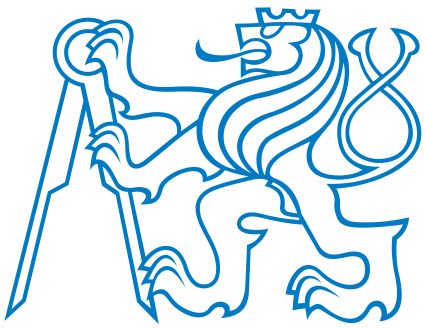
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

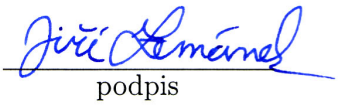
Robot HERO - základní řízení

Praha, 2007 **Autor: Jiří Zemánek**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 31. 8. 2007



podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, docentovi Jiřímu Bayerovi, za připomínky a rady, které mi dával v průběhu práce. Také mu děkuji za to, že mi umožnil a pomohl realizovat úpravy na robotu, se kterými při zadávání bakalářské práce možná ani nepočítal. Jsem vděčný Ing. Bohumilovi Květenskému z firmy Uzimex za zpracování nabídek pohonů a jeho zájem o projekt. Chci poděkovat svému kolegovi Ondřeji Šantinovi za bezproblémovou a příjemnou spolupráci při souběžné práci na robotu. Dík také patří Pavlu Kasíkovi za pročtení práce a její korekturu. Také mé přítelkyní Marianě Velínské děkuji za opravu chyb a povzbuzování k dobré náladě. Děkuji také jmenovci a hlavně rodiči Jiřímu Zemánkovi za rady a pomoc při stavbě robotu a připomínky k textu práce.

Abstrakt

Práce seznamuje s historií a současným stavem mobilního robotu HERO, hodnotí použitelnost dochovaných elektronických a mechanických dílů. Součástí práce je stanovení koncepce robotu, který se bude schopen autonomně pohybovat v neznámém prostředí a bude mít možnost bezdrátového spojení s počítačovým systémem. Koncepce obsahuje návrh struktury řídícího systému a vybavení jednotlivými systémy zajišťujícími funkci robotu. Práce popisuje návrh systému napájení včetně ochran, výběr a instalaci nových pohonů robotu a všechny provedené mechanické úpravy na robotu. Dále obsahuje výčet vlastností a možností jednotlivých řídících subsystémů, které jsou na robotu instalovány. V závěru se práce zabývá určením dynamického modelu robotu a nastavením regulátorů.

Abstract

This work presents the historic and current state of the mobile robot HERO and evaluates the usability of the extant electronical and mechanical parts. It sets down a concept of the robot, which will be able to operate autonomously in an unknown environment and will be provided with the possibility of wireless connection to a computer system. The concep includes a design of a control system structure and equipping it with particular systems, ensuring the functions of the robot. The work introduces a design of a power supply system including protections, choice and instalment of new drives for the robot. It also describes all mechanical modifications made on the robot. A list of characteristics and possibilities of particular operating subsystems, which are installed on the robot, are also covered. Finally, the work deals with identification of a dynamic model of the robot and setting of the regulators.

České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

Školní rok: 2006/2007

Zadání bakalářské práce

Student: Jiří Zemánek

Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: Robot HERO – základní řízení

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s mechanickou koncepcí mobilního robota HERO a stanovte požadavky na jeho základní řízení.
2. Realizujte základní řízení pohybových os robota (pojezd, směr pojezdu, pohyb ruky, stisk chapadla) s možností následného převedení na dálkové řízení.
3. Navrhněte a realizujte sytém napájení robota s respektováním ochran proti přepětí a přetížení.
4. Identifikujte základní dynamické parametry robota a stanovte jednoduchý model řiditelné soustavy.
5. Vypracujte podrobnou dokumentaci robota a jeho řídicího systému.

Seznam odborné literatury:
dokumentace robota Hero, diplomové práce Vaněk, Pácha

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Jiří Bayer, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: zimní semestr 2006/07

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. 8. 2007

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta elektrotechnická L.S. -4-

Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

V

V Praze, dne 6. 3. 2007

Obsah

Seznam obrázků **xi**

Seznam tabulek **xv**

1 Úvod **1**

2 Původní robot **3**
2.1 Sériově vyráběný HERO 1 3
2.2 Výchozí stav 5
2.2.1 Mechanika robotu 5
2.2.2 Pohony robotu 7
2.2.3 Elektronika robotu 7
2.2.4 Ruka 8

3 Koncepce **11**
3.1 Úvod 11
3.2 Mechanika 11
3.3 Řízení 12
3.4 Sofistikované řízení 13
3.5 Dálkové řízení 14
3.6 Senzory 15
3.7 Struktura řídícího systému 17
3.8 Úkoly realizované v této bakalářské práci 18

4 Napájení **19**
4.1 Požadavky na zdroj elektrické energie 19
4.2 Mobilní zdroj elektrické energie 21
4.3 Přehled systémů sekundárních článků 22
4.3.1 Nikl-kadmiové NiCd 22
4.3.2 Nikl-metalhydridové NiMH 22
4.3.3 Olověné LA 23

4.3.4 Lithium-iontové Li-ion . . . 24
4.3.5 Lithium-polymerové Li-pol . . . 24
4.3.6 Výběr druhu akumulátoru . . . 25
4.4 Externí napájení . . . 26
4.5 Nabíjení akumulátorů . . . 28
4.5.1 Přepínání akumulátorů k nabíječkám a k síti . . . 28
4.5.2 Výběr nabíječky . . . 30
4.5.3 Funkce nabíječky s obvodem UC3906 . . . 31
4.6 Napájení přístupového bodu Wi-Fi . . . 33
4.7 Napájení řídících jednotek EPOS . . . 35
4.8 Ochrana obvodů . . . 37
4.8.1 Ochrana proti proudovému přetížení . . . 37
4.8.2 Ochrana proti přepětí . . . 37
4.8.3 Ochrana proti přepólování . . . 38
4.9 Zapojení napájecího systému . . . 38

5 Pohony **41**
5.1 Přehled druhů motorů . . . 41
5.1.1 Stejnosměrný motor DC . . . 41
5.1.2 Krokový motor . . . 43
5.1.3 Elektronicky komutovaný motor EC . . . 45
5.2 Původní pohony . . . 45
5.2.1 Pojezd . . . 45
5.2.2 Natáčení hnacího kola a otáčení hlavy . . . 46
5.3 Nové pohony . . . 47
5.3.1 Pojezd . . . 49
5.3.2 Natáčení hnacího kola . . . 50

6 Řízení **51**
6.1 Řídící jednotky EPOS . . . 51
6.1.1 Struktura jednotky . . . 52
6.1.2 Provozní režimy . . . 53
6.1.3 Ovládací program pro PC . . . 55
6.1.4 Vstupy a výstupy . . . 56
6.1.5 Připojení . . . 59
6.2 Řídící počítač PC/104 . . . 59
6.2.1 Základní deska . . . 60
6.2.2 Karta pro připojení sběrnice CAN . . . 61
6.2.3 Karta pro zachytávání videa . . . 61
6.2.4 Zdroj . . . 62
6.3 Přístupový bod Wi-Fi . . . 62

6.4 Sběrnice CAN 63
6.5 Vstupy a výstupy 64

7 Mechanika **65**
7.1 Podvozek 66
7.1.1 Přední hnací kolo 66
7.1.2 Směrové natáčení předního kola 67
7.1.3 Optické závory 68
7.1.4 Vedení kabelů k hnacímu kolu 69
7.2 Tělo 70
7.2.1 Zadní stěna 70
7.2.2 Levá stěna 71
7.2.3 Přední stěna 71
7.2.4 Pravá stěna 72

8 Model řízené soustavy **75**
8.1 Směrové natáčení kola 75
8.1.1 Fyzikální model dynamiky 75
8.1.2 Identifikace parametrů modelu 77
8.1.3 Nastavení regulátoru 81
8.2 Pojezd 83
8.2.1 Fyzikální model dynamiky 83
8.2.2 Identifikace parametrů modelu 83
8.2.3 Nastavení regulátoru 86
8.3 Odometrický model 86

9 Závěr **89**

Literatura **92**

A Zapojení konektorů jednotek EPOS **I**

B Schéma nabíječky **III**

Seznam obrázků

2.1 Původní podoba robotu HERO 1 bez krytů 3
2.2 Výchozí podoba robotu HERO 5
2.3 Náčrtek podvozku 6
2.4 Uspořádání předního hnacího kola 6
2.5 Původní pohyby robotu řízené krokovými motory 8

3.1 Diagram tvorby mapy prostředí 13
3.2 Senzory Deftech SRF05 a Sharp GP2D12 16
3.3 Skener Sick LMS 200 a Hokuyo URG041X 16
3.4 Blokové schéma řídícího systému robotu 18

4.1 Blokové schéma napájecího systému 19
4.2 Vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru 23
4.3 Panel pro připojení zdroje a ovládání napájení 26
4.4 Zapojení konektoru 27
4.5 Přepínání akumulátorů pro nabíjení 29
4.6 Obvod pro řízení přepínání akumulátorů 29
4.7 Originální stavebnice nabíječky s UC3906 31
4.8 Průběh nabíjení 32
4.9 Schéma spínaného stabilizátoru pro Wi-Fi 33
4.10 Deska plošných spojů spínaného stabilizátoru 34
4.11 Osazený spínaný stabilizátor 35
4.12 Schéma ochrany jednotek EPOS 35
4.13 Deska plošných spojů ochrany jednotek EPOS 36
4.14 Osazená ochrana jednotek EPOS 36
4.15 Schéma přepěťové ochrany 38
4.16 Celkové schéma napájení 39
4.17 Stěna robotu určená pro prvky napájení 39

5.1 Schéma plného H-můstku 42
5.2 Závislost momentu na krokovací frekvenci 44
5.3 Plochý motor Maxon EC45 flat 48

5.4 Převodovka Maxon GS45 k plochému motoru 48
5.5 Pracovní oblast pohonu hnacího kola 49
5.6 Pracovní oblast pohonu natáčení hnacího kola 50

6.1 Řídící jednotka motorů EPOS 24/5 51
6.2 Blokové schéma struktury řídící jednotky EPOS 52
6.3 Průběh zrychlení, rychlosti a polohy při lichoběžníkovém profilu 53
6.4 Průběh zrychlení, rychlosti a polohy při sinusovém profilu . . . 53
6.5 Obrazovka ovládacího programu pro EPOS 56
6.6 Plošný spoj svorkovnice vstupů a výstupů EPOS 57
6.7 Svorkovnice vstupů a výstupů EPOS 57
6.8 Optické závory se součástkou pro uchycení 57
6.9 Schéma připojení optických závor k jednotce EPOS 58
6.10 Řídící jednotka motorů EPOS 24/1 59
6.11 Základní desky PC/104 60
6.12 Deska PC/104 pro sběrnici CAN 61
6.13 Deska PC/104 pro zachytávání videa 61
6.14 Deska PC/104 se zdrojem 62
6.15 Přístupový bodu WRT-312 63
6.16 Nákres propojení systémů robota sběrnicí CAN 64

7.1 Nový podvozek 65
7.2 Nákres celého nového podvozku 66
7.3 Nákres sestavení součástek na ose hnacího kola 66
7.4 Nákres dílu hnacího kola 67
7.5 Podvozek s částí pro směrové natáčení hnacího kola. 68
7.6 Nákres součástek na ose směrového natáčení 68
7.7 Umístění optických závor 69
7.8 Vedení kabelů k hnacímu kolu 69
7.9 Těla robotu s popisem - pohled shora 70
7.10 Pohled na zadní a levou stěnu robotu zevnitř 71
7.11 Levá stěna robotu zvenku 72
7.12 Pohled na přední a pravou stěnu robotu zevnitř 73
7.13 Pohled na robot z boku 73

8.1 Simulační schéma fyzikálního modelu soustavy natáčení v programu Simulink 76
8.2 Závislost ustálené úhlové rychlosti natáčení na budícím proudu 78
8.3 Simulační schéma modelu soustavy natáčení v programu Simulink 79

8.4 Přechodové charakteristiky směrového natáčení pro proud 120 mA, 150 mA, 200 mA a 300 mA (odshora) 80
8.5 Průběh regulačního pochodu natáčení pro skok žádané hodnoty 82
8.6 Průběh regulačního pochodu natáčení při sledování trajektorie 82
8.7 Závislost ustálené úhlové rychlosti pojezdu na budícím proudu 84
8.8 Přechodové charakteristiky pojezdu pro proud 300 mA, 400 mA, 500 mA a 600 mA (odshora) 85
8.9 Průběh regulačního pochodu pojezdu při sledování trajektorie 86
8.10 Nákres pro odometrický model 87

B.1 Shéma nabíječka NBX3906 III

Seznam tabulek

4.1 Požadavky jednotlivých spotřebičů 20
4.2 Parametry akumulátorů 25
4.3 Významy jednotlivých žil připojení spodního panelu 27

5.1 Štítkové údaje motoru pro pojezd 45
5.2 Změřené parametry motoru pro pojezd 45
5.3 Parametry motoru 5067-044-GF-7 při maximální účinnosti . . 46
5.4 Změřené parametry pohonu pro natáčení hnacího kola 47
5.5 Parametry pohonu pojezdu pro jednotku EPOS 49
5.6 Parametry pohonu natáčení pro jednotku EPOS 50

6.1 Význam žil připojujících optické závory 58

8.1 Parametry modelu soustavy natáčení pro různé vstupní proudy 79
8.2 Nastavení konstant jednotlivých regulátorů natáčení 82
8.3 Parametry modelu pojezdu pro různé vstupní proudy 84
8.4 Nastavení konstant jednotlivých regulátorů pojezdu 86

A.1 Připojení motoru pojezdu I
A.2 Připojení Hallových sond pojezdu I
A.3 Připojení motoru a Hallových sond směrového natáčení II
A.4 Zapojení konektoru DSub pro sběrnici CAN na PC/104 II
A.5 Připojení CAN k EPOS II

Kapitola 1

Úvod

Od dětství je elektrotechnika mým velkým koníčekem. Pro studium oboru kybernetiky a řízení jsem se rozhodl, neboť se v něm setkává mnoho mně blízkých oborů a problémy, které se v něm řeší, vyžadují komplexní znalosti, ale i proto, že si pod zástěrkou seriózní práce mohu dále hrát. I z těchto důvodů jsem si vybral téma bakalářské práce, ve kterém jsem viděl rozmanité úkoly a možnost získat zkušenosti v různých oblastech.

Robot HERO byl sériově vyráběný výukový robot. Exemplář, který byl na katedře řízení FEL ČVUT, prošel různými úpravami, které prováděli studenti v rámcí diplomových prací. Na delší dobu se ale tyto práce pozastavily. Mezitím pokročila technika a firmy vyvinuly moderní komponenty s novými možnostmi tvorby systému. Hlavním úkolem na počátku této práce bylo posoudit, které části robotu zachováme a které se nahradí nebo odstraní.

Na robotu jsme pracovali souběžně s kolegou Ondřejem Šantinem. Společně jsme navrhli koncepci robotu, což bylo nutné, aby naše práce nebyla izolovaná, ale mohla být částí cesty k určitému cíli. Hlavní zásada byla: dát robotu solidní základ a tím umožnit jeho další rozvoj v rámci navazujících bakalářských a diplomových prací. Návrh jsme konkretizovali tak, jak pokračovalo hledání prvků, seznamování se s jejich parametry a vyjasňování možností jejich propojování.

Úkolem mé bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat základní řízení mobilního robotu a také systém jeho napájení, tedy systémy, na kterých budou stavět další navazující práce týkající se například sofistikovaného řízení. Protože jsem se soustředil na základy robotu, věnoval jsem pozornost také mechanické konstrukci.

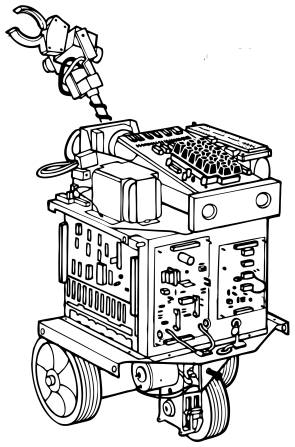
Obsah této práce je soustředěn na mechanickou a hardwarovou stránku konstrukce robotu. Práce Ondřeje Šantina je orientována na vyšší vrstvu řízení, bezdrátový přenos dat a softwarové vybavení.

Kapitola 2

Původní robot

2.1 Sériově vyráběný HERO 1

Robot HERO 1 byl vytvořen v rámci projektu firmy Heathkit®. Jméno HERO pochází ze zkrácení označení Heathkit Educational Robot. Vývoj robotu začala firma v říjnu 1979 a první kusy se dostaly do prodeje o tři roky později, tedy v roce 1982. Robot byl určen pro výukové účely, což naznačuje i jeho samotný název. Firma robot propagovala jako ideální výukový nástroj takto: „HERO 1 je samostatný robot, který reaguje na Vás a na okolí. Je výborný při výuce součástí a obvodů robotů stejně jako umělé inteligence“. Byl připravený pro vnitřní používání a domácí prostředí. HERO 1 byl v 80. letech považován za nejúspěšnější a nejpopulárnější výukový a domácí robot.



Obrázek 2.1: Původní podoba robotu HERO 1 bez krytů

Robot kromě řídícího počítačového systému obsahoval také bohatou sestavu periferních zařízení. Byl vybaven senzorem intenzity osvětlení, senzorem zvuku s frekvenčním rozsahem 200 Hz–5 kHz a ultrazvukovým senzorem pohybu, který detekoval pohyb ve vzdálenosti až 4,5 m. Součástí robotu byl také ultrazvukový dálkoměr s rozsahem 0,1 m–2,4 m, který byl umístěn v otočné hlavě robotu, stejně jako kontaktní pole pro stavbu a testování vlastních obvodů. Robot byl vybaven i hlasovým syntezátorem, obvody reálného času, portem přerušení a panelem pro učení (teach pendant). Pro určování polohy robotu sloužil optický enkodér snímající otáčení kola.

Robot měl profil osmihranu, byl vysoký 0,5 m a v průměru měl 0,45 m. S vybavením vážil 17,7 kg. Podvozek tvořila tři kolečka, dvě zadní s pevnou osou a jedno otočné, které sloužilo zároveň jako pohon. Vrchní část robotu byla otočná v rozsahu 350° a pohon otáčení hlavy zajišťoval krokový motor.

Na otočné horní části byla umístěna také ruka, která mohla sloužit pro zvedání a manipulaci s malými předměty. Nebyla ve standardní výbavě robota, ale byla doplňkovým vybavením. Ruka měla tři rotační klouby a jeden posuvný, dále měla řiditelné chapadlo. Všechny pohony zajišťovaly krokové motory.

Zadávání příkazů robotu bylo možné čtyřmi cestami. První byla hexadecimální klávesnice se 17 klávesami, která byla na vrchní části robotu. Sloužila pro zadávání a modifikaci programů a také ke změně provozních režimů. Pro ruční řízení pohyblivých os bylo možné k robotu připojit panel pro učení. Pomocí rádiového modulu, který byl doplňkovým vybavením, šlo robota řídit na dálku bezdrátově. Čtvrtá cesta pro zadávání příkazů byla rozšiřující deska s pamětí a rozhraním RS-232, přes které se bylo možné připojit k počítači.

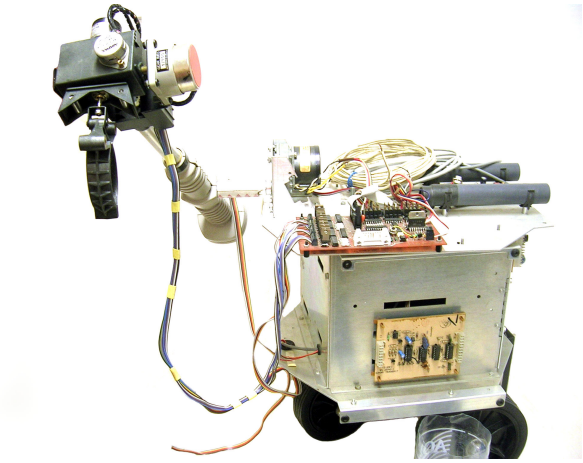
Robot byl řízen osmibitovým procesorem Motorola 6806, měl stálou paměť ROM o velikosti 8 KB pro rozšíření základní instrukční sady procesoru a také paměť RAM 4 KB pro dočasné uložení aktuálního programu. Programy bylo možné psát přímo ve strojovém kódu procesoru nebo ve vyšším jazyku, který byl přizpůsoben pro práci s robotem. Hotové programy šlo uložit a načíst z magnetofonové pásky. Pro zobrazení paměťových adres, kódu, dat a provozních informací sloužil šestimístný LED displej složený ze sedmisegmentovek.

Napájení zajišťovala čtveřice olověných gelových akumulátorů se jmenovitým napětím 6 V a kapacitou 4 Ah. Jedna dvojice sloužila pro napájení pohonů a druhá pro napájení řídící logiky. Robot celkem obsahoval sedm krokových motorů a stejnosměrný motor s enkodérem pro pojezd. Není zřejmé, zda měl robot také referenční snímače pro zjištění absolutní polohy krokových motorů, nebo zda se nalezení absolutní polohy zajistilo mechanickým dorazem.

Na závěr bych pro zajímavost rád uvedl několik příkladů použití robotu

HERO 1 popsaných v manuálu. Robot mohl například po setmění rozsvítit lampičku a v 11 hodin ohlásil: „Je 11 hodin, je čas jít do postele.“ Večer mohl hlídat daný prostor a v případě narušení přivolat pomoc. V neděli mohl sedět u televize s dětmi a pokud byla televize moc hlasitá, upozornil na to.

2.2 Výchozí stav



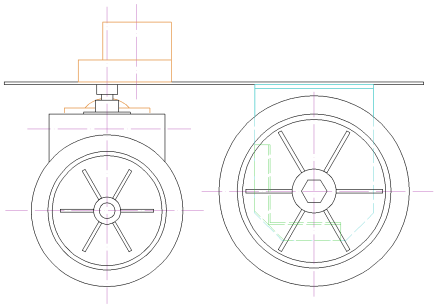
Obrázek 2.2: Výchozí podoba robotu HERO

Robot HERO, který je na katedře řízení FEL ČVUT, nezůstal v původní podobě. Vybavení robotu procházelo různými úpravami, které dělali studenti v rámci svých diplomových prací. Dokumentaci těchto změn jsme neměli k dispozici. Poslední úprava byla provedena roku 1992 v rámci diplomové práce Františka Vaňka a p. Páchy, dokumentace byla k dispozici. Podobu robota HERO před začátkem naší práce si můžete prohlédnout na obrázku 2.2. Některé konstrukční prvky a funkce nebyly dořešeny a práce na robotu se pozastavily.

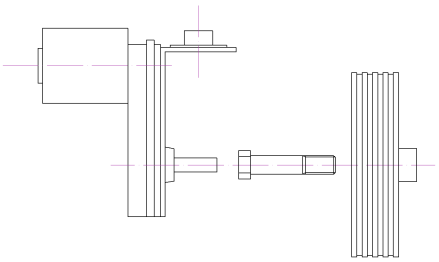
2.2.1 Mechanika robotu

Původní robot měl tří hlavní části: podvozek, tělo a otočnou hlavu. Je vidět na obrázku 2.1. Pod osmihrannou základovou deskou byl tříkolový podvozek, dvě zadní kolečka mají pevnou osu, přední je hnací a otočné. Mezi zadními koly byl prostor pro akumulátor. Základovou desku jsme zachovali, prostor pro akumulátor jsme zvětšili. Tím jsme též snížili těžiště robotu.

Uspořádání předního hnacího kola vidíme na obrázku 2.4. Uchycení kola bylo letmé na šroub, hřídel s kolem působila jako páka a namáhala na ohyb



Obrázek 2.3: Náčrtek podvozku



Obrázek 2.4: Uspořádání předního hnacího kola

plechový nosník. Uchycení jsme změnili na oboustranné. Otočný díl předního kola s motorem a převodovkou byl připevněn na hřídeli převodovky směrového natáčení předního kola. Ložiska měla malou vzdálenost, takže uložení mělo boční výkyvy a převodovka byla značně namáhána. Uložení jsme mechanicky přepracovali, celé uložení je teď robustnější, spodní ložisko je axiální, boční výkyvy jsou minimální. Otočná část byla původně vybavena mechanickými dorazy, které omezovaly pohyb do rozsahu 180 °, ty byly nahrazeny optickými závorami.

Na podvozku je umístěné tělo robotu tvořené čtyřmi stěnami. Zadní stěna je připevněna na pantech a dá se tedy otevírat, tím je umožněn přístup do vnitřku robota. Stěny jsou ideální místo pro připevňování elektronických obvodů, které jsou zvenku dobře přístupné a chlazené. Ve stěnách jsou otvory, kde byly konektory původních řídících desek. Tyto otvory lze využít k průchodu kabelů. Tělo jsme zachovali.

Hlava robotu je umístěna nad tělem. Tvoří ji osmihranná základová deska položená na kuličkové točně. Na základové desce je upevněna ruka. Otočná hlava je výborná možnost k umístění manipulátoru nebo senzorických zařízení jako jsou dálkoměry nebo kamera. Kuličková točna funguje bez problému, proto jsme otočnou hlavu zachovali

2.2.2 Pohony robotu

Přední hnací kolo bylo poháněno stejnosměrným komutátorovým motorem připojeným na převodovku. Pohon byl dostatečně silný a funkční, ale pro složitost zavedení zpětné vazby jsme ho nahradili výkonným elektricky komutovaným motorem. Směrové natáčení předního kola a otáčení hlavy robotu zajišťovaly dvoufázové krokové motory s vyvedeným středem. Tento typ krokových motorů je možné budit jak bipolárně, tak unipolárně. Motory byly rovněž připojené přes převodovku.

U krokových motorů chybí zpětná vazba a při řízení se musíme spoléhat na to, že motor neztrácí kroky. Zkoušeli jsme, jak funguje natáčení předního kola při zvětšeném odporu. Když stál robot na koberci, docházelo ke ztrátě kroků. Proto jsme motor pro natáčení nahradili výkonnějším elektricky komutovaným motorem. Znalost jeho polohy je velmi důležitá například pro odometrické zjišťování polohy robotu.

2.2.3 Elektronika robotu

Z původního vybavení zůstal na robotu ještě ultrazvukový měřič vzdálenosti a řečový syntezátor. Obě zařízení jsme odstranili. Ultrazvukový dálkoměr byl zbytečně velký. Dnes lze použít malé kompaktní moduly, a pro měření vzdálenosti je lepší využít optických senzorů nebo laserového skeneru. Zajímavé bylo, že ultrazvukový vysílač i přijímač byly umístěny v dlouhých trubkách, zřejmě pro lepší zaostření vyzařovací charakteristiky. Řečový syntezátor byl zamýšlený pro anglický jazyk a kvalitou řeči odpovídal možnostem z roku 1982. Pokud bychom chtěli vybavit robot hlasovým výstupem, je lepší využít nové technologie.

Na robotu došlo v minulosti k výměně řídícího počítače. Byla použita deska s procesorem INTEL 80C196 a podpůrnými obvody, označená TEMS-01. K této základní desce byla připojena deska určená zřejmě pro vstupy a výstupy. Deska obsahovala řadič přerušení, demultiplexory, střadače, klopné obvody a hradla. Robot byl také vybaven oddělením pro sériovou linku RS-232. Celý řídící počítač jsme odstranili, neboť chceme vybavit robota výkonnějším systémem.

Další nepůvodní součást byla silová část řízení motorů. Tato deska obsahovala Darlingtonovy tranzistory s ochrannými diodami, optokoplery a třístavové 8-bitové střadače, které sloužily pro řízení krokových motorů. Bylo k ní připojeno všech sedm krokových motorů. Dále deska obsahovala integrovaný H-můstek, ke kterému byl připojen stejnosměrný motor pro pojezd. Tuto desku jsme se rozhodli vyměnit, neboť k ní nebyla dostupná dokumentace, neumožňovala napájení krokových motorů přerušovaným proudem

(chopper) a všechny motory byly napájeny stejným napětím, ačkoliv některé byly na 5 V a některé na 12 V.

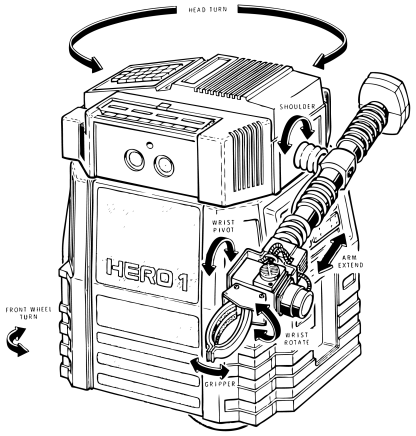
Na robotu bylo umístěno několik integrovaných obvodů MH3SS2. Jedná se o Hallovy sondy. Na několika součástech byly připevněny i magnety, na které měly tyto obvody reagovat. Někdo z našich předchůdců připravoval systém hledání absolutní pozice pro krokové motory. Tento systém ale nebyl v provozu, neboť Hallovy sondy nebyly nikam připojeny a na některých pohyblivých součástech vůbec chyběly.

Všechnu elektroniku, jak originální, tak přidanou v předchozích pracích, jsme odstranili.

2.2.4 Ruka

Ruka měla několik stupňů volnosti. Bylo možné sklápění ruky, vysouvání ruky, sklápění zápěstí a otáčení zápěstí. Na zápěstí bylo chapadlo, kterým šlo stisknout malé předměty. Sklápění celé ruky mělo velkou vůli a bylo řešeno podobně jako ostatní již zmíněné pohyby letmým uložením v převodovce, které je hodně namáháno. Vysouvání ruky zajišťovala plastová závitová tyč.

Sklápění zápěstí bylo poháněné motorem, na jehož hřídeli byl šestihran zapadající do plastového krytu zápěstí. Otáčení zápěstí bylo poháněné přes šnekový převod, který se během používání poškodil, byl ale ohnutý, takže se zasekával a motor s ním nemohl volně otáčet.



Obrázek 2.5: Původní pohyby robotu řízené krokovými motory

Všechny pohyby byly poháněné dvoufázovými krokovými motory, které měly vyvedený střed vinutí fáze. Některé z motorů byly na 12 V a jiné na

5 V. Motor pohánějící vysouvání ruky měl spálenou jednu polovinu vinutí. Tento motor natavil plastové pouzdro ruky ve své blízkosti, takže je možné, že byl provozován na jiném napětí než na jmenovitém. Stejně tak pohon stisku chapadla měl jednu polovinu vinutí spálenou.

Pokud bychom chtěli použít stávající mechaniku a pohony ruky, museli bychom obstarat nové ekvivalentní nebo podobné motory. Motor pohánějící stisk zapěstí je speciální, neboť jím prochází závitová tyč. Zkoušeli jsme ho sehnat, ale neuspěli jsme. Spálenou polovinu vinutí lze také eventuálně vyřešit bipolárním buzením motoru, kdy se využije jen polovina vinutí, která je v pořádku.

Pro smysluplnou práci s rukou je třeba krokové motory doplnit ještě referenčními spínači. Případně rovnou krokové motory vyměnit za jiné se zpětnou vazbou. Při výměně motorů by se ale musela upravit i mechanika ruky, v tom případě je výhodnější navrhnout rovnou celou ruku novou.

Kapitola 3

Koncepce

3.1 Úvod

Mobilní robot je takový robot, který se dokáže sám pohybovat v prostředí. Mobilní roboty lze dělit podle řady různých kritérií. Například podle určení na roboty sloužící, manipulační, inspekční, výzkumné, atd. Podle kinematického systému se roboty dají dělit na kolové, kráčející, létající, vodní, hybridní.

Podle toho, jak jsou roboty řízeny, se dají rozdělit na teleoperované, semi-teleoperované a autonomní. Teleoperované roboty jsou plně řízené na dálku člověkem, který má většinou zprostředkovaný vizuální kontakt s prostředím, v němž se robot nachází. Semi-teleoperované roboty dokáží některé řídící činnosti vykonávat sami a člověk jim zadává dálkově dílčí cíle. Autonomní robot plní samostatně cíl, který je mu člověkem zadán. Člověka může nahradit počítačový systém, kterým je robot na dálku řízen.

Všechny tyto vlastnosti určují konstrukci a vybavení robotu. Některé z nich jsou dané už tím, že nestavíme nový robot, ale rekonstruujeme jej a rozhodli jsme se některé původní prvky zachovat.

3.2 Mechanika

Z hlediska kinematiky zůstává robot kolový s Ackermanovým uspořádáním podvozku. Podvozek je konkrétně tříkolový s hnaným a otočným předním kolem. Vzhledem k provedení podvozku se může robot pohybovat pouze po rovné ploše. Z mechanické konstrukce zůstane zachované tělo robotu a také otočná hlava, na kterou je možné s výhodou umístit některé senzorické prvky a také manipulátor. Robot bude v budoucnu vybaven mechanickou rukou pro manipulaci s malými předměty.

3.3 Řízení

Systém řízení by měl být modulární, aby ho bylo možné snadno rozšiřovat a upravovat v rámci dalších prací na robotu. Z hlediska rozdělení úkolů jednotlivým fyzickým zařízením můžeme rozlišovat řídící systém centralizovaný a distribuovaný. Při požadavku modularity je třeba úkoly řídícího systému distribuovat více subsystémům. Tato koncepce splňuje také požadavek na bezpečnost provozu, neboť selhání jednoho subsystému nemusí nutně znamenat selhání celého řízení. Selhání nebo špatné chování subsystémů může být způsobené také probíhajícím vývojem v rámci práce na robotu. Je výhodnější, když lze izolovaně pracovat jen na částech systému.

Má-li být řídící systém modulární a zároveň snadno rozšiřitelný, musí jeho jednotlivé subsystémy komunikovat pomocí standardizovaných protokolů. Použití vlastního komunikačního protokolu znemožňuje snadné začlenění profesionálních zařízení, která podporují právě standardní protokoly. Vlastní komunikační protokoly většinou nemohou dosahovat úrovně standardních protokolů.

Pro propojení jednotlivých subsystémů je třeba zvolit sběrnici, která je dostatečně odolná proti rušení, je podporována profesionálními výrobky, jako jsou například řídící jednotky motorů nebo jednotky vstupů a výstupů, a zároveň je možné její jednoduché použití pro připojení vlastních zařízení. Těmto požadavkům dobře vyhovuje sběrnice CAN, proto jsme se rozhodli použít právě ji.

Zadání práce na robotu nepožadovalo autonomní chování robotu, ale počítalo s bezdrátovým připojením vzdáleného počítačového systému, který bude sofistikované řízení implementovat. Proto jsme chtěli řídící systém navrhnout tak, aby pracoval bez místního řídícího počítače, ale aby přesto existovala možnost jeho budoucího připojení. Koncepce tedy předpokládala postavit systém na mikrokontrolérech, které budou zastupovat jednotlivé subsystémy a budou propojeny pomocí sběrnice CAN společně s dalšími profesionálními zařízeními, které podporují toto rozhraní. Ke sběrnici by pak byl také připojen systém pro bezdrátovou komunikaci, který by zajišťoval spojení mezi vzdáleným počítačem a subsystémy robotu. Nakonec jsme se rozhodli řídící počítač na palubu robotu umístit.

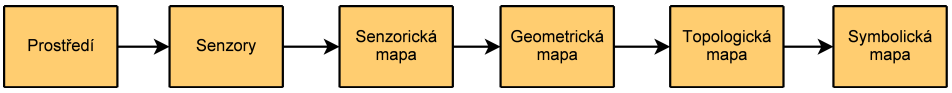
Robot je určen k výukovým účelům, hlavně pro vývoj sofistikovaného řízení. Měl by být schopen v budoucnu pracovat autonomně zároveň s možností úplného řízení na dálku. Aby mohl robot pracovat autonomně, musí jeho řídící systém vykonávat řadu činností, mezi které patří zpracování senzorických dat, udržování modelu okolního prostředí, lokalizace, plánování, generování trajektorie atd. Tyto činnosti kladou relativně vysoké požadavky na výkon řídícího systému. Je dále nutné, aby byl umožněn jednoduchý vý-

voj řídící aplikace. Požadavek vysokého výkonu a zároveň pohodlného vývoje dobře splňují malé počítače třídy PC. Pokud nebude řídící systém dostatečně výkonný pro autonomní chování, bude muset jeho úlohu částečně převzít vzdálený počítač.

Řídící počítač musí být vybaven bohatou sadou rozhraní, aby k němu bylo možné připojovat zařízení s rozmanitým způsobem připojení. Minimálně musí počítač disponovat sériovým rozhraním RS-232 a USB a také rozhraním pro připojení sběrnice CAN. U většiny malých počítačů PC je k dispozici rozhraní Ethernet. Toto rozhraní lze s výhodou použít pro připojení zařízení, která nevyžadují časově kritickou komunikaci a zároveň je možné rozhraní využít pro bezdrátové spojení se vzdáleným systémem pomocí technologie Wi-Fi.

Budou-li v některých subsystémech použity programovatelné mikrokontroléry, bylo by dobré, aby je nebylo nutné při programování vyjímat ze zařízení nebo připojovat speciální programátor, ale aby bylo možné program nahrát bez zásahu do systému, například z dálkově připojeného počítače. K tomu účelu se musí použít mikrokontroléry, které si mohou samy přepsat programovou paměť, takže je možné je vybavit programem *bootloader*, který umožní přepsání hlavního programu.

3.4 Sofistikované řízení



Obrázek 3.1: Diagram tvorby mapy prostředí

Autonomní chování robotu vyžaduje práci řídícího systému s mapou prostředí. Pomocí této mapy může robot plánovat cestu, vyhýbat se překážkám a také se lokalizovat. Mapa prostředí, pokud není dopředu známa, se vytváří a aktualizuje z okamžitých dat, které poskytují senzory o okolním prostředí. Data ze všech senzorů se shromažďují do senzorické mapy, která má formu mřížky obsazenosti. Jednotlivé buňky tedy nesou informaci, zda je prostor, který reprezentují, volný, nebo je v něm překážka. Elementární buňky mřížky musí být konvexní oblasti a většinou jsou to čtverce, případně krychle, jedná-li se o trojrozměrnou mapu. Tvorba takové mapy je snadná, avšak uložení mapy má vysoké paměťové nároky, obzvlášť jedná-li se o mapu rozsáhlého prostoru.

Proto se data ze senzorické mapy interpretují a vytváří se tzv. geometrická mapa. Jejími základními prvky jsou geometrické entity, často přímky

nebo křivky druhého řádu. Tato mapa je méně paměťově náročná než mapa senzorická, avšak extrakce geometrických entit z naměřených dat je poměrně náročná. Geometrickou mapu je možné dále interpretovat a vytvořit topologickou mapu. Tato mapa je grafovou reprezentací volných oblastí a jejich vzájemných vztahů. Je výhodná pro plánování cest, zvláště pokud se pracuje s rozsáhlou mapou. Nadstavbu topologické mapy tvoří mapa symbolická. Ta většinou obsahuje jména objektů a míst v mapě. Umožňuje robotu například porozumět slovním příkazům.

K plánování cesty lze využít známých algoritmů prohledávání stavového prostoru z umělé inteligence díky tomu, že jsou data o obsazení prostoru reprezentována grafem v topologické mapě. Pro nalezení cesty lze využít i jiných metod. Například vytvoření virtuálního potenciálového pole, ve kterém je robot přitahován cílem a může být zároveň odpuzován překážkami. Řízení pohybu robotu se skládá ze tří hlavních úloh. První je již zmíněné plánování cesty, jehož výsledkem jsou zlomové body, kterými musí robot projít. Výsledek zahrnuje vyhýbání se překážkám. Druhým úkolem je proložení těchto bodů trajektorií, po které se bude robot ve skutečnosti pohybovat. Řešení zahrnuje kinematické vlastnosti a omezení robotu. Poslední úkol je řízení robotu po této vygenerované trajektorii. K tomu účelu se dají použít speciální regulátory, které umí vygenerovat i přibližovací trajektorii pro nájezd robotu na naplánovanou trajektorii. Rozlišuje se mezi řízením, které stabilizuje robot v bodě, sleduje cestu nebo trajektorii.

3.5 Dálkové řízení

Pro dálkové řízení je nezbytné, aby byl robot vybaven systémem pro rádiový přenos dat. Musí být možné s robotem na dálku ručně pohybovat, například pomocí pákového ovladače řídit pojezd a natáčení, případně pohyby manipulátoru. Je třeba vzdáleně monitorovat provozní a chybové stavy jednotlivých subsystémů, stejně jako získávat informace snímané pomocí senzorů. Tyto informace mohou mít různou složitost, od velmi jednoduchých, které poskytují například snímače přiblížení, až po složité, které dává například laserový skener. Je také třeba umožnit ruční dálkové ovládání dalších systémů, jako například napájení.

Při dálkovém řízení pohybu robotu je nutný vizuální kontakt operátora s prostředím, ve kterém se robot nachází. Pokud nemá operátor přímý vizuální kontakt, musí mu být tento kontakt zprostředkován pomocí kamery a dálkového přenosu. Přenos videa je náročný hlavně na kapacitu přenosového kanálu. Podobně náročný může být přenos snímaných dat některých složitých senzorů.

Pro dálkové řízení je důležitá také možnost prohlédnout si aktuální mapu prostředí, kterou vytváří řídící systém. Užitečná je obecně možnost monitorovat stavy řídícího systému robotu, například předpokládanou polohu robotu, postup plánování dosažení cíle apod.

V zadání práce bylo požadováno použití komunikačního zařízení pracujícího s protokolem ZigBee. Jedná se o poměrně mladý systém sloužící především pro spolehlivý přenos stavových informací. Přenos se uskutečňuje malou rychlostí, a to 250 kbps. Tento standard se tedy nehodí pro přenos velkého množství dat. Zařízení pro komunikaci podle standardu ZigBee mají velmi malou spotřebu a mohou pracovat dlouhou dobu. ZigBee by mohlo být využíváno k přenosu řídících příkazů k pohybu. Robot by tak mohl být například ovládán pomocí přenosného řídícího panelu.

Robot musí být ještě vybaven zařízením pracujícím s protokolem umožňujícím větší datové toky. Nabízejí se standardy Wi-Fi a Bluetooth. Wi-Fi má větší přenosové rychlosti a také větší vzdálenost, na kterou je možné zařízení spojit. Proto chceme použít právě Wi-Fi.

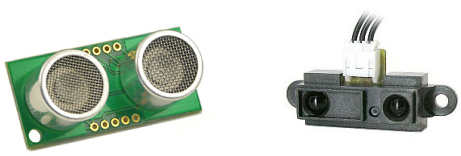
3.6 Senzory

Senzory poskytují data, ze kterých je možné určit polohu robotu. V našem případě, kdy se robot pohybuje ve dvourozměrném prostředí, jde o tři souřadnice, a to $[x, y, \phi]$. Data ze senzorů také slouží pro navigaci robotu, zabraňují tedy při pohybu v prostředí střetům s překážkami, které nejsou zaneseny v mapě prostředí. Z dat získaných ze senzorů se vytváří a také udržuje mapa prostředí, která systému přináší informaci o obsazení prostoru a umožňuje plánování cest.

Určení polohy je možné například za pomocí počítání ujeté trajektorie. Máme-li k dispozici matematický model robotu, můžeme z informací o otáčení koleček odvozovat polohu robotu. Ke snímání otáčení koleček je možné použít optické enkodéry, a to jak absolutní, tak relativní. Absolutní enkodéry jsou ale pro tento účel zbytečné a mají nižší rozlišitelnost než relativní enkodéry. Pro měření ujeté vzdálenosti lze použít měření rychlosti pohybu povrchu založené na principu Dopplerova jevu, kdy se měří frekvenční posun odražených vysílaných vln. Dále je možné využít optické korelační metody, která se používá například u optických myší. Výhoda této metody je vysoká frekvence snímání a nízká cena, nevýhoda je malá opakovatelnost měření.

Počítáme-li polohu z ujeté vzdálenosti, přesnost určení polohy závisí na správném určení směru pohybu. Při nesprávném určení směru se chyba polohy kumuluje s pohybem, proto by měl být robot vybaven také senzory pro určení směru. K tomu účelu lze použít například gyroskop. Mechanický gyro-

skop, který je velmi přesný, je drahý, proto by se v tomto případě použil spíše gyroskop využívající působení Coriolisovy síly na piezokrystal. Jiná možnost je využít magnetický kompas.



Obrázek 3.2: Senzory Deftech SRF05 a Sharp GP2D12

Robot musí mít možnost pohybu i v neznámém prostředí, tedy o němž nemá předem žádné informace. Aby se v těchto prostředích předešlo kolizím robotu s překážkami a aby bylo možné vytvořit mapu prostředí, musí být robot vybaven dálkoměrnými senzory. K měření vzdálenosti lze využít různé metody. SONAR vyhodnocuje vzdálenost z prodlevy mezi vyslanou a odraženou vlnou, většinou ultrazvukovou. Nevýhoda je, že rychlost zvuku ve vzduchu závisí na teplotě. Další nevýhodou je nemožnost zaostření vyzařovací charakteristiky, není tedy možné zabránit přeslechům. Některé materiály zvukové vlny pohlcují nebo odrážejí jiným směrem a nebudou tedy detekovány. Na obrázku 3.2 je vidět senzor Deftech SRF05.

Obrázek 3.3: Skener Sick LMS 200 a Hokuyo URG041X

Na stejném principu pracují také laserové dálkoměry, které rovněž vyhodnocují časovou prodlevu vyslaného a odraženého signálu, kterým je většinou paprsek infračerveného laseru. Metoda zjišťování prodlevy má označení TOF (Time-of-Flight). Tyto senzory nemají nevýhody SONARu. Vyrábějí se také jako dvourozměrné skenery, které soustavně proměřují vzdálenost objektů v kruhové výseči. Takové skenery vyrábí například firma Sick nebo Hokuyo a jsou na obrázku 3.3.

Velmi zajímavé by bylo vyzkoušet možnosti snímače PMD (Photo Mixer Device), který poskytuje informace o jasu a vzdálenosti ve dvourozměrné matici. Jedná se tedy o kameru poskytující navíc hloubkovou informaci. Tento senzor vyrábí například firma CSEM a má označení SwissRanger SR-3000. K zjištění vzdálenosti lze použít také optické senzory, které pracují na principu triangulace. Paprsek odražený od objektu dopadá na jiné místo snímače podle vzdálenosti snímače od objektu. Tyto senzory vyrábí firma Sharp, jeden z typů je na obrázku 3.2

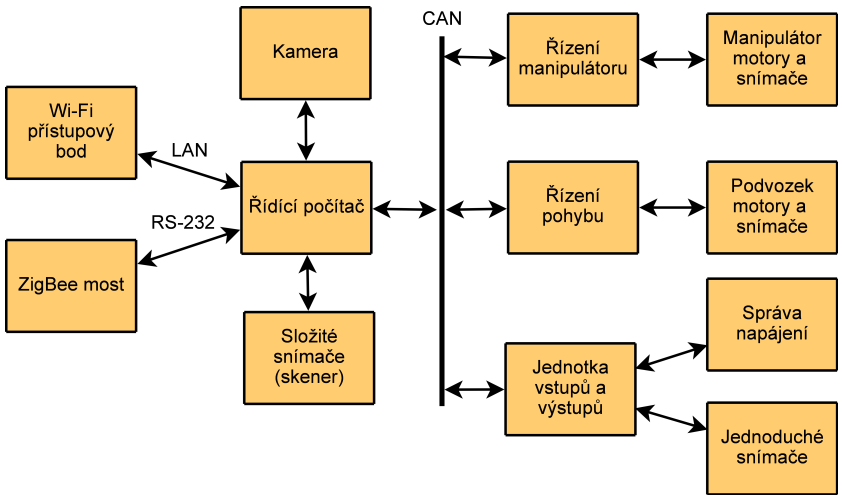
Robot musí být vybaven jednoduchým systémem předcházení kolizím, který bude nezávislý na zpracování dat ze složitých senzorů. Proto by měl disponovat sadou jednoduchých dálkoměrných senzorů, které pracují například na principu triangulace. Ty by byly umístěny na podvozku robota a měřily by vzdálenosti v různých směrech. Dále musí být robot schopen mapovat okolní prostředí, proto je třeba jej vybavit laserovým skenerem, případně snímačem PMD. Tyto senzory lze doplnit ještě ultrazvukovými senzory a data zpracovávat dohromady. Hloubkový obraz prostředí by bylo možné získat také ze dvou běžných kamer.

Pro lokalizaci musí být robot vybaven minimálně odometrickým zjišťováním polohy, které může být doplněno senzorem směru pohybu, například gyroskopem. V budoucnu lze polohu vyhodnocovat z dat, které poskytují senzory o okolním prostředí. Využití lokalizačního systému GPS není výhodné, protože se robot pohybuje ve vnitřních prostorech, kam signál systému neproniká. K lokalizaci by bylo možné použít odměřování vzdáleností od radiomajáků se známou polohou, nebo zjišťování směru, ze kterého signál přichází, poloha robotu se vypočte z těchto údajů.

Pro dálkové řízení operátorem musí robot disponovat kamerou snímající okolí. Tuto kameru by bylo výhodné umístit na otočnou hlavu robotu, aby bylo možné se kamerou rozhlížet.

3.7 Struktura řídícího systému

Strukturu řídícího systému si můžete prohlédnout na obrázku 3.4. Základním prvkem je řídící počítač, ke kterému jsou přímo připojena některá další zařízení. Počítač je připojen přes Ethernetové rozhraní k přístupovému bodu Wi-Fi, který slouží pro bezdrátové spojení se vzdáleným systémem. Přístupový bod Wi-Fi funguje zároveň jako rozbočovač sítě Ethernet a dovoluje připojení dalších zařízení k této síti. Kamera může být připojena pomocí sériového rozhraní USB, přes síť Ethernet, jedná-li se o kameru digitální, nebo, pokud se jedná o kameru analogovou, lze ji připojit k převodníku, který bude součástí řídícího počítače.



Obrázek 3.4: Blokové schéma řídícího systému robotu

Složité senzory, mezi které patří například laserový skener, se mohou připojit k řídícímu počítači podle rozhraní, kterým disponují, tedy pomocí RS-232, USB, Ethernet nebo CAN. Předpokládáme, že most pro komunikaci pomocí ZigBee se bude připojovat přes sériové rozhraní, druhá možnost je jeho připojení na sběrnici CAN.

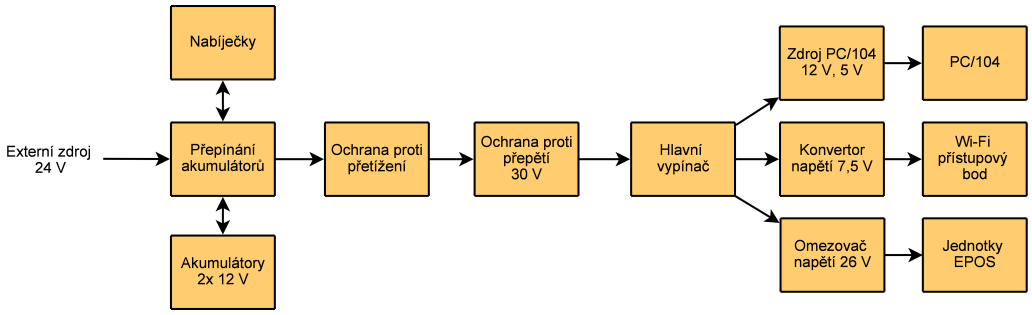
3.8 Úkoly realizované v této bakalářské práci

Na robotu jsme pracovali souběžně s Ondřejem Šantinem. Můj úkol byl realizovat mechanickou část, zdrojovou soustavu, pohony a základní řízení. Jeho úkol byl zaměřen na vyšší vrstvu řízení, softwarovou část a dálkové řízení. Během prací jsme se rozhodli vybavit robot vlastním řídícím počítačem, který bude zajišťovat sofistikované řízení a spojení se vzdáleným systémem. Robot nebude v rámci naší práce vybaven senzory pro snímání okolního prostředí.

Kapitola 4

Napájení

Součástí napájecího systému není jen samotný mobilní zdroj energie pro robot, ale také obvody nabíjení, přípojka externího zdroje, rozvod elektrické energie a měniče napětí pro spotřebiče, které vyžadují zvláštní napětí. Každé zařízení by mělo být odolné proti poruchám a chybám obsluhy, proto je třeba robot vybavit ochranou proti přepólování zdroje, přetížení zdroje a obvody je třeba chránit před přepětím.



Obrázek 4.1: Blokové schéma napájecího systému

4.1 Požadavky na zdroj elektrické energie

Napájecí systém, podobně jako celý robot, nemusí být odolný proti povětrnostním vlivům, neboť bude využíván hlavně ve vnitřních laboratorních podmínkách. Není třeba, aby byla baterie odolná vůči extrémním teplotám nebo velkým otřesům. Rovněž není důležitá hustota energie akumulátoru. Předpokládá se vnitřní laboratorní použití robotu. Robot bude jezdit po rovné zemi, takže nemusíme dodržet těsné limity pro hmotnost a velikost.

Důležitým faktorem je ale bezpečnost provozu a robustnost. Baterie by měly snést i nešetrné zacházení, jelikož se jedná o výukový robot.

Při volbě velikosti palubního napětí a také kapacity akumulátorů musíme vyjít z požadavků jednotlivých spotřebičů. Je dobré v této chvíli vzít v úvahu i spotřebiče, které sice nyní nejsou součástí robotu, ale robot by jimi mohl být vybaven ve své konečné podobě, tyto položky jsou uvedeny v tabulce s hvězdičkou. Jde například o laserový skener okolí, senzorický subsystém, případně pohony dalších pohyblivých částí. Důležité je vzít v úvahu spotřebiče, které mají velký odběr, jako je například právě zmíněný laserový skener.

spotřebič	**napětí**	**odběr**	
		typ	**max**
PC104	15 V–30 V	15 W	
Základní pohony	11–24 V		3 A
Wi-Fi	7,5 V	6,8 W	
Nabíječky	20 V–25 V	1,5 A	
Skener *	20,4 V–27,6 V	36 W	
Další pohony *	24 V		2 A
Senzory *	5 V		500 mA

Tabulka 4.1: Požadavky jednotlivých spotřebičů

V tabulce jsou uvedeny i nabíječky, které samozřejmě nejsou napájeny z akumulátorů, jejich spotřeba je však důležitá pro dimenzování externího zdroje. Maximální odběr proudu z akumulátorů by se v budoucnu mohl pohybovat okolo 8 A. V klidovém stavu by mohl být odběr asi 3 A. Od skutečnosti se tento odhad může lišit, ale je důležité mít představu o spotřebě pro volbu kapacity akumulátorů a také pro dimenzování rozvodu elektrické energie.

Jmenovitá kapacita akumulátorů je kompromisem mezi dobou, po kterou bude robot v provozu bez externího napájení, a hmotností akumulátoru a prostorem, který zabere. Robot by měl vydržet v provozu bez externího napájení 1–2 hod, například při testování nebo předvádění. Vhodná kapacita je tedy 8 Ah.

Většina spotřebičů, kterými je robot vybaven, má jmenovité napájecí napětí 24 V, a proto bylo zvoleno jako palubní napětí robotu. Napětí 24 V je běžně používané v průmyslových řídících systémech, a proto je řada zařízení vyrobena právě pro toto napětí. Napětí 24 V je rovněž ideální pro použité řídící jednotky EPOS, protože mohou využít větší část pracovní charakteristiky motoru než při nižším napětí. Pokud by se na robotu používaly 12V krokové motory, mohou být buzeny tímto napětím, které je řídícím obvodem rychle přerušováno, a lze tak dosáhnou vyšších otáček (*chopper*).

Spotřebiče, které mají napájecí napětí jiné než 24 V, lze napájet ze spínaného zdroje řídícího počítače PC104, který má výstup 5 V s maximálním proudem 15 A a výstup 12 V s maximálním proudem 1,7 A. Z tabulky 4.1 je vidět, že zařízení pro bezdrátovou komunikaci Wi-Fi potřebuje napájení napětím 7,5 V. Toto napětí můžeme získat stabilizací 12 V nebo 24 V.

4.2 Mobilní zdroj elektrické energie

Elektrickou energii je možné získat různými způsoby, ale některé, jako třeba přeměna sluneční nebo tepelné energie, se pro náš případ nehodí. V úvahu připadají elektrochemické články, které se dělí na několik typů.

Primární články – Jsou určeny pro jednorázové použití. Jsou v pevném obalu, plynotěsné a otřesuvzdorné. Chemickou reakcí přeměňují chemickou energii na elektrickou. Jmenovité napětí na článek je většinou 1,5 V a dnes používané typy jsou zinkochloridové články a alkalické články, které mají vyšší kapacitu.

Palivové články – Elektrochemicky aktivní palivo je kontinuálně přiváděno k elektrodám, kde dochází oxidací a redukcí paliva ke vzniku elektrického proudu. Elektrody jsou odděleny separátorem nebo elektrolytem. Při reakci nevzniká teplo, takže jsou články velmi účinné. Nejznámějším typem článku je kyslíko-vodíkový, kde je do článku přiváděn kyslík a vodík a produktem je elektrický proud a voda.

Sekundární články, akumulátory – Narozdíl od primárních článku mají schopnost nejen přeměňovat uloženou chemickou energii na elektrickou, ale i uchovat dodávanou elektrickou energii, tady je možné je nejen vybíjet, ale také nabíjet. Při nabíjení a vybíjení dochází ke změně chemického složení na povrchu elektrod. Články je možně dělit podle několika kritérii, například podle druhu elektrolytu nebo provedení (na otevřené a hermetické). Hermetické (plynotěsné) články neuvolňují žádný plyn ani kapalinu během provozu, jsou-li dodrženy předepsané parametry.

Jelikož robot není určen pro jednorázové použití, primární články se jako zdroj energie nehodí. Jejich použití by bylo neekonomické a také neekologické. Palivové články nejsou dnes ještě běžně dostupným a dobře známým systémem, jejich využití pro robot je tím tudíž omezeno. V budoucnu budou možná sloužit jako zdroj elektrické energie právě v mobilních zařízeních, protože mají příznivé vlastnosti. Pro mobilní robot je nejvýhodnější využít sekundárních článků, tedy akumulátorů.

Akumulátory mají řadu parametrů, jako například jmenovité napětí, jmenovitou kapacitu (uváděnou nejčastěji v Ah), životnost uvedenou časem nebo počtem normalizovaných nabíjecích cyklů. Dalšími důležitými parametry jsou maximální proud, který je baterie schopna dodat trvale a ve špičkách, s tím souvisí i velikost vnitřního odporu. Akumulátory je možné posuzovat také podle hustoty energie, tedy kapacity vztažené k objemu nebo hmotnosti. Tyto parametry se liší podle druhu akumulátoru. Abychom byli schopni vybrat vhodný druh a také jeho parametry, musíme stanovit požadavky na napájecí systém a porovnat je s vlastnostmi jednotlivých druhů akumulátorů.

4.3 Přehled systémů sekundárních článků

4.3.1 Nikl-kadmiové NiCd

Jako jediný typ baterií dobře pracují v širokém rozmezí teplot a snášejí také velké vybíjecí i nabíjecí proudy, jsou odolné proti otřesům a vibracím. Tyto vlastnosti je předurčují pro použití v náročných podmínkách. Jmenovité napětí na článek je 1,2 V. Při nabíjení je možné použít rychlonabíjení, většinou pulzním proudem, které tyto baterie dobře snášejí. Jejich nevýhodou je menší měrná energie a také tzv. paměťový efekt. Při opakujícím se nabíjení neúplně vybité baterie dochází uvnitř k růstu krystalů, které nepříznivě ovlivňují kapacitu. Při vybíjení má baterie téměř konstantní napětí a na konci vybíjení napětí prudce poklesne. Tato vlastnost může být pro některé aplikace výhodná, ale neumožňuje určit z napětí zbývající kapacitu baterie. Kadmium, které baterie obsahují, je klasifikováno jako látka škodlivá pro životní prostředí. Mají relativně velké samovybíjení

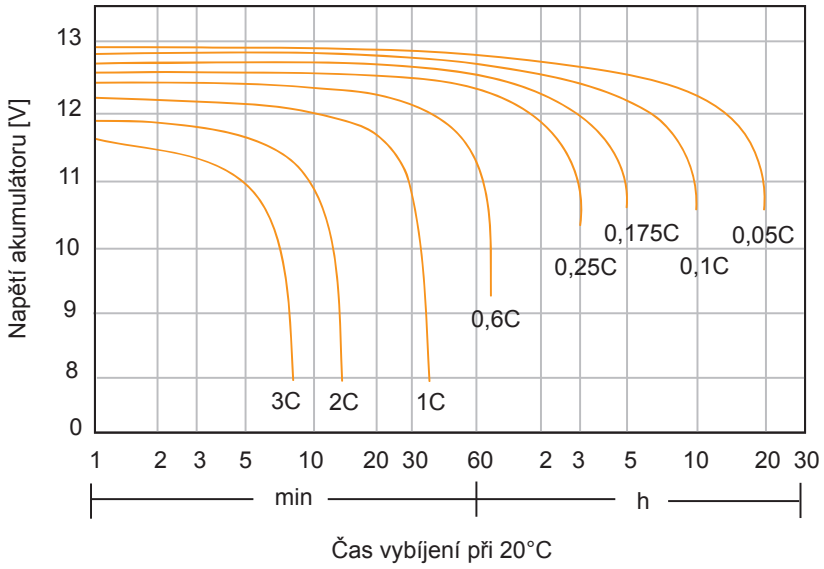
4.3.2 Nikl-metalhydridové NiMH

Oproti NiCd bateriím nejsou zátěží pro životní prostředí, poskytují vyšší měrnou hustotu energie až o 40 % a nemají paměťový efekt. Na druhou stranu jsou ale dražší, mají větší samovybíjení a také větší vnitřní odpor, což neumožňuje z baterie odebírat velké proudy a ani ji rychle nabíjet. Velké zátěžové proudy jim zkracují životnost a pro nabíjení potřebují speciální systém, zahřívají se a musí se nabíjet déle. Jmenovité napětí na článek je 1,2 V.

4.3.3 Olověné LA

Dělí se na dvě skupiny. První jsou malé hermetické olověné akumulátory, označované jako SLA, které jsou také známe jako gelové. Hermetické jsou jen za předpokladu dodržení provozních podmínek. Všechny plyny jsou během provozu absorbovány. Tento typ akumulátoru nevyžaduje žádnou údržbu. Gelové akumulátory je možné používat v jakékoliv poloze. Obal je odolný proti rázům i vibracím. Druhou skupinu tvoří velké ventilem řízené olověné akumulátory označované VRLA. Olověné akumulátory jsou výhodné pro aplikace, kde rozměr a váha nehraje roli, a to především pro svoji velmi nízkou cenu. Vyžadují poměrně dlouhé nabíjení 8–16 h.

Olověné akumulátory netrpí samovybíjením a nemají sklon k paměťovému efektu. Mohou dodávat velké proudy i 10 C (o velikosti odpovídající desetinásobku kapacity), ale kapacita akumulátoru je pak menší než jmenovitá, jak můžeme vidět na obrázku 4.2. Hluboké vybíjení jim snižuje kapacitu, proto je dobré používat akumulátory s větší jmenovitou kapacitou. Při hlubokém vybití malým proudem hrozí nevratné poškození akumulátoru, je tedy nutné sledovat napětí a včas odpojit zátěž. Jmenovitá kapacita platí většinou pro vybíjení proudem 0,1 C po dobu 10 h.



Obrázek 4.2: Vybíjecí charakteristiky olověného akumulátoru

4.3.4 Lithium-iontové Li-ion

Jedná se o nový typ článků, který se rychle vyvíjí. Stále se zlepšují jejich parametry a snižuje cena. Vynikají vysokou hustotou energie, tedy nízkou hmotností a rozměry. Další výhodné vlastnosti jsou vysoké jmenovité napětí na článek (3,6 V), nízké samovybíjení a nezávadnost pro životní prostředí. Nemají paměťový efekt. Při vybíjení článek mění napětí v rozsahu 4,2 V– 3 V, lze tedy dobře indikovat aktuální kapacitu. Nevýhodou je velký vnitřní odpor, který omezuje velikost nabíjecích i vybíjecích proudů. Tyto články zatím nemají dlouhou životnost a mají sklon ke stárnutí. Aplikace tohoto typu baterií vyžaduje ochranné obvody pro nabíjení i vybíjení, neboť při překročení napěťových hranic hrozí nevratné zničení článku.

4.3.5 Lithium-polymerové Li-pol

Jsou nejmodernějším systémem baterií. Jejich výhodou je velice malý profil, mohou mít velikost například kreditní karty. Mají podobné vlastnosti jako baterie Li-ion. Mají menší hmotnost, jsou bezpečnější a odolnější proti přebití, ale mají menší měrnou hustotu energie a jsou dražší. Jejich hlavní výhodou je, že se oproti NiCd a NiMH článkům, které se mohou spojit jen do série, dají zapojovat i paralelně. Lze tedy zvýšit celkovou kapacitu a maximální proud, který baterie může dodat. Podmínkou ke spojení je stejné napětí článků. Články musí být stejného typu, nejlépe z jedné série.

Při provozu se napětí článků zapojených sériově nebo paralelně rozchází a je třeba ho vyrovnávat, při nabíjení se musí použít nabíječka kontrolující každý článek jednotlivě, omezovač nebo vyrovnávač (balancer). Baterie mají tzv. servisní konektor, který umožňuje nabíjení každého článku zvlášť. Omezovač při překročení dovoleného napětí článku mění proud na teplo, vyrovnávač se snaží během celého nabíjení vyrovnat napětí všech článků, ale nezabrání jejich přebití.

Ačkoliv jsou tyto baterie za běžného provozu zcela bezpečné, jestliže se článek přehřeje tak, že teplota uvnitř překročí 150 °C, dojde k nastartování exotermní reakce, která pokračuje samovolně, což může vést k explozi článku a požáru. Vystříknutá náplň článku se na vzduchu sama vznítí, takže je potřeba si dávat pozor i na mechanické poškození obalu článku. Je nutné zabránit přebití baterie (hranice 4,2 V) a jejímu přetížení, např. zkratem. Nabíjecí proud je třeba dodržet maximálně o velikosti 1C. Vybití baterie pod 2,5 V znamená její nevratné zničení, v praxi se dodržuje hranice 3 V. Z hlediska životnosti je výhodné baterii zcela nenabíjet a nevybíjet. Snížení napětí o 0,1 V znamená zmenšení kapacity o 10 %.

4.3.6 Výběr druhu akumulátoru

Jako vhodné systémy sekundárních článku se jeví olověné gelové akumulátory a lithium-polymerové. Olověné akumulátory jsou výhodné pro svoji příznivou cenu, dobře známe chování a robustnost. Jejich hlavní nevýhodou je nízká energetická hustota, takže jsou velké a těžké, což v našem případě není tak důležité, neboť robot jezdí po hladké podložce a nemusí překonávat překážky. Lithium-polymerové akumulátory jsou vynikající pro napájení mobilních zařízení pro svoji vysokou energetickou hustotu. Jejich nevýhoda je vysoká cena a také vysoké nároky na obsluhu a provoz. Lithium-polymerové baterie vyžadují nabíjení pomocí inteligentních nabíječek, které dokážou vyrovnávat jednotlivé články a při provozu se musí včas odpojit od zátěže. Při nesprávné manipulaci hrozí nebezpečí požáru. Informace o jejich životnosti se rozcházejí.

systém	**napětí**	**kapacita**	**hmotnost**	**rozměry**	**cena**
olověný	12 V	8 Ah	2,7 kg	151x65x94 mm	430,- Kč
Li-pol	11,1 V	8 Ah	0,5 kg	23x58x165 mm	3.280,- Kč
NiCd	12 V	7 Ah	10× 0,23 kg	10× 33x90mm	4.600,- Kč
NiMH	12 V	8,5 Ah	10× 0,16 kg	10× 33x62mm	4.100,- Kč

Tabulka 4.2: Parametry akumulátorů

Z tabulky 4.2 je vidět, že olověný akumulátor je asi čtyřikrát větší než Li-pol podobných parametrů a více než pětkrát těžší. Tyto pro Li-pol velmi příznivé vlastnosti vyvažuje jeho cena, která je oproti olověnému akumulátoru téměř osmkrát větší. Dvě Li-pol baterie by se daly umístit do prostoru mezi zadními koly robotu. Napětí na baterii Li-pol by se v provozu pohybovalo v závislosti na aktuální kapacitě od 18 V–25,2 V. Takže pokud by některé zařízení bylo citlivé na nízké napětí, mohlo by přestat pracovat správně nebo by se nevyužívala celková kapacita baterie.

Pro provoz Li-pol akumulátorů se mi podařilo najít tyto výrobky:

- nabíječka TANK 4 umožňuje nabíjení až 4 článků Li-pol a každý je dobíjen a kontrolován zvlášť, nabíjecí proud je možné nastavit a napětí každého článku je zobrazeno na displeji. Cena 2.500,- http://www.bel-shop.eu/

- nabíječka SUPERMATE 4 rovněž umožňuje nabíjení až 4 článků Li-pol a obsahuje vyrovnávač, stav dobíjení každého článku je indikován LED. Cena 1.480,- http://www.montymodel.com/

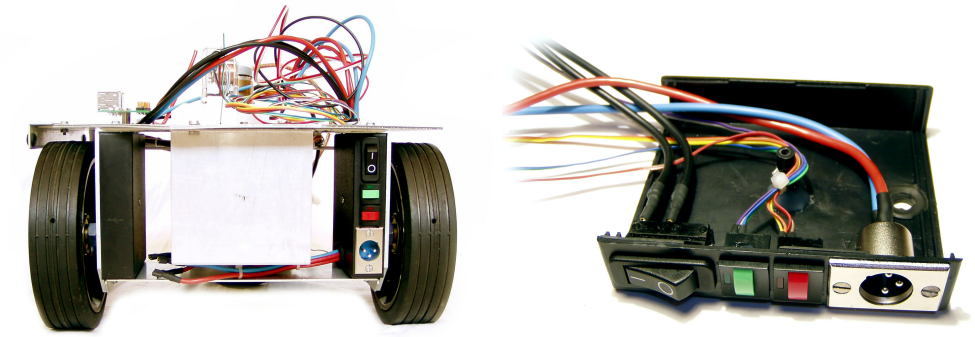
- vyrovnávač Hyperion LBA10 pracuje až s 6ti články a použil by se spolu s nabíječkou, která nekontroluje každý článek zvlášť. Cena 1.100,- http://www.reichard.cz/

Kvůli vysoké ceně, vysokým nárokům na provoz Li-pol akumulátoru a faktu, že se nemusíme snažit o minimální rozměry a váhu, jsme se rozhodli pro olověný akumulátor.

4.4 Externí napájení

Při experimentování s robotem nebude vždy zapotřebí, aby byl napájen z akumulátorů. Při ladění programů a testování řídících obvodů často stačí, aby byl robot na místě nebo se pohyboval jen v malém prostoru. Proto by robot měl mít možnost připojení k externímu zdroji elektrické energie, aby se v takových situacích zbytečně nevybíjely akumulátory. Akumulátory by měly být v takových situacích dobíjeny.

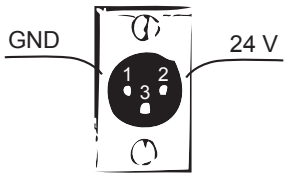
Je výhodné, aby měl tento zdroj výstupní napětí shodné s velikostí palubního napětí robotu, tedy 24 V, abychom se vyhnuli převodům napětí. Zdroj by mohl být přímo součástí robotu, což by umožňovalo robota kdekoliv připojit k síťovému napětí, ale zbytečně by tento zdroj zabíral prostor a zvyšoval hmotnost robotu. Zdroj musí být schopný dodat dostatečný proud pro provoz systémů robotu a dobíjení akumulátorů.



Obrázek 4.3: Panel pro připojení zdroje a ovládání napájení

Externí zdroj se připojuje pomocí napájecího kabelu a konektoru, který je umístěn na panelu ve spodní zadní části robotu. Panel byl vyroben v rámci této práce a je vidět na obrázku 4.3. Pro připojení napájení jsem zvolil konektor Canon XLR, se kterým se dobře manipuluje a který je stavěn na velké proudy (až 16 A). Význam jednotlivých pinů je ukázán na obrázku 4.4. Zdroj

pracuje paralelně s akumulátory, takže na pinech je napětí baterií. Je třeba dbát opatrnosti při připojování zdroje, aby nedošlo ke zkratu nebo zničení zdroje. Elektronika některých stabilizovaných zdrojů může být zničena zpětným proudem (připojení napětí k vypnutému zrdoji). Tato nevýhoda by šla odstranit, pokud by se do obvodu za napájecí konektor vřadilo relé, které by sepnulo až po zapnutí zdroje.



Obrázek 4.4: Zapojení konektoru

Panel kromě konektoru pro připojení externího napájení obsahuje také hlavní vypínač, kterým se zapnou řídící systémy, tedy počítač PC104, přístupový bod Wi-Fi a řídící jednotky EPOS. Hlavní vypínač nepřeruší napájení pro obvod řízení nabíjení, aby bylo možno nabíječky zapnout a zbytek systému nechat vypnutý. Tento obvod musí být vybaven samostatným vypínačem napájení, aby ho šlo vypnout, pokud nebude robot delší dobu používán. Jinak by mohl hluboce vybít akumulátor a tím ho poškodit, jak bylo uvedeno v sekci o olověných akumulátorech. Nebo nesmí obvod odebírat v klidu žádný proud.

Na panelu jsou také tlačítka, která ovládají obvod, spínající napájení nabíječkám. Pokud by se v budoucnu systém nabíjení řešil jinak, lze je využít k jinému účelu. Popis významu jednotlivých žil, které vedou k tlačítkům, je uveden v tabulce 4.3. Jak je vidět na obrázku 4.3, robot má připravenou ještě jednu podobnou krabičku na druhé straně podvozku, která může být využita v budoucnu, otvor na kabely v těle robotu je již připravený.

signál	**barva žíly**	
	červené tlačítko	**zelené tlačítko**
spínač	hnědá	modrá
spínač	červená	zelená
LED A	oranžová	fialová
LED K	žlutá	šedá

Tabulka 4.3: Významy jednotlivých žil připojení spodního panelu

4.5 Nabíjení akumulátorů

Olověné akumulátory lze nabíjet konstantním napětím nebo konstantním proudem. Při nabíjení konstantním proudem je třeba znát hloubku vybití, nebo měřit napětí či oteplení akumulátoru. Velikost proudu se volí desetina kapacity. Nabíjení menším proudem než desetina kapacity je pomalejší, ale k baterii šetrnější. Doporučovaný způsob nabíjení je nabíjení konstantním napětím, protože není třeba znát hloubku vybití. Velikost tohoto napětí se volí podle toho, jestli akumulátor pracuje v cyklickém nebo nepřetržitém (stand-by) režimu. Je potřeba zabránit tomu, aby při hlubokém vybití do baterie tekl velký proud, proto je nejlepší zkombinovat oba způsoby nabíjení.

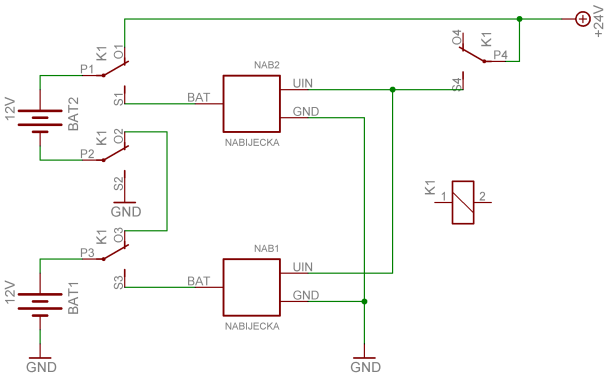
Jsou dvě varianty kam nabíječku umístit.

- Nabíječka může být umístěna mimo robot. Pak se musí buď akumulátory z robotu vyjmout a připojit k nabíječce, nebo se nabíječka musí připojovat zvláštním kabelem k robotu. Vyjímání akumulátorů znamená složitější manipulaci s robotem a je to nepohodlné pro uživatele. Externí nabíječka je zbytečné další zařízení potřebné k provozu robotu. Je pravděpodobné, že nabíjení by v tomto případě obsluha odkládala nebo na něj zapomínala.

- Druhá možnost je umístit nabíječku na robot, tím odpadá starost s externí nabíječkou. Není nutné akumulátory vyjímat ani připojovat robot zvláštním kabelem k nabíječce. K nabíjení by se využil externí zdroj. Nevýhoda tohoto řešení je, že nabíječky zabírají místo na robotu a zvětšují jeho celkovou hmotnost, ale komfort a jednoduchost obsluhy jsou v této aplikaci důležitější.

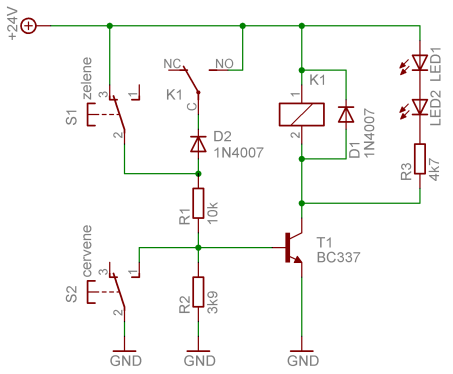
4.5.1 Přepínání akumulátorů k nabíječkám a k síti

Akumulátory by měly být při nabíjení odpojeny od palubního rozvodu napětí, protože při nabíjení obou akumulátorů může jejich společné napětí dosáhnout i 30 V a pro některé spotřebiče je to za hranicí maximálního napájecího napětí. Odpojení je také výhodné, protože se akumulátory zbytečně nevybíjejí, zatímco je robot napájen z externího zdroje. Z externího zdroje není možné nabíjet oba akumulátory v sérii, neboť na to je třeba vyšší napětí než 24 V. Při nabíjení je tedy třeba nabíjet každý akumulátor zvlášť nebo by se musel na robot umístit ještě konvertor napětí. Přepínání akumulátoru pomocí relé ukazuje obrázek 4.5. Jsou-li kontakty v klidovém stavu, pak jsou akumulátory připojeny k palubní síti, pokud relé přitáhne, relé odpojí akumulátory od palubní sítě, odpojí propojku seriového zapojení a připojí akumulátory k nabíječkám.



Obrázek 4.5: Přepínání akumulátorů pro nabíjení

Relé může být ovládáno přímo řídícím systémem robotu, ale ten pak musí být vždy zapnutý při nabíjení. Druhá možnost je postavit pro toto ovládání samostatný obvod, který by nebyl závislý na řídícím systému. Jednalo by se o jednoduchý klopný obvod, který by mohl být ovládán jak řídícím systémem tak tlačítky na panelu. Pokud by byl tento obvod postavený na technologii CMOS, mohl by díky minimálnímu odběru zůstávat připojen k baterii i při vypnutém hlavním vypínači robotu, aby šlo nabíjení zapnout i při vypnutém robotu.



Obrázek 4.6: Obvod pro řízení přepínání akumulátorů

Na obrázku 4.6 je schéma obvodu řídícího přepínání baterií. Jedná se o jednoduchý klopný obvod. Po stisku tlačítka S1 se otevře tranzistor T1 a relé K1 přitáhne. Kontakt relé pak drží tranzistor otevřený. Protože tento kontakt je zároveň používán ke spínání napájecího napětí nabíječkám, dioda D2 brání průchodu proudu přes tlačítko do nabíječek. Relé vypne po stisku tlačítka S2. Sepnutí nabíjení indikují dvě zelené LED. Jedna je umístěna

u spínacího tlačítka a druhá na univerzálním plošném spoji na přední stěně robota, kde je také obvod postaven. Obvod v klidu neodebírá žádný proud, takže se nemusí odpojovat od nabíjení.

Nabíjení musí zapnout obsluha poté, co připojí externí zdroj. Připojení zdroje by též šlo detekovat a nabíjení spustit automaticky. Detekce by byla jednoduchá hlavně v případě, že by se externí zdroj oddělil pomocí relé, jak bylo zmíněné v sekci o externím napájení. Jiná možnost je využít třetí pin u konektoru XLR externího napájení právě k detekci připojení napájení. Vypnutí napájení by stejně tak měla provést obsluha před odpojením externího zdroje. Pokud by tak neučinila, bude robot chvíli bez proudu, než relé odpadne a připojí akumulátory k palubnímu rozvodu napájení. Tlačítko T1 bude připojeno právě ke třetímu pinu, aby nebylo možné zapnout nabíjení, když není připojen externí zdroj, tím by totiž došlo k chvilkovému výpadku napájení.

Jako relé je použito relé Relpol R15 s 4 přepínacími kontakty. Cívka je na 24 V a kontakty mají maximální proud 10 A. Jeho spotřeba je 1,5 W.

4.5.2 Výběr nabíječky

Hotovou nabíječku 12V olověných gelových akumulátorů, která je napájena z 24 V jsme na našem trhu nenalezli. Existuje pouze široká nabídka nabíječek, které se připojují k síťovým 230 V. Pro řešení řízení nabíjení jsme se rozhodovali mezi těmito možnostmi:

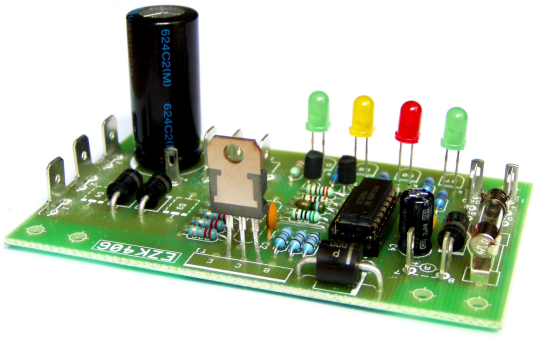
- Integrovaný obvod UC3906 od firmy Texas Instruments. Tento obvod řídí celý proces nabíjení, na počátku procesu reguluje proud, dále napětí a nakonec převede akumulátor do udržovacího režimu. Má možnost signalizace stavu. Je u nás běžně dostupný a existují pro něj navržené obvody i stavebnice. Jeho nevýhodou je, že regulační tranzistor pracuje v lineárním režimu, takže je na něm veliká výkonová ztráta.

- Integrovaný obvod BQ2031 od firmy Texas Instruments. Podobně jako předchozí, i tento obvod řídí celý proces nabíjení. Dovoluje zvolit mezi několika druhy nabíjení (dvoustupňové napětí, dvoustupňový proud, pulzní proud), také je možné zvolit mezi různými podmínkami ukončení nabíjení (maximální napětí, druhá derivace napětí, minimální proud, maximální čas). Obvod před začátkem nabíjení testuje baterku, zda nemá vadné články a během celého nabíjení kontroluje napětí a teplotu akumulátoru. Největší výhodou je, že reguluje pomocí pulzně-šířkové modulace. Nevýhodou je, že u nás není dostupný.

- Poslední možnost je použít napěťový konvertor, který má nastavitelné jak napětí, tak proud. Existují konvertory, které mohou mít vstupní napětí právě 24 V. Tyto konvertory by se pro nabíjení měly doplnit ještě obvodem, který by je odpojil po dokončení nabíjení nebo by odpojení mohl zajistit řídící systém robotu. Pak by ale musel být zapnutý i v průběhu nabíjení.

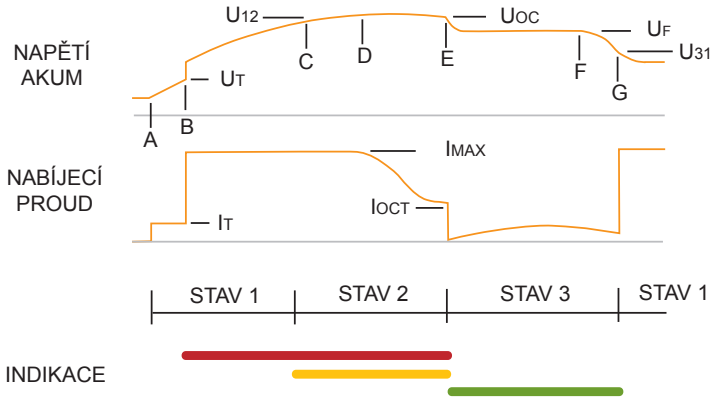
Ideální se zdá druhá možnost, tedy využít obvod BQ2031. Ačkoliv není tento obvod u nás běžně k dostání, lze ho získat jako vzorek přímo od výrobce. Aplikace tohoto obvodu by vyžadovala návrh výkonové části spínaného zdroje, který vyžaduje více zkušeností. Výrobce nabízí také vývojové kity s tímto obvodem označené DV2031S1 a DV2031S2. Tyto byly v době řešení vyprodány. Na internetových stránkách Texas Instrument jsme nalezli schémata těchto kitů, ale museli bychom najít ekvivalenty nedostupných součástek a navrhnout desku plošných spojů. Vzhledem k tomu, že se jedná o složité zapojení, vývoj nabíječky by mohl trvat dlouho. Proto jsme tuto možnost opustili, i když by byla velice elegantní a do budoucna je to jedna z možností na vylepšení robotu.

4.5.3 Funkce nabíječky s obvodem UC3906



Obrázek 4.7: Originální stavebnice nabíječky s UC3906

Jako řídící obvod nabíjení jsme zvolili UC3906. Navrhnout silovou a měřicí část zapojení nabíječky s tímto obvodem není složité. Vše je podrobně popsáno v aplikační poznámce k tomuto obvodu. Protože jsme chtěli uspořit čas, rozhodli jsme se použít stavebnici nabíječky olověných akumulátorů NBX3906 od firmy EZK (www.ezk.cz), která používá právě tento obvod. Stavebnice je vidět na obrázku 4.7.



Obrázek 4.8: Průběh nabíjení

Po připojení akumulátoru k nabíječce a také připojení napájení začíná proces nabíjení, který ukazuje obrázek 4.8. Přítomnost napájení je indikována svitem zelené LED. Proces nabíjení prochází postupně třemi stavy.

stav 1 – Pokud je napětí akumulátoru nižší než $U_T = 11,6\,\mathrm{V}$, pak je šetrně dobíjen proudem asi $I_T = 30\,\mathrm{mA}$, aby došlo k jeho oživení. Jakmile je napětí vyšší, začíná nabíjení konstantním proudem $I_{MAX} = 750\,\mathrm{mA}$, toto je indikováno červenou LED. Když napětí vzroste na hodnotu $U_{12} = 14,1\,\mathrm{V}$ přechází nabíječka do stavu 2.

stav 2 – Tento stav se nazývá přebíjení a je indikován svitem žluté LED společně s červenou. Akumulátor je dále dobíjen proudem I_{MAX}, ale po dosažení napětí $u_{OC} = 14,9\,\mathrm{V}$, proud postupně klesá až na hodnotu $I_{OCT} = 75\,\mathrm{mA}$, tedy nabíječka pracuje v režimu konstantního napětí.

stav 3 – Udržovací režim je indikován svitem zelené LED. Akumulátor je malým proudem udržován na napětí $U_F = 13,8\,\mathrm{V}$. Pokud napětí klesne pod hodnotu $U_{31} = 12,4\,\mathrm{V}$, například kvůli zatížení, nabíječka přechází zpátky do stavu 1.

Přímo na desce plošných spojů jsou propojeny body 4 a 5, které nahrazují přepínač volící velikost maximálního nabíjecího proudu a body 7 a 8, mezi které lze jinak připojit ampérmetr indikující nabíjecí proud. Filtrační kondenzátor C1 je možné zmenšit, je připraven pro napájení střídavým proudem, ale v našem případě je nabíječka napájena stejnosměrným proudem, takže není kondenzátor třeba.

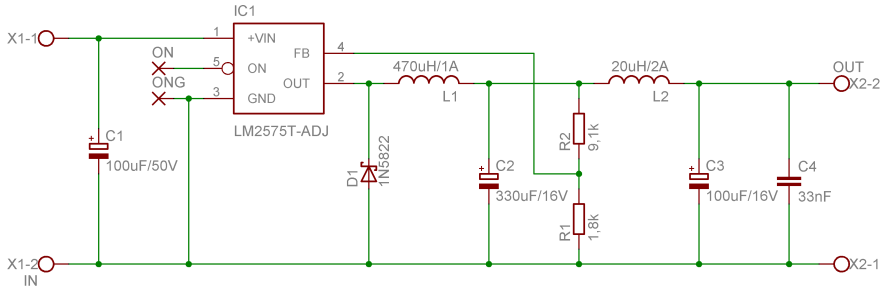
4.6 Napájení přístupového bodu Wi-Fi

Jak již bylo zmíněno v požadavcích na napájecí systém, zařízení Wi-Fi potřebuje pro svoji činnost napětí 7,5 V, které není nikde přímo dosažitelné. Musíme ho získat stabilizací z vyššího napětí, které dostupné je, tedy z 24 V nebo z 12 V. Z hlediska spolehlivosti je lepší použít přímo palubních 24 V a nebýt závislý ještě na zdroji počítače PC104, který by zmíněných 12 V poskytoval. Originální síťový napáječ tohoto zařízení poskytoval až 0,9 A, takže i stabilizátor by měl být navržen pro tuto hodnotu proudu.

Stabilizace napětí může probíhat dvěma způsoby podle režimu, ve kterém pracuje regulační prvek stabilizátoru, tedy v lineárním nebo pulzním (spínaném). V lineárních stabilizátorech se rozdíl napětí přeměňuje v teplo, nejsou tedy tolik výhodné pro velké proudy nebo velké rozdíly napětí, kdy dochází k velkým výkonovým ztrátám a jsou potřeba velké chladiče. Spolu s mařením výkonu samozřejmě klesá účinnost stabilizátoru.

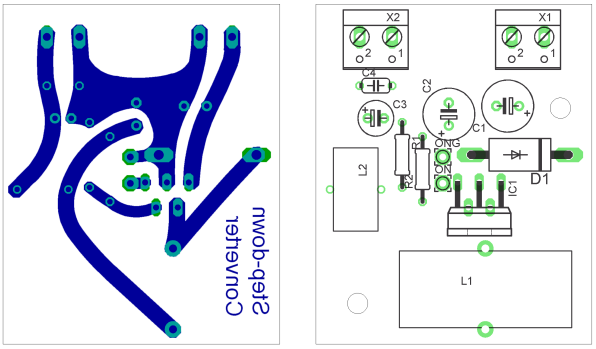
Nevýhodu výkonových ztrát odstraňují spínané stabilizátory. Ty využívají akumulační prvky a rychlé spínání vstupního napětí, kterým se akumulační prvek napájí, čímž dosahují změny velikosti výstupního napětí. Spínání je řízeno zpětnou vazbou. Obecně lze tímto způsobem napětí i zvyšovat, proto spínané stabilizátory snižující napětí mají označení *step-down*. Protože regulační prvek pracuje ve spínacím režimu, nedochází na něm k tepelným ztrátám. Spínané stabilizátory více ruší okolí vysokými frekvencemi.

Na trhu jsou dostupné obvody, které integrují spínací i řídící část těchto stabilizátorů a potřebují tedy minimum dalších součástek. Vybral jsem obvod LM2575, který se vyrábí ve verzi jak pro pevná tak nastavitelná napětí a je u nás běžně dostupný, není drahý a má dostatečný proud. Žádná z verzí pro pevné napětí nemá výstupní napětí 7,5 V. Proto je třeba použít obvod s nastavitelným napětím LM2575-ADJ. Jeho maximální proud je 1 A a maximální vstupní napětí 45 V, pracuje na frekvenci 52 kHz. Ostatní údaje lze najít v katalogovém listu tohoto integrovaného obvodu.



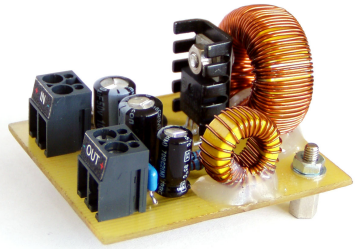
Obrázek 4.9: Schéma spínaného stabilizátoru pro Wi-Fi

Schéma celého stabilizátoru je na obrázku 4.9. Zapojení vychází z aplikační poznámky v katalogovém listu. Kondenzátor C1 zabraňuje, aby se na výstupu objevovalo přechodně vysoké napětí a musí být umístěn blízko IO. Přes Schottkyho diodu D1 teče proud do zátěže při vypnutém proudu ze vstupu. Cívka L1 funguje jako proudový akumulátor, musí mít takovou indukčnost, aby stačila pokrýt dodávku proudu, zatímco je vypnutý proud ze vstupu. Kondenzátor C2 filtruje výstup a umožňuje stabilizaci zpětnou vazbou. Pilový průběh proudu cívky L1 způsobuje zvlnění napětí, které je filtrováno LC filtrem složeného z kondenzátoru C3 a cívky L2. Napěťové špičky způsobené spínáním se pohlcují kondenzátorem C4. Rezistory R1 a R2 fungují jako dělič pro zpětnou vazbu. IO má aktivační vstup, po připojení na zem je IO aktivní. Tento vstup je možné použít pro elektronické vypínání Wi-Fi.



Obrázek 4.10: Deska plošných spojů spínaného stabilizátoru

Hodnoty všech součástek jsem určil podle doporučení v aplikační poznámce integrovaného obvodu. Výstupní napětí stabilizátoru je 7,5 V, maximální proud 1 A a maximální vstupní napětí 27 V. Při návrhu desky plošných spojů jsem se snažil udržet minimální vzdálenost zemí kondenzátorů C1, C2, integrovaného obvodu a diody D1, aby se omezil vliv parazitních složek tištěného spoje. Návrh desky plošných spojů a také nákres pro její osazení je na obrázku 4.10. Cívky jsou mechanicky připevněny, aby nedošlo k jejich utržení. Na desce je drátová propojka, která připojuje aktivační vstup IO k zemi a tím ho aktivuje, tato propojka lze odstranit a IO lze aktivovat elektronicky nadřazeným řídícím systémem.

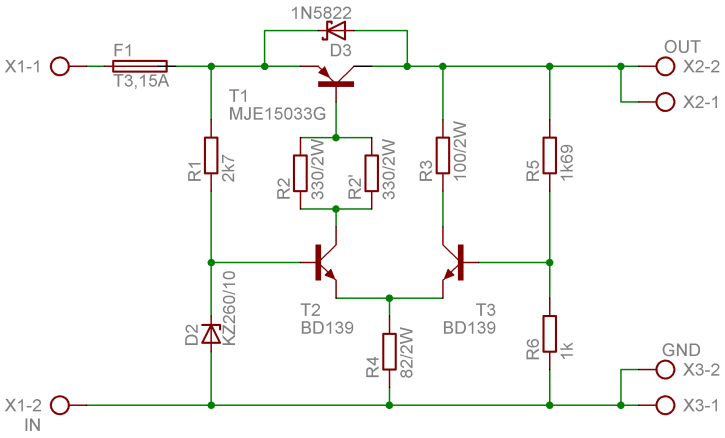


Obrázek 4.11: Osazený spínaný stabilizátor

4.7 Napájení řídících jednotek EPOS

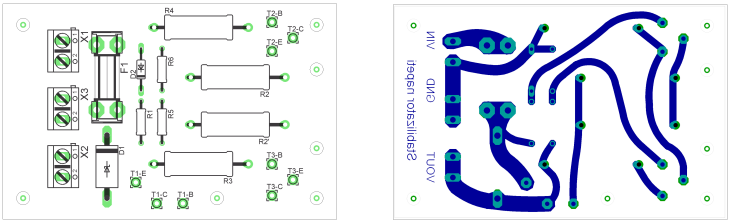
Velikost jmenovitého napájecího napětí pro provoz těchto jednotek je 11–24 V. Výrobce v manuálu k těmto jednotkám uvádí, že napětí vyšší než 27 V je může zničit. Tato provozní podmínka by se měla dodržet. Bezprostředně po nabíjení akumulátorů by jejich společné napětí mohlo tuto hranici překročit, proto je třeba použít obvod, který zabezpečí správné napájení pro jednotky EPOS. Obvod musí být schopný dodat proud o velikosti až 3 A což je maximální proud, který mohou obě jednotky s použitými motory a převodovkami odebrat.

Normální lineární stabilizátory se úplně nehodí, protože je na nich nezanedbatelný úbytek napětí a nám jde především o snížení napětí při překročení určité hranice. Ideální jsou nízkoúbytkové stabilizátory. Existují v integrované verzi, ale nenašel jsem žádný pro tuto kombinaci proudu a napětí. Proto jsem tento obvod postavil z diskrétních součástek.



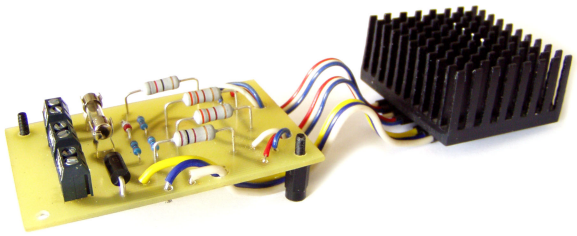
Obrázek 4.12: Schéma ochrany jednotek EPOS

Zapojení ochrany je vidět na obrázku 4.12. Běžně je T2 v saturaci a báze T1 je buzena proudem 100 mA při napájení 24 V. Nad 27 V se T3 začne otvírat, T2 zavírat a na T1 roste úbytek napětí, na výstupu je udržováno napětí 27 V. Proudy T2, T3 se dělí podle odběru jednotek. Dioda D1 je zařazena, neboť jednotky při brždění dodávají proud zpátky do sítě a mohlo by dojít k průrazu T1.



Obrázek 4.13: Deska plošných spojů ochrany jednotek EPOS

Tranzistory, které mohou vést velké kolektorové proudy, mají zpravidla malé zesílení. Aby mohl přes tranzistor T1 téci proud do jednotek EPOS o velikosti 3 A, musí být vzhledem k svému zesílení tranzistor buzen proudem asi 100 mA. Do budoucna by bylo dobré nahradit tranzistor T1 jiným, který má větší zesílení, a upravit velikosti odporů.



Obrázek 4.14: Osazená ochrana jednotek EPOS

V poslední fázi vývoje robotu se projevovala teplotní závislost výstupního napětí, která byla způsobena velkou teplotní závislostí Zenerova napětí použité diody, proto jsem diodu nahradil dvěma diodami s nižším napětím zapojenými do série, které mají menší teplotní drift. Zapojení se Zenerovými diodami jsem zvolil, protože má větší odolnost proti přepěťovým špičkám než zapojení s monolitickým referenčním zdrojem. Při této úpravě jsem také posunul napětí, při kterém začíná obvod stabilizovat, dolů na 26 V, aby byly jednotky EPOS spolehlivě chráněny.

4.8 Ochrana obvodů

Obvody robotu by měly být chráněny před zničením při poruše v systému napájení nebo chybné obsluze. Nejpravděpodobnější takové chybové stavy jsou připojení zdroje vyššího napětí nebo opačné polarity a zkrat nebo proudové přetížení.

4.8.1 Ochrana proti proudovému přetížení

Proudové přetížení vzniká při poruše jakékoliv části, nebo při zkratu, například při nesprávné manipulaci nebo při oživování, nebo jako následná porucha po přepětí. Může dojít ke zničení elektronických obvodů nebo může vyhořet kabeláž. Před přetížením se lze chránit pomocí elektronických nebo tepelných pojistek. Elektronické pojistky mají tu výhodu proti tavným pojistkám, že umožňují nastavit přesný mezní proud a jsou přibližně stokrát rychlejší. Hodí se především při vývoji a testování obvodů. Počítáme s tím, že na robot se budou umisťovat profesionální nebo otestované obvody, měla by tudíž stačit ochrana pomocí tavných pojistek.

Akumulátory budou chráněny před přetížením pojistkou a zároveň bude mít externí zdroj svoji vlastní pojistku. Protože počítáme s maximálním odběrem okolo 8 A, pojistky jsou na 7,5 A. K přetavení pojistky dochází při poměrně velkém proudu, proto je lepší vybavit pojistkou ještě jednotlivá zařízení. Další tavné pojistky jsou tedy ve zdroji řídícího počítače PC104 a stabilizátoru napětí pro řídící jednotky EPOS.

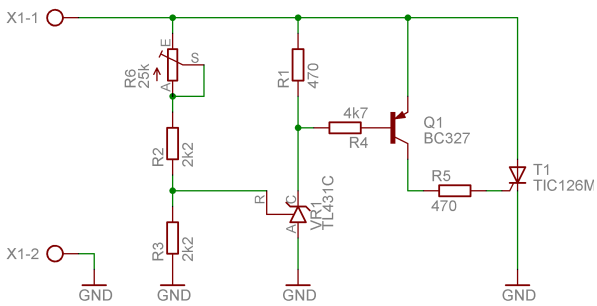
Jako hlavní pojistky baterie a externího zdroje jsou použity nožové automobilové pojistky, protože jejich pouzdro má menší přechodový odpor než kabelová pouzdra trubičkových pojistek. Jsou umístěny v zadní části robotu za dvířky na pravé straně.

4.8.2 Ochrana proti přepětí

Přepětí se může dostat do obvodů různými způsoby. Například se tak stane chybnou obsluhou, kdy se jako externí zdroj připojí zdroj se špatným napětím, případně poruchou v napájecím zdroji. Některé obvody robotu mohou být na zvýšené napětí citlivé, proto je nutné je před tímto stavem ochránit.

Často se jako ochrana používá triak, který se sepne v případě, že napětí překročí určitou mez a zkratuje obvod, čímž obvody ochrání. Součástí ochrany je proudová pojistka, která při zkratu obvod rozpojí. V našem případě je to hlavní pojistka baterie, případně externího zdroje.

Zapojení této ochrany ukazuje obrázek 4.15 a nalezl jsem ho v článku [10]. Některé hodnoty odporů jsem upravil, protože původní obvod byl připravený



Obrázek 4.15: Schéma přepěťové ochrany

pro rozmezí napětí 5 V-25 V. Jakmile napětí na řídící elektrodě napěťového stabilizátoru VR1 dosáhne 2,5 V, začne jím téci proud, který otevře tranzistor Q1, ten kolektorovým proudem sepne tyristor T1, který zkratuje obvod. Napětí, při kterém začne ochrana působit, je třeba nastavit pomocí trimru R6, lze ho nastavit v rozmezí 27.5 V–33 V.

Obvod odebírá stále proud 1 mA a měl by se v případě dlouhé odstávky robotu vypínat.

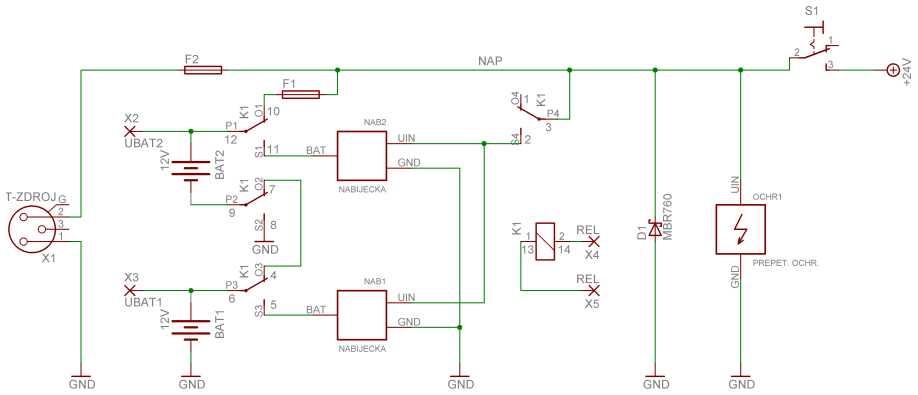
4.8.3 Ochrana proti přepólování

K přepólování dochází zpravidla chybnou obsluhou. Ochránit obvod před přepólováním lze jednoduše diodou zapojenou sériově s obvodem nebo antiparalelně ke zdroji. Pokud diodu zapojíme sériově s obvodem, zajistíme, že proud může téci jen jedním směrem. Nevýhoda je, že proud přes diodu teče při provozu stále a kvůli úbytku napětí se dioda zahřívá. Tato nevýhoda odpadá při použití diody s malým úbytkem napětí. Může dojít k situaci, kdy je třeba, aby proud tekl zpět do baterií, například při brždění motorů.

Jako ochranu proti přepólování jsme použili rychlou Schottkyho diodu MBR760 zapojenou antiparalelně se zdrojem. Pokud je v palubní síti napětí menší než asi $-0,1$ V, dioda zkratuje napájení a tím ochrání ostatní obvody. Při zkratu by mělo dojít k přepálení hlavní pojistky.

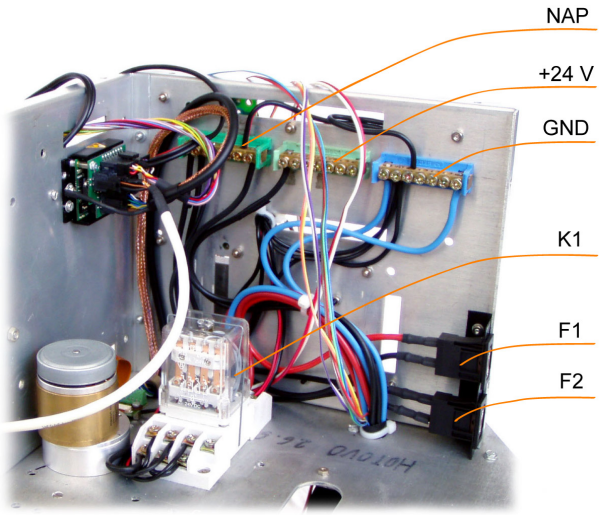
4.9 Zapojení napájecího systému

Schéma zapojení napájecího systému ukazuje obrázek 4.16. Napětí akumulátorů se bude zjišťovat v bodech UBAT1 a UBAT2. Toto napětí bude přivedeno přes děliče na analogové vstupy jednotky EPOS. V případě, že by se robot v budoucnu vybavil jednotkou vstupů a výstupů, připojilo by se napětí tam. Je třeba myslet na to, aby se tímto měřením po dobu dlouhodobé



Obrázek 4.16: Celkové schéma napájení

nečinnosti akumulátory hluboce nevybily. Přes body REL se ovládá cívka relé, které spíná nabíjení akumulátorů.



Obrázek 4.17: Stěna robotu určená pro prvky napájení

Většina prvků a obvodů, které souvisí s napájením robotu, jsou umístěny na jedné stěně robotu, jak můžeme vidět na obrázku 4.17. Pro rozvedení napájení jsou použity tři propojovací můstky. Levý zelený označený NAP je stále pod napětím, jsou na něj připojeny ochranné obvody. Prostřední zelený je 24 V spínaných hlavním vypínačem a pravý modrý, označený GND, je rozvod země.

Kapitola 5

Pohony

5.1 Přehled druhů motorů

5.1.1 Stejnosměrný motor DC

Stejnosměrné motory obsahují permanentní magnety, které vytvářejí statické magnetické pole. V tomto poli se otáčí rotor složený z plechů. Na rotoru jsou navinuty cívky. Proud procházející cívkou, která je v magnetickém poli statoru, vyvolává moment, který rotor roztáčí. Proud je do cívek přiváděn přes komutátor, který zajistí vždy správnou polaritu připojeného napětí k cívce. Komutátor je zdrojem rušení a také je to část, která vyžaduje údržbu. Při pohybu cívky v magnetickém poli se v ní indukuje tzv. elektromotorické napětí, které působí proti napájecímu napětí. Velikost tohoto napětí je úměrná otáčkám a díky němu se zvyšujícími se otáčkami klesá velikost momentu.

Stejnosměrné motory jsou výhodné pro svůj příznivý poměr mezi hmotností a výkonem. Jsou hodně rozšířené, proto lze vybírat z široké nabídky. Pracují na vysokých otáčkách a mají relativně malý moment, proto se většinou používají ve spojení s převodovkou. Někteří výrobci motorků poskytují převodovky, které tvoří s motorem kompaktní celek. Součástí tohoto celku může být i optický enkodér. Účinnost malých stejnosměrných motorků se pohybuje od 50 do 80 %.

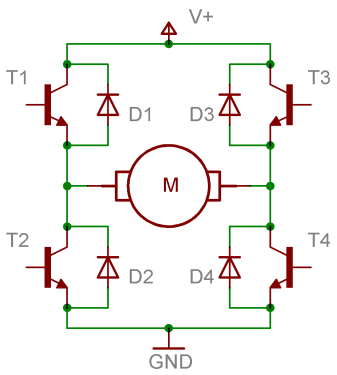
Pro otáčky ω stejnosměrného motorku platí následující vztah, kde R je odpor vinutí, k_m je momentová konstanta, M moment a U napájecí napětí:

$$\omega = -\frac{R}{k_m^2} M + \frac{U}{k_m} \tag{5.1}$$

Potřebujeme-li snížit otáčky motoru a současně zvýšit moment, musíme k motoru připojit převodovku. Otáčky můžeme regulovat změnou velikosti napájecího napětí, jak je vidět z rovnice 5.1. Pokud chceme řídit jen otáčky

při jednom směru otáčení, pak můžeme napětí měnit jednoduchým lineárním jednokvadrantovým regulátorem, kdy je sériově s motorem zařazen výkonový tranzistor, na kterém se v závislosti na velikosti řídícího napětí mění úbytek napětí. Nevýhodou je malá účinnost při nízkých otáčkách, kdy je vyzařován výkon jako teplo. Tento typ regulace lze použít pro motorky malých výkonů. Výhoda je, že regulační obvod není zdrojem rušení.

Regulační tranzistor můžeme provozovat také ve spínacím režimu. V sepnutém stavu je na tranzistoru minimální úbytek napětí a s tím spojené minimální výkonové ztráty. Výhodou je také jednodušší řízení pomocí číslicových obvodů. K řízení výkonových tranzistorů se nejčastěji používá pulzně-šířkové modulace (PWM). Nevýhodou tohoto způsobu je, že regulační obvod je zdrojem rušení. Vinutí cívky má indukčnost, která při pulzním napájení motorku vyhlazuje proud. Pokud je tato indukčnost malá, můžeme buď zvětšit spínací frekvenci nebo do série s vinutím zařadit cívku.



Obrázek 5.1: Schéma plného H-můstku

Pokud je třeba kromě otáček řídit také směr otáčení, musíme použít tzv. poloviční H-můstek, kdy jsou v sérii zapojeny dva tranzistory mezi symetrické napájecí napětí. Motor je připojen mezi jejich střed a nulový potenciál. Vyžaduje-li aplikace kromě změny smyslu otáček také změnu momentu, musíme použít úplný H-můstek, který umožňuje brždění motoru pomocí rekuperace, tedy provozu motoru v režimu generátoru.

H-můstky jsou dnes dostupné v integrované verzi, takže se nemusí stavět z diskrétních součástek. Příkladem je integrovaný obvod L298N, který obsahuje dva můstky a také řídící logiku, která zabrání tomu, aby došlo chybným řízením k současnému sepnutí tranzistorů v jedné větvi a tím ke zkratu. Obvod může spínat proud až do velikosti 2 A.

5.1.2 Krokový motor

Krokové motory se dělí podle konstrukce na dva hlavní druhy: s pasivním rotorem, jinak zvané též reakční, a druhým typem jsou hybridní krokové motory. Motory s pasivním rotorem mají stator složený z plechů, který má osm vyniklých pólů. Na pólech jsou navinuty cívky zapojené tak, že cívky na protějších pólech jsou zapojeny do série, celkem má tedy tento motor čtyři fáze. Rotor může být z jednoho kusu nebo složený z plechů. Na rotoru je šest vyniklých pólů, které jsou stejně široké jako statorové.

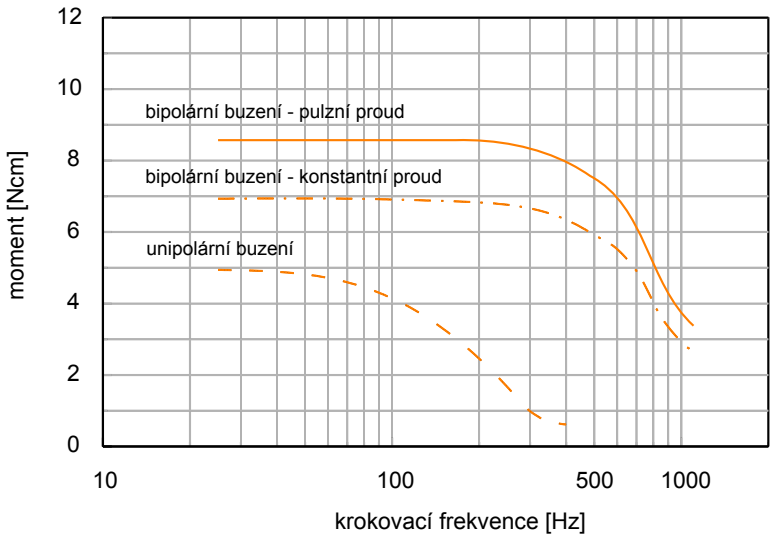
Hybridní krokové motory mají na statoru osm pólů, na kterých jsou navinuty cívky. Tyto póly mají na sobě směrem k rotoru zuby. Na ose rotoru jsou nalisované dva pólové nástavce, mezi nimiž je axiálně polarizovaný magnet. Tyto nástavce mají po obvodu zuby se stejnou roztečí jako zuby na statorových pólech. Rotorové nástavce jsou magnetem opačně polarizované a jsou vzájemně pootočené tak, že proti zubům jednoho nástavce jsou mezery druhého. Magnetické pole permanentního magnetu fixuje rotor v určité pozici, i když není statorové vinutí buzeno.

Vždy čtyři pólové nástavce tvoří jednu fázi. Nejdříve je buzena první fáze, pak druhá a následuje buzení první fáze opačným proudem a buzení druhé fáze opačným proudem. Tomuto buzení se říká bipolární čtyřtaktní s buzením jedné fáze. Bipolární buzení lze realizovat i s unipolárním zdrojem, používá se k tomu H-můsek zmíněný v předchozí sekci.

Aby bylo možné motory budit i jednoduše unipolárně, mají motory vyveden střed vinutí fáze. Motory mohou mít osm, šest nebo pět vývodů, takže je každá polovina vinutí vyvedena zvlášť nebo jsou vyvedené společné středy dvou fází anebo jsou všechny středy spojeny. Motor s osmi vodiči dovoluje propojení fázového vinutí pro bipolární buzení paralelně i sériově. Paralelní spojení je pro některé režimy výhodnější.

Závislost velikosti momentu na krokovací frekvenci je vidět na obrázku 5.2. Křivky se liší podle typu buzení. Pro dosažení příznivé momentové charakteristiky je nutné buzení motoru s postupným zvyšováním rychlosti, například při konstantním zrychlení. Toto buzení vyžaduje složitější řídící obvod. Pokud je motor provozován v režimu start-stop, kdy jsou na motor v klidu přivedeny pulzy odpovídající žádané rychlosti, dosahuje se mnohem horších výsledků.

Vinutí fáze motoru představuje indukčnost, takže proud vinutím narůstá postupně, to znamená i postupný nárůst momentu. Pro dosažení vyšších otáček a také většího momentu je snaha zkrátit čas nárůstu proudu. K tomu účelu se místo napěťového zdroje může použít proudový zdroj nebo metoda přerušování proudu, kdy se motor připojí na vyšší napětí a proud se přerušuje tak, aby jeho velikost nepřekročila jmenovitou hodnotu. Stejně tak je



Obrázek 5.2: Závislost momentu na krokovací frekvenci

třeba zkrátit čas při sestupné hraně proudu, proto se antiparalelně s vinutím zařazuje dioda nebo dioda sériově zapojená se Zenerovou diodou.

Motor lze budit čtyřtaktně s buzením jedné fáze, čtyřtaktně s buzením dvou fází nebo osmitaktně. Při osmitaktním buzení dostáváme dvojnásobný počet kroků na otáčku. Je možné dosáhnout ještě většího násobku kroků na otáčku použitím mikrokrokování, kdy se řídí velikost proudu, který teče jednotlivými fázemi.

Pro buzení krokových motorů existují integrované H-můstky, již zmíněné u stejnosměrných motorů. Pro řízení H-můstku lze použít integrovaný obvod L297, kterému se posílají pouze pulzy pro krokování a dále řídící signály jako směr otáčení, způsob buzení nebo uvolnění. Tento obvod dokáže sledovat velikost proudu tekoucího vinutím na snímacích odporech a budit motor přerušovaným proudem (chopper).

K řízení lze použít také spínače integrované s inteligentním řízením. Například obvod AMIS-30624, který umožňuje mikrokrokování, bezsenzorovou detekci ztráty kroku, spínání proudu až do 800 mA, implementuje regulátor polohy s nastavitelným zrychlením a mnoho dalších činností. Má rozhraní I^2C.

5.1.3 Elektronicky komutovaný motor EC

Tento typ motoru je svými vlastnostmi podobný stejnosměrnému motoru s komutátorem a konstrukcí je blízký synchronnímu motoru. Rotor tvoří permanentní magnet, který může být i vícepólový. Ve statoru je pak pro každý pól rotoru sekce vinutí. Tyto motory vynikají svojí dlouhou životností, která je omezena jen životností ložisek, neboť neobsahují mechanický komutátor. Mohou vytvářet konstantní moment v celém rozsahu otáček. Moment je úměrný protékajícímu proudu.

Statorové buzení je napájeno řídící jednotkou obdélníkovým nebo sinusovým proudem. Obdélníkový proud má tu nevýhodu, že je moment motoru zvlněný. Pro řízení proudu je třeba, aby měla jednotka informaci o natočení rotoru. Ke snímání se může použít *resolver*, který pracuje na principu vyhodnocení rozdílu velikosti napětí, které se indukuje z rotoru do dvou statorových cívek pootočených o 90 °. V dnešní době se často používají Hallovy sondy, které poskytují digitální obdélníkový signál.

5.2 Původní pohony

5.2.1 Pojezd

BARBER-COLMAN Rockford, IL U.S.A. CYHS 62700-13 HEATH P/N 420-637 12 VOLTS DC 12-83

Tabulka 5.1: Štítkové údaje motoru pro pojezd

Rozměry	51 × 57 mm
Napětí	12 V
Proud	210 mA
Otáčky	3120 min^{-1}
Převod	1:40

Tabulka 5.2: Změřené parametry motoru pro pojezd

Pohon pojezdu byl realizován stejnosměrným motorem s mechanickou komutací, který měl k sobě připojenou převodovku. Na štítku motoru nebyl uveden ani výkon motoru, ani moment, který je motor schopný vyvinout. Snažil jsem se podrobnější informace o motoru najít na Internetu, ale marně. Potřebné údaje bych mohl získat proměřením momentové charakteristiky. Nakonec jsem změřil jen základní údaje, jak ukazuje tabulka 5.2. Proud i otáčky jsou měřeny s připojenou převodovkou. Abych získal alespoň představu o výkonu motoru, našel jsem jiný motor, který byl podobný motoru z robotu. Tento motor byl na stejné napětí, v klidu odebíral 280 mA při otáčkách 3940 min^{-1} a měl rozměry 50 × 67 mm. Jeho výrobce je firma Igrashi Motors a má označení 5067-044-GF-7.

Otáčky	3300 min^{-1}
Moment	35,2 Nm
Proud	1,5 A
Výkon	12,3 W
Účinnost	68,4 %

Tabulka 5.3: Parametry motoru 5067-044-GF-7 při maximální účinnosti

Za předpokladu, že by měl motor podobnou charakteristiku jako motor, který jsem nalezl, byl by při provozu v režimu maximální účinnosti na výstupu převodovky moment M_p a otáčky $n_p \doteq 70\,\mathrm{min}^{-1}$. Předpokládáme účinnost převodovky $\eta = 70\,\%$.

$$M_p = M_m \cdot p \cdot \eta = 0{,}0352 \cdot 40 \cdot 0{,}7\,\mathrm{Nm} \doteq 1\,\mathrm{Nm} \tag{5.2}$$

Výkonově tento motor pro provoz postačoval. Byl dimenzovaný na pohon pojezdu původního robotu, který vážil 17 kg. Pohon byl vybaven jednoduchým optickým enkodérem, který měl ale malé rozlišení. Pro určení polohy robotu by toto rozlišení stačilo, ale nemuselo by být dostatečné pro regulaci.

5.2.2 Natáčení hnacího kola a otáčení hlavy

Hnací kolo natáčel přes převodovku dvoufázový krokový motor. Podobně jako u předchozího motoru jsme neměli k dispozici další údaje a nebylo možné je ani najít, proto jsem vyhledal podobný motor, který vyrábí firma Berger Lahr a má označení RDM 51/12, má stejné parametry jako motor z robotu. Jeho maximální moment při unipolárním buzení je 8,9 Ncm. Při frekvenci kroku asi 200 Hz (to odpovídá výstupním otáčkám přibližně 5 min^{-1}) je moment poloviční. Výstupní moment by tedy byl:

Rozměry	57×26 mm
Napětí	12 V
Odpor vinutí	46,5 Ω
Krok	7,5 °
Max. otáčky	325 min^{-1}
Převod	1:51

Tabulka 5.4: Změřené parametry pohonu pro natáčení hnacího kola

$$M_p = M_m \cdot p \cdot \eta = 0{,}044 \cdot 51 \cdot 0{,}7\,\mathrm{Nm} \doteq 1{,}6\,\mathrm{Nm} \tag{5.3}$$

Hlavní nevýhoda tohoto pohonu byla absence zpětné vazby. Při ztrátě kroku by se kumulovala chyba určení aktuální polohy. Pohon by se musel vybavit ještě snímačem polohy. Nebo by musel často korigovat hodnotu absolutní polohy pomocí referenčního snímače. Pohon jsme se rozhodli vyměnit, neboť krokové motory pracují nejlépe při bipolárním buzení vyšším napětím. Pro 12V motory je to napětí například o velikosti 40 V, které na robotu není k dispozici.

Otáčení hlavy bylo poháněno stejným krokovým motorem jako natáčení hnacího kola. Převodovka měla převodový poměr 1:150

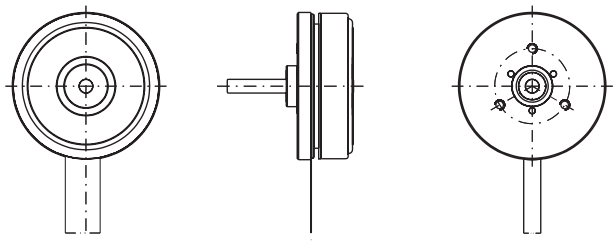
5.3 Nové pohony

Jako dodavatele nových motorů jsem zvolil firmu Maxon. Má širokou nabídku motorů, převodovek i optických enkodérů. Tyto části pohonu se skládají v kompaktní celky. Vzhledem k velikosti nabídky není problém zvolit takovou kombinaci, která vyhovuje požadavkům na pohon. S pohony od této firmy mají zkušenosti lidé na naší fakultě a motory mají obecně dobrou pověst. Firma zároveň dodává i řídící jednotky od jednoduchých s analogovým vstupem až po programovatelné s funkcí PLC.

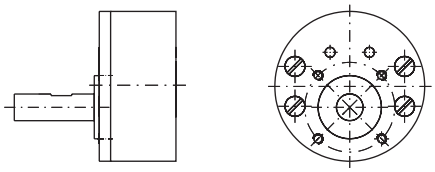
Pro výběr motoru, převodovky, enkodéru a řízení slouží program Maxon Selection Program, který podle požadavků na pohon navrhne různé sestavy a vypočítá jejich parametry a charakteristiky. Na návrhu pohonů se podíleli specialisté z firmy Uzimex, která je dodavatelem výrobků Maxon. Celý proces od začátku hledání sestavy až po její objednání trval relativně dlouho a během něj jsme opakovaně hledali novou vhodnou kombinaci, vždy. když jsme odhalili nové požadavky na pohon.

Bylo možné vyměnit jen původní motory a ponechat původní převodovky. Toto řešení ale neposkytuje žádné výrazné úspory, proto jsme se rozhodli

nahradit celý pohon. Nejprve byl navržen pohon se stejnosměrnými motory s optickými enkodéry. Při návrhu mechanického uspořádání jsme zjistili, že pohon hnacího kola by při přímém připojení na osu čněl příliš do strany a musel by se tedy umístit nad kolo a spojit pomocí řetízkového náhonu.



Obrázek 5.3: Plochý motor Maxon EC45 flat



Obrázek 5.4: Převodovka Maxon GS45 k plochému motoru

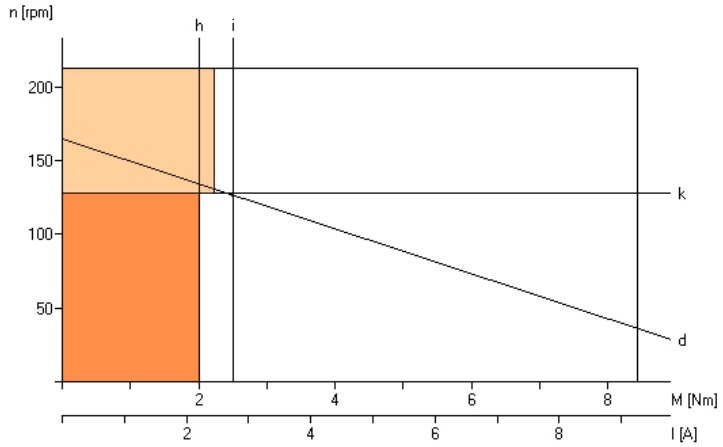
Jako ideální možnost se ukázalo použití plochých motorů s elektronickou komutací a vnějším rotorem, které mají při svých rozměrech relativně velký výkon, konkrétně byly použity motory s výkonem 30 W. Motory mají osm pólpárů a pro každý pól jsou na statoru tři sady vinutí. K těmto motorům se vyrábějí také speciální převodovky. Převodovky mají čelní ozubení. Motory ale nemají možnost připojení optického enkodéru, a tak se při řízení musí pracovat jen se signálem z Hallových sond. Výrobce uvádí, že pro stabilní regulaci polohy je potřeba, aby měl motor alespoň čtyři pólpáry a měl otáčky alespoň $1000\,\mathrm{min}^{-1}$ na jeden pólpár. Typ motorů, které jsme použili, je novinkou v nabídce výrobce, proto je těžké získat informace o provozu těchto motorů při regulaci polohy.

Motor obsahuje tři Hallovy sondy. Každá poskytne jeden obdélníkový pulz na jeden pólpár. Celkem tedy motor poskytuje $3 \cdot 2 \cdot 8 = 48$ pulzů na otáčku.

5.3.1 Pojezd

Jako vstupní parametry pro hledání pohonu jsme použili údaje uvedené v sekci o původních pohonech.

Pohon hnacího kola je tvořen motorem EC45 flat 200142 a převodovkou GS45 301171. Převodovka je třístupňová a má převodový poměr 47:1. Pracovní oblast pohonu je vidět na obrázku 5.5, kde je vyznačená tmavěoranžovou barvou. Přímka d je omezení napájecím napětím, přímka k jsou maximální otáčky převodovky ($6000\,\mathrm{min}^{-1}$), přímka h maximální trvalý moment převodovky 2 Nm a přímka i maximální krátkodobý moment převodovky 2,5 Nm. Pracovní oblast tedy nejvíce určují právě parametry převodovky. Rozlišení Hallových sond na výstupu převodovky je $\frac{360\,^\circ}{48\cdot47} \doteq 9'34''$ což při průměru hnacího kola 125 mm odpovídá dráze $\frac{\pi\cdot125\,\mathrm{mm}}{48\cdot47} \doteq 0{,}17\,\mathrm{mm}$



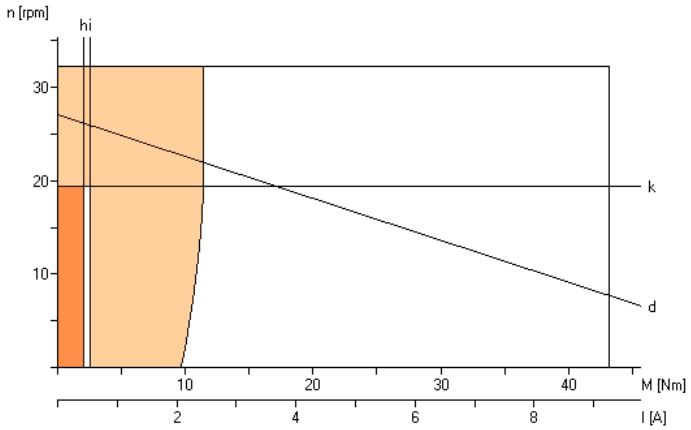
Obrázek 5.5: Pracovní oblast pohonu hnacího kola

max. otáčky	6000 rpm
max. trvalý proud	2,14 A
teplotní konst.	13,2 s
pulzů na otáčku	48

Tabulka 5.5: Parametry pohonu pojezdu pro jednotku EPOS

5.3.2 Natáčení hnacího kola

Pohon natáčení hnacího kola je tvořen motorem EC45 flat 200142 a převodovkou GS45 301178. Převodovka je pětistupňová a má převodový poměr 310:1. Pracovní oblast je vidět na obrázku 5.6. Přímky mají stejný význam jako v předchozím případě. Takto vysoký převodový poměr byl zvolen proto, aby byly na motoru vyšší otáčky a tak větší jistota úspěšné regulace polohy. Vyšší převodový poměr také umožňuje budit motor menším proudem a použít řídící jednotku s nižším výkonem. Rozlišení Hallových sond na výstupu převodovky tedy v natáčení hnacího kola je $\frac{360\,^\circ}{48 \cdot 310} \doteq 1'27''$.



Obrázek 5.6: Pracovní oblast pohonu natáčení hnacího kola

max. otáčky	6000 rpm
max. trvalý proud	0,5 A
teplotní konst.	13,2 s
pulzů na otáčku	48

Tabulka 5.6: Parametry pohonu natáčení pro jednotku EPOS

Kapitola 6

Řízení

6.1 Řídící jednotky EPOS

Pro řízení motorů na robotu jsem použil řídící jednotky EPOS, které umí pracovat jak s kartáčovými motory DC, tak bezkartáčovými EC. Elektronicky komutované motory jsou buzeny sinusovým nebo obdélníkovým proudem. Jednotky zpracovávají signál z optického enkodéru i Hallových sond a dovolují připojení ještě dalšího snímače polohy. Implementují regulátor proudu, rychlosti a polohy. S nadřízeným systémem mohou být propojeny pomocí sběrnice CAN nebo pomocí rozhraní RS-232. Jednotka též může fungovat jako interface mezi linkou RS-232 a sběrnicí CAN, obsahuje systém detekce a hlášení chyb. Informace, které nenaleznete zde, hledejte v příručkách k jednotkám.

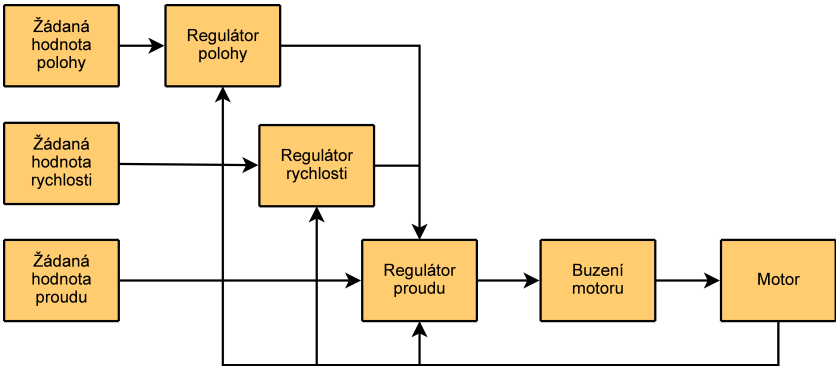
Obrázek 6.1: Řídící jednotka motorů EPOS 24/5

Jednotka disponuje digitálními vstupy a výstupy, které mohou být použity pro obecný účel, nebo jim může být přiřazena speciální funkce. Mohou

tedy sloužit například pro připojení referenčních a limitních spínačů nebo brzdy. Součástí jednotek je také užitečný záznamník průběhů, který dovoluje zachytit časové průběhy různých hodnot, například žádané a aktuální polohy, rychlosti a proudu, stejně jako hodnoty na digitálních vstupech jednotky. Jednotky jsou chráněny proti podpětí a přechodnému přepětí, zkratu vinutí motoru a dalším poruchovým stavům a rovněž chrání pohon před poškozením vysokou teplotou nebo vysokými otáčkami.

Řídící jednotky jsou vyráběny pro různé maximální proudy buzení. Prakticky se neliší svou funkcí. Jednotky pro větší proudy mají více univerzálních vstupů a výstupů. Na robotu jsou umístěny dvě řídící jednotky. EPOS 24/1, určená pro maximální trvalý proud o velikosti 1 A, řídí motor pro natáčení předního kola a EPOS 24/5, pro trvalý proud 5 A, řídí motor hnacího kola.

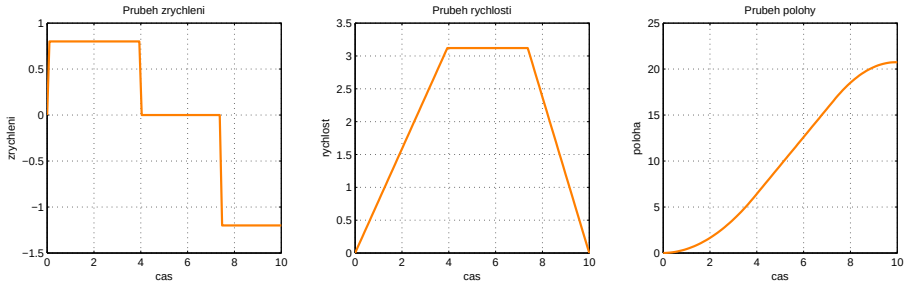
6.1.1 Struktura jednotky



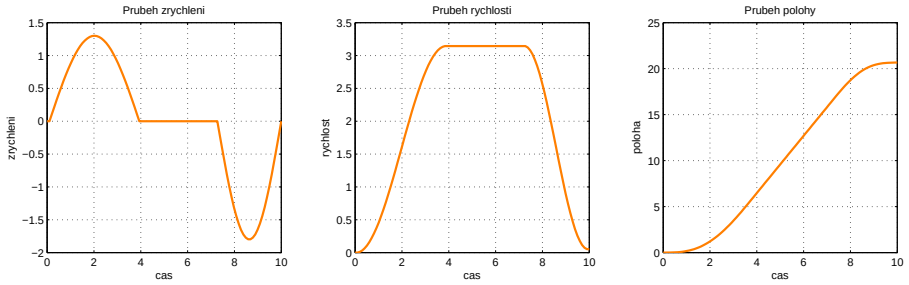
Obrázek 6.2: Blokové schéma struktury řídící jednotky EPOS

Na obrázku 6.2 vidíme strukturu jednotky EPOS. Při regulaci polohy a rychlosti se využívá dvousmyčkový obvod, kde vnitřní smyčka je v obou případech regulace proudu. Regulátory proudu a rychlosti mají nastavitelnou proporcionální a integrační složku, regulátor polohy má navíc i složku derivační.

Součástí systému řídící jednotky je generátor trajektorie, který může generovat žádanou hodnotu pro regulátor rychlosti a polohy. Na vstupu regulátorů se pak místo skoku žádané hodnoty objevuje průběh, který je bližší fyzikálním možnostem pohonu, což zlepší průběh regulačního pochodu. Regulátor průběh žádané hodnoty dokáže sledovat s minimální odchylkou. Generátoru je možné nastavit kromě cílové dráhy nebo rychlosti i dovolené zrychlení a odrychlení. Kromě toho jsou k dispozici dva rychlostní profily: lichoběžníkový, který je na obrázku 6.3, a sinusový na obrázku 6.4.



Obrázek 6.3: Průběh zrychlení, rychlosti a polohy při lichoběžníkovém profilu



Obrázek 6.4: Průběh zrychlení, rychlosti a polohy při sinusovém profilu

Základní režimy jednotky se řídí stavovým automatem. Jednotka může být v různých stavech, jako je startovací, připravenost k zapnutí, uvolnění operací, rychlé zastavení, chybový a další. Tento stav lze zjistit přečtením stavového slova. Některé stavy lze poznat podle indikační LED. Svit červené LED znamená obecně chybový stav, pomalé blikání zelené LED neaktivní buzení motoru a svit zelené LED aktivovaný pohon.

Mezi některými stavy jednotka přechází sama po dokončení určité operace a jiné přechody se vyvolají pouze příkazy zaslanými z nadřízeného systému. Mezi tyto příkazy patří například zakázání nebo povolení operací, zrušení chyby, rychlé zastavení, vypnutí napětí a další. Příkazy se zadávají pomocí zápisu do řídícího slova. Aktuální stav jednotky také určuje, jaké příkazy budou zpracovávány.

6.1.2 Provozní režimy

Chování jednotky určuje nastavený operační mód. Může být nastaven zápisem slova určeného pro tento účel a stejně tak se dá zjistit vyčtením speciálního slova.

Řízení proudu – V režimu řízení proudu reguluje jednotka proud motorem na žádanou hodnotu. Jednotka podle nastaveného typu motoru rovněž

zabraňuje zničení motoru přehřátím. Nastavením příslušného parametru lze také omezit maximální otáčky.

Řízení polohy – V tomto módu je přímo řízena poloha. Řídící jednotce se pošle žádaná hodnota polohy a ona se jí snaží okamžitě dosáhnout. Na vstupu regulátoru se tedy objeví skok.

Profil polohy – I tento mód je určený pro regulaci polohy, v tomto případě je ale cílová poloha přivedena na vstup generátoru trajektorie, který podle nastavených parametrů generuje žádanou hodnotu pro regulátor polohy. Parametry pro tento mód jsou: cílová poloha zadaná absolutně nebo relativně, rychlost pohybu, dovolené zrychlení, odrychlení pro normální režim a pro rychlé zastavení. Dále se zadává také typ rychlostního profilu, který může být lichoběžníkový nebo sinusový. Je možné definovat toleranční okno kolem žádané hodnoty, kdy bude poloha vyhodnocena jako cílová. Pro regulaci polohy je tento režim výhodný, protože regulátor dosahuje ideálního sledování žádané hodnoty, jak bylo zmíněno při popisu generátoru trajektorie. Nadřízený systém by měl využívat právě tento režim.

Nalezení referenční pozice – Tento mód se používá pro zjištění absolutní polohy pohonu. Lze nastavit několik metod, kterými bude jednotka absolutní polohu určovat. Některé z nich využívají indexovací signál z optického enkodéru, který v našem případě není použit, proto je nemá smysl nastavovat. Většina metod funguje tak, že se pohon roztočí jedním směrem a čeká se na signál z limitního snímače. Některé metody mohou reagovat i na signál z referenčního snímače.

Mód dovoluje různá nastavení. Kromě zmíněného způsobu hledání absolutní polohy to jsou: rychlost při hledání referenční polohy, maximální zrychlení, poloha referenčního spínače pro definování uživatelských souřadnic a o jaký úhel se má motor otočit na konci sekvence hledání. Jednotka také dovoluje využití mechanických dorazů, kdy při hledání sleduje velikost proudu a při překročení nastavené hranice toto vyhodnotí jako nájezd na doraz.

V naší aplikaci se bude pro hledání absolutní polohy využívat metoda „Home Switch Positive Speed“, případně „Home Switch Negative Speed“, která motor roztočí jedním směrem a hledá referenční snímač, buď narazí na něj nebo na limitní snímač.

Externí enkodér – K jednotce EPOS se připojí pomocí digitálních vstupů externí enkodér, který funguje jako vstup do čítače. Jeho výstup je násoben konstantami a limitován. Výsledná hodnota slouží jako žádané

hodnoty polohy. Mód dovoluje nastavit vstupní faktor, polaritu enkodéru atd. Pohon může v tomto režimu například sledovat jiný pohon.

Krokovací – Tento režim je velmi podobný jako předchozí, jen ke vstupům se nepřipojuje enkodér, ale signál pro krokování a signál určující směr pohybu. Pohon pak funguje jako krokový motor.

Řízení rychlosti – V tomto módu je řízena přímo rychlost. Žádaná hodnota se přivede na vstup regulátoru rychlosti, takže jde o skok žádané hodnoty.

Profil rychlosti – Funkce jednotky v tomto režimu je velmi podobná jako v režimu profil polohy. Cílová hodnota rychlosti se přivádí na vstup generátoru trajektorie, kterému se dají nastavit stejné parametry jako při profilu polohy, tedy: zrychlení, odrychlení a tvar profilu.

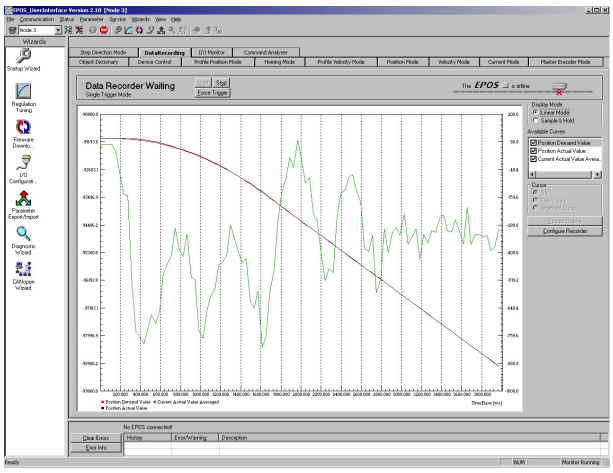
Diagnostický režim – Je využíván ovládacím programem na PC pro jednotky EPOS.

Ve všech režimech, které regulují polohu, lze jednotce nastavit maximální odchylku od žádané hodnoty. Při překročení této odchylky přejde jednotka do chybového stavu. Této funkce lze použít například k detekci mechanického zablokování pohonu. V případě, že se bude využívat generátor trajektorie, lze při správném provozu očekávat minimální odchylku. Jednotce je také možné nastavit maximální a minimální polohu. Toto je nutné u pohonu natáčení předního kola, aby nedošlo chybným příkazem k jeho přetočení a utržení kabelů.

6.1.3 Ovládací program pro PC

K jednotkám je k dispozici program pro PC s názvem EPOS UserInterface, který je určen pro nastavování, testování a diagnostiku jednotek. Jednotka se k počítači připojuje pomocí rozhraní RS-232 nebo CAN. V obou případech je možné pracovat se všemi jednotkami, které jsou na společné sběrnici. Pomocí programu lze nastavit do jednotky parametry motoru jako druh motoru, maximální otáčky a proud, teplotní konstantu, počet pulzů snímače na otáčku apod. Dále se program využívá k nastavení parametrů regulátorů a nabízí i možnost automatického ladění konstant jednotlivých regulátorů. Tato možnost je předpokládána pro motory s optickým enkodérem a lepších výsledků se v našem případě dosáhne ručním nastavením regulátoru.

Pomocí programu je možné aktualizovat firmware jednotek, konfigurovat význam jednotlivých vstupů a výstupů a monitorovat jejich stav, dále také



Obrázek 6.5: Obrazovka ovládacího programu pro EPOS

exportovat a importovat parametry uložené v jednotce, které je samozřejmě pomocí programu možné i měnit. Program také umožňuje záznam průběhů důležitých veličin. Záznam může trvat 10 ms až 10 s a má řadu parametrů jako spouštění nebo předstih. Získaná data lze vyexportovat v obrazové i číselné podobě, což je užitečné pro další zpracování například pomocí programu Matlab. Obrazovka programu v režimu sledování průběhů je vidět na obrázku 6.5.

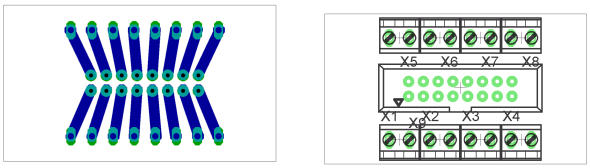
Program umožňuje dávat jednotce příkazy k pohybu ve všech režimech provozu, které byly výše popsány. Pro každý režim se před odesláním příkazu nastavují žádané parametry. Také je možné posílat příkazy k přechodům mezi stavy jednotky.

6.1.4 Vstupy a výstupy

Jednotka EPOS 24/1 disponuje šesti digitálními vstupy, dvěma výstupy, které mohou proti zemi spínat až 50 mA a dvěma analogovými vstupy. Analogové vstupy mají převodník s rozlišením 10 b a maximální napětí je 5 V. Jednotka EPOS 24/5 má rovněž šest digitálních vstupů, čtyři výstupy, z nichž jeden může proti zemi spínat proud až 1 A a zbylé proud 100 mA. Jednotka má také dva analogové vstupy s uvedenými vlastnostmi.

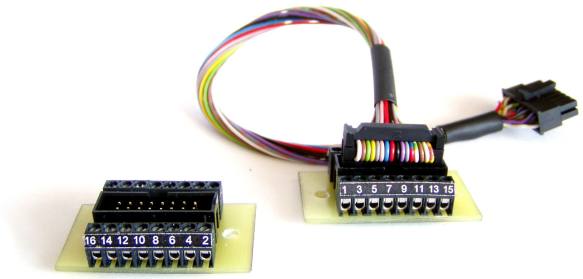
Některé vstupy se dají v jednotce konfigurovat pro obecný nebo speciální účel, takže pak mohou pracovat jako vstupy od referenčních a limitních spínačů. U vstupů lze nastavit pozitivní a negativní logika a také reakce na náběžnou nebo spádovou hranu. Vstup lze nastavit také tak, aby povoloval operace jednotky. Toho by šlo v budoucnu využít pro připojení mechanického

spínače, který by sloužil pro nouzové vypnutí pohonů obsluhou.



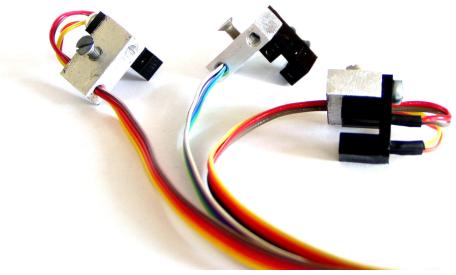
Obrázek 6.6: Plošný spoj svorkovnice vstupů a výstupů EPOS

Vstupy a výstupy jsou vyvedeny na konektory jednotky, které ale neumožňují pohodlnou manipulaci s jednotlivými piny a tak znemožňují vývoj a úpravy. Proto jsem vyrobil adaptér se svorkovnicí, na kterém jsou vstupy a výstupy pohodlně k dispozici. Plošný spoj adaptéru je na obrázku 6.7.



Obrázek 6.7: Svorkovnice vstupů a výstupů EPOS

Adaptéry od obou jednotek jsou umístěny na přední stěně robotu a pod nimi je univerzální plošný spoj pro stavbu pomocných obvodů. Čísla přilepená na svorkách souhlasí s číslováním pinů, význam jednotlivých pinů tak lze snadno najít v manuálu k jednotkám.

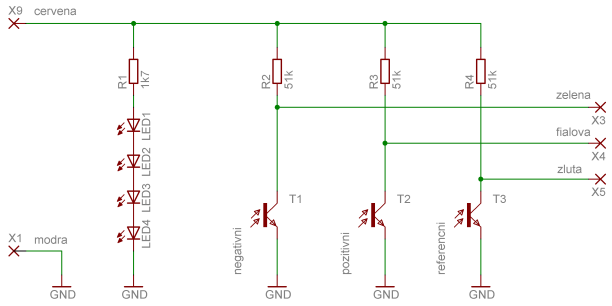


Obrázek 6.8: Optické závory se součástkou pro uchycení

význam	**barva**	
	limitní závora	**referenční závora**
dioda K	žlutá	modrá
dioda A	oranžová	zelená
tranzistor C	červená	šedá
tranzistor E	hnědá	fialová

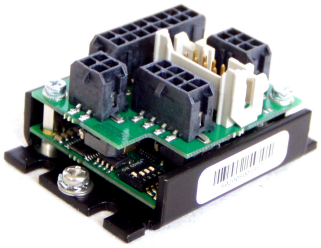
Tabulka 6.1: Význam žil připojujících optické závory

Pro řízení robotu je velmi důležité znát absolutní polohu natočení hnacího kola, aby bylo možné určit směr, kterým robot pojede. K tomu účelu jsem pohon vybavil optickými závorami, které fungují jako limitní a referenční snímač.



Obrázek 6.9: Schéma připojení optických závor k jednotce EPOS

Všechny LED diody optických závor jsou propojeny sériově a je k nim vřazena ještě žlutá indikační svítivá dioda umístěna na přední stěně na univerzální desce plošných spojů, kde je realizovaný celý obvod světelných závor. Schéma obvodu je na obrázku 6.9. Obvod je napájen palubním napětím 24 V, které se odebírá ze svorkovnice vstupů a výstupů jednotky 24/5, neboť u jednotky 24/1, ke které obvod patří, není napájení k dispozici. Diodami protéká při napětí 24 V proud 11 mA. Pokud není závora aktivována, tranzistor je otevřen a na vstupu je nulové napětí, při zastínění světelného paprsku plíškem, který je umístěn na otočné části pohonu, se tranzistor zavře a na vstupu se objeví napětí asi 5,1 V, které je vyhodnoceno jako logická úroveň 1. Pozici, ve které dojde k zákrytu referenční optické závory, není nutné mechanicky dostavovat, neboť jednotka umožňuje polohový posun nastavit softwarově.



Obrázek 6.10: Řídící jednotka motorů EPOS 24/1

6.1.5 Připojení

Pro připojení napájení, motoru, senzorů a nadřízeného systému k jednotkám se používá speciálních konektorů s krimpovacími piny. Konektory jsou na obrázku 6.10. Všechny propojovací kabely byly vyrobeny v rámci této práce. Parametry kabelů, jako je průřez žil či stínění, jsou stejné jako parametry originální sady kabelů k jednotce popsané v manuálu. Kde to bylo možné, jsou stejné i barvy žil.

Na obou jednotkách je nutné nastavit identifikační číslo pro rozlišení jednotek na sběrnici CAN. Toto číslo se nastavuje pomocí přepínačů DIP nebo ho lze nastavit i softwarově. Na jednotce 24/5 je celkem osm přepínačů, z nichž jeden (číslo 8) slouží pro připojení zakončovacího rezistoru na sběrnici (terminátor), a není tedy nutné připojovat externí rezistor, pokud je jednotka na konci sběrnice. Lze nastavit adresu jednotky od 1 do 127, nula se užívá pro softwarové nastavení. Na jednotce 24/1 jsou přepínače čtyři, lze tedy nastavit adresu v rozsahu 1–16.

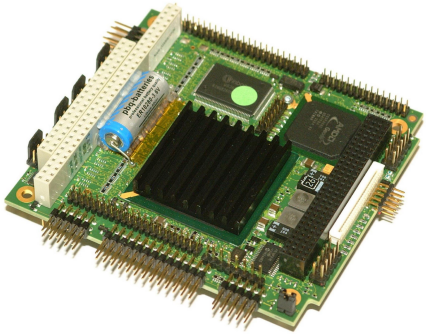
6.2 Řídící počítač PC/104

Řídící počítač je v hierarchii řídících systémů, které jsou umístěny na robotu, na nejvyšší úrovni. Slouží pro dohled nad ostatními subsystémy a vykonává operace sofistikovaného řízení. Není třeba, aby pracoval v reálném čase, neboť úkoly, které jsou časově kritické vykonávají podřízené subsystémy. Stejně tak úkoly související s bezpečností zajišťují subsystémy. Počítač tedy musí mít dostatečný výpočetní výkon pro sofistikované řízení, jak bylo zmíněno v koncepci robotu. Zároveň nemusí být schopný vykonávat řízení v reálném čase.

Jako řídící počítač byl vybrán systém PC/104. Jedná se o standardizovaný malý počítačový systém určený k zabudování. O standard se stará konsorcium PC/104, které definuje jak některé parametry mechanického uspořá-

dání, tak specifikace sběrnice. Systém splňuje hlavní specifikace PC/AT. Základní deska systému umožňuje samostatný provoz, neboť obsahuje všechny základní prvky. Systém je možné rozšiřovat o další desky s různými vstupy a výstupy, které se připojují pomocí sběrnice ISA. V případě PC/104+ je k dispozici rovněž rychlejší sběrnice PCI, která je využita v naší aplikaci. Všechny desky systému mají standardní rozměry a mají přibližně tvar čtverce. Při spojování se desky skládají nad sebe a přes otvory v rozích se spojují distančními sloupky, takže pak vytváří relativně robustní celek.

6.2.1 Základní deska



Obrázek 6.11: Základní desky PC/104

Na desce je osazen výkonný procesor GEODE ™ LX-800 s taktovací frekvencí 500 MHz. Procesor je kompatibilní s 8086-P5. Dále je deska osazena obvodem BIOS a konektorem DDR-DODIMM, který dovoluje připojení operační paměti s velikostí 256–1024 MB. Deska dále obsahuje nezbytné podpůrné obvody, jako tři čítače/časovače, řadič přímého přístupu do paměti se čtyřmi 8b kanály a třemi 16b, obvod reálného času a řadič přerušení. Připojeným zařízením pro trvalé uchování dat může být disketová jednotka nebo dva pevné disky. V našem případě je jako perzistentní paměť využita paměťová karta emphCompactFlash, připojená přes příslušný konektor.

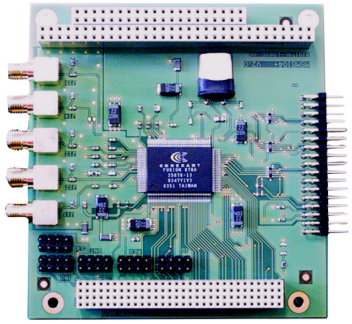
Dále je deska vybavena rozhraním pro připojení periferií, jako klávesnice AT nebo PS/2, myši PS/2, zobrazovacího zařízení CRT s rozlišením 1920 × 1440 nebo TFT s rozlišením 1600 × 1200. Deska má paralelní port LPT, dva sériové porty COM pro spojení RS-232, čtyři sériové porty USB splňující specifikaci USB 2.0, takže maximální přenosová rychlost je 400 MBps. Navíc deska poskytuje rozhraní Ethernet a umožňuje také zpracování zvuku. Odběr základní desky se pohybuje kolem 8 W.

6.2.2 Karta pro připojení sběrnice CAN

Obrázek 6.12: Deska PC/104 pro sběrnici CAN

Tato karta má označení MSMCA104+. Poskytuje dva úplně nezávislé kanály CAN, které nemají galvanické oddělení. Maximální přenosová rychlost je 1 Mbps. Sběrnice se ke kartě připojuje pomocí devítipinového konektoru DSub nebo pomocí desetipinového počítačového konektoru. Karta je připojena k základní desce pomocí sběrnice PCI. Její příkon je 3 W na jeden kanál.

6.2.3 Karta pro zachytávání videa



Obrázek 6.13: Deska PC/104 pro zachytávání videa

Rozšiřující karta MSMG104G+ slouží pro digitalizaci video signálu. Obsahuje obvod pro zachycování videa (framegrabber) a čtyřvstupový multiplexor. Ke kartě mohou být připojeny tři videokamery CVBS a kamera Svideo. Při rozlišení PAL může karta zpracovat 30 snímků za sekundu. PCI sběrnice, přes kterou je karta připojena k počítači, dovoluje souběžný přenos

dvou digitalizovaných videosignálů v rozlišení PAL s uvedenou obnovovací frekvencí. Karta má také sadu digitálních vstupů a výstupů. Příkon karty je 1 W.

6.2.4 Zdroj

Obrázek 6.14: Deska PC/104 se zdrojem

Modul se zdrojem pro systém PC/104 má označení MSMPS104. Jmenovité vstupní napětí zdroje je stejnosměrné napětí o velikosti 24 V, ale může se pohybovat v rozmezí 15–30 V. Zdroj má čtyři výstupy. První poskytuje 5 V a je zatížitelný 15 A, druhý 12 V a dovoluje odebírat proud 1,7 A a poslední dva mají napětí -5 V a -12 V s dovoleným proudem 75 mA a 30 mA. První dva zmíněné výstupy jsou vyvedeny na svorkovnice a lze je tedy použít k napájení dalších zařízení robotu. Zdroj má možnost připojení baterie SmartBattery, které řídí nabíjení.

6.3 Přístupový bod Wi-Fi

Toto zařízení slouží pro propojení řídícího počítače se vzdáleným řídícím systémem pomocí rádiového přenosu. Jako přístupový bod (access point) byl vybrán výrobek firmy StraightCore WRT-312. Pro naši aplikaci je výhodný svými parametry a také rozměry. Jde o bezdrátový směrovač (router), který může pracovat i v klientském režimu. Podporuje normu Wi-Fi 802.11b i 802.11g, takže maximální rychlost spojení je 54 Mbps, což je dostatečné i pro přenos náročnějších dat, jako je například video. Zařízení také umožňuje regulovat výstupní výkon v rozmezí 8–20 dB s krokem 1 dB.

Firmware přístupového bodu rozlišuje tři rozhraní: první je bezdrátová síť a dále dvě ethernetová rozhraní. Jedno z nich zároveň funguje jako čtyřportový přepínač (switch). Každé rozhraní je zvlášť konfigurovatelné, takže pří-

Obrázek 6.15: Přístupový bodu WRT-312

stupový bod může pracovat v různých režimech podle toho, které rozhraní je použito pro připojení k WAN a které k LAN. Protože je toto zařízení vybaveno i zmíněným ethernetovým přepínačem, může sloužit jako centrální prvek vnitřní sítě Ethernet na robotu, ke kterému se budou připojovat další zařízení jako například IP kamera. Konfigurace přístupového bodu se provádí pomocí internetového prohlížeče, jak je to u podobných zařízení běžné.

Přístupový bod je propojen přímým ethernetovým kabelem s rozhraním řídícího počítače. Zatím je přístupový bod vybaven originální anténou, která by měla pro naše účely postačovat, neboť se nepředpokládá spojení s robotem na velkou vzdálenost. Pokud by v budoucnu bylo třeba dosáhnout lepšího spojení na velkou vzdálenost, lze k tomuto zařízení připojit anténa s větším ziskem.

6.4 Sběrnice CAN

Propojení jednotlivých subsystémů navzájem a hlavně s řídícím počítačem zajišťuje sběrnice CAN. Tato sběrnice byla vytvořena pro automobilový průmysl, ale díky dobrým vlastnostem se prosadila také v průmyslové automatizaci. Fyzická vrstva je odolná proti rušení, neboť je realizována diferenciální sběrnicí, a sběrnice se hodí nejen pro přenos řídících a stavových signálů, které díky vhodné formě nezatěžují sběrnici, ale také náročnějších dat, neboť maximální přenosová rychlost je 1 Mbps. Jednotlivá zařízení jsou připojena na diferenciální sběrnici, kterou tvoří kroucená dvoulinka zakončená rezistory

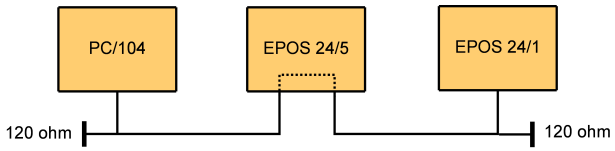
o velikosti 120 Ω. Jeden vodič sběrnice je označen jako CAN_low a druhý jako CAN_high.

K připojení na sběrnici jsou třeba následující prvky:

Mikroprocesor který využívá sběrnici ke komunikaci. Posílá data na sběrnici a přijatá data zpracovává.

Řadič sběrnice se stará o datovou a linkovou vrstvu komunikačního protokolu. Převádí data na rámce, zajišťuje zabezpečení proti chybám, filtruje přijaté zprávy apod. Některé dnes dostupné mikrořadiče tento řadič obsahují.

Budič sběrnice převádí logické úrovně řadiče na úrovně pro diferenciální sběrnici a opačně. Budič je součástí fyzické vrstvy.



Obrázek 6.16: Nákres propojení systémů robota sběrnicí CAN

Propojení stávajících zařízení ukazuje obrázek 6.16. Pro spojení je použit stíněný čtyřpárový kabel STP používaný pro sítě Ethernet. Vodič CAN_high má barvu oranžovou a CAN_low bílo-oranžovou. Zakončovací rezistory jsou součástí konektorů u počítače PC/104 a u jednotky EPOS 24/1, která řídí směrové natáčení kola.

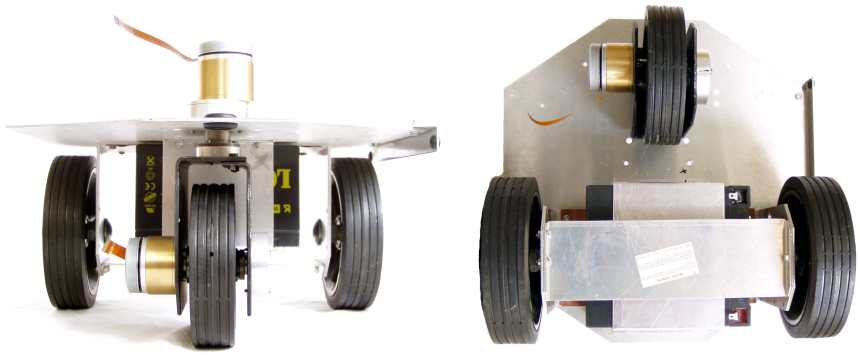
6.5 Vstupy a výstupy

Řídící systém zatím není vybaven samostatnou jednotkou vstupů a výstupů. Volnými vstupy a výstupy disponují obě řídící jednotky motorů EPOS, jak bylo zmíněno v kapitole o nich. Jednoduché senzory, případně spínací obvody, lze připojit přímo k nim. V budoucnu by samostatná jednotka byla výhodná, neboť by umožňovala předzpracování signálů z čidel, případně registraci krátkých pulzů, které nemusí řídící počítač detekovat. K tomuto účelu lze využít zmíněné mikrokontroléry vybavené řadičem pro sběrnici CAN. Pro pouhé rozšíření počtu vstupů a výstupů robotu lze využít také profesionální moduly připojitelné na sběrnici CAN například PCAN-MicroMod.

Kapitola 7

Mechanika

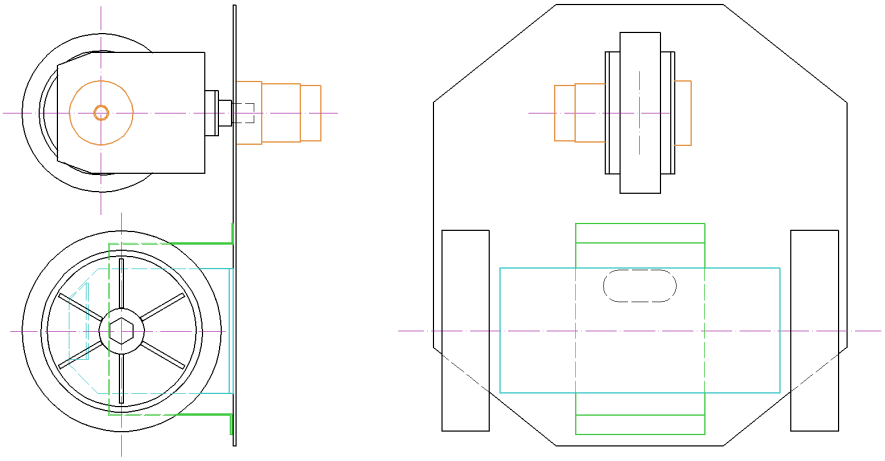
Mechanická konstrukce robotu se vyvíjela po celou dobu naší práce a představovala větší objem prací, než jsme předpokládali. Návrh jsme museli upravovat a upřesňovat spolu s tím, jak se vyvíjela koncepce robotu. Během práce se objevily nedostatky původní mechaniky, které jsme následně odstraňovali. Byly také problémy spojené s umístěním nových komponent. Mechanické řešení velmi úzce souvisí s použitím ostatního vybavení, takže nelze dobře řešit mechanickou konstrukci, pokud není dokončený návrh vybavení robotu, a mnohdy se s řešením musí počkat na dobu, kdy jsou k dispozici komponenty fyzicky. Například návrh upevnění pohonů se několikrát přepracoval spolu s tím, jak se vyvíjel výběr pohonů, a součástky pro realizaci pohonů se navrhovaly a vyráběly až po dodání motorů. Konečná podoba mechanické části vznikla až v poslední fázi práce.



Obrázek 7.1: Nový podvozek

Z originální mechanické konstrukce zůstaly jen základové desky, stěny těla robotu, otočná deska hlavy robotu a upevnění zadních koleček. O důvodech výměny ostatních částí jsem se zmínil v kapitole o původním robotu.

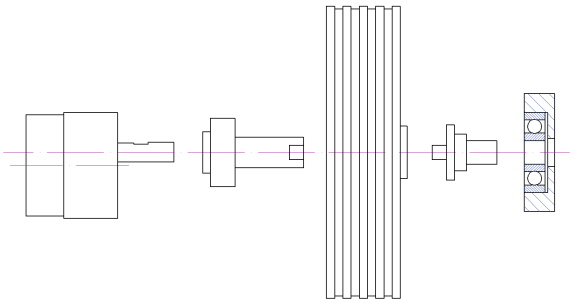
7.1 Podvozek



Obrázek 7.2: Nákres celého nového podvozku

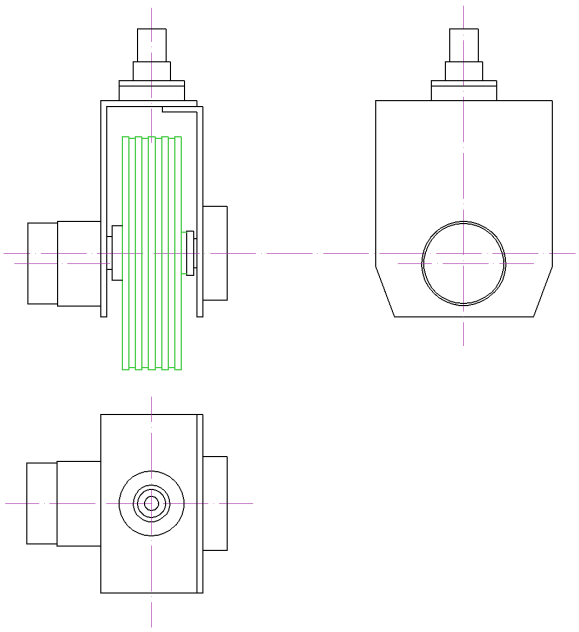
Na podvozek jsme se během úprav soustředili nejvíce. Je základem pro další práci na robotu, která již bude pravděpodobně probíhat na těle a na hlavě robotu. Podvozek nejen umožňuje pohyb robotu po zemi, ale navíc je důležitý pro stabilitu robotu. Do prostoru podvozku jsme chtěli umístit oba olověné akumulátory. Nezabírají tak užitečné místo v těle robotu a navíc snižují těžiště a robot je stabilnější. Do původního prostoru mezi koly se ale akumulátory nevešly a tak byl tento prostor upraven. Oba akumulátory jsou připevněny pomocí odnímatelného plechu k základové desce.

7.1.1 Přední hnací kolo



Obrázek 7.3: Nákres sestavení součástek na ose hnacího kola

Narozdíl od původní konstrukce je hřídel předního kola uložena dvoubodově, jak můžete vidět na obrázku 7.3. Na jedné straně se využívá ložiska, které je v převodovce a na druhé straně je hřídel uložena v radiálním ložisku. Převodovka má v katalogu uvedené dovolené radiální zatížení 180 N 10 mm od své stěny. Hřídel hnacího kola je dvoudílný se závitovým spojem zajištěným z boku kolíčkem.

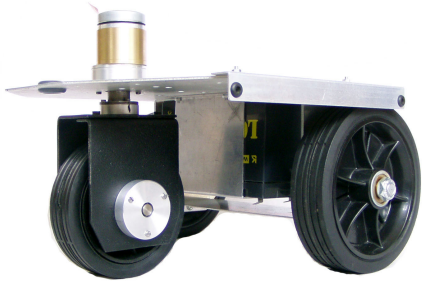


Obrázek 7.4: Nákres dílu hnacího kola

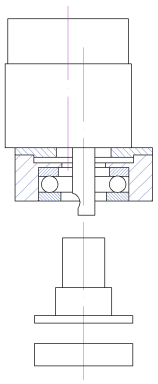
Převodovka s motorem a ložisko jsou přišroubovány ke dvěma plechovým profilům, které nesou hnací kolo. Profil nemůže být vyroben z jednoho kusu, neboť by pak celá sestava byla nerozebíratelná. Oba profily jsou k sobě přišroubovány. Nákres sestaveného dílu, který nese hnací kolo je vidět na obrázku 7.4. Na obrázku je nahoře vidět vodící hřídel, která slouží pro připojení k motoru směrově natáčející díl hnacího kola.

7.1.2 Směrové natáčení předního kola

K profilu, který nese hnací kolo, je přišroubována přes podložku vodící hřídel, která prochází axiálním ložiskem, opírá se o něj a je připevněna k motoru směrového natáčení šroubem, který se zatahuje na vybrání v hřídeli. Jednotlivé díly jsou na obrázku 7.6. Převodovka má dovolené axiální zatížení 60 N. Hmotnost robotu je sice soustředěna na zadní kola, ale přidané axiální ložisko zmenšuje zatížení převodovky. Po sestavení se ukázalo, že zmíněný šroub se



Obrázek 7.5: Podvozek s částí pro směrové natáčení hnacího kola.



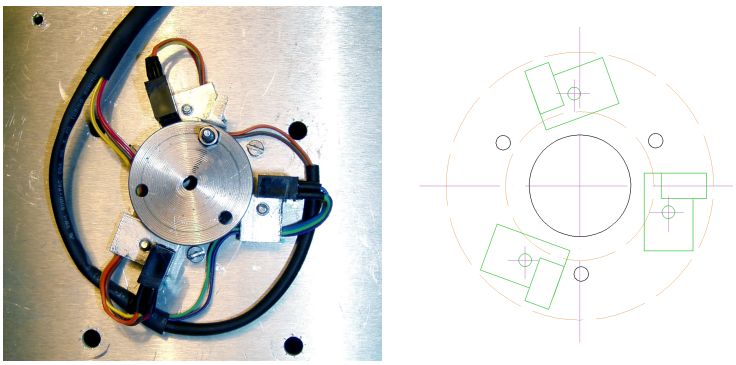
Obrázek 7.6: Nákres součástek na ose směrového natáčení

při záběru povoluje a vzniká vůle. Vodící hřídel je třeba ještě upravit, například spojení zajistit ještě kolíčkem.

7.1.3 Optické závory

Aby bylo možné určit absolutní polohu směrového natočení předního kola, musíme pohon vybavit referenčním snímačem, jehož poloha bude řídícímu systému známa. Řídící jednotky motorů EPOS umožňují připojit jak referenční snímač, tak také limitní spínače, které omezují pohyb do určitého rozsahu. Omezení směrového natáčení je velmi důležité, protože při velkém natočení může dojít k utržení kabelů, které vedou k motoru hnacího kola. Další důvod použití limitního spínače je algoritmus vyhledávání referenční polohy, který ho vyžaduje.

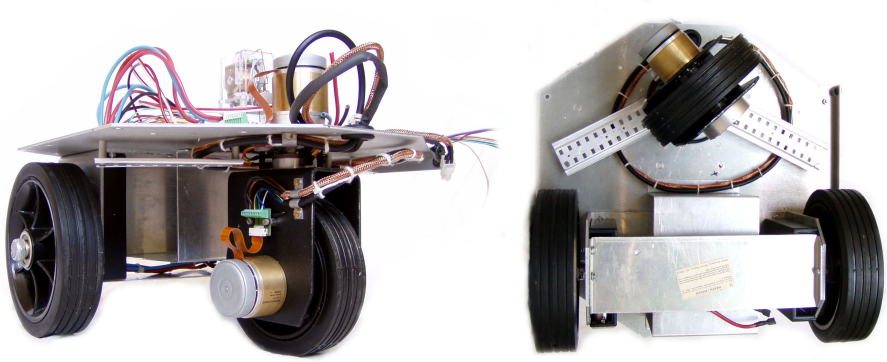
Jako limitní i referenční snímače jsou použity optické závory. Jsou upevněny na hliníkových kvádrech, které jsou přišroubovány k základové desce. Limitní snímače svírají úhel 220 °, což je experimentálně vyzkoušený úhel, kdy nedojde k namáhání kabelů a dalšího příslušenství. Při montáži jsem



Obrázek 7.7: Umístění optických závor

použil přímé přenesení pozic držáků optických závor z výkresu v AutoCADu na základovou desku. Jako clonka pro optické závory slouží plíšek uchycený pod díl procházející axiálním ložiskem. Uspořádání je vidět na obrázku 7.7.

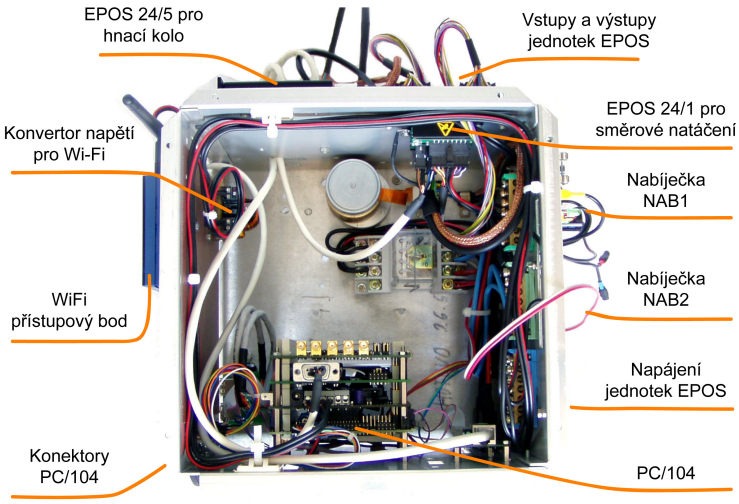
7.1.4 Vedení kabelů k hnacímu kolu



Obrázek 7.8: Vedení kabelů k hnacímu kolu

Vedení kabelů od motoru hnacího kola musí umožňovat volně směrové natáčení kola v daném rozsahu. Kabely jdou od motorů smyčkou okolo osy směrového natáčení a pak průchodkou v základové desce. Aby kabely nevisely dolů, jsou vedeny v držácích, které umožňují jejich pohyb při změnách natočení kola a zároveň je udržují poblíž základové desky. Na fotografiích 7.8 si můžete vedení prohlédnout. V budoucnu by bylo dobré na motor umístit kryt chránící plochý kabel vedoucí z motoru do svorkovnice.

7.2 Tělo



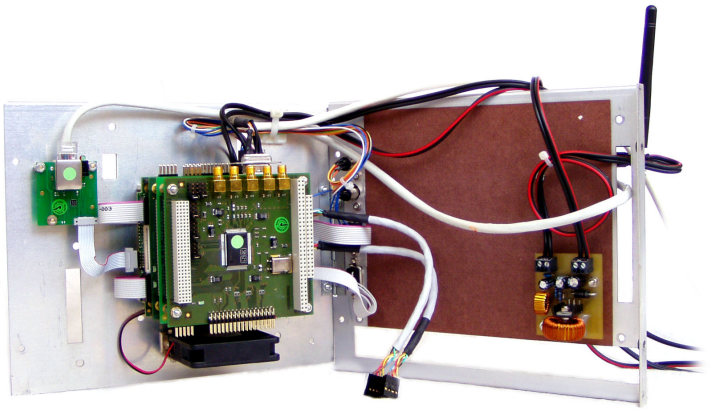
Obrázek 7.9: Těla robotu s popisem - pohled shora

Na těle robotu se žádné zásadní změny nedělaly. Většina prací se týkala umísťování součástí systému. Při umísťování každé komponenty je třeba brát zřetel na přístupnost, a to zvláště k ovládacím prvkům a konektorům, také na viditelnost indikačních prvků. Je třeba myslet na chlazení a způsob připojení komponenty, aby byla blízko k příbuzným zařízením. Zároveň se musí brát ohled na komponenty, které ještě umístěny nejsou, aby se vešly do zbylého místa. Musíme také nechat volný prostor pro komponenty, které budou přidány v rámci následujících prací.

Při umísťování jsem se snažil vyhradit každou stěnu k nějakému účelu. Konkrétní rozmístění komponent si můžete prohlédnout na fotografii 7.9. Fotografie byla pořízena během práce, proto na ní některá zařízení chybí, jako například nabíječka NAB2 nebo ochrana pro jednotky EPOS.

7.2.1 Zadní stěna

Tato stěna je upevněna na pantech a díky ní je možné se dostat do vnitřku robotu. Na stěnu byl umístěn řídící počítač PC/104. Umístění na výklopné stěně je výhodné, neboť je k počítači umožněn dobrý přístup, například je možné vyjmutí paměťové karty nebo přepojování nastavovacích propojek. Navíc je počítač relativně objemný a pokud by byl na pevné stěně, snižoval by přístupnost k ostatním zařízením uvnitř těla robotu. Desky počítače jsou ve



Obrázek 7.10: Pohled na zadní a levou stěnu robotu zevnitř

vertikální poloze pro lepší obtékání vzduchem. Protože se počítač v provozu zahřívá, umístil jsem pod něj ještě ventilátor. Ventilátor je na 12 V, ale je připojen na 5 V pro snížení hluku. Napájení poskytuje spínaný zdroj PC/104.

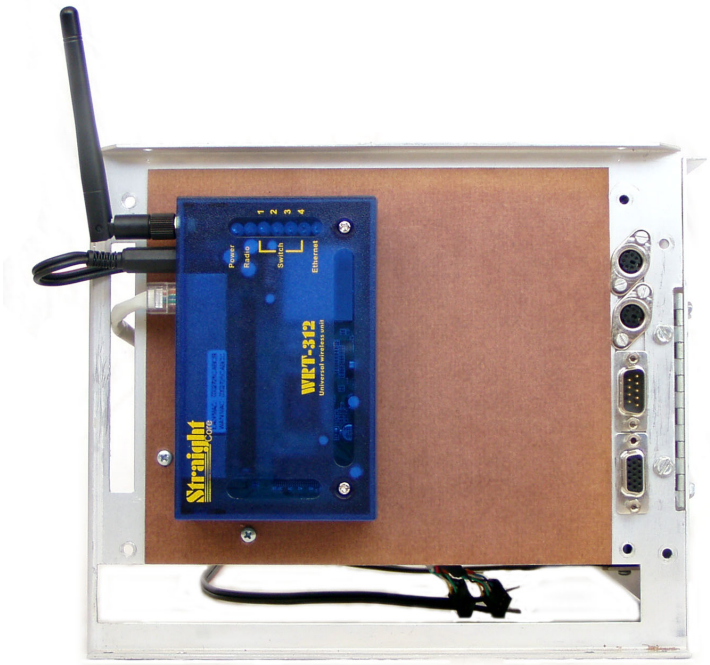
Na zadní stěně je rovněž umístěn konektor sloužící pro připojení Ethernet k PC/104. Druhá strana zůstává nevyužitá a v budoucnu ji lze použít na lehké obvody.

7.2.2 Levá stěna

Stěna je označena jako levá ve směru jízdy vpřed. Na této stěně je umístěn přístupový bod Wi-Fi a obvod, který mu zajišťuje napájení. U hrany jsou připevněny konektory pro připojení periferií k počítači PC/104 jako monitoru, klávesnice, myši. V dolní části stěny je otvor, kterým se lze dostat do vnitřku robotu a hlavně jsou za ním upevněny konektory USB připojené k PC/104. Stěnu lze v budoucnu použít například pro umístění dalších systémů připojených k PC/104.

7.2.3 Přední stěna

Přední stěna slouží pro systémy řídící pohony. Na vnitřní straně je jednotka EPOS 24/1 připojená k motoru, který pohání směrové natáčení kola. Nastavovací přepínače DIP adresy CAN jsou přístupné, zároveň je vidět na indikační LED. Na vnější straně je řídící jednotka EPOS 24/5 připojená k motoru hnacího kola. Na vnější straně jsou také svorkovnice, kde jsou přístupné vstupy a výstupy jednotek EPOS a pod svorkovnicí je univerzální



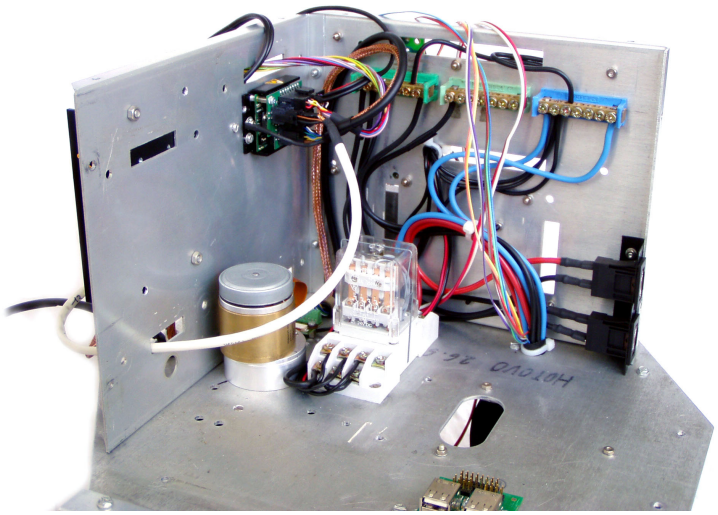
Obrázek 7.11: Levá stěna robotu zvenku

plošný spoj pro realizaci jednoduchých obvodů souvisejících s rozhraním jednotek, například omezovací rezistory, napěťové děliče pro analogové vstupy a silové spínače.

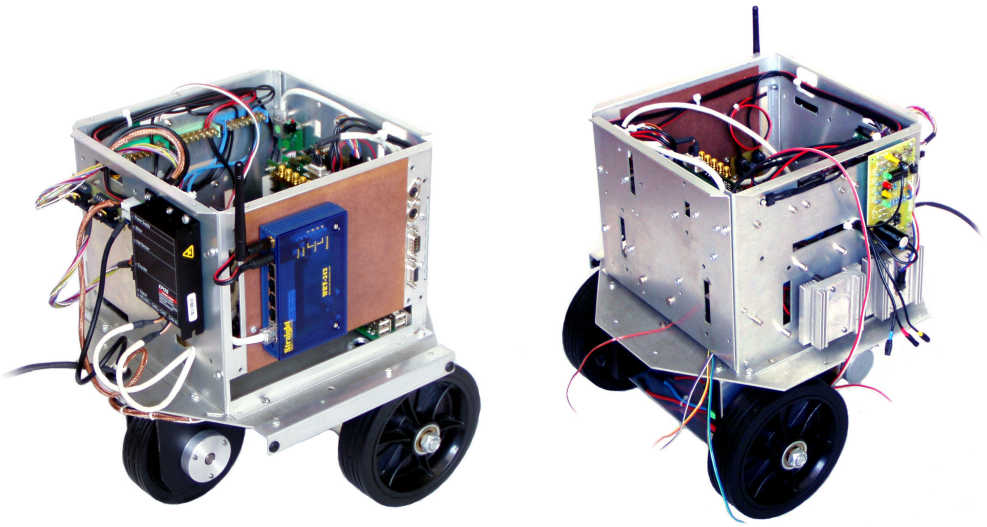
7.2.4 Pravá stěna

Tuto stěnu jsem vyhradil pro komponenty, které se týkají napájení. Zvenku jsou umístěny nabíječky NAB1 a NAB2. Pod každou z nich je chladič regulačního tranzistoru, který není umístěn na desce plošných spojů, ale je pomocí plochých vodičů vyveden na chladič. Tranzistor není od chladiče odizolovaný kvůli dobrému přenosu tepla, proto je celý chladič přišroubován na polyamidových distančních sloupkách. Při spojení chladiče s kostrou by došlo ke zkratu. Na vnější straně je také obvod poskytující napájení řídícím jednotkám EPOS a k němu příslušející chladič tranzistorů. V horní části je umístěna dioda chránící robot před přepólováním. Je izolovaná slídovou podložkou od kostry robotu.

Na vnitřní straně se nacházejí také můstky pro rozvod napájení a na krajní hraně u dvířek dole je plech, ve kterém jsou držáky hlavních pojistek.



Obrázek 7.12: Pohled na přední a pravou stěnu robotu zevnitř



Obrázek 7.13: Pohled na robot z boku

Kapitola 8

Model řízené soustavy

8.1 Směrové natáčení kola

8.1.1 Fyzikální model dynamiky

Motor, převodovka a celý díl spodního kola tvoří rotační soustavu. Každé rotující těleso má moment setrvačnosti J, který vyvozuje moment M_J úměrný úhlovému zrychlení ε. Moment působí proti momentu, který těleso roztáčí, případně zpomaluje.

$$M_J = J \cdot \varepsilon \tag{8.1}$$

Viskózní tření, které se může vyskytnout například v ložiskách, je přímo úměrné úhlové rychlosti ω. Koeficient této úměrnosti označme k_v. Moment, který tření vyvozuje je:

$$M_v = k_v \cdot \omega \tag{8.2}$$

Protože hnací kolo stojí na podložce, působí na soustavu rovněž suché neboli Coulombovo tření. Brzdná síla F_t je při přímočarém pohybu tělesa úměrná normálové síle F_n, kterou působí těleso na podložku. Pokud je podložka vodorovná, je velikost normálové síly shodná s tíhovou silou a platí tedy $F_n = m \cdot g$, kde m je hmotnost tělesa a g gravitační zrychlení. Koeficient suchého tření se označuje μ a při větších rychlostech se může jeho velikost měnit.

$$F_t = \mu \cdot F_n \tag{8.3}$$

V našem případě nejde o přímočarý pohyb, ale o rotační. Tření, které může být nejen mezi podložkou a hnacím kolem, ale i v uložení, způsobuje

brzdný moment. Funkce není lineární, neboť moment mění svoje znaménko podle smyslu otáčení.

$$M_t = \mu_{rot} \cdot F_n \cdot \mathrm{sgn}(\omega) \tag{8.4}$$

Soustavu roztáčí moment M_h vyvozený magnetickým polem v motoru. Tento moment je u elektronicky komutovaných motorů přímo úměrný velikosti budícího proudu i. Konstanta úměrnosti je k_m, takže platí:

$$M_h = k_m \cdot i \tag{8.5}$$

Všechny momenty působící na soustavu musí být v rovnováze, takže platí:

$$M_J + M_v + M_t = M_h \tag{8.6}$$

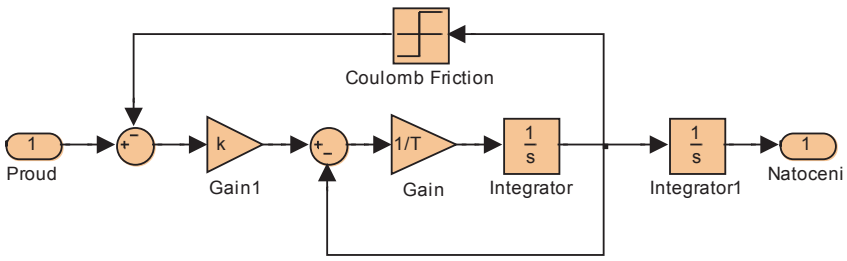
$$J \cdot \varepsilon + k_v \cdot \omega + \mu_{rot} F_n \cdot \mathrm{sgn}(\omega) = k_m \cdot i \tag{8.7}$$

$$J \cdot \frac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}t^2} + k_v \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = k_m \cdot i - \mu_{rot} \cdot F_n \cdot \mathrm{sgn}\left(\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}\right) \tag{8.8}$$

$$T \cdot \frac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}t^2} + \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = k \cdot i - f_t(\omega) \tag{8.9}$$

Rovnici rovnováhy jsme upravili tak, že jsme dosadili uvedené vztahy pro jednotlivé momenty a nahradili úhlovou rychlost a zrychlení derivacemi úhlového natočení φ, tím jsme získali diferenciální rovnici. Jak vidíme z poslední rovnice, soustava směrového natáčení kola je astatická a má zpoždění prvního řádu. Nebudeme-li uvažovat vliv suchého tření, přenos soustavy v Laplaceově transformaci vypadá takto:

$$F(s) = \frac{k}{s \cdot (T \cdot s + 1)} \tag{8.10}$$



Obrázek 8.1: Simulační schéma fyzikálního modelu soustavy natáčení v programu Simulink

Vzhledem k tomu, že suché tření je nelineární funkcí úhlových otáček, nemůžeme jej do přenosu zahrnout. Celou soustavu můžeme modelovat tak, že vytvoříme pomocný model soustavy prvního řádu, která má na vstupu budící proud a na výstupu úhlové otáčky. Výstup stačí vést přes integrátor, na jehož výstupu dostaneme úhlové natočení. Před soustavu zařadíme rozdílový člen, který bude od vstupního proudu odečítat proud odpovídající suchému tření. Tuto hodnotu dostaneme samostatnou funkcí, která má na svém vstupu otáčky soustavy. Model je vidět na obrázku 8.1.

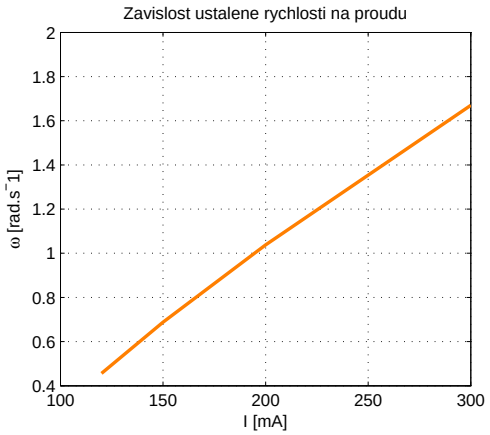
Model obsahuje jedinou nelinearitu, a tou je suché tření. Skutečná soustava bude mít jistě nelinearit víc, například: vůli v převodovce, nelineární koeficienty tření nebo převodu proudu na moment. Je možné, že ve skutečné soustavě jsou další zpožďující prvky, se kterými nebylo počítáno.

8.1.2 Identifikace parametrů modelu

Číselné hodnoty parametrů modelu soustavy lze určit postupně od jednotlivých koeficientů, které vystupují ve vztazích pro působící momenty, a skládat je až k parametrům soustavy. Některé, jako například hmotnost robotu, není těžké určit. Momenty setrvačnosti motoru a převodovky jsou uvedeny v katalogových listech těchto součástí, ale moment setrvačnosti vyrobených částí by se musel vypočítat nebo změřit. Úspěšnost tohoto postupu závisí na tom, že všechny potřebné koeficienty zjistíme buď ze specifikací nebo samostatným měřením.

Parametry můžeme také určit z přechodové charakteristiky soustavy, kterou se budeme snažit aproximovat. Tento postup jsem použil pro identifikaci parametrů soustavy. K měření jsem využil ovládací program k řídícím jednotkám motorů EPOS UserInterface, který umožňuje záznam různých veličin a zaznamenané hodnoty zobrazuje nebo exportuje do textového souboru. Získaná data jsem zpracoval pomocí programu Matlab. Na motor jsem přivedl skok budícího proudu, který regulovala jednotka provozovaná v režimu konstantního proudu.

Velikost tohoto skoku jsem volil v rozmezí proudu, který uvede směrové natáčení do pohybu, což je proud větší než 100 mA, a maximálního trvalého proudu asi 500 mA, který je určený dovoleným momentem na výstupu převodovky. Při měření jsem musel využít jen omezeného rozsahu natáčení, aby nedošlo k utržení kabelů, které vedou k motoru hnacího kola. Závislost ustálených otáček na velikosti budícího proudu je vidět na obrázku 8.2. Tato závislost určuje velikost zesílení k v přenosu. Zesílení může být určeno při aproximaci přechodové charakteristiky, ale vzhledem k tomu, že přechodová charakteristika je změřena pro relativně krátký čas, mohli bychom ji úspěšně aproximovat přechodovou charakteristikou soustavy, která má větší zesílení.



Obrázek 8.2: Závislost ustálené úhlové rychlosti natáčení na budícím proudu

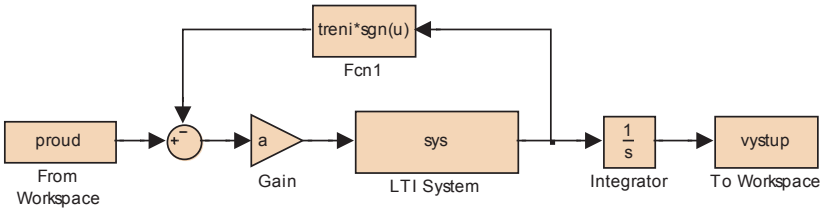
To by ovšem neodpovídalo skutečné soustavě, proto jsem toto zesílení určil samostatně.

K aproximaci přechodové charakteristiky jsem využil program Matlab. Aproximační funkcí byla přechodová charakteristika soustavy prvního řádu s astatismem prvního řádu, kterou by měla být i skutečná soustava, podle odvození fyzikálního modelu. Matlab hledal časovou konstantu iteračně pomocí minimalizace kritéria přiléhavosti obou funkcí. Kritériem přiléhavosti byl součet kvadrátů odchylek obou funkcí. Pro iterační hledání minima jsem použil vestavěnou funkci `fminsearch`. Aproximace soustavou prvního řádu neměla dobré výsledky, proto jsem se rozhodl aproximovat soustavou druhého řádu. Je možné, že skutečná soustava opravdu obsahuje další zpožďující člen, který jsem neuvažoval. Přenos soustavy byl tedy:

$$F(s) = \frac{k}{s \cdot (s \cdot T_1 + 1) \cdot (s \cdot T_2 + 1)} \tag{8.11}$$

Aproximací jsem získal číselné hodnoty obou časových konstant, čímž jsem určil přenos soustavy, která má na vstupu daný skok proudu a na výstupu stejný průběh úhlového natočení jako skutečná soustava směrově natáčející kolo. Tento přenos ale nezahrnoval vliv suchého tření, takže při vypnutí proudu úhlová rychlost klesala stejně rychle jako při náběhu. Ve skutečnosti klesá právě vlivem tření rychleji. Model jsem tedy doplnil ještě o suché tření, a sice tak, že jsem sestavil simulační obvod v programu Simulink. Obvod je vidět na obrázku 8.3.

Obvod obsahuje blok *sys*, který simuluje soustavu s daným přenosem. V našem případě je to tedy soustava druhého řádu, ale bez astatismu. Astatismus je simulován samostatným integrátorem, to proto, aby byla jednoduše



Obrázek 8.3: Simulační schéma modelu soustavy natáčení v programu Simulink

dostupná rychlost, neboť podle jejího směru se určuje směr třecí síly. Třecí síla je simulována blokem realizujícím funkci $f(u)$, kde u je vstupní signál a I_t konstanta určující velikost proudu, který je ekvivalentní velikosti třecí síly.

$$f(u) = I_t \cdot \mathrm{sgn}(u) \tag{8.12}$$

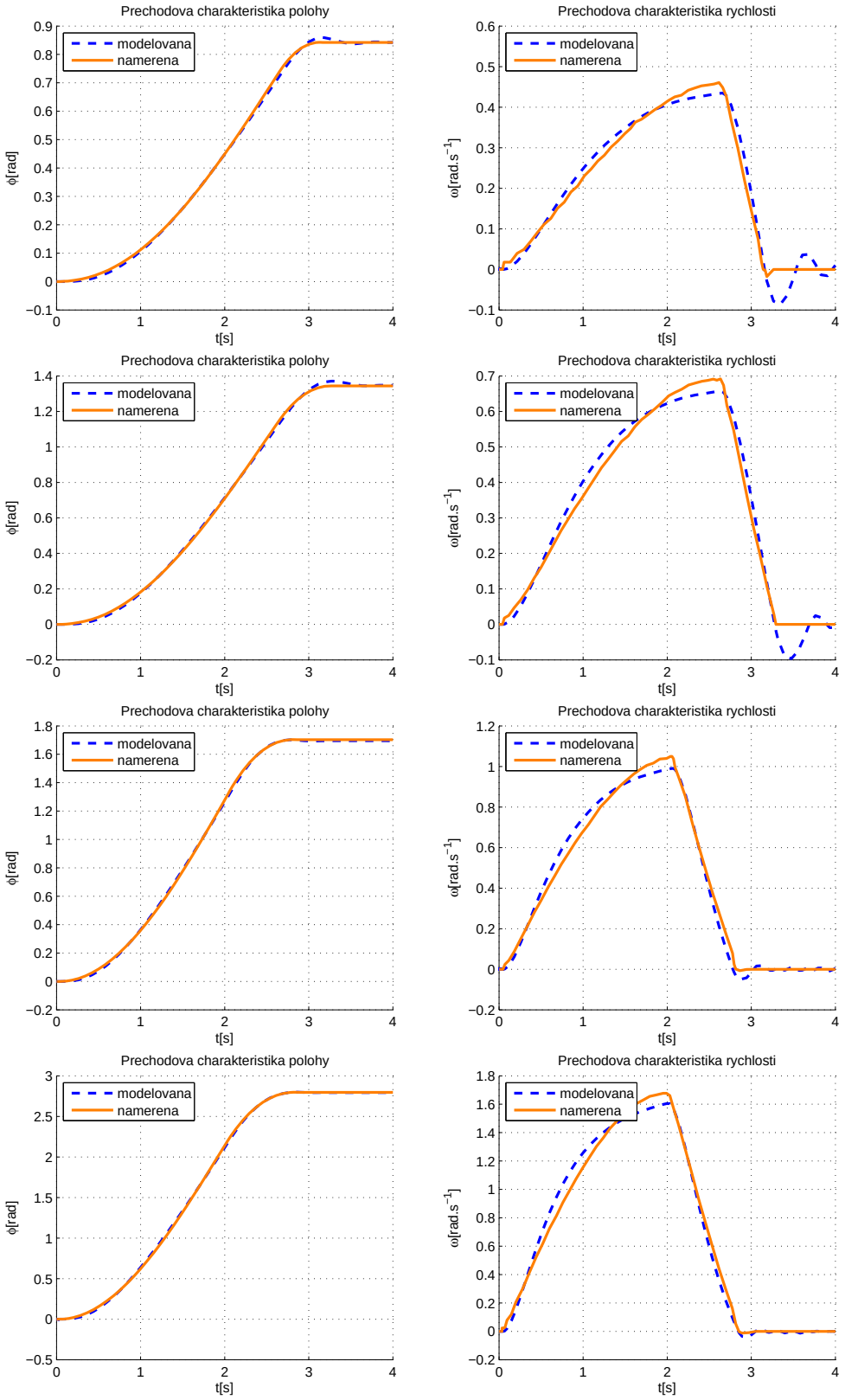
Velikost proudu I_t byla určena iteračně tak, aby křivka namodelované soustavy a změřená křivka přiléhaly. Jak vidíme v simulačním obvodu na obrázku 8.3, je zařazen také proporcionální člen se zesílením a, který zajišťuje, aby po odečtení proudu o velikosti ekvivalentní suchému tření zůstaly ustálené otáčky stejné. Při velikosti vstupního skoku I a proudu nahrazujícím tření I_t je zesílení:

$$a = \frac{I}{I - I_t} \tag{8.13}$$

proud	**zesílení** k	**čas. konst.** T_1	**čas. konst.** T_2	**tření** I_t
120 mA	$3{,}8 \cdot 10^{-3}$	0,51 s	0,51 s	90 mA
150 mA	$4{,}6 \cdot 10^{-3}$	0,40 s	0,56 s	90 mA
200 mA	$5{,}2 \cdot 10^{-3}$	0,18 s	0,57 s	75 mA
300 mA	$5{,}6 \cdot 10^{-3}$	0,16 s	0,55 s	90 mA

Tabulka 8.1: Parametry modelu soustavy natáčení pro různé vstupní proudy

Porovnání chování skutečné a namodelované soustavy si můžete prohlédnout na obrázku 8.4.



Obrázek 8.4: Přechodové charakteristiky směrového natáčení pro proud 120 mA, 150 mA, 200 mA a 300 mA (odshora)

Jedná se o část přechodové charakteristiky. Vstupní skok budícího proudu trval omezenou dobu, takže na obrázcích je vidět jak vzestupná, tak sestupná hrana úhlové rychlosti. Můžeme si všimnout jejich různého sklonu, který je způsobený působením suchého tření. Zakmitání modelu soustavy po spádové hraně, které je zřetelné při budícím proudu 120 mA a 150 mA, je pravděpodobně způsobeno nedokonalostí simulace suchého tření.

8.1.3 Nastavení regulátoru

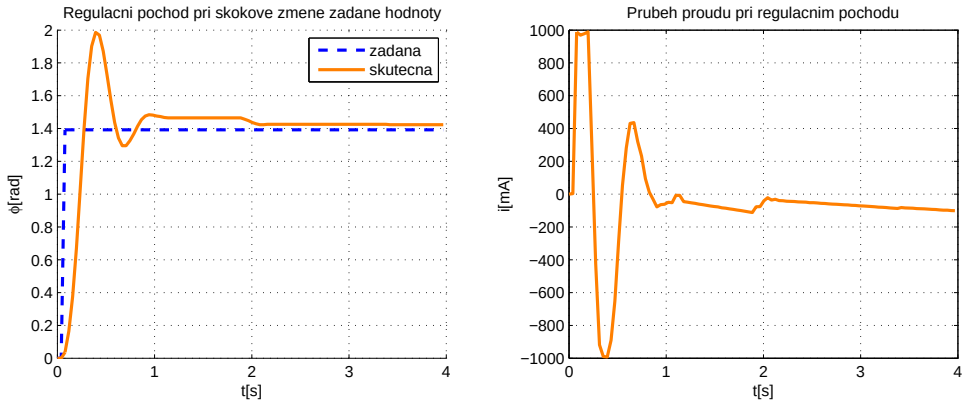
Řídící jednotka motorů obsahuje regulátor proudu, polohy a rychlosti. Regulátory proudu a rychlosti mají složky PI a regulátor polohy PID. Jak bylo zmíněno v sekci popisující jednotky EPOS, regulace polohy a rychlosti je dvousmyčková, kde vnitřní smyčka je regulace proudu. Nastavení regulátoru proudu by tedy mělo předcházet nastavení zbylých regulátorů. V dokumentaci k jednotkám jsem nenalezl předpisy, podle kterých se řídí velikost regulačního zásahu. Kvůli tomu, a také kvůli nedostatku času, jsem se rozhodl nastavit hodnoty regulátorů empiricky. Jednotce se nastavují zesílení jednotlivých složek. Jednotka umožňuje také automatické ladění konstant regulátorů. Tento postup ale není pro elektronicky komutované motory bez enkodéru úspěšný.

Regulační pochod smyčky budícího proudu byl dobrý s továrním nastavením regulátoru. I při změně konstant proud dosáhl bez překmitu žádané hodnoty v časovém intervalu, který dokázal záznamník průběhu rozlišit při nejkratším měřícím intervalu.

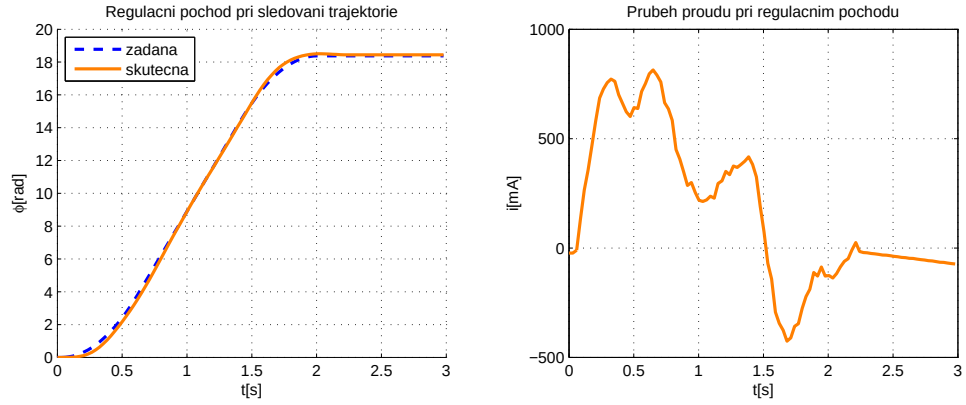
Zbývající regulátory jsem nastavil tak, že jsem zkoušel chování regulačního obvodu s různě nastaveným regulátorem a snažil se najít optimální hodnoty. Integrační složka působila nestabilitu i při relativně malém zesílení, proto jsem ji zmenšil na minimum. Při regulaci polohy není teoreticky I složka třeba, jelikož se jedná o astatickou soustavu, takže obvod s regulátorem bez I složky nemá trvalou regulační odchylku. Díky přítomnosti suchého tření regulátor bez I složky nedosáhne nulové regulační odchylky, proto jsem nastavil malé zesílení složky I.

Derivační složka obecně regulační pochod stabilizuje. Její nevýhodou je, že působí velkými pulzy při skokových změnách žádané hodnoty. Snažil jsem se především o dobré nastavení regulátoru polohy, který bude v praxi využíván nejvíce. Optimalizoval jsem regulační pochod při sledování trajektorie, neboť tento režim by měl být využíván nadřízeným systémem, jak bylo zmíněno v sekci o jednotkách EPOS. Zkusil jsem chování i při skokové změně žádané hodnoty.

Chování regulátoru si můžete prohlédnout na obrázcích 8.5 a 8.6. Regulátor dokáže sledovat trajektorie téměř bez odchylky. Průběh žádané hodnoty



Obrázek 8.5: Průběh regulačního pochodu natáčení pro skok žádané hodnoty



Obrázek 8.6: Průběh regulačního pochodu natáčení při sledování trajektorie

je výstupem generátoru trajektorie, který má nastaven lichoběžníkový profil rychlosti s maximální rychlostí motoru 6000 rpm a zrychlením, respektive odrychlením 10000 rpm.s^{-1}. V praxi bude používáno jistě menších rychlostí i zrychlení, proto lze předpokládat ještě lepší regulační pochod.

Parametry, které jsou vhodné vzhledem k fyzikálním vlastnostem soustavy, jsou maximální rychlost profilu 5000 rpm a zrychlení 3000 rpm.s^{-1}..

proud		**poloha**			**rychlost**	
P	I	P	I	D	P	I
500	200	200	1	1000	500	20

Tabulka 8.2: Nastavení konstant jednotlivých regulátorů natáčení

8.2 Pojezd

8.2.1 Fyzikální model dynamiky

Soustava pohonu pojezdu je podobná soustavě směrově natáčející přední kolo. Působí na ni stejné momenty, které byly zmíněny v předchozí sekci. Působící momenty se budou lišit hlavně svými koeficienty. Lze předpokládat, že moment vyvolaný suchým třením bude menší, neboť bude působit jen tření v uložení. Setrvačnost robotu při přímočarém pohybu se projevuje silou působící proti vnější síle, která se snaží robot urychlovat nebo zpomalovat. Velikost setrvačné síly je při hmotnosti m a zrychlení a:

$$F_s = m \cdot a \tag{8.14}$$

Tuto sílu můžeme při známém poloměru hnacího kola r přepočítat na moment působící na ose otáčení. Zrychlení, které vystupuje ve vztahu pro setrvačnou sílu, lze vyjádřit pomocí úhlového zrychlení.

$$M_s = r \cdot m \cdot a = r^2 \cdot m \cdot \varepsilon \tag{8.15}$$

Moment vyvolaný setrvačností robotu se přičte k momentu vyvolanému momentem setrvačnosti rotující části pohonu. V diferenciální rovnici uvedené pro předchozí pohon dojde tedy pouze ke změně koeficientů. Charakter soustavy zůstane zachovaný. Jedná se o soustavu prvního řádu s astatismem prvního řádu.

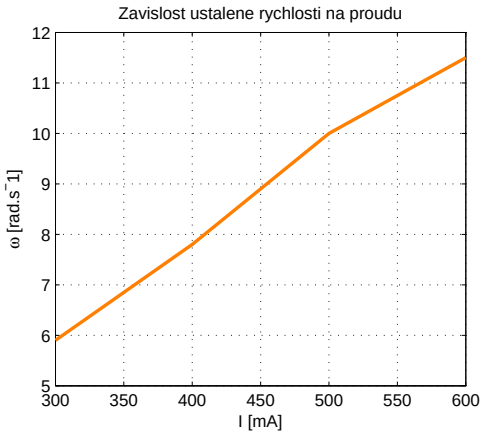
$$(J + r^2 \cdot m) \cdot \frac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}t^2} + k_v \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = k_m \cdot i - \mu_{rot} \cdot F_n \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}\right) \tag{8.16}$$

8.2.2 Identifikace parametrů modelu

Číselné hodnoty parametrů soustavy jsem určoval stejnou metodou jako v předchozím případě. Nejprve jsem změřil závislost ustálených otáček na budícím proudu. Rozsah proudu byl v tomto případě shora omezený proudem, který způsobil prokluz kola. Maximální velikost budícího proudu byla 600 mA

Z této závislosti jsem určil zesílení soustavy, které je rovno 0,02. Časovou konstantu jsem určoval opět aproximací přechodové charakteristiky. Stejně jako v předchozím případě jsem se rozhodl přejít k soustavě druhého řádu, tedy s přenosem:

$$F(s) = \frac{k}{s \cdot (s \cdot T_1 + 1) \cdot (s \cdot T_2 + 1)} \tag{8.17}$$

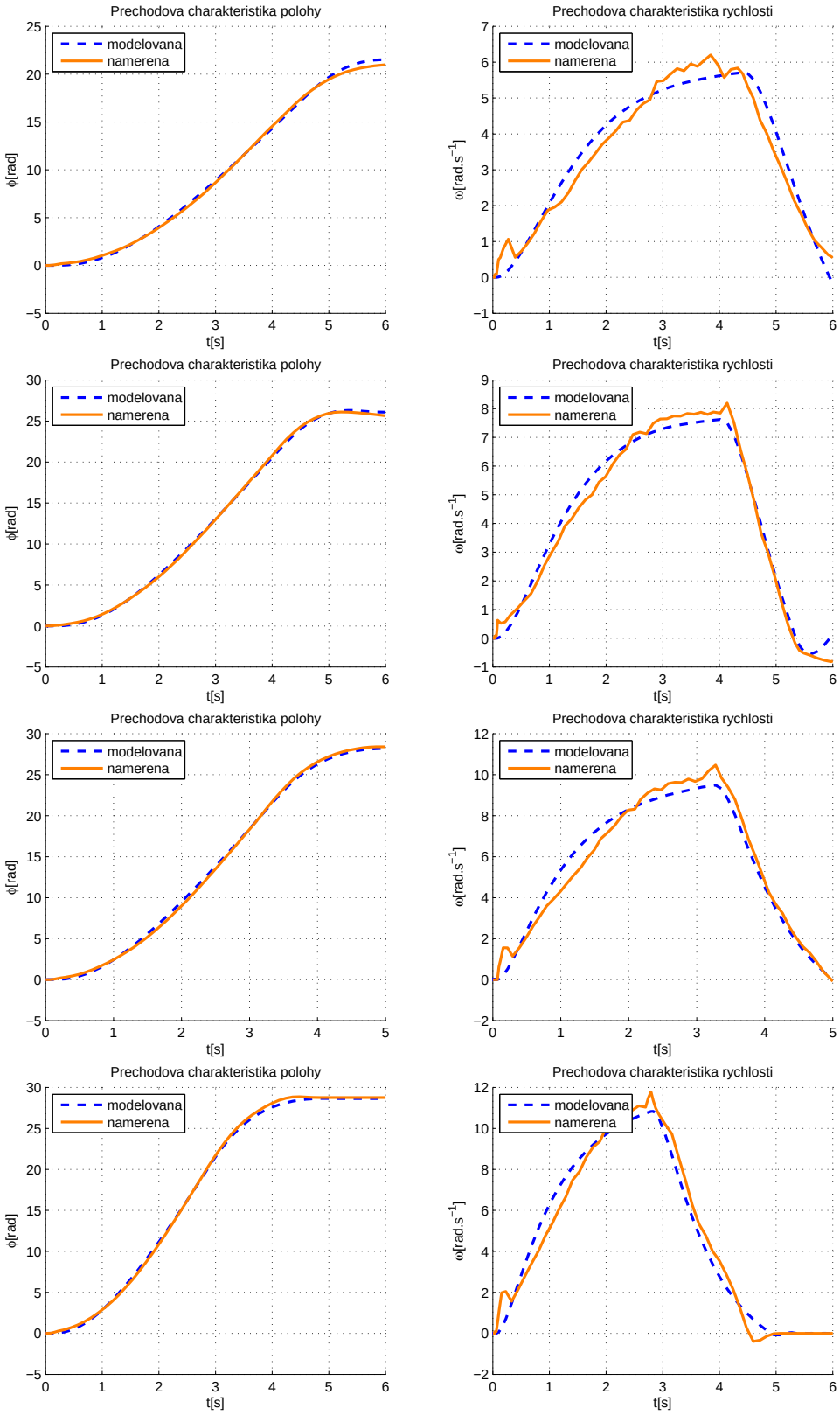


Obrázek 8.7: Závislost ustálené úhlové rychlosti pojezdu na budícím proudu

Po stanovení zesílení a časových konstant jsem určil velikost proudu, který je ekvivalentní tření, pomocí stejného simulačního obvodu a stejným způsobem jako u směrového natáčení kola.

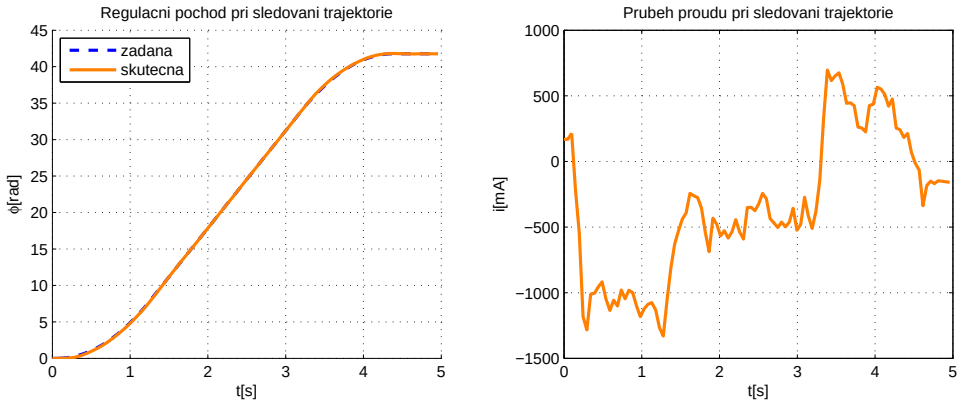
proud	**zesílení** k	**čas. konst.** T_1	**čas. konst.** T_2	**tření** I_t
300 mA	$20 \cdot 10^{-3}$	0,75 s	0,75 s	120 mA
400 mA	$20 \cdot 10^{-3}$	0,65 s	0,65 s	160 mA
500 mA	$20 \cdot 10^{-3}$	0,31 s	0,77 s	80 mA
600 mA	$20 \cdot 10^{-3}$	0,18 s	0,96 s	80 mA

Tabulka 8.3: Parametry modelu pojezdu pro různé vstupní proudy



Obrázek 8.8: Přechodové charakteristiky pojezdu pro proud 300 mA, 400 mA, 500 mA a 600 mA (odshora)

8.2.3 Nastavení regulátoru



Obrázek 8.9: Průběh regulačního pochodu pojezdu při sledování trajektorie

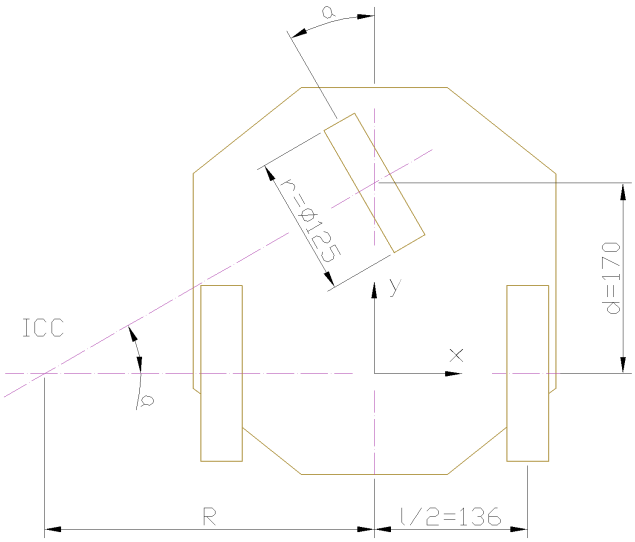
I postup nastavení regulátoru byl obdobný jako u směrového natáčení. Regulátor jsem testoval při sledování trajektorie s lichoběžníkovým profilem rychlosti, který měl parametry: maximální otáčky 6000 rpm a zrychlení 5000 rpm.s^{-1}. Otáčky odpovídají maximálním otáčkám dovoleným na vstupu převodovky a zrychlení je mezní, aby hnací kolo nepodkluzovalo. V provozu tedy nemusíme očekávat horší výsledky. Průběh regulačního pochodu je na obrázku: 8.9.

proud		**poloha**			**rychlost**	
P	I	P	I	D	P	I
1000	300	200	1	1000	1000	100

Tabulka 8.4: Nastavení konstant jednotlivých regulátorů pojezdu

8.3 Odometrický model

Obecný kolový podvozek se může při zatáčení pohybovat rotačním nebo smýkavým pohybem. Pro rotační pohyb je třeba, aby všechna kola měla společný průsečík os. Tomuto bodu se pak říká střed zakřivení, někdy označovaný jako *ICC*. Dále je nutné, aby měla kola nulovou šířku běhounu. V našem případě robot zatáčí nesmýkavým rotačním pohybem. Potom je snadné stanovit vztahy pro polohu v prostoru v závislosti na natočení předního kolečka a ujeté dráze. Toho se dá využít pro tzv. odometrické zjišťování polohy.



Obrázek 8.10: Nákres pro odometrický model

Všechny parametry důležité pro odometrický model jsou vyznačeny na obrázku 8.10. Jako referenční bod je zvolen střed spojnice zadních koleček. Souřadnice referenčního bodu spolu s natočením robotu jsou $[x, y, \varphi]$. Střed zakřivení *ICC* leží na společné ose zadních koleček, jeho poloha závisí na natočení předního kolečka α a vzdálenosti předního kolečka od zadních d.

$$R = \frac{d}{\tan(\alpha)} \tag{8.18}$$

Změna natočení robotu v prostoru $\mathrm{d}\varphi$ při ujetí vzdálenosti $\mathrm{d}s$ předním kolečkem je:

$$\mathrm{d}\varphi = \mathrm{d}s\frac{\sin(\alpha)}{d} \tag{8.19}$$

Z vypočtené změny natočení, aktuálního natočení a poloměru zakřivení lze vypočítat změnu souřadnic referenčního bodu:

$$\mathrm{d}x = -\mathrm{d}\varphi \cdot R \cdot \sin(\varphi) = -\mathrm{d}\varphi \cdot \frac{d}{\tan(\alpha)} \cdot \sin(\varphi) \tag{8.20}$$

$$\mathrm{d}y = \mathrm{d}\varphi \cdot R \cdot \sin(\varphi) = \mathrm{d}\varphi \cdot \frac{d}{\tan(\alpha)} \cdot \sin(\varphi) \tag{8.21}$$

Hodnoty souřadnic dostaneme integrací jejich změn po dráze uražené předním kolečkem. Tento způsob lokalizace je zatížen kumulativní chybou,

způsobenou hlavně občasným smykem kol. Pro lokalizaci je dobré zkombinovat více metod. Například odometrické měření doplnit ještě o senzor určující natočení robotu.

Kapitola 9

Závěr

Praktickým výsledkem mé práce je funkční základní část mobilního robotu. Vedle toho jsme s kolegou Ondřejem Šantinem zpracovali koncepci řídícího systému, tedy navrhli strukturu a vybavení jednotlivými subsystémy. Na tuto koncepci by měly navazovat další práce na robotu. Proti původnímu zadání jsme na robot umístili řídící počítač, aby byl robot schopný autonomního provozu.

V práci není podrobně rozpracováno řízení mechanické ruky, neboť se její stav ukázal jako nevyhovující a ruku rekonstruovat nebo navrhnout novou konstrukci by bylo časově náročné.

Mechanická konstrukce původní podoby robotu HERO byla upravena. Rekonstrukce se týkala hlavně podvozku, aby se stal spolehlivým základem pro další stavbu. V budoucnu je třeba ještě upravit vodící hřídel směrového natáčení tak, aby neměla vůli. Další mechanické práce jsem provedl při umísťování jednotlivých komponent.

Součástí práce byla také výměna původních pohonů, návrh a umístění nových pohonů. Jednalo se o pohon pojezdu robotu a pohon směrového natáčení předního kola. Nyní je robot vybaven bezkartáčovými motory, které jsou kompaktní a zároveň dostatečně výkonné. Pohony jsem otestoval po dokončení práce a v současné době jsou, vzhledem k váze robotu, výkonově předimenzované. Jejich řízení zajišťují inteligentní jednotky mající dostatek funkcí pro řízení počítačovým systémem. Oproti původním motorům mají lepší zpětnou vazbu polohy, takže i lepší možnost řízení a poskytují spolehlivý údaj pro odometrickou lokalizaci.

Navržený systém napájení je v provozu. Umožňuje napájení robotu z akumulátorů nebo externího zdroje, řeší kontrolované dobíjení akumulátorů a poskytuje základní ochrany proti poruchovým stavům. Pokud by bylo v budoucnu třeba odstranit lineární regulační prvky, například pro nedostatek prostoru, je možné využít navrženou variantu nabíječky pracující ve spína-

cím režimu.

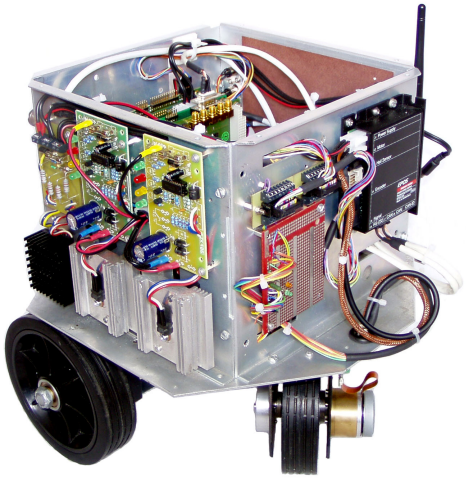
Identifikovaný dynamický model je jednoduchým přiblížením skutečné soustavě. Jeho správnost byla ověřena porovnáním chování skutečné soustavy a modelu na přechodových charakteristikách. Nastavení regulátorů nebylo optimalizováno pro skokové změny polohy, ale pro sledování trajektorie.

Robot je po skončení mé práce vybaven novými elektronicky komutovanými motory s řídícími jednotkami, které jsou propojeny sběrnicí CAN a připojeny k řídícímu počítači PC/104. Bezdrátovou komunikaci a centrální prvek sítě Ethernet na robotu zajišťuje přístupový bod Wi-Fi. Robot je napájen dvěma olověnými akumulátory a na palubě robotu jsou také dvě inteligentní nabíječky. Všechna zařízení jsou oživena. Robot je tedy připraven pro navazující práci, jejímž obsahem může být sofistikované řízení, realizace senzorického systému nebo montáž manipulátoru.

Při práci jsem získal cenné zkušenosti a nové znalosti, nejen z mého oboru. Jsem rád, že jsem měl možnost rešit úkoly této bakalářské práce, neboť se týkaly různých oblastí a práce tak byla velmi pestrá. To také díky tomu, že jsem řešení neměl jen navrhnout, ale také realizovat. Cesta od návrhu po realizaci přinesla vždy nové otázky, na keré jsem při návrhu nemyslel.

S kolegou Ondřejem Šantinem jsme přemýšleli o novém pojmenování robotu HERO, protože HERO bylo označení původního profesionálního výrobku. Náš návrh je jméno FERO, které v sobě spojuje české znění a zároveň je zkratkou pro: Faculty of electrical engineering Educational RObot.

Všem, kteří budou v práci na robotu pokračovat, přeji hodně úspěchů a hlavně obohacujících zážitků. Věřím, že i pro vás bude práce malým dobrodružstvím, stejně jako byla pro mě.



Literatura

[1] Novák, P. (2005). *Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení*. Vydavatelství BEN, Praha.

[2] Schmid, D. (2005). *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. Europa-Sobotáles, Praha

[3] Marek, J.; Stehlík, L. (2004). *Hermetické akumulátory v praxi*. INEL, Praha

[4] Hammerbauer, J. (1998). *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory - 2.vyd.*. Západočeská Univerzita, Plzeň

[5] Brož, V. (2007). *Řízení otáček motorů EC s výkony do 400 W*. Automa 2007/03, str. 2–4

[6] Savický, P. (2005). *Bakalářská práce - Mobilní robot pro výuku realtime řízení*. ČVUT, Fakulta elektrotechniky, Praha

[7] Kubeš, P.; Kyncl, Z.(1999). *Fyzika I*. ČVUT, Fakulta elektrotechniky, Praha

[8] Kulich, M.; Přeučil, L.; Štěpán, P.(2007). *Mobilní robotika - materiály k přednáškám* [online]. [2007-05-17], ⟨http://robot.felk.cvut.cz/mor/course/view.php?id=2⟩.

[9] Winkler, Z. (2005). *Odometrie* [online]. [2007-05-20], ⟨http://robotika.cz/guide/odometry/cs⟩.

[10] Slansky, M. (2006). *Ochrana proti přepětí (5-25V / 5A)* [online]. [2007-07-10], ⟨http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1732-Ochrana-proti-prepeti-5-25V—5A.html⟩.

[11] Doerr, R. (2002). *Hero Robots* [online]. [2007-06-24], ⟨http://www.robotgallery.com/robotgallery/heathkit/index.html⟩.

[12] Buchmann, I. (2005). *Battery University* [online]. [2007-05-30], ⟨http://www.batteryuniversity.com/⟩.

[13] Heath co, (1982). *Heathkit User's Manual - Hero Robot, model ET-18*.

[14] Maxon Motor ag (2006). *EPOS Firmware Specification*.

[15] Maxon Motor ag (2006). *EPOS 24/1 (24/5) Getting Started*.

[16] Maxon Motor ag (2006). *EPOS 24/1 (24/5) Hardware reference*.

[17] Texas Instruments (2007). *Datasheet, Lead-Acid Fast-Charge IC, BQ2031*.

[18] Texas Instruments (2006). *Datasheet, Sealed Lead-Acid Battery Charger, UC3906*.

[19] ON Semiconductors (2004). *Datasheet, LM2575*.

Příloha A

Zapojení konektorů jednotek EPOS

pin	signál	barva	svork.
1	Hallova sonda 1	zelená	3
2	Hallova sonda 2	černá	4
3	Hallova sonda 3	bílá	2
4	GND	žlutá	5
5	+V	modrá	1
6	stínění	černá	

Tabulka A.1: Připojení motoru pojezdu

pin	signál	barva	svork.
1	vinutí 1	černá	8
2	vinutí 2	hnědá	7
3	vinutí 3	černá	6
4	stínění	černá	

Tabulka A.2: Připojení Hallových sond pojezdu

pin	signál	barva	svork.
1	Hallova sonda 3	bílá	2
2	Hallova sonda 2	černá	4
3	vinutí 3	modrá	6
4	vinutí 1	žluto-zelená	8
5	+V	modrá	1
6	Hallova sonda 1	zelená	3
7	GND	žlutá	5
8	vinutí 2	hnědá	7

Tabulka A.3: Připojení motoru a Hallových sond směrového natáčení

pin	signál	barva
2	CAN_low	oranžovo-bílá
3	CAN_shield	černá
5	terminátor	
6	CAN_GND	hnědá
7	CAN_high	oranžová
9	terminátor	

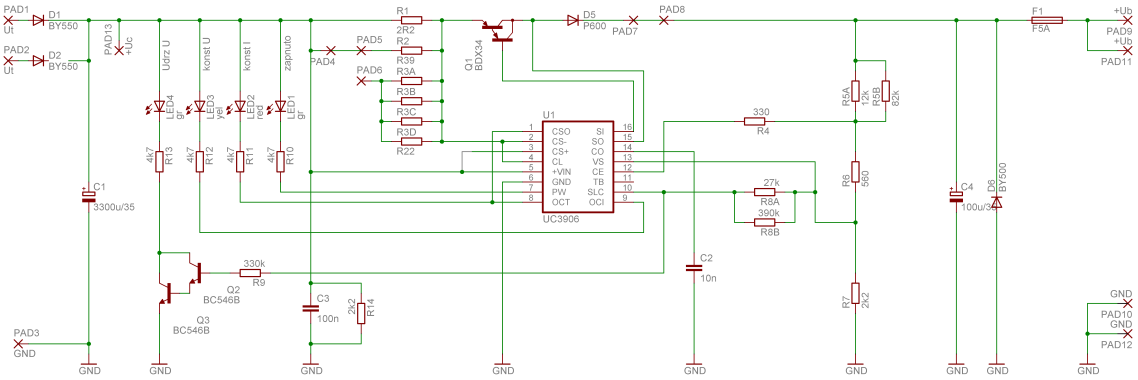
Tabulka A.4: Zapojení konektoru DSub pro sběrnici CAN na PC/104

pin	signál	barva
1	CAN_high	oranžová
2	CAN_low	oranžovo-bílá
3	CAN_GND	hnědá
4	CAN_shield	černá

Tabulka A.5: Připojení CAN k EPOS

Příloha B

Schéma nabíječky



Obrázek B.1: Shéma nabíječka NBX3906