

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**NÁVRH MECHANICKÉHO TĚLA A SENZOROVÉHO**  
**SYSTÉMU ROBOTA**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**ALEŠ MARVAN**

BRNO 2007



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

# NÁVRH MECHANICKÉHO TĚLA A SENZOROVÉHO SYSTÉMU ROBOTY

DESIGN OF A BODY AND SENSOR SYSTEM OF A ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ALEŠ MARVAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FILIP ORSÁG, Ph.D.

BRNO 2007

## Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2006/2007

# Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Marvan Aleš**

Obor: Informační technologie

Téma: **Návrh mechanického těla a sensorového systému robota**

Kategorie: Umělá inteligence

Pokyny:

1. Prostudujte problematiku návrhu malých dvoukolových mobilních robotů. Zaměřte se na mechanickou konstrukci a sensorický a pohybový systém robota.
2. Navrhněte mechanickou konstrukci malého mobilního dvoukolového robota (berte v úvahu rozměry jednotlivých součástí).
3. Zkonstruuje robot na základě Vašeho návrhu mechanické konstrukce a elektrického řídicího systému.
4. Zhodnoťte výsledek své práce a navrhněte další postup - oživení robota, programové vybavení.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 a 2 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním paměťovém médiu (disketa, CD-ROM), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Orság Filip, Ing., Ph.D.**, UITS FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2006

Datum odevzdání: 15. května 2007

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta informačních technologií  
Ústav inteligentních systémů  
602 00 Brno, Božetěchova 2

---

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček  
vedoucí ústavu

**LICENČNÍ SMLOUVA  
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO**

uzavřená mezi smluvními stranami

**1. Pan**

Jméno a příjmení: **Aleš Marvan**  
Id studenta: 84248  
Bytem: Doležalova 798/18, 616 00 Brno  
Narozen: 08. 05. 1985, Brno  
(dále jen "autor")

a

**2. Vysoké učení technické v Brně**

Fakulta informačních technologií  
se sídlem Božetěchova 2/1, 612 66 Brno, IČO 00216305  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....  
(dále jen "nabyvatel")

**Článek 1  
Specifikace školního díla**

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):  
bakalářská práce

Název VŠKP: Návrh mechanického těla a sensorového systému robota  
Vedoucí/školitel VŠKP: Orság Filip, Ing., Ph.D.  
Ústav: Ústav inteligentních systémů  
Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

tištěné formě            počet exemplářů: 1  
elektronické formě      počet exemplářů: 2 (1 ve skladu dokumentů, 1 na CD)



2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## Článek 2 Udělení licenčního oprávnění

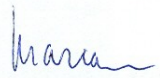
1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti:
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3 Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

  
.....  
Autor

## **Abstrakt**

Dokument obsahuje zpracování problematiky mobilních robotů. Součástí práce je konkrétní návrh a realizace mobilního robota pro mezinárodní soutěž Minisumo. Předpokladem pro sestavení mobilního robota je vytvoření teoretického podkladu, který je výchozím bodem pro sestavení vhodných parametrů vlastností, ze kterých se následně vychází při konečném návrhu a konstrukci. Práce dále obsahuje rozbor, teoretický návrh a konstrukci jednotlivých komponentů robota.

## **Klíčová slova**

Mobilní, robot, Minisumo, PWM, regulátor, stejnosměrný, motor, h-můstek, L6205, konstrukce

## **Abstract**

This thesis deals with a problematic of mobile robot design. There is proposed a design and realization of a mobile robot intended for an international competition - Minisumo. The first step in the development process is collecting of information, which helps us to find the most suitable elements. The next step is choosing of the individual elements fulfilling the design requirements according to their specification.

## **Keywords**

Mobile, robot, Minisumo, PWM, regulator, direct, current, motor, h-bridge, L6205, construction

## **Citace**

Aleš Marvan: Návrh mechanického těla a sensorového systému robota, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2007

# Návrh mechanického těla a senzorového systému robota

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením

Ing. Filipa Orsága, Ph.D.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Aleš Marvan  
14.5.2007

## Poděkování

Ing. Jaroslavu Pokornému za konzultace a pomoc při návrhu mechanické části robota.

Ing. Filipu Orságovi, Ph.D. a Ing. Martinu Drahanskému, Ph.D. za konzultace.

Firmě Oprox, a.s. za podporu při vývoji v podobě výroby tištěných spojů.

Firmě Uzimex Praha, spol. s r. o. za konzultace při výběru pohonu.

© Aleš Marvan, 2007.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

Obsah.....	1
1 Úvod.....	2
2 Soutěž Minisumo.....	3
2.1 Pravidla robotického Minisuma.....	4
2.2 Limity.....	5
2.3 Omezení robota.....	6
2.4 Zvyšování adheze.....	6
2.5 Zápas.....	6
2.6 Ring.....	8
3 Teoretický rozbor.....	9
3.1 Pohon.....	9
3.1.1 Princip činnosti.....	9
3.1.2 Řízení otáček.....	11
3.2 Akumulátory.....	12
3.2.1 Akumulátory NiCd a NiMH.....	12
3.2.2 Akumulátory Li-Ion a A123 Systems.....	13
3.2.3 Akumulátory Li-Pol.....	13
4 Návrh robota.....	15
4.1 Návrh mobilního robota pro soutěž Minisumo.....	15
4.2 Výběr pohonu.....	16
4.3 Regulátor.....	19
4.3.1 Popis regulátoru.....	20
4.3.2 Rozbor elektronického schématu.....	21
4.3.3 Generování PWM signálu.....	22
4.3.4 Komunikace s nadřazeným systémem.....	23
4.3.5 Ochrana proti vysokému proudu.....	23
4.3.6 Ovládání h-můstku.....	24
4.3.7 Výsledný regulátor otáček motoru.....	26
4.4 Napájení robota.....	27
4.5 Konstrukce.....	27
4.5 Materiály.....	29
5 Závěr.....	30
Literatura.....	31
Seznam příloh.....	32



# 1 Úvod

Dnešní doba je symbolizována levnou cenou mikročipů a naprostou dostupností jakéhokoliv integrovaného obvodu. To, co dřív mohlo být pouze snem, lze dnes bez větších problémů realizovat. Mobilní roboti už nejsou doménou pouze inženýrů japonských nadnárodních korporací, ale stávají se oblíbenou hračkou i nadšenců a kutilů. Výpočetní výkon moderních jednočipů je nadprůměrný a h- můstky jsou realizovány v integrovaném pouzdře. Dnes si může každý vyvinout své „číslo 5“.

Už od dětství mě fascinovala zařízení, která byla charakterizována hromadou integrovaných obvodů, jejichž seskupení dávalo mechanické části zařízení určitý záblesk inteligence. Tato zařízení, roboti, nebyla přirozeně inteligentní, jako je člověk. Dokázala mnohdy vykonávat pouze určitou skupinu funkcí a byla velmi omezena. Svoji extrémní složitostí a drahým výpočetním výkonem se řadila mezi nedosažitelné cíle. Tato doba určitého tajemna již pominula. S dostatečným množstvím dokumentů a literatury je možné pochopit princip fungování každé části jakéhokoliv robota. Při příležitosti výběru bakalářské práce jsem cítil příležitost oprášit staré sny a pustit se do konstrukce jednoho malého robota. Bez většího zázemí a bez předchozích zkušeností jsem se rozhodl vstoupit do světa robotů.

Každá práce by měla mít uplatnění. Je důležité, aby i robot byl vytvořen s určitým cílem, s možností jeho testování a získávání dalších znalostí z dané problematiky. Po zvážení soutěží, které se konají u nás i v zahraničí, jsem se rozhodl pro robotickou soutěž Minisumo. Zápas robotů Minisumo se odehrávají po celém světě a mají mnoho příznivců. Jak se záhy ukázalo, Minisumo je velmi zajímavá soutěž jak svými pravidly, tak i kategorií, do které roboti zapadají. Stavba vlastního robota se ukazuje jako tvrdý, leč zajímavý oříšek.

Rozhodl jsem se tedy pro vytvoření robota pro tuto soutěž. Nechtěl jsem pouze univerzální kit. Robota jsem si chtěl poskládat sám z různých komponentů, které jsou dostupné na cizím ale i českém trhu. Mnoho komponent mi ale nevyhovovalo a to mě vedlo k vybudování robota od základu. Každou část a každý obvod navrhují podle svých požadavků a upravují je pro specifickou aplikaci. Nicméně je pro mě důležitá možnost znovupoužití každého modulu.

Budoucí studenti mají díky této práci možnost poučit se ze špatných rozhodnutí, jichž jsem se dopustil. Mohou se ale také inspirovat řešením, které jsem vybíral pro každou situaci a tak si ušetřit mnoho sil a času pro vývoj jiných komponentů.

## 2 Soutěž Minisumo

Robotické sumo, konkrétně robotické Minisumo je mezinárodní soutěž, která je inspirována skutečnou soutěží sumo.

Díky tomu, že soutěž pro robotické nadšence ideově vychází z tradiční soutěže, mají i podobné rysy.

Krátce o sumo – pro lidi. Následující část, přibližující lidské sumo je převzata z [16].

Zápasy (bašo) sumo se konají v dohyo, vyvýšené ploše o průměru 4,5 metru, která není ohrazena provazy. Zápasník se označuje jako sumotori, jeho hlavním cílem je vyhodit protivníka z ringu. K metodám, které zápasníci používají, patří podrážení, položení soupeře na lopatky, vytlačování a tahání. Přestože samotný zápas netrvá ani minutu, jeho příprava může zabrat i půl hodiny. Starobylé rituály se totiž dodržují do nejmenšího detailu.

Zápasníci bojují prakticky nazi, mají na sobě pouze jakousi bederní zástěrku, jež se nazývá mawaši a připomíná obrovskou dětskou plenku. Jde vlastně o poskládaný pás hedvábí, dlouhý asi deset metrů. Když zápasník vkročí do dohyo, musí nejprve kolem sebe rozsypat sůl, aby ring očistil (rozhazování trvá nejméně čtyři minuty). U každého zápasu je přítomen šintoistický kněz, který dohlíží na správné dodržování rituálů. Proto se důležitější zápasy konají ve svatyních. Před začátkem zápasu musí zápasník zadupat nohama, aby z ringu vyhnal zlé duchy.

Po skončení ceremonií zaujmou oba zápasníci příkrčenou pozici a na signál rozhodčího se do sebe pustí. Srazí se ve středu ringu, zvuk nárazu je slyšet všude kolem. Rozhodčí na sebe bere neobvyklou roli. Jeho slovo platí jako absolutní zákon a žádný ze závodníků nemá právo protestovat.

Tradičním znakem sumotoriho je účes - uzel z dlouhých vlasů. Ovšem aby ho mohl nosit, musí se propracovat do kategorie maku uči. Jedná se o jednu ze dvou vrcholných kategorií. Zápasník si poté vlasy nestříhá, dokud nezanechá aktivního zápasení.

Základními předpoklady sumotoriho jsou síla a stabilita. Váha se pohybuje okolo 160 kg, přičemž je nejvíce soustředěna do dolní části těla. Zápasníci musí přijímat energeticky bohatou stravu. Konečným cílem je mít silné nohy, boky a velké břicho. Tím získávají dobrou rovnováhu.

Nejvyšší titul se nazývá jokozuna neboli velký šampión. Od okamžiku, kdy ho zápasník získá, musí neustále dokazovat svou převahu. Pokud by prohrál více než osm zápasů nebo kol, musí se dobrovolně a navždy vzdát zápasení.

Robotické Minisumo nedodržuje veškeré ceremonie jako sumo, ale vychází z principů samotné hry.

V práci se budu zabývat konkrétně robotickým Minisumem, což je podkategorie robotického suma. Aby bylo naprosto zřejmé, že robotické sumo není doménou pouze malé skupinky nadšenců,

existuje velké množství specifikací této soutěže. Všechny tyto kategorie jsou specifické především fyzickými vlastnostmi a způsobem ovládání robota. Asi největší rozdíl lze nalézt mezi RC (radio control) sumo a autonomním sumo. RC sumo je řízeno člověkem, kdežto autonomní sumo se musí řídit samo – bez jakékoliv pomoci, či komunikace. Autonomní sumo se dále dělí do mnoha kategorií podle maximální velikosti a hmotnosti robota, anebo podle země konání soutěže. Nejznámější kategorie jsou vybrány do Tabulky 1.

Kategorie	Max. hmotnost [Kg]	Šířka [cm]	Délka [cm]	Výška [cm]	Průměr ringu [cm]	Výška ringu [cm]	Soutěž
Micro	0,1	5	5	5	38,5	1,25	SRS, PARTS, RoboMaxx
Mini	0,5	10	10	Neomezeno	77	2,5	ChiBots, CIRC, Northwest, PARTS, RoboMaxx, SFRSA, SRS, WCRG
Lego	1	20	20	Neomezeno	77	2,5	Kategorie vyhrazená pro roboty ze stavebnice Lego MindStorms
Japanese	3	20	20	Neomezeno	154	5	CIRC, FUJISOFT ABC, Indiana, Northwest, SFRSA, SRS

*Tabulka 1: Nejrozšířenější kategorie autonomního sumo.*

## 2.1 Pravidla robotického Minisuma

Princip hry spočívá v umístění dvou autonomních robotů do hracího ringu. Oba roboti musí být položeni za startovací čáru. Po startu se snaží jeden robot vytlačit druhého robota mimo vyznačený ring. Robot vyhrává ve chvíli, kdy se jakákoliv část jeho soupeře dotkne plochy mimo ring.

Robot musí být naprosto autonomní. Nesmí být ovládán jakýmkoliv způsobem od člověka. Nesmí obsahovat žádné komunikační zařízení, pomocí něhož by byl ovládán z počítače, či z jiného zařízení. Po odstartování zápasu je zakázána veškerá externí pomoc robotovi.

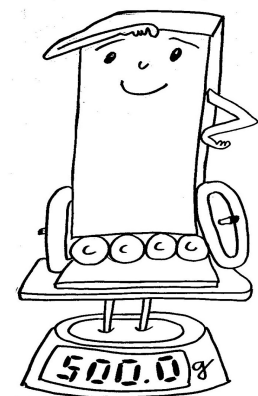
Robot může být vyroben z jakéhokoliv materiálu typu železo, dřevo, PVC, apod. Může obsahovat jakýkoliv typ zařízení jako je mikrokontrolér, motor, baterie, infračervená čidla a pod. Důležité je, aby při použití těchto zařízení robot neporušil ostatní pravidla jako velikostní limit, či váhový limit apod.

## 2.2 Limity

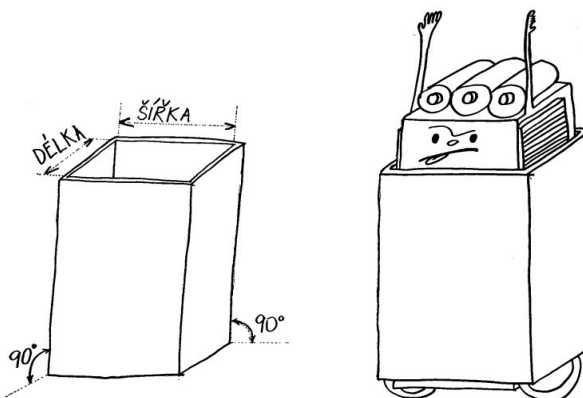
Robot je mnohdy omezen limity, záleží však na tom, jaké soutěže se konkrétně účastní. V robotickém Minisumu je robot omezen na šířku, délku a hmotnost.

Konkrétně u hmotnosti není dovoleno měnit hmotnost pomocí technologie – například pomocí heliového balónku, který by byl použit při přeměrování robota a v průběhu zápasu by byl vypuštěn čímž by robot dosáhl vyšší hmotnosti. Je dobré využít téměř maximální povolenou hmotnost robota, nicméně je lepší přidat na hmotnosti pomocí olověných kuliček těsně před zápasem, než být diskvalifikován kvůli překročení hmotnostního limitu. Pozor také na výměnu baterií. Různé baterie mají různou hmotnost. Hmotnostní limit u Minisumu je 500 g (viz Tabulka 1).

*Maximální hmotnost robota.*



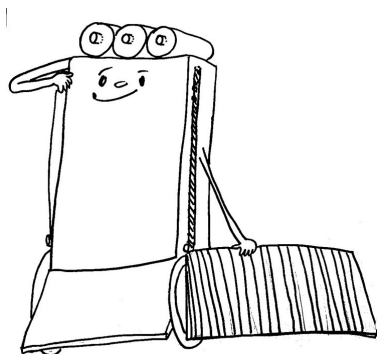
*Kontrola velikosti robota.*



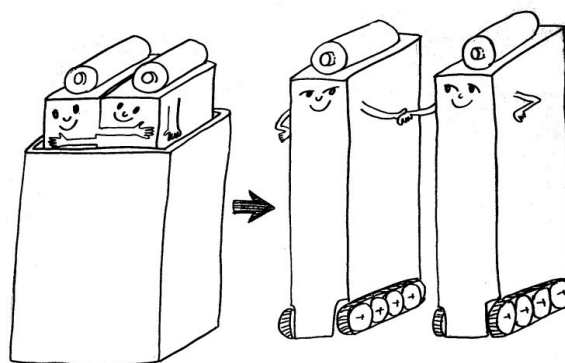
Obrázek 1: Limity. Převzato z [16].

Další limitní parametr je rozměrový limit. U Minisumu je tento limit stanoven pouze u šířky a délky a to na 100x100 mm (viz Tabulka 1). Výška zde není omezena. Při měření by měl robot projít čtvercem o výše uvedených rozměrech.

*Zvětšení robota po startu.*



*Rozdělení robota po startu.*



Obrázek 2: Povolené úpravy při zápasu. Převzato z [16].

Nicméně, na rozdíl od hmotnostního limitu je u rozměrového limitu dovoleno měnit svou velikost a skupenství po startu zápasu. Mnoho konstruktérů využívá neomezené výšky tím, že umísťují různé části robota do výšky a po startu je robot spuštěn na hrací plochu. Je dokonce dovoleno rozdělení robota na 2 části, nicméně ve chvíli, kdy jedna část robota vypadne mimo hrací ring, robot prohrává.

## **2.3 Omezení robota**

Veškeré vybavení, které robot používá nesmí být agresivní, či destruktivní. Způsob soutěžení nesmí vést k poškozování soupeřova robota, či ringu. Robotické Minisumo není soutěž typu Robot Wars, kde destrukce a ničení protivníka je záměrem soutěže. Proto je zakázáno používat vybavení typu plamenomet, vrtačka, pneumatické kladivo, ale není dovoleno ani pouštění elektrického výboje do protihráče atp. Robot také nesmí znemožňovat pohybu soupeři. Nesmí létat, či přelétávat nad ringem. Musí mít stále kontakt s ringem. Tato pravidla však umožňují použití létajících částí robota pro navigaci. Ovšem stále platí pravidlo, které říká, že ve chvíli, kdy jakákoliv část robota dopadne mimo hrací ring, tak robot prohrává.

## **2.4 Zvyšování adheze**

V soutěži je zakázáno používat prostředků jako lepidlo, šrouby či jiné mechanické přichycení k ringu pro zvýšení adheze. Nepřípustná adheze je vyhodnocena, pokud se robot při aktivovaných technologiích položí na bílý papír a při zvednutí robota, papír nezůstane ležet na zemi.

## **2.5 Zápas**

Před zápasem umístí hráči svého robota tak, aby byl za startovací čarou. Robot nesmí žádnou svou část zasahovat před startovací čáru. Robot může být natočen libovolným směrem. Následně je provedena prohlídka robota rozhodčím.

Po prohlídce, kdy jsou roboti připraveni k samotnému zápasu, zapnou soutěžící svého robota na pokyn rozhodčího. Robot může být zapnut i jiným způsobem, než připojením akumulátorů. V tuto chvíli je dovoleno použití komunikačního zařízení, ale po startu je veškerá komunikace zakázána. Robot může být spuštěn i tlesknutím, anebo světelným, či rádiovým signálem. Po přijetí signálu ke startu, musí robot počkat 5 vteřin a teprve následně se může začít pohybovat. V průběhu tohoto času se musí všechny osoby vzdálit od ringu a uvolnit aktivní zónu kolem ringu. Tato zóna je většinou stanovena na 1 metr dokola kolem ringu. Tato oblast je vymezena kvůli eventuální možnosti matení senzorů robota. Plocha aktivní zóny nesmí být bílá. Při aktivování robota je zakázáno rekonfigurovat

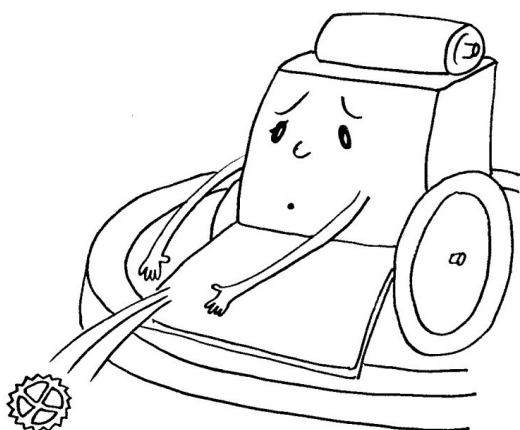


zařízení. Nicméně je povoleno mít na robotu více tlačítek, kterými můžeme vybrat jednotlivé strategie.

Dojde-li k předčasné aktivaci robota, anebo zjistí-li se v průběhu odpočítávání, že robot nefunguje, je možné, aby rozhodčí přerušil odpočítávání. Souboj se vzápětí opakuje. Při dalším přerušení je robot diskvalifikován.

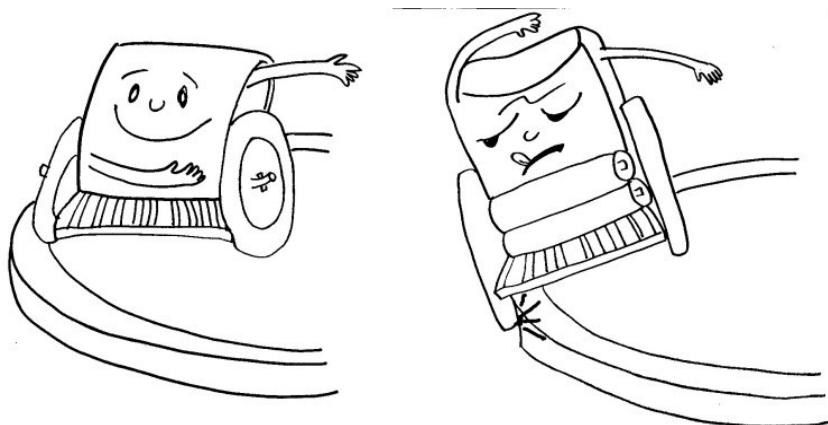
Souboj trvá 3 minuty a pokud nedojde k poražení jednoho z robotů, je souboj ukončen rozhodčím.

Robot je poražen (vyřazen), pokud se jeho jakákoliv část dotkne plochy mimo hrací ring (tím je



Obrázek 3: Prohra. Převzato z [16].

myšlena i jakákoliv část, která v průběhu hry odpadne). Hrana ringu je počítána jako samotný ring, nicméně lem ringu už je považován jako plocha mimo ring.



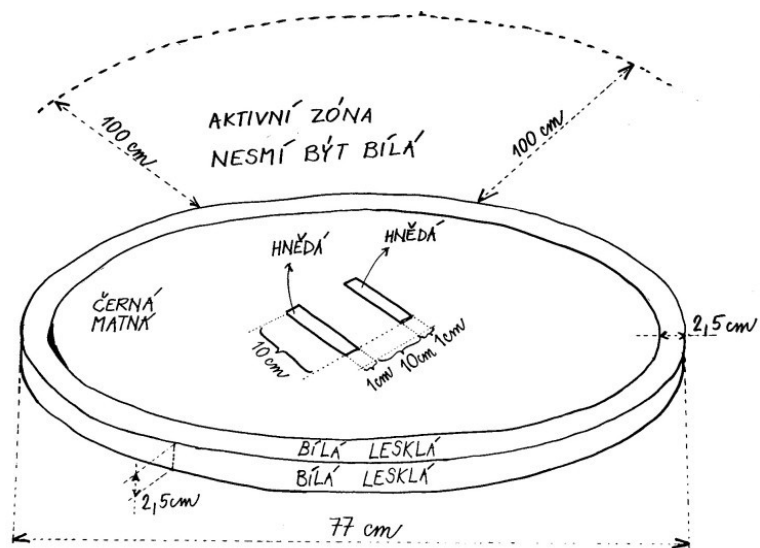
Obrázek 4: Uvnitř / mimo ring. Převzato z [16].

Mezi zápasy je 5 minutová přestávka pro výměnu akumulátorů a jiného. Po výměně je možné provést opětovnou kontrolu robota.

## 2.6 Ring

Velikost ringu je dána především typem soutěže a pravidly. Ring pro Minisumo je znázorněn na Obrázku 5.

Ring může být vyroben z libovolného materiálu, je pokryt černou matnou barvou. Okraje ringu jsou bílé a startovací čára je hnědá.



Obrázek 5: Ring pro Minisumo. Převzato z [16].

Kompletní a podrobná pravidla lze nalézt na [16] anebo [15]. Návod na konstrukci ringu je na [14].

## 3 Teoretický rozbor

Správný návrh a konstrukce robota předpokládá teoretické znalosti komponent robota a principy jejich funkčnosti. Z těchto důvodů se v následující kapitole zabývám teorií práce s motory a využití elektronických zdrojů, což jsou pilíře funkčnosti mobilního robota.

### 3.1 Pohon

K pohonu mobilního robota lze vybrat z různých typů motorů. Ať se jedná o krokové motory, stejnosměrné motory (DC – Direct Current), či motory s elektronickou komutací (BLDC – Brush Less Direct Current, Maxon EC program). Nicméně co se týče poměru cena/výkon/složitost/ovládání, jsou stejnosměrné motory nejlepší a nejdostupnější variantou. Ovšem i stejnosměrné motory s komutátorem mají své nevýhody. Nižší životnost díky komutátorům, elektromagnetické rušení a absence bezúdržbovosti.

Malé stejnosměrné motory pracují na celkem vysokých otáčkách s minimálním kroutícím momentem. Samotný motor je ovšem pro účely mobilního robota nevhodný a tak musí být motor spojen s převodovkou. V tuto chvíli mluvíme o pohonu. Přidání převodovky nám sníží nominální otáčky motoru na požadovanou hodnotu a ve stejném poměru zvýší kroutící moment. Takový pohon lze ještě vybavit otáčkoměrem anebo mechanickou brzdou (není tak časté).

Stejnospměrné motory jsou vybaveny 2 svorkami, přičemž po připojení jmenovitého napětí se nezátížený rotor roztočí a ustálí na jmenovitých otáčkách. Každý motor lze krátkodobě přetížít a tím pádem dosáhnout větších otáček. Změnu smyslu otáčení dosáhneme změnou polarit napájecího napětí.

#### 3.1.1 Princip činnosti

Následující text a vzorečky jsou převzaty z [5].

Otáčení rotoru stejnosměrného motoru s permanentním magnetem je způsobeno silou  $F = ILB$ , která vytváří silový moment  $M$  na ramenech rovnajícím se poloměru závitu  $W$  smyčky (pro úhel  $\alpha = 0^\circ$ ). Tyto síly jsou dvě (navzájem opačné). Obecně pak, moment  $M$  se rovná dvakrát síla  $F$  působící na rameni  $(W/2)\sin\theta$ , kde  $\theta = 90 - \alpha$ .

$$M = 2ILB \frac{W}{2} \sin\theta = ILBW \sin\theta, \quad (1)$$

$M = IBAsin\theta$ , kde  $A = LW$  je plocha závitu smyčky.

Ve skutečnosti je jedna smyčka nahrazena cívkou složenou z  $N$  smyček - závitů. Na každý závit působí moment  $M$ , takže celkový moment působící na cívku je

$$M_{celk} = NIBAsin\theta \quad (2)$$

Kontinuální otáčení rotoru vyžaduje změnu polaritu protékajícího proudu, což je zajištěno mechanicky komutátorem.

Výstupní mechanický výkon  $P_{výst}$  je úměrný elektrickému vstupnímu výkonu  $P_e$  v poměru

$$\eta = \frac{P_{výst}}{P_e} \quad (3)$$

V důsledku typických ztrát jako tření, odpor vinutí a dalších je tento poměr, nazývaný účinnost menší než jedna. Typicky pro malé stejnosměrné motorky je v rozsahu 0,5–0,75, pro velké pak kolem 0,9. Dále je třeba si uvědomit, že když se rotor – a tedy i cívka – otáčí v magnetickém poli permanentního magnetu statoru, je generován elektrický proud. Jeho změna v čase indukuje tzv. zpětné elektromotorické napětí  $u_{emf}$  s polaritou opačnou, než je napájecí napětí motoru přivedené na jeho svorky. Velikost tohoto napětí závisí na parametrech motoru tj. Na magnetické indukci  $B$  v mezeře pro vinutí. Tyto parametry motoru se v katalogu motorů vyjadřují rychlostní konstantou  $k_n$ , která je definovaná vztahem pro rychlost  $n$  v ot./min,  $n = k_n u_{emf}$ .

Čím se tedy rotor rychleji otáčí, tím je toto napětí vyšší. Protože napětí  $u_{emf}$  je jak již bylo zmíněno v opačné polaritě vůči napájecímu napětí  $U$ , dochází k poklesu proudu tekoucím vinutím:

$$U = IR + u_{emf} \quad (4)$$

$$I = \frac{U - u_{emf}}{R}$$

Důsledkem toho je, že jak otáčky  $\omega$  rostou, moment  $M$  klesá.

Dále také platí, že při nulových otáčkách  $\omega = 0$  je zpětné elektromotorické napětí  $u_{emf} = 0$  a proud tekoucí motorem je:

$$I_s = \frac{U}{R} \quad (\text{pro } u_{emf} = 0). \quad (5)$$

Proud  $I_s$  se nazývá proud nakrátko a protéká vinutím při mechanickém přetížení motoru, kdy dojde k jeho zastavení -  $\omega = 0$ . V některých pramenech bývá tento proud též nazýván startovací (rozběhový), což je ale z důvodu nenulové časové konstanty vinutí ne zcela správné.

Když se motor otáčí, elektromotorické napětí  $u_{emf}$  je přímo úměrné rychlosti otáčení  $\omega$ :

$$u_{emf} = k_e \omega, \quad (6)$$

kde  $k_e$  je zpětná elektromotorická konstanta.

Po dosazení:

$$U = IR + k_e \omega \quad (7)$$

(Při ustálených otáčkách, respektive proudu tekoucím motorem, je napětí na indukčnosti  $L$  nulové a proto není ve vztahu uvedeno).

Podobně je i kroutící moment  $M$  úměrný proudu protékajícím vinutím a na magnetickém poli. Řízen je tedy pouze protékajícím proudem. Moment  $M$  vzrůstá lineárně s proudem s proporcionalní konstantou  $k_M$ , nazývanou momentová konstanta:

$$M = k_M I \quad (8)$$

Dosazením obdržíme:

$$U = \frac{MR}{k_M} + k_e \omega \quad (9)$$

Mechanický výkon  $P_m$  na hřídeli je elektrický výkon  $P_e$  minus ztráty na odporu vinutí (pro jednoduchost neuvažujeme ztráty třením):

$$P_m = P_e - I^2 R \quad (10)$$

Po dosazení:

$$\begin{aligned} M \omega &= UI - I^2 R \\ k_M I \omega &= (IR + k_e \omega) I - I^2 R \end{aligned} \quad (11)$$

a po vykrácení obdržíme:

$$k_M = k_e = k_M$$

Takže po dosazení za  $k_e = k_M$ :

$$U = \frac{MR}{k_M} + k_M \omega \quad (12)$$

V tomto vztahu nyní vyjádříme úhlovou rychlost – zajímá nás její závislost:

$$\omega = -\frac{R}{k_M^2} M + \frac{U}{k_M} \quad (13)$$

Jedná se o rovnici přímky s negativním sklonem.

### 3.1.2 Řízení otáček

Z rovnice (13) je zřejmé, že otáčky motoru lze řídit změnou napájecího napětí. Při snížení/zvýšení napájecího napětí se sníží/zvýší i otáčky motoru.

Nejjednodušší způsob řízení otáček motoru je řízení přímo pomocí napájecího napětí. Pokud chceme nastavit konstantní otáčky, můžeme využít odporu zapojeného do série. To sebou ale nese nevýhody ve ztrátách na odporu a tudíž vyzařováním tepelné energie a nemožnost regulování otáček – existují pouze 2 stavy. Zapnuto (při snížených otáčkách) a vypnuto. Pokud bychom chtěli dosáhnout sofistikovanějšího řízení otáček, museli bychom ovládat budící obvody stejnosměrného motoru pomocí řídicího napětí – což není nejvhodnější pro řízení mikroprocesorem.

Druhou možností je řízení pomocí pulzně šířkové modulace (tzv. PWM – Pulse Width Modulation) přičemž jde o rychlou změnu napájecího napětí na motoru (vypnuto/zapnuto). Řídící tranzistory jsou vždy zcela otevřené, anebo otevřené. Navíc pro tuto metodu řízení existuje rozsáhlé množství obvodů (tzv. h-můstky), které jsou schopny efektivního řízení motoru v různých režimech i



se změnou smyslu otáčení. Díky tomu, že jsou spínací tranzistory zcela otevřeny, nebo uzavřeny, nevznikají zde téměř žádné ztráty oproti předchozímu případu. Pokud spínáme tranzistory s dostatečně vysokou frekvencí je proud protékající obvodem jen mírně zvlněný. Nicméně, pokud motor neobsahuje dostatečně velkou indukčnost, tak při nízkých frekvencích PWM je potřeba dodat externí indukčnost, jinak hrozí jiskření na komutátoru, přehřívání a eventuálně trvalé poškození motoru. Například řízení od společnosti Maxon motor pracuje na frekvenci 40 – 50 kHz a navíc umožňuje i přidání externí indukčnosti.

## 3.2 Akumulátory

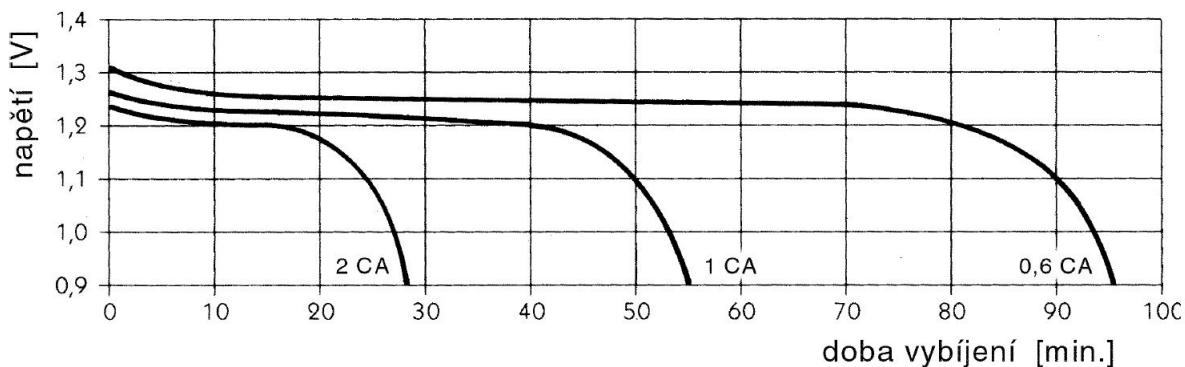
Každé mobilní zařízení potřebuje pro svůj chod nějaký zdroj energie. Při vývoji zařízení lze pracovat s laboratorním zdrojem, ovšem ve chvíli, kdy je potřeba skutečného nasazení si už mnohdy nemůžeme dovolit užívání laboratorního zdroje a potřebujeme jiný způsob dodání elektrické energie. Nejlepší prostředek k získání elektrické energie je využití primárních článků (baterií) anebo sekundárních článků (akumulátorů). Je ovšem velmi důležité vybrat vhodný zdroj elektrické energie.

Hlavní rozdíl mezi baterií a akumulátorem je dobíjecí schopnost akumulátorů. Zatímco po použití baterie nám nezbude nic jiného než ji vyhodit, akumulátor můžeme znovu nabít a použít. Schopnost obnovení původní kapacity a počet nabití je dán typem akumulátoru.

### 3.2.1 Akumulátory NiCd a NiMH

Mezi doposud nejrozšířenější akumulátory patří akumulátory nikel-kadmiové a netoxické nikel-metalhydridové. Oba typy mají napětí 1,2 V a jsou vyráběny v kapacitách až do 3500 mAh. Oba typy akumulátorů mají velmi podobné vlastnosti (až na dříve zmíněnou toxicnost u NiCd) a velké samovybití akumulátoru NiMH. Díky tomu je potřeba akumulátory NiMH skladovat nabitě a jsou víc náchylnější na přepólování, přepětí a rychlonabíjení než NiCd [5].

NiMH jsou citlivé na zvýšenou teplotu. “Při zvýšení teploty o 10° C klesá životnost akumulátoru o 20% a při provozní teplotě 45° C je jen poloviční” [5]. Také trpí menším počtem nabíjecích cyklů. Nicméně oproti NiCd jsou schopny uchovávat větší kapacitu.



Obrázek 6: Vybití křivka NiCd při proudových zatíženích 2 C, 1 C a 0,6 C. Převzato z [17].

Oba typy článků trpí neduhem jménem paměťový efekt. Ten se projevuje snížením kapacity při nabíjení nevybitého článku. Tento jev opět zaniká při vybití pod úroveň 1 V/článek a jeho plném nabití (tzv. formátováním). Mnoho pramenů uvádí potřebu 3x plně nabít a vybit článek, aby došlo k plnému zformátování akumulátorů [5]. Při nabíjení proudem nižším než 0,1 CA (celkovou kapacitou akumulátoru) se paměťový efekt neprojevuje [17].

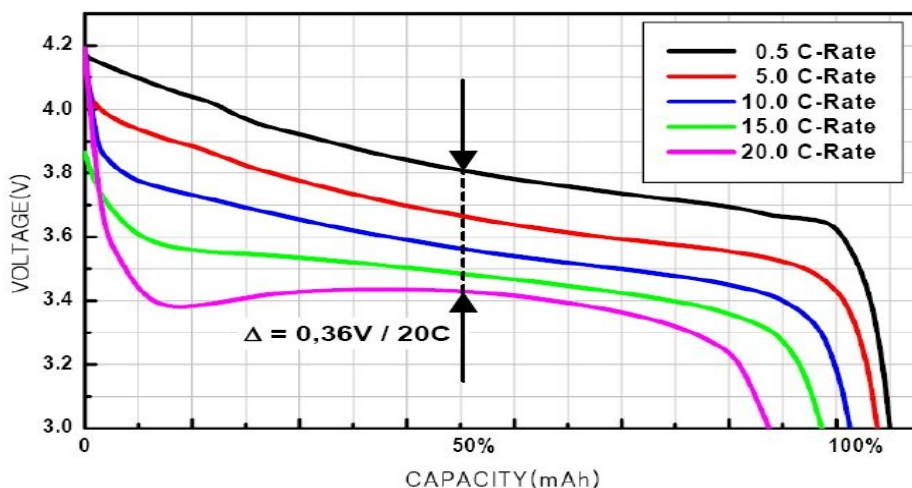
### 3.2.2 Akumulátory Li-Ion a A123 Systems

Mezi novější typy akumulátorů patří akumulátory Li-Ion (Lithium-Iontové). Oproti NiMH netrpí paměťovým efektem, tak velkým samovybitím (pouze okolo 10% za půl roku [5]). Nicméně nemají tak velkou proudovou tvrdost a pomaleji se nabíjejí. Vyrábějí se především pro segment spotřební elektroniky (mobilní telefony a malá přenosná zařízení). Napětí článku je 3,6 V. Články mají asi 300-500 nabíjecích cyklů.

Akumulátory A123 Systems jsou inovované Li-Ion články. Mnohdy jsou označovány též jako Li-Fe, Li-FePo<sub>4</sub> apod. Články mají schopnost velmi rychlého nabití a dlouhou životnost. Jejich původní záměr je pro využití v ručním nářadí a na toto využití jsou skutečně výborné [12]. Oproti klasickým Li-Ion mají válcovitý tvar. Vybíjecí charakteristika A123 Systems se blíží téměř k ideálu.

### 3.2.3 Akumulátory Li-Pol

Poslední dobou se velmi rozšířily akumulátory typu Li-Pol (lithium-polymer). Tyto články pomalu, ale jistě, začínají vytlačovat akumulátory NiMH a to díky svým vlastnostem a možnostem.



Obrázek 7: Vybíjecí charakteristika článku Kokam 3200. Převzato z [12].

Mají obdobné vlastnosti jako Li-Ion – netrpí samovybitím (mají velmi nízký vnitřní odpor), netrpí paměťovým efektem, nejsou zabaleny do kovu – jsou tvořeny gelem a tudíž mohou mít téměř libovolný tvar [5] a v režimu SHD jsou schopny dodat 20 C (dvacetinásobek vlastní kapacity), to znamená že při kapacitě 2200 mAh jsou schopny dodávat až 44 A. Mají velmi dobré vybíjecí

křivky – projevuje se ve tvrdosti článku. Napětí jednoho článku je 3,7 V, přičemž jak je vidět v Obrázku 7, tak napětí může být až 4,2 V. Nicméně Li-Pol články jsou choulostivé na přílišné podbíjení a přebíjení. Klesne-li napětí na akumulátoru pod hranici 3,0 V může dojít k trvalému poškození [11]. Stejně jako Li-Ion jsou velmi lehké (oproti NiMH a NiCd) a malé. Při dobré údržbě článků (long life režim) lze dosáhnout až 3500 nabíjecích cyklů [11].

Typ akumulátoru	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Pol
Jmenovité napětí [V]	1,2	1,2	3,6	3,7
Hustota Energie [Wh/l]	140	180	200	250
Hustota Energie [Wh/kg]	39	57	90	110
Hmotnost* [g]	22	22	?	37

*Tabulka 2: Orientační porovnání akumulátorů.*

- Akumulátory NiCd/NiMH výrobce ANSMANN (1500 mAh/1,2 V), Li-Pol výrobce KOKAM (1500 mAh/3,7 V).

## 4 Návrh robota

Mobilní robot, ačkoliv se to nezdá, je velmi komplexní a složité zařízení skládající se z různých funkčních bloků a modulů. Celé zařízení musí být navíc zkonstruováno tak, aby splňovalo určité předpisy, co se velikosti a hmotnosti týče. Také je potřeba, aby výsledné zařízení mohlo být uchováno v nějaké pevné skořápce, která bude promyšlena a ve které bude každá komponenta pevně a stabilně uchycena.

### 4.1 Návrh mobilního robota pro soutěž Minisumo

Robot pro soutěž Minisumo je autonomní zařízení a tomu odpovídá i jeho návrh. Při vývoji je nutné klást velký důraz na vlastnosti, které jsou vyžadovány pravidly a to je především hmotnost a velikost. Programové vybavení je v tomto případě relativní, neboť se dá vždycky jednoduchým způsobem upravit. Oproti tomu změna motorů může změnit kompletně celý návrh zařízení.

Robot bude dvoukolové zařízení ovládané diferenciálním způsobem – režim tank. Budu dávat důraz na velikost i povrch zařízení – menší s matným černým nátěrem bude hůře detekovatelný pro soupeře.

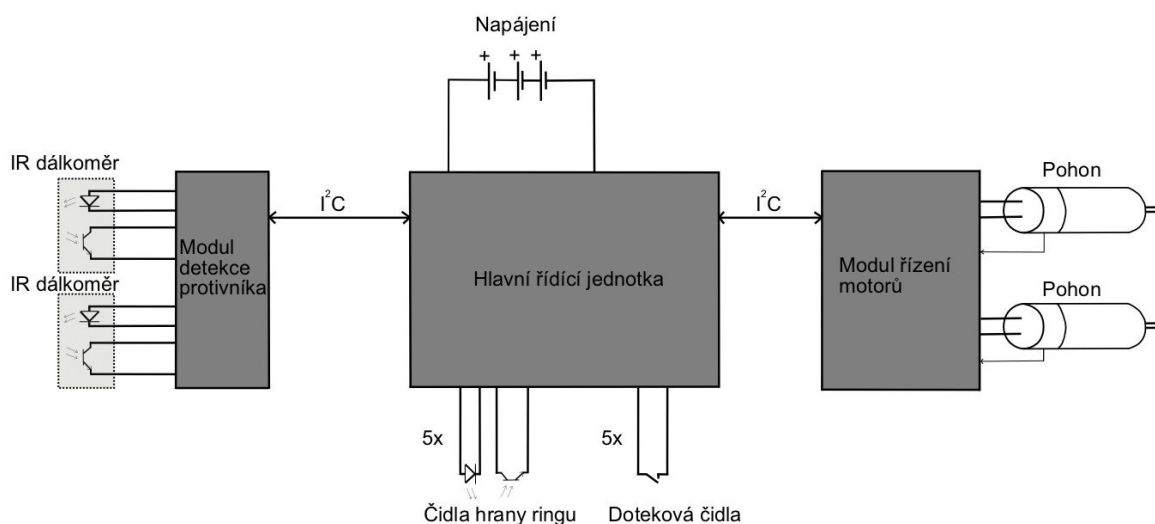
Motory musí být dostatečně výkonné, aby při nízkých otáčkách dokázaly vytvořit velký kroutící moment alespoň ke krátkodobému přetlačení protihráče. Robot by měl být i dostatečně rychlý (od 0,5 m/s do 1 m/s při přetížení motorů) pro možnost využití kinetické energie a kvůli schopnosti eventuálního úniku. Robot bude muset mít také dostatečnou adhezi, aby mu velký kroutící moment nebyl na škodu.

Řízení, snímání a výpočetní výkon robota bude postaven na principu distribuovaného systému, čímž se budu snažit odlehčit hlavní řídicí jednotce s mikrokontrolérem ATmega128 (viz příloha). K hlavní řídicí jednotce bude připojen modul pro řízení motorů, který je podrobně popsán v kapitole 4.3 a také modul pro detekci soupeře. Oba dva moduly budou komunikovat přes I<sup>2</sup>C sběrnici. Při vývoji modulů budu klást velký důraz na jejich univerzálnost. Tím pádem dosáhnu možnosti znovupoužití výše zmíněných modulů i v jiných aplikacích. I<sup>2</sup>C sběrnice je v tomto případě ideálním řešením a díky tomu je možné připojit moduly k jakémukoliv zařízení a to i počítači například přes převodník USB <-> I<sup>2</sup>C .

Modul řízení motoru bude z počátku nastaven na jednoduchou neintuitivní provozuschopnost, nicméně díky schopnosti přijímat signál z enkodéru a měření protékajícího proudu bude možné postavit na jeho základu značně sofistikované řízení na ovládání stejnosměrných motorů.

Modul skenování prostředí bude sloužit pro zjišťování polohy protivníka. Bude postaven na bázi dvou odrazových infra senzorů GP2Y0A21 (viz příloha), eventuálně v modifikaci s ultrazvukovým dálkoměrem SRF05 (viz příloha).

Hlavní řídicí jednotka bude vybavena, jak již bylo uvedeno, výkonnějším mikrokontrolérem z řady MEGA – Atmega128 [1], který bude komunikovat s jednotlivými moduly a bude se starat o celý chod aplikace – od startu až po ukončení zápasu. K hlavní řídicí jednotce budou přímo připojeny odrazové infra senzory QRD1114 (viz příloha) a dotekové senzory – spínače. Důvod k tomuto rozhodnutí je potřeba znalosti vždy čerstvých informací o relativní poloze robota v ringu – tj. zda nevyjíždí mimo ring. Sensory mohou být trvale připojené k portu a bez nutnosti komunikace na vyšší úrovni je možné rovnou přečíst jejich hodnotu. Navíc budou připojeny na vstup externího přerušení, takže při dosažení hranice ringu o tom bude řídicí jednotka vědět během pár  $\mu\text{s}$ . Díky tomu robot nebude zbytečně ztrácet čas a zabráni prohře vlastní vinou. Stejným způsobem budou k řídicí jednotce připojeny senzory doteku – spínače pro případ ohrožení od soupeře z místa, kde nemá senzory odrazu.



Obrázek 8: Schématické návrh robotu.

Akumulátory musí být schopny podat dostatečně vysoký proud pro případ přetlačování – to je období největšího odběru motorů.

Při všech těchto plánech je nutné dodržet maximální velikost a hlavně hmotnost. Robot, který by nesplňoval základní pravidla soutěže je zbytečný.

## 4.2 Výběr pohonu

K pohonu robota jsem vybral dva stejnosměrné kartáčové motory od společnosti Maxon motor. Motory mají patentované vinutí, které se vyznačuje bezželezovým jádrem. Jejich výhodou je schopnost velmi rychlého reagování na změny napájecího napětí na motoru.

Motory společnosti Maxon motor mají díky své preciznosti i drobné nevýhody. Při řízení pulzně šířkovou modulací (dále PWM – Pulse Width Modulation), vyžadují frekvenci PWM alespoň 10 kHz a v lepším případě 30 kHz -50 kHz [13]. Sám výrobce tyto limitní parametry neuvádí, ale



vycházejí z parametrů výrobků [4][8] samotné společnosti a ze zkušenosti uživatelů [13]. Pokud bychom nebyli schopni dodat dostatečně vysokou frekvenci PWM je vhodné a výrobcem doporučené zapojit do série s motorem přidavnou tlumivku. Jestliže by se tak nestalo, hrozí možnost “vrčení”, přehřívání komutace motoru (kartáčů nebo lamel), obzvláště při nízkých otáčkách. Výrobce doporučuje hodnoty mezi 200  $\mu$ H – 300  $\mu$ H podle typu jednotky [13].

Maxon nabízí celé pohony. Jsou tvořeny motorem, převodovkou, enkodérem (tachometrem), brzdou eventuálně celým řízením. Samozřejmě, že žádná z výše uvedených položek není povinná. Nicméně až na výjimky jsou tyto položky doporučené (řízení je větší než celý robot, na každý motor nelze připojit enkodér/brzdu). Konkrétně jsem vybral motor z řady RE-Max 21 s označením 250022 s planetovou převodovkou GP 22A 29:1 s označením 134162. Motor a převodovka umožňují pevné připojení enkodéru na hřídel motoru a budou doplněny o enkodér MR Type M s čítáním 32 pulzů na 1 otáčku. Enkodér má označení 201938.

Motor s převodovkou je těžký díl a jeho otočením o 90° selepší rozložení hmotnosti, tj. umístění těžiště, to by mělo být ve středu mezi osou kola a čelem robota. Pokud by byla veškerá zátěž na kolech robota, došlo by při dobré adhezi a přenosu kroutícího momentu ke zdvihnutí čela robota, což je nevýhodné, neboť by robot ztratil kontakt s ringem. Ostatní parametry motoru jsou následující:

- grafitové kartáče
- jmenovitý výkon motoru: 6 W
- jmenovité napětí: 9 V
- proud bez zatížení: 59 mA
- jmenovitý proud: 0,720 A
- startovací proud: 3,26 A
- jmenovitý kroutící moment: 5,51 mNm
- maximální kroutící moment: 27,1 mNm
- otáčky na prázdno: 10200 ot/min
- účinnost motoru: 75%

Druhou alternativou k tomuto motoru je stejný motor s železnými kartáči, jehož jmenovitý výkon je 5 W. Má vyšší účinnost, takže dosahuje lepších výsledků, nicméně k němu není možné připojit výše zmíněný enkodér. Navíc motory s grafitovými kartáči se víc hodí do start/stop aplikací, kterou mobilní robot jistě bude.

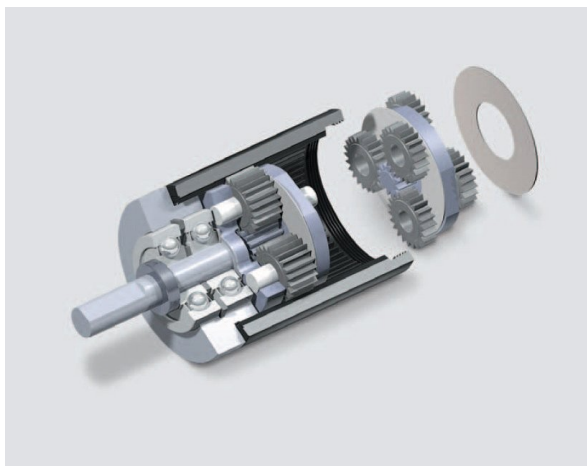
Vzhledem k tomu, že motor je možné krátkodobě přetížít, bude možné ho napájet napájecím napětím baterie, které se bude pohybovat okolo 11,1 V. Doba, po kterou je možné motor přetížít je stanovena na 8,77 s, přičemž v této době se počítá se startovacím proudem. V případě menšího protékajícího proudu motorem se tato doba prodlužuje.

Při výběru převodovky jsem dal přednost kovové planetové převodovce oproti plastové verzi, anebo převodovce s čelním soukolím, tzv. spur gearhead. Výhoda kovové verze proti plastové je ve schopnosti vydržet větší kroutící moment – až 2 Nm místo 0,6 Nm. Nicméně je těžší o 20 gramů a

delší o 1,7 mm. Ovšem jak je vidět z níže uvedených tabulek, tak převodovka by nemusela vydržet kroutící moment při startu/přetlačování.

Převodovka má převodový poměr 29:1, tudíž výsledná rychlost na výstupu je 29 krát menší a kroutící moment je 29 krát větší.

*Planetová převodovka.*



*Čelní soukolí.*



*Obrázek 9: Zobrazení planetové převodovky a čelního soukolí. Převzato z [4].*

Po zpřevodování motoru převodem 29:1 dostanu výsledné hodnoty:

$v_0$	351,7 [ot/min]	Rychlost bez zatížení.
$v_{\max}$	278,3 [ot/min]	Rychlost při nominálním zatížení.
$M_{\max}$	159,8 [mNm]	Kroutící moment při nominálních otáčkách.
$M_{\text{stal}}$	785,9 [mNm]	Kroutící moment při 0 ot/min.

*Tabulka 3: Parametry motoru po zpřevodování. Jmenovité napětí = 9 V.*

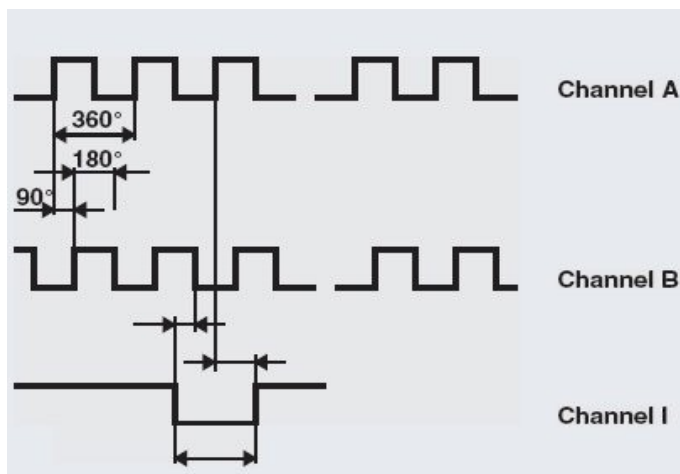
Protože ale počítám s úmyslným přetěžováním motoru, jeho parametry po připojení napájecího napětí 11,1 V na svorky jsou následující:

$v_0$	433,8 [ot/min]	Rychlost bez zatížení.
$v_{\max}$	360,3 [ot/min]	Rychlost při nominálním zatížení.
$M_{\max}$	111,0 [mNm]	Kroutící moment při nominálních otáčkách.
$M_{\text{stal}}$	678,0 [mNm]	Kroutící moment při 0 ot/min.

*Tabulka 4: Parametry motoru po zpřevodování. Jmenovité napětí = 11,1 V.*

Připojený enkodér je 3 kanálový. Přičemž kanál A a kanál B (Channel A, Channel B) jsou vůči sobě posunuty o 90°. Posunutí o 90° slouží k možnosti určení smyslu otáčení. Oba kanály čítají 32 pulzů na otáčku motoru (tím není myšleno po zpřevodování), maximálně do frekvence 8 kHz. Při otáčkách v nezatíženém režimu s napájecím napětím 11,1 V bude enkodér pracovat na frekvenci 6,808 kHz. Kanál I (Channel I) je tzv. indexovací, tudíž vysílá pulz pouze 1x za otočení motoru o

360°. Při otáčkách v nezatíženém režimu s napájecím napětím 11,1 V bude enkodér pracovat na frekvenci 212,76 Hz.



Obrázek 10: Princip funkčnosti enkodéru. Převzato z [4].

## 4.3 Regulátor

Složitější úroveň ovládání motoru vyžaduje vyšší úroveň regulátorů. Ve chvíli, kdy budeme od regulátoru vyžadovat abstraktně vyšší výsledky, než trvale zapnuto a trvale odpojeno, budeme muset nasadit i vyšší stupeň složitosti tohoto zařízení.

K řízení stejnosměrných motorů lze využít mnoho metod. Samotné řízení můžeme rozdělit na dva způsoby:

- řízení pomocí napěťové úrovně
- řízení pomocí pulzně šířkové modulace (PWM)

Každá metoda má své výhody, ale i nevýhody. Při řízení pomocí napěťové úrovně není potřeba řešit frekvenci, při které budeme dodávat proud do motorů a podobně. Nicméně je zde potřeba navrhnout řídicí obvod z diskrétních součástek a řídit tento obvod pomocí analogového signálu. Navíc, pouze při chodu na plný výkon nebude docházet ke zbytečným ztrátám na pasivních částech obvodu, jako jsou rezistory. Také ztratíme dynamiku řízení, které je možno dosáhnout u pulzně šířkové modulace.

Oproti tomu zde stojí již dříve zmíněná pulzně šířková modulace. Jako nevýhodu je možné uvažovat například téměř nulovou dostupnost h-můstků, řízení dostatečně vysokou frekvencí PWM. Nicméně řízení na bázi PWM nabízí i spoustu výhod. Jednou z nich je jednoduchost zapojení, řízení na úrovni TTL logiky – pomocí jakéhokoli dedikovaného jednočipu, lepší schopnost dynamického řízení motoru.

Na trhu se dají sehnat i hotové výrobky ve formě modelářských regulátorů pro stejnosměrné motory. Ovšem tyto regulátory jsou připraveny pro klasické modelářské motory a mnohé nabízejí v

základní verzi frekvenci do 3 kHz, což je velmi nedostatečné. Proto jsem se rozhodl pro výrobu vlastního regulátoru, který bude fungovat jako samostatný modul řízený přes I<sup>2</sup>C sběrnici.

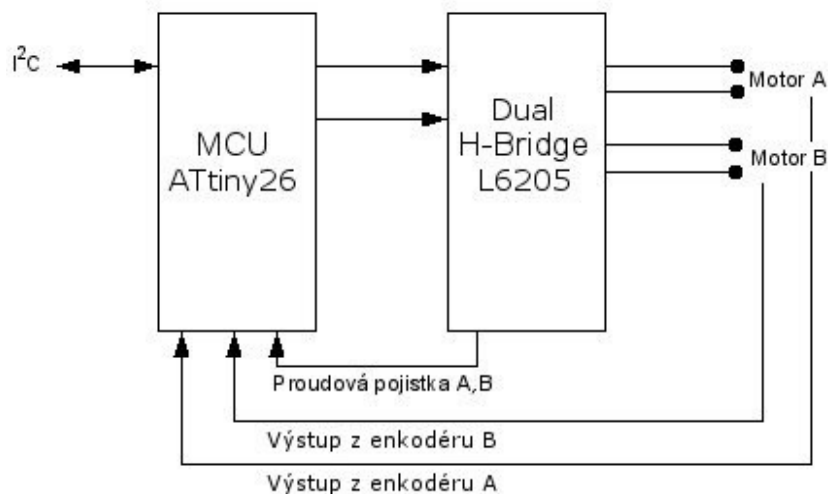
### 4.3.1 Popis regulátoru

Na regulátor budou kladeny velké požadavky, a proto hned ze začátku specifikuji vlastnosti, které musí regulátor splňovat:

- ovládání přes společnou komunikační sběrnici – přes sběrnici I<sup>2</sup>C
- pracovní napětí od 11,1 V (3 Li-Pol články)
- schopnost spínat až 2 A
- frekvence pulzně šířkové modulace od 30 kHz
- nastavitelná proudová ochrana
- regulování otáček podle skutečných otáček motoru – zpětná vazba

Regulátor je tvořen 2 integrovanými obvody:

- 8-bitovým mikrokontrolérem ATMEL AVR ATtiny26
- dvojitým h-můstkem ST L6205.



Obrázek 11: Schématické zapojení regulátoru.

Mikrokontrolér je připojen k řídicí desce přes I<sup>2</sup>C sběrnici. K mikrokontroléru je dále připojen výstup z enkodéru, výkonový výstup z h-můstku připojený přes odpor na měření průchodu proudu na jednotlivých můstcích.

Mikrokontrolér ovládá h-můstek a řídí jeho spínání pomocí PWM.

Dvojitý h-můstek tvoří výkonovou část regulátoru. Je schopný plně řídit dva motory, anebo 1 motor s dvojnásobným proudem. Nejdůležitější vlastnosti obvodu L6205 jsou následující:

- dva nezávisle na sobě pracující h-můstky v jednom integrovaném pouzdře
- schopnost spínat až do 100 kHz

- pracovní napětí mezi 8 až 52 V
- krátkodobý odběr až 5,6 A , dlouhodobý odběr 2,8 A
- integrované rychlé diody pro režim volnoběhu
- spínací odpor 0,34  $\Omega$

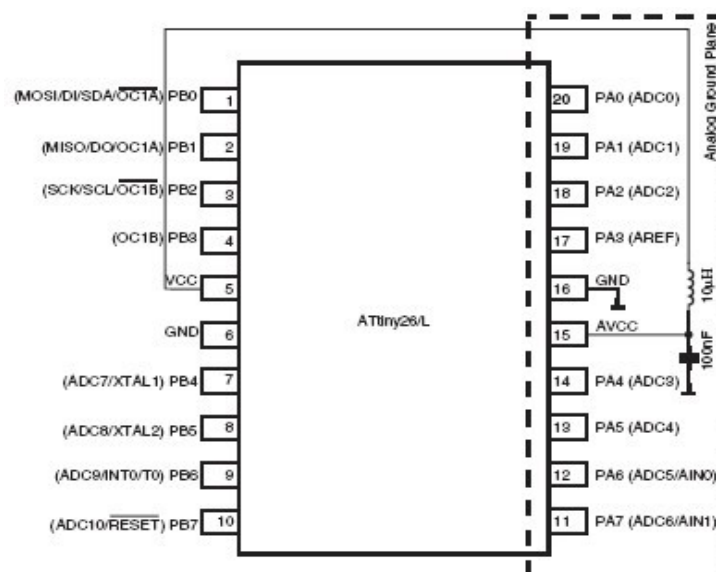
### 4.3.2 Rozbor elektronického schématu

V samotném regulátoru se používají 2 různé úrovně napájecích napětí a zemí. Ačkoli je veškerá elektronika napájena ze stejných Li-Pol akumulátorů, je od výrobce h-můstku doporučeno oddělit zem (GND) pro logické obvody od výkonové země (GNDA) určené pro uzemnění motoru. Obě zemnění (GND, GNDA) jsou spojena v blízkosti vývodů výkonového okruhu – viz schéma regulátoru v příloze 4.

Regulátor je schopný spínat napájecí napětí až do 20 V. Tato limitní hranice je způsobena tantalovým kondenzátorem C8 (33 M/20 V), který je připojen na výkonovou část obvodu. Tantalové kondenzátory jsou velmi choulostivé na přepětí a při jeho převýšení by došlo k trvalému poškození. Nicméně je možné tento kondenzátor vyměnit za typ 1 M/50 V, který je ve stejném pouzdře ale s nižší kapacitou. V tu chvíli bude regulátor schopný pracovat až v blízkosti napětí limitovaného výrobcem. Nicméně, v případě robota je k regulátoru připojené napětí 11,1 V , které je přivedené z Li-Pol akumulátorů, a tudíž není potřeba optimalizace pro tak vysoké napětí.

V případě spínání maximálního přípustného proudu je vhodné zpočátku testovat teplotu můstku a případně přidat i pasivní chlazení. Můstek je sice vybaven tepelnou ochranou, která při překročení 165° C [7] odpojí zátěž od obvodu, ale díky tomu by nebylo možné obvod trvale používat.

Obvod je také vybaven bezetrátovou proudovou pojistkou [7]. Zapojení využívá R-C članku, který je připojený na vstupu pinu ENABLE 1. Doporučené hodnoty jsou  $R_{EN} = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $C_{EN} = 5,6 \text{ nF}$  , přičemž je tím nastaven čas 200  $\mu\text{s}$  na odpojení zátěže.



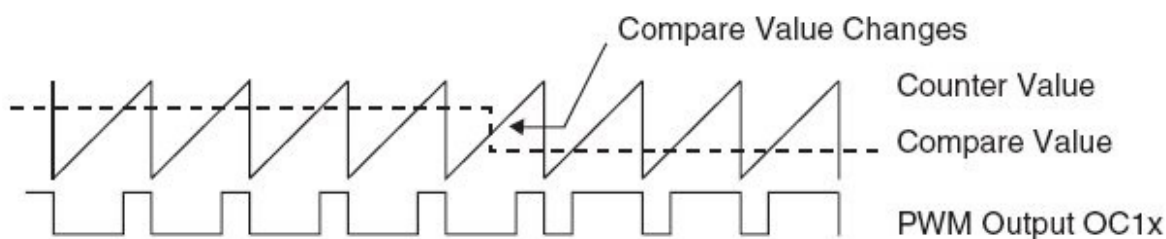
Obrázek 12: Zem pro AD převodník. Převzato z [2].

Logická část obvodu je napájena 5 V z konektoru, který je připojen na řídicí desku. Toto napájecí napětí je filtrováno tantalovým kondenzátorem C9 100  $\mu\text{F}/6,3\text{ V}$ . Napájecí napětí pro logickou část obvodu je využito především pro napájení mikroprocesoru ATtiny26 a pro vytvoření referenčního napětí pro A/D převodník.

K vytvoření referenčního napětí pro A/D převodník je použito zapojení dle doporučení výrobce [2]. Zapojení vytváří L-C dělič dle zapojení na Obrázku 12. Referenční hodnoty jsou  $L = 10\ \mu\text{H}$  a  $C = 100\ \text{nF}$ .

### 4.3.3 Generování PWM signálu

Pro řízení dvojitého h-můstku je využit 8bitový časovač/čítač v režimu PWM. Princip funkčnosti č/č je znázorněn na Obrázku 13.



Obrázek 13: Princip č/č v režimu PWM. Převzato z [2].

Časovač/čítač (č/č, T/C -Timer/Counter) počítá vždy od 0 do 255, anebo do hodnoty nastavené v registru  $\text{OCR1C} + 1$ . Na začátku čítání nastaví hodnotu na výstupním portu OC1x (kde x je A nebo B, záleží na tom, jaký kanál zrovna uvažujeme) na hodnotu log. 1. Ve chvíli shody s porovnávanou hodnotou, která je v registru OCR1x (kde x je A nebo B) shodí hodnotu na výstupním portu OC1x (kde x je A nebo B) do úrovně log. 0 a nastaví příznak přerušení Timer/Counter1x Compare Match Flag (OCF1x). Následně se znovu pokračuje, než č/č narazí na čítací strop v podobě hodnoty registru OCR1C. V ten moment se přepne hodnota výstupního portu OC1x opět do úrovně log. 1 a nastaví se příznak přerušení Timer1 Overflow Flag (TOV1). Při přerušení od TOV1 je nejlepší čas na eventuální změnu registru s porovnávanou hodnotou (OCR1x).

Č/č využívá techniku bufferování registru (OCR1x), takže se nemůže stát, že bychom novou hodnotu zapsali v nesprávnou chvíli, a tím pokazili výstupní signál. Nová hodnota se použije až při dalším průběhu – viz Obrázek 13.

Frekvenci PWM lze nastavit hodnotou registru OCR1C, anebo hodnotou rezonátoru (krystalu):

$$f_{PWM} = \frac{f_{TCK1}}{(\text{OCR1C} + 1)}, \quad (14)$$

kde  $f_{PWM}$  je výsledná frekvence PWM,  $f_{TCK1}$  je frekvence č/č - v tomto případě stejná jako frekvence oscilátoru a OCR1C je hodnota stejnojmenného 8-bitového registru.

### 4.3.4 Komunikace s nadřazeným systémem

Další vlastnost, kterou aplikace nabízí, je řízení přes I<sup>2</sup>C sběrnici. Tato sběrnice není v mikrokontroléru plně implementována, ale pouze částečně. Výrobce ji díky tomu nazval USI (Universal Serial Interface), aby se vyhnul problémům s patenty. Regulátor funguje jako koncové zařízení a tudíž je přes tuto sběrnici řízeno od vyššího zařízení (hlavní kontrolní jednotky).

Ovládání I<sup>2</sup>C sběrnice využívá základ komunikačního protokolu pro I<sup>2</sup>C [6] a pouze specifikuje příkazy pro konkrétní použití.

Mikrokontrolér má volitelnou adresu, pomocí které ho lze adresovat. Standardní adresa je 0x10, přičemž tuto adresu lze změnit při volání funkce `USI_TWI_Slave_Init(0x10)`, kde parametr funkce nastaví novou adresu. Zařízení také reaguje na obecné volání, které je zastoupeno adresou 0x00. Zdrojové kódy jsou v příloze 5.

Mikrokontrolér komunikuje většinou ve 3-bytovém sledu. První byte adresuje zařízení, přičemž jeho nejméně významový bit určuje, zda bude od zařízení data přijímat, anebo zda bude data vysílat. Následující byte určuje příkaz, od kterého se odvine zbytek komunikace a zpracování přenesených dat (zda půjde o změnu rychlosti, nastavení, či vyčítání aktuální spotřeby proudu). Další byte je datový. Přenáší hodnotu, se kterou bude regulátor dál pracovat. V příkazech, kde není potřeba datového bytu (zastav motor), není tento 3. byte použit.

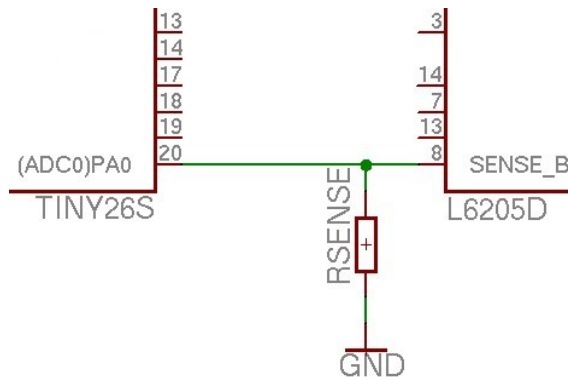
Příkazy jsou:

- `FAST_STOP`: zastavení motoru
- `RUN`: nastavení PWM na určitý výkon (chod motoru) – vyžaduje datový byte
- `FREE_RUN`: odpojení motoru od h-můstku
- `FREE_RUN_CONTINUE`: připojení motoru k h-můstku
- `REVERSE`: změna smyslu otáčení motoru
- `RESET`: nastavení hodnot jako při startu

Jednotlivé příkazy budou vždy pro jeden ze dvou h-můstků. Přes I<sup>2</sup>C sběrnici bude dále možno nastavit proudovou ochranu a snímání rychlosti motoru. Mikrokontrolér bude schopen na požádání vyslat svůj `STATUS`, ve kterých bude uložen stav, v jakém se zařízení nachází – tj. smysl otáčení jednotlivých můstků, zda jsou v provozu, či zastavené, chybový kód.

### 4.3.5 Ochrana proti vysokému proudu

Regulátor též využívá integrovaný převodník z analogového signálu na digitální signál (ADC). Smyslem zapojení je měřit proud protékající motory a při eventuálním překročení maximální meze motory odpojit od napájení. Maximální přípustná mez je nastavitelná přes I<sup>2</sup>C sběrnici. Pevodník je připojen paralelně k odporu na výstup `SENSE_x` (kde x nabývá hodnot A, B podle konkrétního zapojení) h-můstku L6205. Velikost odporu je volitelná v závislosti na maximálním předpokládaném průtoku proudu motorem. Já jsem vybral hodnotu 0,1 Ω, aby na odporu nebyla největší ztráta energie.



Obrázek 14: Zapojení A/D převodníku.

Orientační hodnotu proudu z naměřeného napětí lze jednoduše pomocí Ohmova zákona:

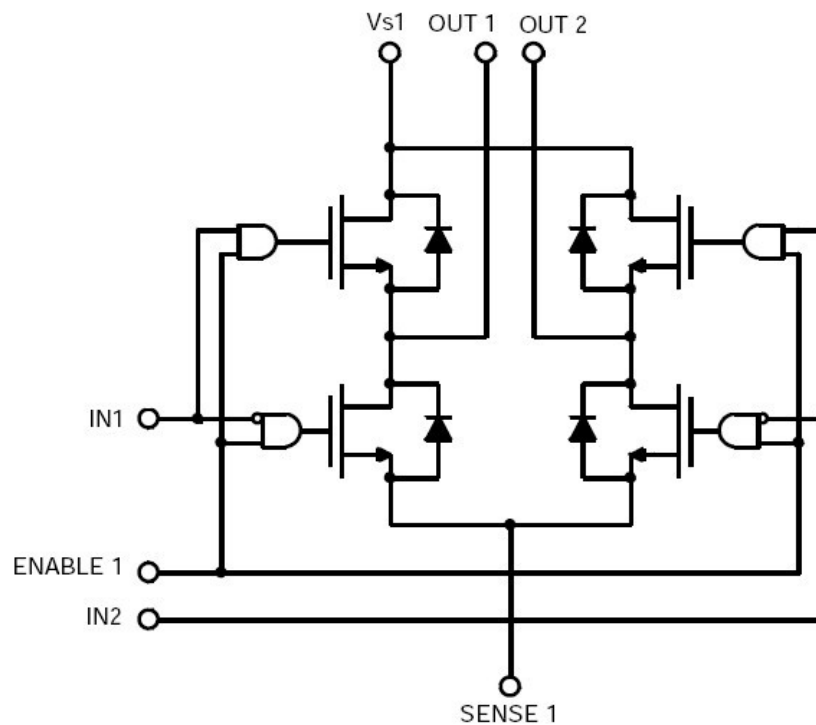
$$I_{mot} = \frac{U_{ADC}}{R_{SENSE}}, \quad (15)$$

kde  $I_{mot}$  je proud protékající motorem,  $U_{ADC}$  je napětí naměřené AD převodníkem a  $R_{SENSE}$  je hodnota odporu připojeného na výstup SENSE\_x (kde x nabývá hodnot A nebo B).

Pokud si vzorec převedeme, můžeme určit i potřebnou hodnotu odporu pro maximální proud a po zaokrouhlení podle hodnot odporové řady zvolený odpor použít.

#### 4.3.6 Ovládání h-můstku

Vlastní ovládání můstku/motoru je realizováno pomocí 3 vodičů pro každý můstek. Schématické zapojení obvodu je znázorněno na Obrázku 15.



Obrázek 15: Schématické zapojení h-můstku. Převzato z [7].



Signály IN1, IN2 spínají jednotlivé strany můstku a signál ENABLE 1 povoluje připojení napájecího napětí. Opět existují dva způsoby řízení či ovládnání h-můstku:

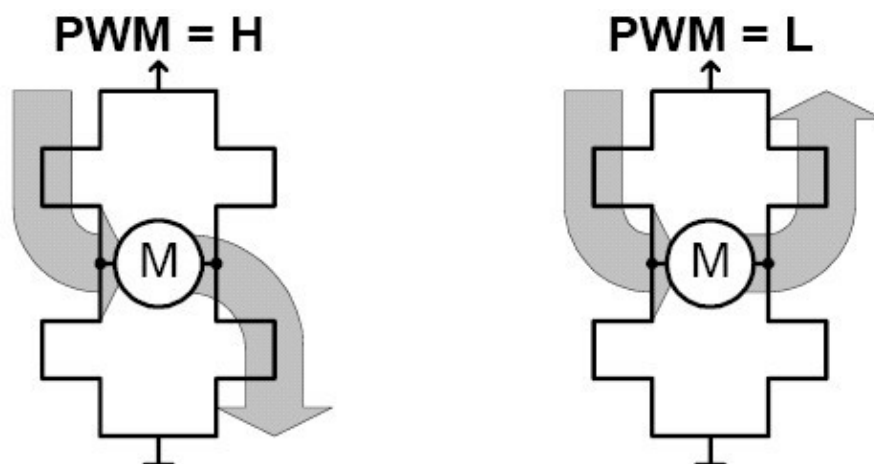
1. Vstupy IN1, IN2 je ovládán smysl otáčení motoru a na vstup ENABLE 1 je přiveden pulzně-šířkově modulovaný signál a současně povoluje výstup můstku.
2. Vstupem IN1 je přiveden pulzně-šířkově modulovaný signál, vstup IN2 určuje smysl otáčení a vstup ENABLE 1 povoluje výstup můstku.

Vstupy			Výstupy		Poznámka
ENABLE 1	IN1	IN2	OUT1	OUT2	
L	X	X	High Z	High Z	Motor brzdí volnoběhem - je odpojen
H	L	L	GND	GND	Motor brzdí
H	H	L	Vs	GND	Motor se točí vpřed
H	L	H	GND	Vs	Motor se točí vzad
H	H	H	Vs	Vs	Motor brzdí

Tabulka 5: Pravdivostní tabulka řízení obvodu L6205.

High Z = stav vysoké impedance - odpojení, GND = zem, Vs = Napájecí napětí

Jak lze z Tabulky 5 poznat, při řízení 1. způsobem se podle šířky pulzu motor střídavě připojuje na napájecí napětí a odpojuje do stavu vysoké impedance. Při odpojení do stavu vysoké impedance funguje motor jako dynamo a vytváří elektrický náboj, který je následně odveden integrovanými diodami v můstku. Navíc se nechová stejně při rozjezdu tak jako při brzdění, což je způsobeno výše zmíněným odpojováním do stavu vysoké impedance. Proto jsem se rozhodl ovládat motor způsobem druhým, nazývaným též slow decay [3]. Tento způsob řízení je znázorněn na Obrázku 16. Při řízení dochází k větší spotřebě elektrické energie, nicméně tato spotřeba je naprosto zanedbatelná.



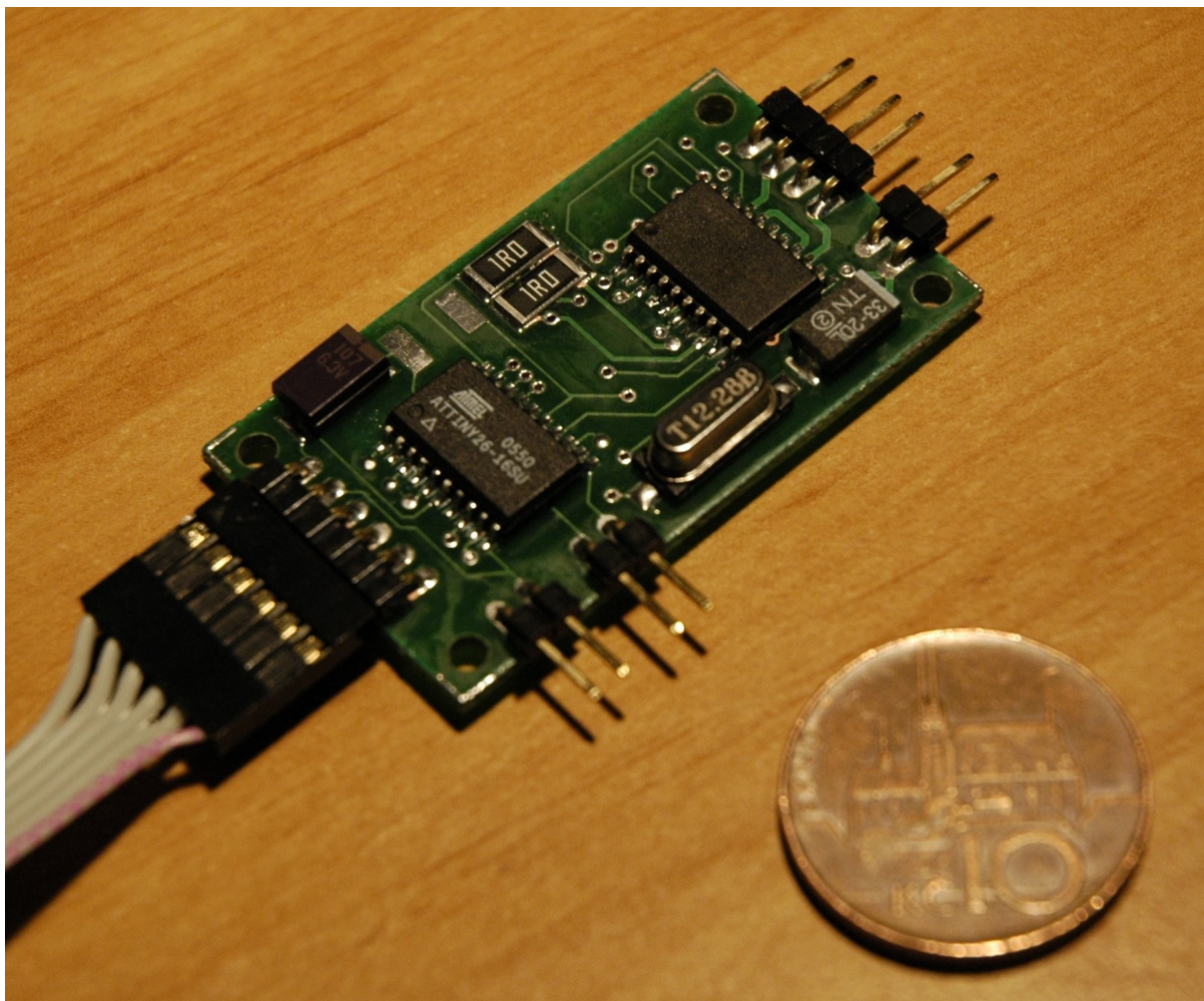
Obrázek 16: Způsob řízení motoru. Převzato z [3].

### 4.3.7 Výsledný regulátor otáček motoru

Tištěný spoj je osazen výhradně SMD součástkami. Mikrokontrolér je ve verzi ATtiny26-16SU a dvojitý h-můstek ve verzi L6205D. Konektory jsou kvůli zachování snadného připojení klasické piny. Regulátor je zcela provozuschopný. Při vyšším trvalém proudovém zatížení (0,3 A) je nutné obvod L6205D chladit (např. pasivním chlazením).

Výsledné parametry zařízení jsou následující:

- šířka: 49 mm (bez konektorů), 62 mm (s konektory)
- hloubka: 28,5 mm (bez konektorů), 35,5 mm (s konektory)
- váha: 8 gramů (s konektory)



Obrázek 17: Výsledný regulátor otáček motoru.

## 4.4 Napájení robota

Každý mobilní robot s sebou musí vozit svůj vlastní zdroj elektrické energie. Jinak tomu není ani u robota pro soutěže Minisumo. Nicméně, než vyberu konkrétní zdroj energie, je potřeba specifikovat požadované parametry.

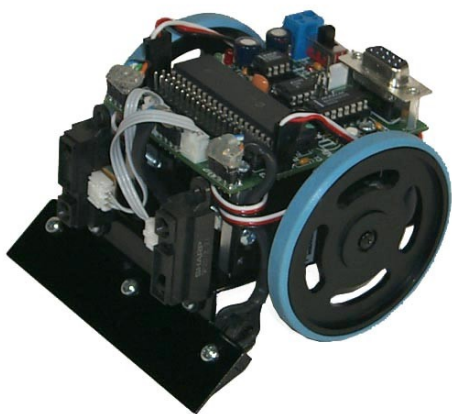
Jednou z nejnáročnějších částí robota na zdroj energie jsou motory. Mají naprosto největší spotřebu a ve špičkách spotřebují obrovské množství proudu (při rozjezdu, tudíž i při přetlačování, mohou spotřebovat i jednotky ampér). Robot má také omezenou hmotnost a samotný pohon (motor + převodovka + tachometr) váží přes 100 g/kus, tudíž je potřeba vybrat co nejlehčí možný zdroj energie. Myslím si, že nejlepší možnou variantou jsou Li-Pol články. V kapitole 3.2 jsem zmínil mnoho výhod těchto akumulátorů a tudíž uvedu pouze konkrétní informace.

Robot bude obsahovat 3 sériově spojené Li-Pol články (například Wide Energy) o kapacitě 800 mAh. Celý zdroj bude mít napájecí napětí 11,1 V, což je pro řízení 9 V dobré – možnost krátkodobého přetížení motoru a získání vyšších otáček. Zdroj bude schopný dodávat až 16 A, čehož samozřejmě nevyužiji - neboť při takovém proudovém odběru by byl robot schopný fungovat pouze 3 minuty. Celková hmotnost zdroje je 60 g a velikost 66x35x16 mm. Pokud by tato varianta byla hmotnostně nepřijatelná, lze ji vyměnit za 400 mAh variantu, která váží pouhých 36 g.

## 4.5 Konstrukce

Při konstrukci a výrobě robota nejsou ve vzhledu a užitečnosti kladeny žádné hranice. Pouze nesmí být překročeny limity velikosti a hmotnosti, nicméně, zda bude robot vysoký či nízký je už na volbě konstruktéra. Existuje malý standard ve vzhledu a principu funkčnosti robota a ten je nastaven podle robota Mark III [10].

*Robot Mark III.*



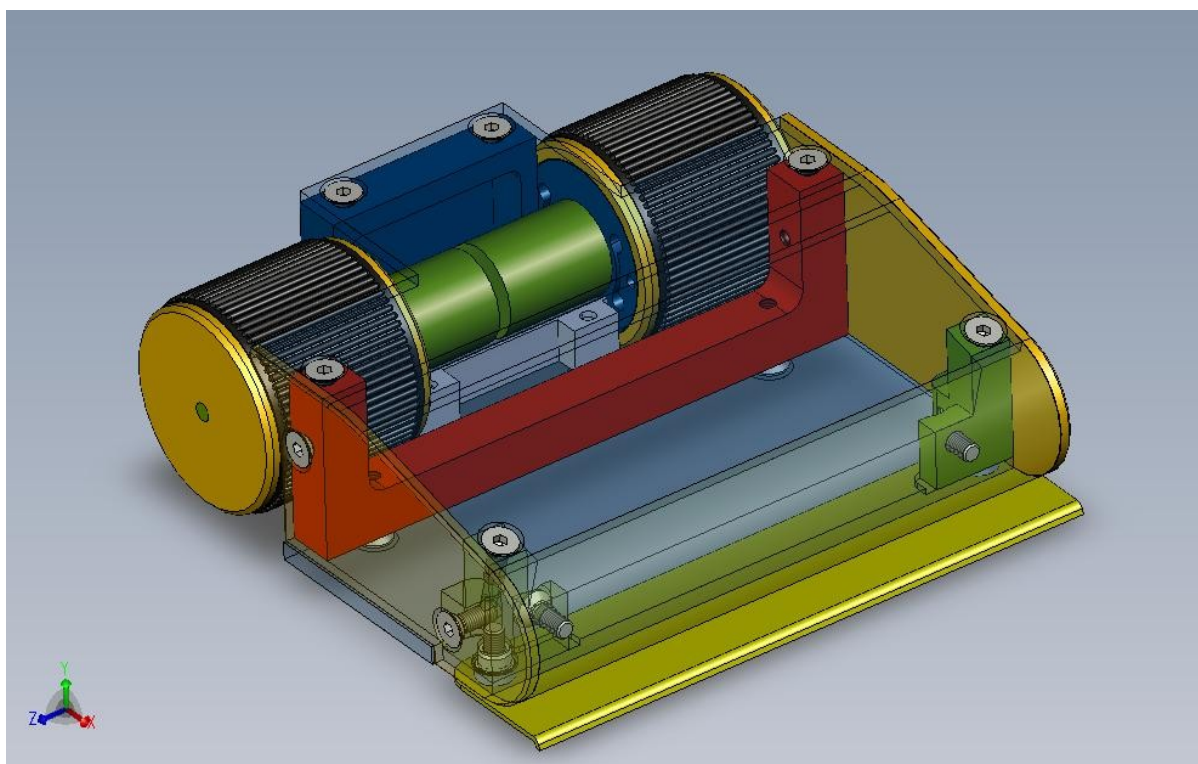
*Robot Seeker II.*



*Obrázek 18: Ukázka robota Mark III a Seeker II.*

Koncept robota Mark III není vůbec špatný. Robot je konstrukčně jednoduchý, využívá levných a dostupných částí a tudíž je vhodný pro široké spektrum zájemců o tuto soutěž. Je velmi zpopularizovaný a najde se téměř všude – i na českém trhu. Oproti tomu je možnost vyvíjet jakýkoliv jiný typ robota. Existují 4kolové varianty, anebo také 2kolové, které se snaží využít všech potenciálních nedostatků robotů jako je Mark III. Tím pádem je vidět, že koncept robota a jeho konstrukce je velmi důležitá a nezanedbatelná složka. Já jsem se nechal inspirovat robotem Seeker II [9], který je koncipován jiným směrem. Nízký, malý robot, který ukrývá veškeré vybavení.

Výhody druhého konceptu jsou celkem prozaické. Malou výškou a černým matným lakem se robot snaží eliminovat odrazivost infračervených dálkoměrů. Mnohdy jsou samotné dálkoměry umístěny výš a tím pádem se stává robot do jisté míry neviditelným. Jeho malá výška mu dává i vyšší stabilitu na zemi. Velmi důležitá jsou širší kola s gumovou, či silikonovou pneumatikou. Ta zvyšuje stabilitu a adhezi. Díky tomu má robot větší možnost přenést veškerý kroučící moment na podložku a vyvarovat se prokluzování koleček. Také radlice, která je téměř na každém robotu, má své odůvodnění. Snaží se využít možnost nabrání protivníka na radlici a určitým způsobem mu zhoršit jeho možnost hybnosti. Navíc se přenesou část jeho hmotnosti na radlici a robot bude moci lépe využít svého kroučícího momentu.



*Obrázek 19: První koncept mobilního robota.*

Původní koncept využívá usazení motorů v kolech, jak je možné pozorovat na Obrázku 19. Nicméně díky výměně motorů už toto řešení není možné. V novém konceptu budou motory uloženy v těle robota a přes hřídelku bude kroučící moment převezen do koleček.

## 4.6 Materiály

Robot bude zkonstruován z lehkého materiálu (s největší pravděpodobností z duralu). I přesto je očekávaná hmotnost zařízení okolo 200 g, což je vzhledem k ostatním částem nepřipustné. Proto se při jeho výrobě bude využívat potenciálu k “hubnutí” a v místech, kde to bude možné, budou vyvrtány otvory. Tyto otvory nesmí být příliš velké, aby nesnížili jeho pevnost konstrukce, nicméně sníží jeho výslednou hmotnost. Vytvoření otvorů vrtačkou je konstrukčně velmi jednoduché.

## 5 Závěr

Mobilní robot je velmi složité a komplexní zařízení. Tomu odpovídá i množství práce, které je hotové na tomto projektu. Celková realizace a oživení robota se mi nepodařilo stihnout. Během práce na projektu jsem nastudoval mnoho oblastí od návrhu elektrických obvodů, principu řízení stejnosměrných motorů až po mechanický návrh. Položil jsem základ pro další práci na mobilním robotu například ve formě způsobu výběru jiného pohonu, modulu ovládání motorů, způsobu napájení zařízení, principu práce distribuovaného systému atd.

Během návrhu jsem udělal mnoho chyb (např. ve výběru pohonné jednotky či návrhu robota). Tyto chyby byly často způsobeny neznalostí fyzikálních potřeb robota, mechaniky a inspirováním špatnými radami samozvaných odborníků. Díky studiu problematiky a konzultacím jsem tyto defekty našel a odstranil.

Hotový je vlastní návrh robota, výběr jednotlivých součástí na skenování prostředí, pohyb, napájení a konstrukci. Vyrobený a připravený je i modul pro řízení pohonu, který se bude starat o řízení obou pohonných jednotek a ulehčovat tak hlavní řídicí jednotce co se procesorového času týká.

Momentálně je připraveno na předělání uchycení a položení výkonnějších motorů, které jsou nezbytné pro přetlačování – to znamená upravit “skořáčku” robota, dále výroba modulu na skenování prostředí a vyhledávání protivníka. Modul bude opět komunikovat přes I<sup>2</sup>C sběrnici a bude snižovat procesorové zatížení řídicí jednotky. Z elektroniky to bude na závěr samotná řídicí jednotka a kompletní programové vybavení. V neposlední řadě se bude jednat o konečné sestavení všech komponent dohromady a oživení. Práce je dostatek a bude velmi zajímavá. Díky rozsáhlosti projektu bych rád dále pokračoval na jeho dokončení v navazujícím studiu.



# Literatura

- [1] Atmel, San Jose, *ATmega128(L)*, 2006. Dokument dostupný na URL [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2467.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf) (květen 2007).
- [2] Atmel, San Jose, *ATtiny26(L)*, 2006. Dokument dostupný na URL [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc1477.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc1477.pdf) (květen 2007).
- [3] Infineon, Munich, *TLE 6209 R*, 2001. Dokument dostupný na URL [http://www.infineon.com/upload/Document/cmc\\_upload/documents/028/495/tle6209r\\_3.0\\_1.pdf](http://www.infineon.com/upload/Document/cmc_upload/documents/028/495/tle6209r_3.0_1.pdf) (květen 2007).
- [4] Maxon motor, Sachseln, *Program 06/07*, 2006.
- [5] NOVÁK, P. *Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení*. Praha. BEN-technická literatura. 2005. ISBN 80-7300-141-1.
- [6] Philips Semiconductors, Eindhoven, *The I<sup>2</sup>C-bus specification*, 2000. Dokument dostupný na URL [http://www.nxp.com/acrobat\\_download/literature/9398/39340011.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download/literature/9398/39340011.pdf) (květen 2007).
- [7] STMicroelectronics, Geneva, *L6205*, 2003. Dokument dostupný na URL <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/7616.pdf> (květen 2007).
- [8] Uzimex, Praha, *Motory a řízení pohonů Maxon*, 2005. Dokument dostupný na URL [http://www.uzimex.cz/knihovna/uzimex/mot\\_riz.pdf](http://www.uzimex.cz/knihovna/uzimex/mot_riz.pdf) (květen 2007).
- [9] <http://www.huv.com/miniSumo/seeker2/> (květen 2007).
- [10] <http://www.junun.org/MarkIII/Manual/index.jsp> (květen 2007).
- [11] <http://www.mgm-compro.cz/index.php?tid=li-pol-baterie-manual> (květen 2007).
- [12] <http://www.mgm-compro.cz/pdf/lipol-vs-a123-v4.pdf> (květen 2007).
- [13] <http://pandora.idnes.cz/part/2007/03/6373> (květen 2007).
- [14] <http://www.robotroom.com/SumoCircleMini.html> (květen 2007).
- [15] <http://www.robotroom.com/SumoRules.html> (květen 2007).
- [16] <http://www.robozor.cz/view.php?cislocclanku=2004120801> (květen 2007).
- [17] <http://www.sam119.sk/tipy/akumulatory.pdf> (květen 2007).

# Seznam příloh

Příloha 1. Katalogový list k QRD1114 (na CD)

Příloha 2. Katalogový list k GP2Y0A21 (na CD)

Příloha 3. Katalogový list k Atmega128 (na CD)

Příloha 4. Schéma tištěného spoje k regulátoru (na CD)

Příloha 5. Zdrojové kódy k mikrokontroléru (na CD)