngineering*. [online]. únor 2007 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<http://www.dimensionengineering.com/datasheets/Sabertooth2x5.pdf>>
- [10] SENSORS - SHARP IR RANGE FINDER. *Society Of Robotics*. [online]. ©2005-2014 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <[http://www.societyofrobots.com/sensors\\_sharpirrange.shtml](http://www.societyofrobots.com/sensors_sharpirrange.shtml)>
- [11] GP2Y0A41SK0F datasheet. *SHARP*. [online]. 8.8.2013 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <[http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a41sk\\_e.pdf](http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a41sk_e.pdf)>

- [12] LINEARIZING SHARP RANGER DATA. *ACRONAME*. [online]. ©1994-2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<https://acroname.com/articles/linearizing-sharp-ranger-data>>
- [13] DLOUHÝ, Martin a Zbyněk Winkler. Enkodéry. *robotika.cz*. [online]. 30.10.2003 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<http://robotika.cz/guide/encoders/cs>>
- [14] Spínaný zdroj. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Spáňnanã\\_zdroj](http://cs.wikipedia.org/wiki/Spáňnanã_zdroj)>
- [15] lady ada. Introducing the Raspberry Pi Model B+. *adafruit*. [online]. 14.3.2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<https://learn.adafruit.com/category/raspberry-pi>>
- [16] I2C. *www.mikrocontroller.net*. [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<http://www.mikrocontroller.net/articles/IãC>>
- [17] SHAHMIR, Javaid. Raspberry Pi and Pololu Servo Controller using C. *SHAHMIR JAVAID*. [online]. 9.6.2013 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<http://shahmirj.com/blog/raspberry-pi-and-pololu-servo-controller-using-c>>
- [18] HENDERSON, Gordon. I2C Library. *Gordons Projects*. [online]. ©2012-2014 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z <<https://projects.drogon.net/raspberry-pi/wiringpi/i2c-library/>>

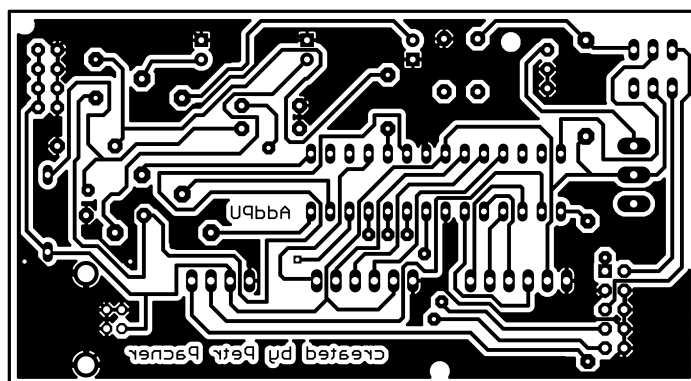
# PŘÍLOHY



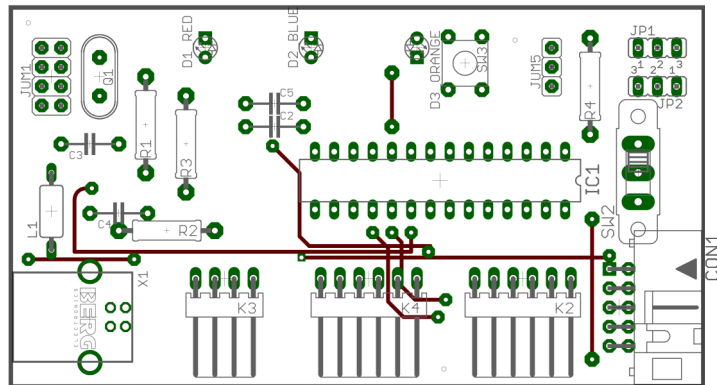
Obr. 4.4: Blokové schéma síť robota



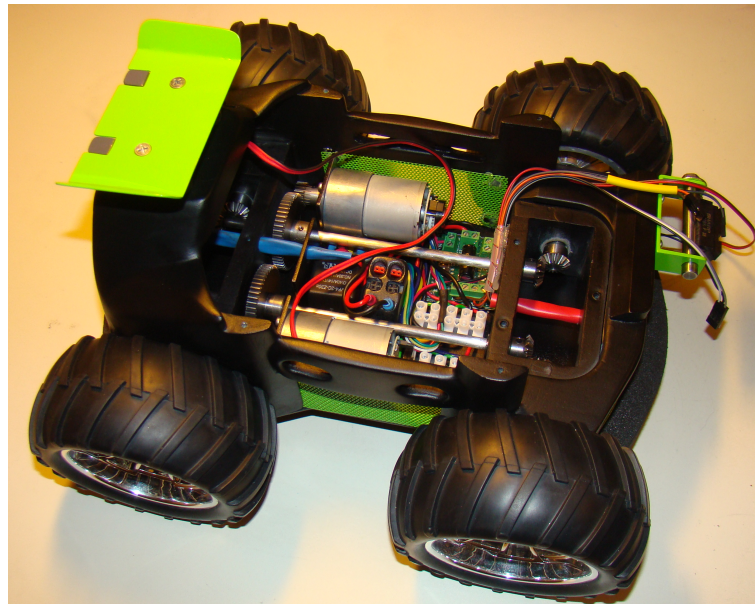
Obr. 4.5: Schéma desky AddPU



Obr. 4.6: Plošný spoj AddPU



Obr. 4.7: Osazovací plán desky AddPU



Obr. 4.8: Vnitřní elektronika s jednotkou pro řízení motorů