



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## **ŘÍZENÍ POHONŮ MOBILNÍHO ROBOTU MINIDARPA**

MINIDARPA ROBOT - MOTOR CONTROLLER DESIGN

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

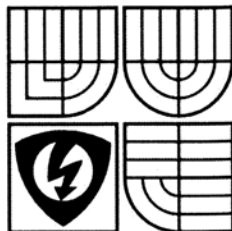
**Bc. JAROSLAV LIBRA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. LUKÁŠ KOPEČNÝ, Ph.D.**

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Kybernetika, automatizace a měření

**Student:** Bc. Jaroslav Libra

**Ročník:** 2

**ID:** 78564

**Akademický rok:** 2009/10

**NÁZEV TÉMATU:**

## Řízení pohonů mobilního robotu Minidarpa

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Navrhněte obvody pro zpětnovazební rychlostní řízení hlavních pohonů robotu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

ŽALUD, L., KOPEČNÝ, L. Teleoperated Reconnaissance Robotic System. In SSRR 2004 - IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics. Bonn - Germany, Fraunhofer-Gesellschaft. 2004. p. 1 - 6.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 24.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Kopečný

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*předseda oborové rady*



**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## Abstrakt

Hlavním úkolem této diplomové práce je navrhnout obvody pro zpětnovazební řízení hlavních pohonů robotu Minidarpa. Práce obsahuje popis řízeného pohonu mobilního robotu a teorii řízení stejnosměrného motoru. Další část práce se zabývá možnostmi návrhu řídicího modulu a jeho následným konstrukčním zpracováním. V poslední části je proveden kaskádní návrh rychlostního regulátoru s podřízenou proudovou smyčkou pomocí metod optimálního modulu a symetrického optima.

## Klíčová slova

robot, robotour, mobilní robot, autonomní robot, robotika, DARPA Grand Challenge, řízení pohonu, SS motor, regulátor, rychlostní regulátor, proudová smyčka, metoda optimálního modulu, metoda symetrického optima

## Abstract

The main task of this master's thesis is to design circuits for feedback control of the main drives Minidarpa robot. It contains the description of power-driven mobile robot control theory and the DC motor. The second part deals with the design options of the control module and its mechanical design. The last part of the proposal made cascade speed control with current loop by using optimal module and the symmetric optimum methods.

## Keywords

robot, robotour, mobile robot, autonomous robot, robotics, DARPA Grand Challenge, controls drive, DC motor, controller, speed controller, current of loop, optimal module method, symmetry optimum method

## Bibliografická citace

LIBRA, Jaroslav. *Řízení pohonů mobilního robotu Minidarpa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. s.58, 12 příloh. Vedoucí práce. Ing. Lukáš Kopečný , Ph.D.

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Řízení pohonů mobilního robotu Minidarpa jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

## Poděkování

Děkuji tímto Ing. Františku Burianovi, Ing. Lukáši Kopečnému, Ph.D., Ing. Lud'ku Žaludovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

V Brně dne :

Podpis:

## OBSAH:

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ:</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK:</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK:</b> .....	<b>11</b>
<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
1.1 Minidarpa .....	13
1.2 Robotour .....	13
<b>2. POPIS ROBOTU</b> .....	<b>14</b>
2.1 Co je robot .....	14
2.2 Robo-Kop .....	14
2.3 Popis řízeného pohonu .....	15
2.3.1 Elektromotor MAXON RE 35 .....	15
2.3.2 Planetová převodovka MAXON GP 42 C .....	16
2.3.3 Enkodér MR 500 .....	17
2.3.4 Podvozek s pohony .....	18
<b>3. TEORIE ŘÍZENÍ SS MOTORU</b> .....	<b>19</b>
3.1 PWM řízení SS motoru .....	19
3.2 H-Most .....	20
3.3 Možnosti řízení H-můstku .....	20
3.3.1 H-můstek se 3 vstupy .....	20
3.3.2 Sign-Magnitude 1 = směr velikost .....	21
3.3.3 Sign-Magnitude 2 = směr velikost .....	21
3.3.4 Locked-antiphase = střídané řízení .....	21
3.4 Výkonové tranzistory MOSFET .....	22
3.4.1 Parametry tranzistorů MOSFET .....	22
<b>4. NÁVRH MODULU ŘÍZENÍ MOTORU - V2</b> .....	<b>24</b>
4.1 Výkonový modul řízení motoru – v2 .....	24
4.2 Integrovaný h-MOST VNH3SP30-E .....	24
4.2.1 Vlastnosti IO VNH3SP30-E .....	25
4.2.2 Výhody integrovaného H-můstku .....	25

4.2.3 Nevýhody integrovaného H-můstku.....	25
4.3 Schéma zapojení modulu řízení motoru –v2.....	26
4.4 Navržený plošný spoj modulu řízení motoru –v2.....	27
4.5 Seznam použitých součástek.....	27
4.6 Výsledné provedení modulu řízení motoru –v2.....	28
4.6.1 Výhody .....	28
4.6.2 Nevýhody.....	28
<b>5. MOŽNOSTI NÁVRHU ŘÍDÍCÍHO MODULU.....</b>	<b>29</b>
5.1 Výběr vhodného mikrokontroléru.....	29
5.1.1 Mikrokontrolér ATmega32M1 .....	29
5.1.2 Signálový kontrolér Freescale 56F8322 (DSC).....	30
5.2 Výkonová část.....	31
5.2.1 Diskrétní H-MOST .....	31
5.2.2 Výhody diskrétního H-můstku .....	33
5.2.3 Nevýhody diskrétního H-můstku.....	33
5.3 Možnosti komunikace s nadřazeným systémem.....	33
5.3.1 Seriová komunikace RS232.....	33
5.3.2 Sériová sběrnice RS422 a RS485 .....	33
5.3.3 Sériová sběrnice CAN .....	33
5.4 Možnosti zpracování dat z inkrementálního enkodéru .....	34
5.4.1 Softwarové řešení pomocí mikrokontroleru .....	34
5.4.2 Kvadrurní čítač HCTL-2022.....	34
5.4.3 Kvadrurní dekodér LS7083/84-S.....	35
5.4.4 Kvadrurní čítač LS7366R-S .....	35
5.4.5 Kvadrurní dekodér IRCDEK2 .....	36
<b>6. POPIS ŘÍDÍCÍHO MODULU .....</b>	<b>37</b>
6.1 Řídící část.....	37
6.1.1 PSC – výkonový řízený kontrolér .....	37
6.1.2 ADC – analogově digitální převodník s diferenčním zesilovačem .....	38
6.2 Výkonová část.....	39
6.2.1 Diskrétní H-MOST .....	39

6.2.2 Snímací rezistory pro zpětnou proudovou vazbu .....	40
6.3 Komunikační část.....	42
6.3.1 Komunikace s nadřazeným systémem pomocí RS232.....	42
6.3.2 Komunikace s nadřazeným systémem pomocí CAN .....	42
6.4 Kvadrurní dekodér .....	43
6.5 Výsledné provedení modulu .....	43
6.5.1 Seznam použitých součástek .....	44
<b>7. NÁVRH REGULÁTORŮ.....</b>	<b>45</b>
7.1 Použité parametry .....	45
7.2 Identifikace momentu setrvačnosti pohonu .....	46
7.2.1 Moment setrvačnosti motoru přepočítaný na hřídel kola .....	46
7.2.2 Ekvivalentní moment setrvačnosti robota .....	46
7.2.3 Celkový moment setrvačnosti na kole.....	47
7.2.4 Celkový moment setrvačnosti přepočítaný na hřídel motoru.....	47
7.3 Navrh PI regulátoru proudu metodou optimálního modulu (OM).....	48
7.3.1 Blokové schéma proudové smyčky .....	48
7.3.2 Výpočet přenosu soustavy proudové smyčky .....	49
7.3.3 Návrh PI regulátoru proudu metodou optimálního modulu .....	49
7.3.4 Diskrétní přenos regulátoru proudu.....	50
7.4 Navrhnutí regulátoru otáček metodou symetrického optima (SO).....	50
7.4.1 Regulace rychlosti s podřízenou proudovou smyčkou .....	50
7.4.2 Výpočet přenosu soustavy otáčkové smyčky .....	51
7.4.3 Návrh PI regulátoru otáček metodou symetrického optima .....	51
7.4.4 Diskrétní přenos regulátoru otáček.....	51
7.5 Simulace v Simulinku.....	52
7.5.1 Podřízená proudová smyčka .....	52
<b>8. ZÁVĚR.....</b>	<b>53</b>
<b>9. SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>54</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 2.1 – Robo-Kop na soutěži Robotour 2009 .....	14
Obrázek 2.2 - DC motor MAXON RE 35.....	15
Obrázek 2.3 - Planetová převodovka MAXON .....	16
Obrázek 2.4 - Enkodér MR 500 .....	17
Obrázek 2.5 - Průběh 3-kanálového inkrementálního snímače .....	17
Obrázek 2.6 - Podvozek s pohony.....	18
Obrázek 3.1 - PWM modulace.....	19
Obrázek 3.2 - Zapojení DC motoru do H-můstku.....	20
Obrázek 4.1 - Pouzdro integrovaného H-můstku VNH3SP30-E.....	25
Obrázek 4.2 – Schéma zapojení modulu řízení motoru –v2 .....	26
Obrázek 4.3 – Modul řízení motoru – v2 .....	27
Obrázek 4.4 – Pohled na spodní část modulu řízení motoru –v2.....	28
Obrázek 5.1 – Pouzdro kvadrurního čítače HCTL-2022 .....	34
Obrázek 5.2 – Typické schéma zapojení IO LS7083/84 s enkodérem .....	35
Obrázek 5.3 – Typické schéma zapojení k mikrokontroleru .....	36
Obrázek 5.4 – Hradlové pole XILINX.....	36
Obrázek 6.1 – Ukázka nastavení PWM v režimu ONE RAMP.....	37
Obrázek 6.2 - Pouzdra tranzistoru-vlevo TO-220AB, vpravo D <sup>2</sup> Pak.....	39
Obrázek 6.3 -Typické zapojení budiče půl-mostu k dvojici MOSFET tranzistorů ...	40
Obrázek 6.4 – Příklad snímání proudu motoru .....	41
Obrázek 6.5 – SMD pouzdro IO ST232.....	42
Obrázek 6.7 – Výsledné provedení řídicího modulu .....	43
Obrázek 7.1 – Kaskádní regulace otáček s podřízenou proudovou smyčkou.....	45
Obrázek 7.2 – Znázornění přepočtu setrvačné hmoty robota na hřídel kola .....	47
Obrázek 7.3 – Celkový moment setrvačnosti přepočítaný na hřídel motoru.....	47
Obrázek 7.4 – Blokové schéma proudové smyčky .....	48
Obrázek 7.5 – Zjednodušené blokové schéma proudové smyčky .....	49
Obrázek 7.6 – Blokové schéma uzavřené otáčkové smyčky .....	50
Obrázek 7.7 – Zjednodušené blokové schéma otáčkové smyčky .....	51

Obrázek 7.8 – Celkové schéma simulace.....	52
Obrázek 7.9 – Blokové schéma podřízené proudové smyčky .....	52

## SEZNAM TABULEK:

Tabulka 2.1 - Technická data motoru MAXON RE 35 .....	15
Tabulka 2.2 - Technická data planetové převodovky GP 42 C.....	16
Tabulka 2.3 - Technická data enkodéru MR 500.....	18
Tabulka 3.1 - H-můstek se 3 vstupy.....	20
Tabulka 3.2 - Sign-Magnitude 1 .....	21
Tabulka 3.3 - Sign-Magnitude 2 .....	21
Tabulka 3.4 - Locked-antiphase.....	22
Tabulka 4.1 – Seznam použitých součástek – část 1 .....	27
Tabulka 4.2 – Seznam použitých součástek – část 2 .....	28
Tabulka 5.1 - Výpočet $P_{Z1}$ a $P_{Z2}$ .....	31
Tabulka 5.2 - Celkový ztrátový výkon tranzistorů při různé frekvenci spínání.....	32
Tabulka 6.1-Technická data použitého tranzistoru IRFZ48ZS.....	39
Tabulka 6.2 - Technická data budiče půl-mostu .....	40
Tabulka 6.3 – Seznam použitých součástek v modulu řízení .....	44
Tabulka 7.1 – Parametry motoru a pohonu.....	45
Tabulka 7.2 - Parametry pro výpočet regulátorů .....	46

## SEZNAM ZKRATEK:

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
AP		Access Point (přístupový bod)
WI-FI		Wireles Fidelity
TOF		Time Of Flight (čas letu)
A/D převodník		Analogově/Digitální převodník
GPS		Global Position System
PWM	[Hz]	Pulsně šířková modulace
AP		Access Point (přístupový bod)
HSD		High-Side Driver
LSD		Low-Side Driver
MOSFET tranzistor		
$U_{DS}$	[V]	maximální napětí kolektor-emitor
$I_D$	[A]	stejnoseměrný proud kolektoru
$I_{Dpulz}$	[A]	impulsní proud kolektoru
$I_{AR}$	[A]	lavinový proud
$E_{AS}$	[J]	lavinová energie
$U_{GS}$	[V]	napětí hradlo-emitor
$P_D$	[W]	maximální ztrátový výkon
$T_j/T_{stg}$	[°C]	rozsah provozní/skladovací teploty
$U_{(BR)Dss}$	[V]	průrazné napětí kolektor-emitor
$U_{GS(th)}$	[V]	prahové napětí hradla
$I_{DSS}$	[A]	zbytkový proud kolektoru
$I_{GSS}$	[A]	svodový proud hradla
$R_{DS(on)}$	[Ω]	odpor mezi kolektorem a emitorem v sepnutém stavu
$g_{fs}$	[S]	přenosová vodivost
$C_{iss}$	[F]	vstupní kapacita
$t_{on}$	[s]	zapínací doba

$t_{off}$	[s]	vypínací doba
MOSFET inverzní dioda		
$I_{DR}$	[A]	stejnoseměrný proud diody
$I_{DRM}$	[A]	impulsní proud
$U_{SD}$	[V]	propustné napětí
$t_{rr}$	[s]	doba závěrného zotavení
$Q_{rr}$	[C]	náboj závěrného zotavení
Řízení DC motoru		
$U$	[V]	napětí na kotvě motoru
$R_a$	[ $\Omega$ ]	ohmický odpor vinutí kotvy
$I_a$	[A]	proud v obvodu kotvy
$c$	[-]	konstanta
$\Phi$	[Wb]	budící magnetický tok
$n$	[ot/min]	otáčky motoru
$T_1$	[s]	doba zapnutí
$T_2$	[s]	doba vypnutí

## 1. ÚVOD

Tato diplomová práce si bere za cíl zpracovat teoretické poznatky zpětnovazebního řízení pohonů, následně navrhnutí a realizaci takového systému.

Práce je rozdělena do několika částí. Po úvodní kapitole je zde popsán řízený mobilní robot Minidarpa, který náš celý tým společně přejmenoval na RoboKop. Další kapitolou je popsána obecná teorie řízení stejnosměrného motoru, kde jsou popsány možnosti řízení H-můstku pomocí PWM signálu. Následující kapitola zahrnuje možnosti návrhu řídicího modulu, kde jsou uvedeny vlastnosti jednotlivých mikrokontrolérů, návrh výkonových MOSFET tranzistorů, komunikace s nadřazeným systémem a vlastnosti kvadrantních dekodérů pro získávání dat z inkrementálního enkodéru. V posledních kapitolách je proveden návrh a následná simulace kaskádní rychlostní regulace s podřazenou proudovou smyčkou.

### 1.1 MINIDARPA

Minidarpa je název pro soutěž Robotour, která se pravidelně koná od roku 2006. Je to závod autonomních outdoor (venkovních) robotů, která je ve zmenšené formě obdobná americké soutěži DARPA Grand Challenge. [1]

### 1.2 ROBOTOUR

Robotour — robotika.cz outdoor delivery challenge, je původem česká soutěž autonomních robotů pohybujících se po parkových cestičkách.[2]

Robotour 2008 se konala v parku Stromovka v Praze, kde jsme se zúčastnili s celým týmem a robotem RoboKop. Náš robot se umístil z celkových 17 přihlášených robotů na 3-4 místě.

O rok později se Robotour poprvé konala na domácí půdě v Brně v parku Lužánky. V soutěži jsme se umístili na 4. místě z 15 homologovaných robotů. Z loňského ročníku jsme se poučili z určitých nedostatků a pokusili jsme je vylepšit. První velkou změnou je skládací hliníkový profil, který drží anténu GPS, kameru a elektronický kompas. Další změnou je výměna Wi-fi PCI karty za AP Ovislink 5460AP, z důvodu lepší stability a vyššího pokrytí.

## 2. POPIS ROBOTU

### 2.1 CO JE ROBOT

Robot je samostatně (autonomně) pracující stroj, vykonávající určené úkoly. Slovo robot bylo známo již v sedmnáctém století, ve významu otrocká práce podaných. Poprvé ve významu stroj ho použil český spisovatel Karel Čapek v divadelní hře R.U.R. Slovo mu poradil jeho bratr Josef Čapek, když se ho Karel ptal, jak umělou bytost pojmenovat. Původně zamýšlený labor zněl autorovi příliš papírově. [3]

### 2.2 ROBO-KOP



Obrázek 2.1 – Robo-Kop na soutěži Robotour 2009

## 2.3 POPIS ŘÍZENÉHO POHONU

### 2.3.1 Elektromotor MAXON RE 35

Tato řada elektromotorů RE používá magnety typu FeNdB(permanentní magnety s příměsí Neodymu), a proto mají nejvyšší koncentrací výkonu na  $1\text{cm}^3$ . Firma MAXON vyrábí motory od průměru 6mm s trvalým momentem 0,2 mNm a výkonem 0,3 W až do průměru 75mm s 900 mNm a 250 W. Náš typ RE 35 s výkonem 90 W používá uhlíkových kartáčů, jako převod proudu do rotoru.



Obrázek 2.2 - DC motor MAXON RE 35

#### 2.3.1.1 Technická data

Napájecí napětí (nominální)	24 V
Výkon motoru	90 W
Nominální otáčky	6910 rpm
Nominální proud (max. průběžný proud)	3.36 A
Nominální moment (max. průběžný moment)	93.3 mNm
Startovací proud	39.7 A
Maximální účinnost	84 %
Hmotnost motoru	340 g
Mechanická časová konstanta	5.6 ms

Tabulka 2.1 - Technická data motoru MAXON RE 35

### 2.3.2 Planetová převodovka MAXON GP 42 C

Obsahuje několik planetových stupňů řazených podél osy převodovky. Ozubená kola koncových stupňů jsou širší, takže převodovka s větším počtem stupňů má na výstupu vyšší přípustný krouticí moment. V každém stupni jsou v záběru 3 planetová kola a krouticí moment planetové převodovky proto několikanásobně převyšuje momenty přenášené převodovkami s předlohou. Tuková náplň je trvanlivá.

Tato planetová převodovka se vyrábí ve variantách s kovovými nebo keramickými čepy pro uložení jednotlivých planetových kol.



Obrázek 2.3 - Planetová převodovka MAXON

#### 2.3.2.1 Technická data

Redukční poměr	1:113
Setrvačnost převodovky	9.4 gcm <sup>2</sup>
Maximální průměr hřídele motoru	8 mm
Maximální trvalé zatížení výstupní hřídele převodovky	15 Nm
Přerušované dovolené zatížení výstupu převodovky	22.5 Nm
Maximální účinnost	72 %
Hmotnost převodovky	460 g
Průměrná vůle	0.5 °
Celková délka převodovky	69.9 mm

Tabulka 2.2 - Technická data planetové převodovky GP 42 C

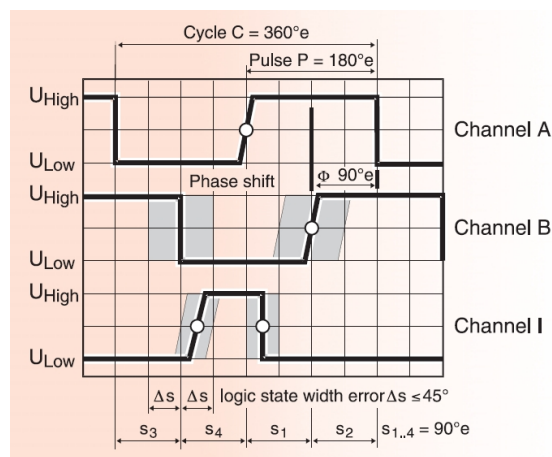
### 2.3.3 Enkodér MR 500

Tento inkrementální magnetický snímač s 500 dílky na otáčku se dnes vyskytuje již téměř ve všech aplikacích, kde je potřeba zajistit přesné zjišťování momentální polohy natočení hřídele motoru.



Obrázek 2.4 - Enkodér MR 500

Enkodér obvykle generuje dva obdélníkové průběhy, vzájemně posunuté o 90 elektrických stupňů, které se nazývají kanál A a kanál B. Zpracováním samotného kanálu A lze získat informaci o rychlosti otáčení, pomocí druhého kanálu je možné podle sekvence stavů generovaných oběma kanály rozeznat i směr otáčení (viz obrázek 2.5). K dispozici je ještě další signál, nazývaný Index, který udává referenční (nulovou) polohu hřídele enkodéru. Tento signál je obdélníkový a ve fázi s kanálem A. Průběh jedné otáčky je znázorněno na obrázku 2.5.[4]



Obrázek 2.5 - Průběh 3-kanalového inkrementálního snímače

### 2.3.3.1 Technická data

Napájecí napětí	5V ± 5%
Výstupní signál	kompatibilní s TTL logikou
Rozlišení enkodéru	500 pulsů na otáčku
Maximální operační frekvence	200 kHz
Počet kanálů	3
Teplotní rozsah	-25 až 85 °C
Moment setrvačnosti	< 1.7 gcm <sup>2</sup>
Nominální šířka INDEX pulzu	90°e ± 45°e

Tabulka 2.3 - Technická data enkodéru MR 500

### 2.3.4 Podvozek s pohony

Ve spodní části robota jsou umístěni motory s převodovkou, napínací kladky, řemeny, kola s náboji.



Obrázek 2.6 - Podvozek s pohony

### 3. TEORIE ŘÍZENÍ SS MOTORU

Stejnoseměrný motor lze nejjednodušeji řídit pomocí napájecího napětí, protože otáčky motoru jsou přímo úměrné napájecímu napětí. Rychlost tedy můžeme řídit změnou napětí, tak jak je uvedeno v Rovnici 3.1.

$$U = R_a I_a + c \cdot \Phi \cdot n$$

#### Rovnice 3.1-Napětí na kotvě motoru

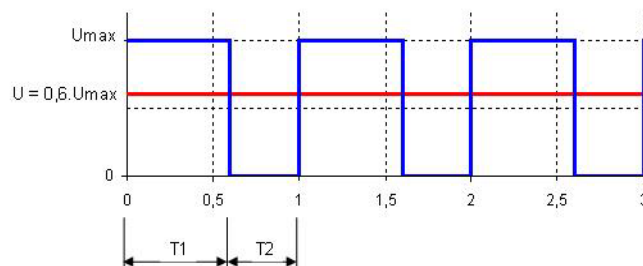
Plynulá změna napětí na stejnosměrném motoru však není vhodná z energetického hlediska, protože proud do motoru je poměrně velký. Proto se používá tzv. PWM (pulsně šířková modulace) řízení motoru.[5][6]

#### 3.1 PWM ŘÍZENÍ SS MOTORU

Princip spočívá v rychlém spínání a vypínání napájení. Díky setrvačnosti motoru a dostatečně vysoké frekvenci spínání, rotor nestačí tyto změny sledovat. Motor se chová jako kdyby byl napájen napětím o velikosti střední (průměrné) hodnoty, která je dána poměrem doby zapnutí a vypnutí (viz Rovnice 3.2).[5][6]

$$U = \frac{T_1}{T_2} \cdot U_{\max}$$

#### Rovnice 3.2-Střední hodnota napětí daná hodnotami $T_1, T_2$

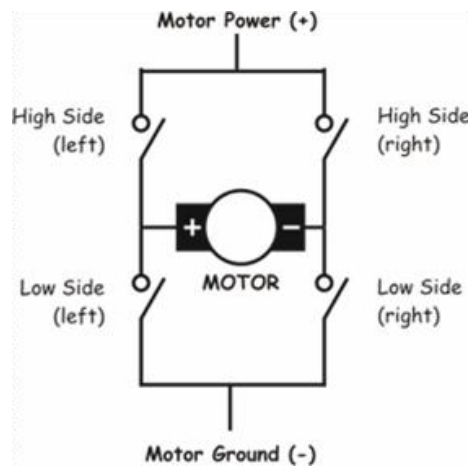


Obrázek 3.1 - PWM modulace

### 3.2 H-MOST

Pokud chceme měnit polaritu na motoru tj. reverzovat motor, tak se nečastěji v praxi používá zapojení do „H-mostu“ (viz. Obrázek 3.2).

H-můstek je tvořen dvojicí spínacích prvků High a Low side, tj. tyto spínací prvky jsou dále nahrazeny výkonovými MOSFET tranzistory.[5][6]



Obrázek 3.2 - Zapojení DC motoru do H-můstku

### 3.3 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ H-MŮSTKU

#### 3.3.1 H-můstek se 3 vstupy

Typické zapojení je třívodičové, kde jeden vstup IN1 řídí levou polovinu můstku (inverzně zapíná a vypíná horní a spodní spínač, vždy je jeden spínač sepnutý a druhý vypnutý), druhý IN2 řídí pravou polovinu můstku a třetí vstup ENABLE vypíná celý můstek.[6]

H-můstek se 3 vstupy

IN1	IN2	ENABLE	A	B	C	D	Motor
0	0	1	0	1	0	1	brzda
1	0	1	1	0	0	1	vpřed
0	1	1	0	1	1	0	vzad
1	1	1	1	0	1	0	brzda
x	x	0	0	0	0	0	volně se otáčí

Tabulka 3.1 - H-můstek se 3 vstupy

### 3.3.2 Sign-Magnitude 1 = směr velikost

Vstupy IN1 a IN2 =  $\sim$ IN1 volíme směr otáčení, na vstup ENABLE je přiveden PWM signál, řídicí rychlost. Příslušné dva tranzistory (dle směru otáčení) spínají napájení. Při vypnutí jsou všechny tranzistory uzavřeny, tj. motor se může „volně otáčet“. [6]

Sign-Magnitude 1

IN1 = DIR	IN2 = $\sim$ DIR	EN = PWM	A	B	C	D	Motor
0	1	0	0	0	0	0	volně se otáčí
0	1	1	1	0	0	1	vpřed
1	0	0	0	0	0	0	volně se otáčí
1	0	1	0	1	1	0	vzad

Tabulka 3.2 - Sign-Magnitude 1

### 3.3.3 Sign-Magnitude 2 = směr velikost

Jeden vstup IN1 určuje směr otáčení, na druhý IN2 je přiveden signál PWM, pro řízení rychlosti, vstup ENABLE je trvale aktivní. Jedna strana můstku má trvale sepnutý jeden tranzistor, na druhé straně se střídavě spíná horní a dolní, dle PWM. Tzn. motor akceleruje nebo brzdí. [6]

Sign-Magnitude 2

IN1 = PWM	IN2 = DIR	ENABLE	A	B	C	D	Motor
0	0	1	0	1	0	1	brzda
1	0	1	1	0	0	1	vpřed
0	1	1	0	1	1	0	vzad
1	1	1	1	0	1	0	brzda

Tabulka 3.3 - Sign-Magnitude 2

### 3.3.4 Locked-antiphase = střídané řízení

Oba vstupy IN1 a IN2 =  $\sim$ IN1 jsou připojeny na PWM signál, vstup ENABLE je trvale aktivní. Pokud je plnění PWM 50%, je výsledná střední hodnota napětí nulová a motor stojí. Pro plnění  $<50\%$  se otáčí jedním směrem pro  $>50\%$  se otáčí druhým směrem.

Locked-antiphase

IN1 = PWM	IN2 = ~ PWM	ENABLE	A	B	C	D	Motor
0	1	1	1	0	0	1	vpřed
1	0	1	0	1	1	0	vzad

Tabulka 3.4 - Locked-antiphase

### 3.4 VÝKONOVÉ TRANZISTORY MOSFET

Tranzistory MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) jsou polem řízené tranzistory, kde jejich vodivost kanálu mezi elektrodami emitor (Source) a kolektor (Drain) je ovládána elektrickým polem vytvářeným ve struktuře kov(M)-oxid(O)-polovodič(S) napětím přiloženým mezi hradlo báze (Gate) a emitor (Source). [6]

Podle polaritý napětí kolektor-emitor rozlišujeme tranzistory

- s kanálem typu N (kladný kolektor, kladné řídící napětí hradla)
- s kanálem typu P (záporný kolektor, záporné řídící napětí hradla)

#### 3.4.1 Parametry tranzistorů MOSFET

Parametry tranzistorů udávané v katalozích lze rozdělit do dvou kategorií, a to na mezní hodnoty a charakteristické hodnoty statických a dynamických parametrů tranzistoru a inverzní diody. Mezní a charakteristické hodnoty se liší tím, že mezní hodnoty musí být respektovány v pracovních podmínkách součástky určených uživatelem, zatímco charakteristické hodnoty jsou pevně dány a uživatel je nemůže ovlivnit. [10]

##### 3.4.1.1 Mezní hodnoty

K mezním hodnotám patří maximální napětí kolektor-emitor  $U_{DS}$ , ss proud kolektoru  $I_D$ , impulsní proud kolektoru  $I_{Dpulz}$ , lavinový proud  $I_{AR}$ , lavinová energie  $E_{AS}$ , napětí hradlo-emitor  $U_{GS}$ , maximální ztrátový výkon  $P_D$ , rozsah provozní a skladovací teploty  $T_j$  a  $T_{stg}$ . [11]

Mezní hodnoty nesmí být v žádném případě překročeny, neboť by to způsobilo zničení tranzistoru i tehdy, když ostatní parametry svých mezních hodnot nedosáhnou nebo jsou i daleko pod nimi. [6]

#### ***3.4.1.2 Statické charakteristické hodnoty***

Mezi statické charakteristické hodnoty náleží průrazné napětí kolektor-emitor  $U_{(BR)DSS}$ , prahové napětí hradla  $U_{GS(th)}$ , zbytkový proud kolektoru  $I_{DSS}$ , svodový proud hradla  $I_{GSS}$  a odpor mezi kolektorem a editorem v sepnutém stavu  $R_{DS(on)}$ . [11]

#### ***3.4.1.3 Dynamické charakteristické hodnoty***

K charakteristickým dynamickým hodnotám se řadí přenosová vodivost  $g_{fs}$ , vstupní kapacita  $C_{iss}$ , zapínací doba  $t_{on}$  a vypínací doba  $t_{off}$ . [11]

#### ***3.4.1.4 Charakteristické hodnoty inverzní diody***

Tyto hodnoty inverzní diody informují o jejím ss proudu  $I_{DR}$ , impulsním proudu  $I_{DRM}$ , propustném napětí  $U_{SD}$ , době závěrného zotavení  $t_{tr}$ , a náboji závěrného zotavení  $Q_{tr}$ . [11]

## 4. NÁVRH MODULU ŘÍZENÍ MOTORU - V2

Tento výkonový modul s integrovaným H-MOSTem měl nahradit pouze stávající výkonový modul řízení motoru – verze 1, který jsme nutně potřebovali jako náhradní modul na soutěž Robotour 2009.

### 4.1 VÝKONOVÝ MODUL ŘÍZENÍ MOTORU – V2

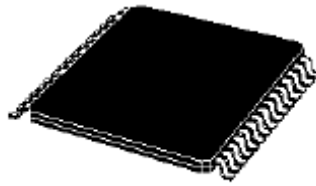
Realizace modulu řízení motoru – verze 1 byla tvořena pomocí integrovaného H-MOSTu L6203, z důvodu jednoduchosti a urychlení návrhu řídicího obvodu. Integrovaný obvod L6203 byl určen pro malé proudy (při chlazení až 4 A). V našem případě kdy má robot tzv. pásový podvozek (tj. podvozek řízený smykem) se při otáčení robota na místě může projevit až o řád vyšší proud motorem. Z tohoto důvodu je nyní použitý H-MOST s integrovaným obvodem L6203 nejslabším místem pro řízení pohonu robota.

### 4.2 INTEGROVANÝ H-MOST VNH3SP30-E

Tento integrovaný H-MOST pro plné ovládání motorů je určený pro široký rozsah automobilových aplikací. Zařízení obsahuje dva jednodílné HSD(high-side driver) a dva LSD(low-side driver) spínače.

High-side spínače obsahují dva výkonové MOSFET tranzistory od firmy STMicroelectronics s inteligentními ochranami. Tyto spínače využívají VIPOWER™ M0-3 technologii. Low-side spínače jsou opět výkonové MOSFET tranzistory od STMicroelectronics, ale využívají STripFET™ technologii.

Pouzdro MultiPowerSO-30™, které je vidět na obrázku 4.1 je specificky navrženo pro hrubý automobilový průmysl. Navíc je plně symetrické mechanické zpracování pouzdra.[7]



MultiPowerSO-30™

#### Obrázek 4.1 - Pouzdro integrovaného H-můstku VNH3SP30-E

Ovládání směru otáčení motoru je zajištěno vstupy  $IN_A$  a  $IN_B$ . Povolení spínání H-mostu je zajištěno pomocí vstupů  $EN_A$  a  $EN_B$ .

##### 4.2.1 Vlastnosti IO VNH3SP30-E

- výstupní proud  $I_{OUT} = 30 \text{ A}$
- odpor mezi kolektorem a emitorem v sepnutém stavu  $R_{DS(on)} = 45 \text{ m}\Omega$
- maximální napájecí napětí  $V_{CC} = 40 \text{ V}$
- podpět'ová a přepět'ová ochrana vypnutím
- kompatibilní 5V vstupní uroveň
- teplotní ochrana vypnutím, ochrana proti zkratu
- lineární proudové omezení
- velmi nízká spotřeba
- frekvence spínání PWM do 10kHz

##### 4.2.2 Výhody integrovaného H-můstku

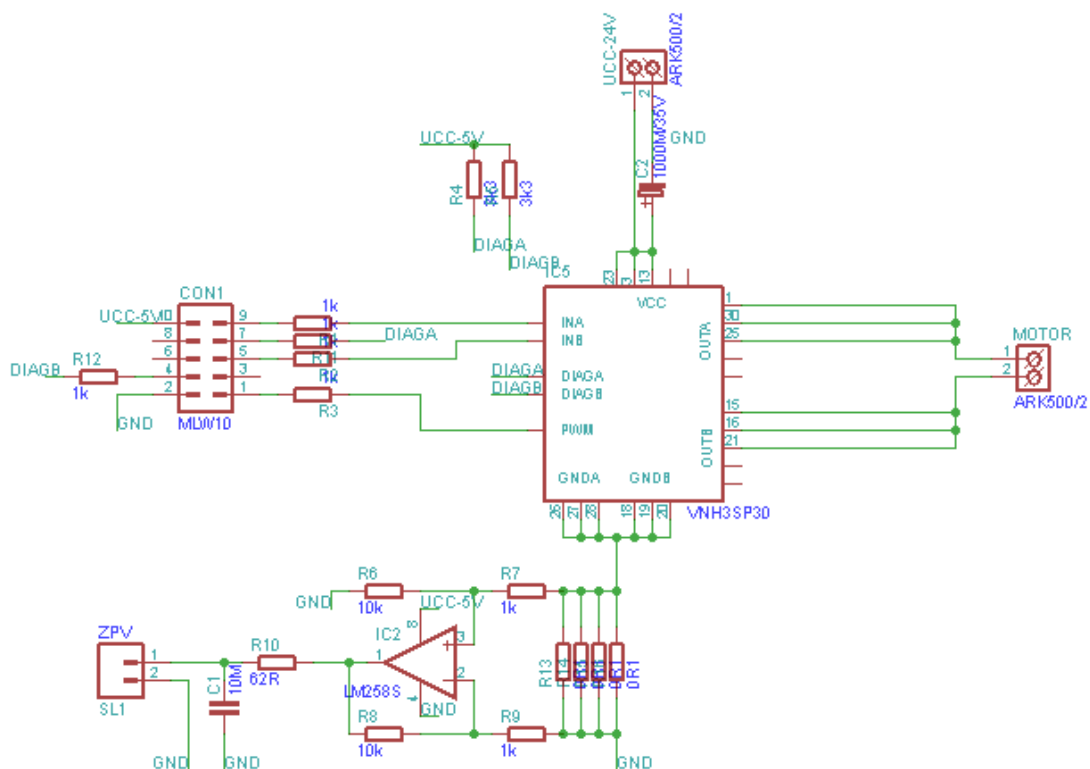
- malé rozměry
- podpět'ové, přepět'ové a tepelné ochrany
- nízká spotřeba
- nízká cena
- přímé připojení k mikroprocesoru

##### 4.2.3 Nevýhody integrovaného H-můstku

- spínání PWM do 10kHz
- není integrováno snímání proudu motorem

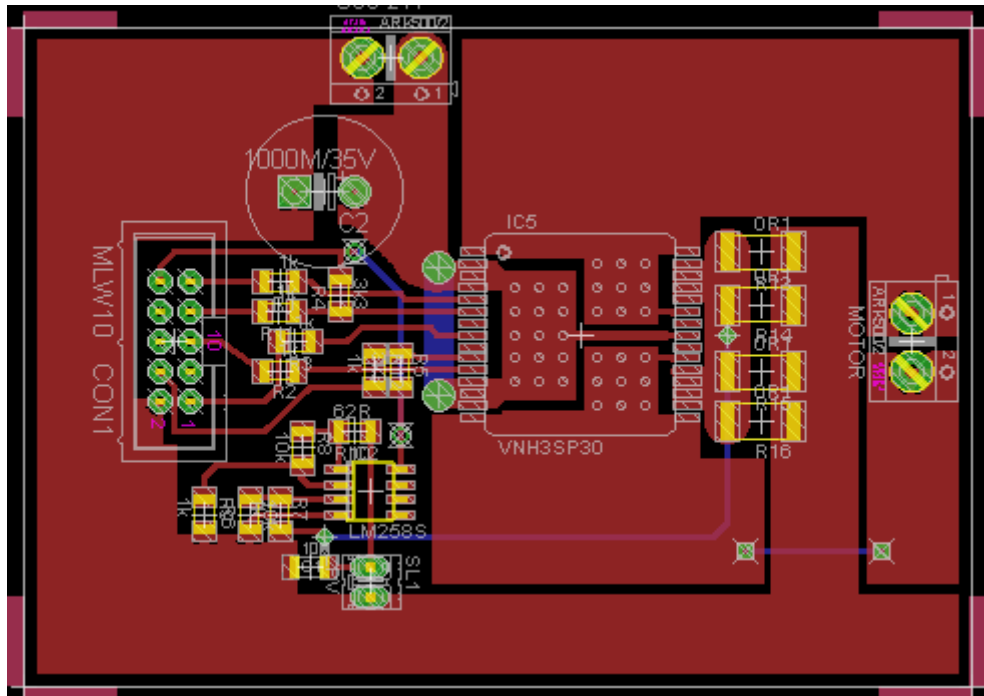
### 4.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ MODULU ŘÍZENÍ MOTORU –v2

Schéma zapojení tvoří výkonová část, která je převážně umístěna v pouzdře integrovaného H-můstku VNH3SP30. Na dolní části schématu je zapojení proudové zpětné vazby se snímacími rezistory o celkovém odporu  $0.025 \Omega$ . Úbytek na těchto snímacích rezistorech se dále zesílí na diferenčním zapojení operačního zesilovače. Tento upravený signál je dále zpracováván v A/D převodníku mikrokontroléru.



Obrázek 4.2 – Schéma zapojení modulu řízení motoru –v2

#### 4.4 NAVRŽENÝ PLOŠNÝ SPOJ MODULU ŘÍZENÍ MOTORU –V2



Obrázek 4.3 – Modul řízení motoru – v2

#### 4.5 SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

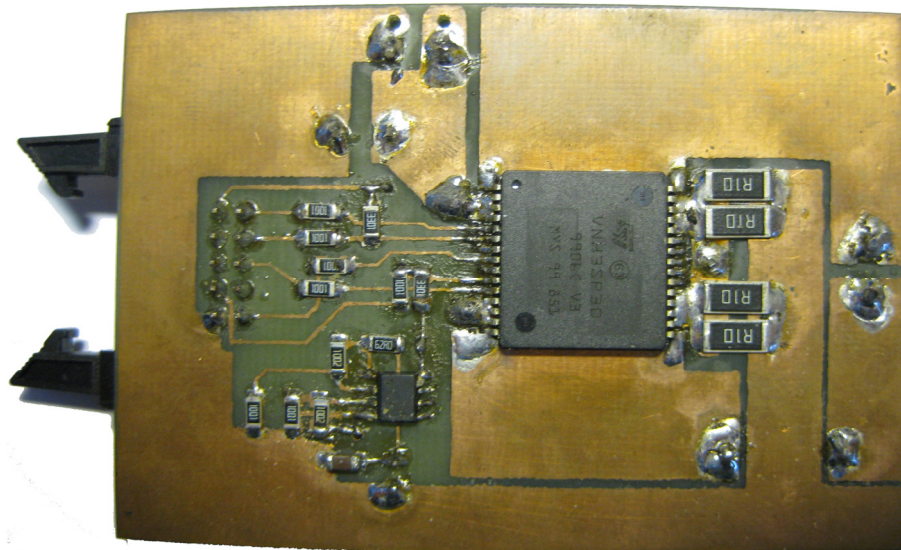
Seznam použitých součástek-část 1			
Označení	Hodnota	Součástka	Pouzdro
C1	10µF	keramický kondenzátor	SMD 1206
C2	1000µF/35V	elektrolytický kondenzátor	C_EL_5
CON1		konektor pro řízení mostu	MLW10G
MOTOR		svorkovnice	ARK500/2
UCC-24V		svorkovnice	ARK500/2
IC1		IO VNH3SP30	MULTIpowerSO-30
IC2		OZ LM258S	SO08
R1,R2,R3,R7	1kΩ	rezistory	SMD 1206
R9,R11,R12	1kΩ	rezistory	SMD 1206

Tabulka 4.1 – Seznam použitých součástek – část 1

Seznam použitých součástek – část 2			
Označení	Hodnota	Součástka	Pouzdro
R4,R5	3,3k $\Omega$	rezistory	SMD 1206
R6,R8	10k $\Omega$	rezistory	SMD 1206
R10	62 $\Omega$	rezistor	SMD 1206
R13,R14,R15,R16	0,1 $\Omega$	rezistor	SMD 2512
SL1		konektor pro proudovou vazbu	M02P

Tabulka 4.2 – Seznam použitých součástek – část 2

#### 4.6 VÝSLEDNÉ PROVEDENÍ MODULU ŘÍZENÍ MOTORU –V2



Obrázek 4.4 – Pohled na spodní část modulu řízení motoru –v2

##### 4.6.1 Výhody

- levné a dostupné řešení s integrovanými ochranami
- malá velikost výsledného modulu

##### 4.6.2 Nevýhody

- tento H-můstek dokáže spínat motor s frekvencí do 10kHz, což se projevuje nevlídným pískáním
- vyšší zatížení jak 10A se můstek přehřívá i při použití chladiče

## 5. MOŽNOSTI NÁVRHU ŘÍDÍCÍHO MODULU

### 5.1 VÝBĚR VHODNÉHO MIKROKONTROLÉRU

#### 5.1.1 Mikrokontrolér ATmega32M1

Mikrokontroléry **ATmega16M1**, **ATmega32M1** a **ATmega64M1** byly vyvíjeny tak aby vhodně posloužily při velmi přesných, řídicích aplikacích s využitím PWM (Pulse Width Modulation) a vzájemného propojení pomocí sběrnice CAN nebo LIN. Nová rodina obvodů proto může nabídnout 16, 32 a 64 KB paměti Flash, I/O piny pro všeobecné použití (General Purpose), A/D převodníky, analogové komparátory, 8 a 16bitové timery nebo také řízení koncového stupně (Power Stage Controller). [6]

#### **Vlastnosti:**

- vysoký výkon, nízká spotřeba 8-bit AVR mikrokontroleru
- pokročilá RISC architektura
- programovací rozhraní(debutWIRE)
- komunikační rozhraní CAN 2.0A/B, LIN 2.1, UART 8-bit
- 12-bitový vysokorychlostní PSC (Power Stage Controller)
- 8-bitový a 16-bitový čítač/časovač
- Master/Slave SPI sériové rozhraní
- 10-bitový ADC (analogově-digitální převodník)
- rychlost jádra 0 – 16 MHz
- operační napětí 2.7 - 5.5 V
- teplota -40 do +85 °C

#### **5.1.1.1 - Výhody mikrokontroleru Atmel**

- jednoduchá komunikace s nadřazeným systémem
- operační napětí 2.7 - 5.5 V

#### **5.1.1.2 - Nevýhody mikrokontroleru Atmel**

- není zde integrován kvadrurní dekodér

### 5.1.2 Signálový kontrolér Freescale 56F8322 (DSC)

Tento digitální signálový kontrolér je schopen zvládnout jak řídicí aplikace tak aplikace zpracování signálů stejně kvalitně jako mikrokontrolér (MCU) nebo digitální signálový procesor (DSP). [6]

#### Vlastnosti:

- frekvence jádra 60 MHz
- 6-kanálový PWM modul
- dva 3-kanálové 12-bitové AD převodníky
- integrovaný kvadrurní dekodér
- komunikační rozhraní SPI a SCI
- teplotní senzor
- 32 KB flash - paměť programu
- 4 KB RAM - paměť programu
- 8 KB flash – paměť dat
- 8 KB RAM – paměť dat
- 8 KB bootovací flash

#### 5.1.2.1 - Výhody signálového kontroléru Freescale

- integrovaný kvadrurní dekodér
- rychlost jádra

#### 5.1.2.2 - Nevýhody signálového kontroléru Freescale

- složitost komunikace s nadřazeným systémem

## 5.2 VÝKONOVÁ ČÁST

### 5.2.1 Diskrétní H-MOST

Diskrétní H-MOST tvoří čtveřici výkonových MOSFET tranzistorů Q1 až Q4. Teoretický popis H-MOSTu a MOSFET tranzistorů je již popsán v kapitole 3.

#### 5.2.1.1 Výběr MOSFET tranzistorů

Na velké množství MOSFET tranzistorů od různých výrobců např. IR(International Rectifier), STMicroelectronics a dalších jsem použil následující kritérium.

#### Kritérium pro výběr MOSFET tranzistorů:

- MOSFET tranzistor typu N
- minimálně dvojnásobek spínaného napětí
- minimálně dvojnásobek spínaného proudu
- nejnižší odpor mezi kolektorem a emitorem v sepnutém stavu  $R_{DS(ON)}$
- lavinová odolnost
- rychlost spínání
- pouzdro tranzistoru

Nakonec jsem vybral 5 MOSFET tranzistorů, u kterých jsem spočítal teoretický ztrátový výkon  $P_Z$  v závislosti na spínací frekvenci  $f_s$  tranzistoru podle následujících vztahů a vybral tranzistor s nejnižšími ztrátami z Graf 5.1.

Příklad výpočtu pro tranzistor IRFZ48ZS:

$$P_{Z1} = R_{DS(ON)} \cdot I^2 = 0.0086 \cdot 15^2 = \underline{1.935W}$$

$$P_{Z2} = \frac{U}{2} \cdot \frac{I}{2} = \frac{24}{2} \cdot \frac{15}{2} = \underline{90W}$$

-----	parametry z katalogu				výpočty		
	tranzistor	I[A]	RDS(ON)[Ω]	U[V]	tr[s]	Pz1[W]	Pz2[W]
	IRFZ48ZS	15	0.0086	24	6.9E-08	1.935	90
	IRFZ48VS	15	0.0120	24	2E-07	2.700	90
	IRFZ44N	15	0.0175	24	6E-08	3.938	90
	STB150	15	0.0060	24	1.8E-07	1.350	90
	STB80	15	0.0065	24	1.55E-07	1.463	90

Tabulka 5.1 - Výpočet  $P_{Z1}$  a  $P_{Z2}$

$P_{Z1}$  – ztrátový výkon způsobený odporem v sepnutém stavu  $R_{DS(ON)}$

$P_{Z2}$  – ztráty způsobené spínáním. Tento výkon ovšem trvá pouze během spínání, proto spočítáme poměr mezi dobou spínání  $t_r$  a celkovou dobou sepnutí  $T_s$ .

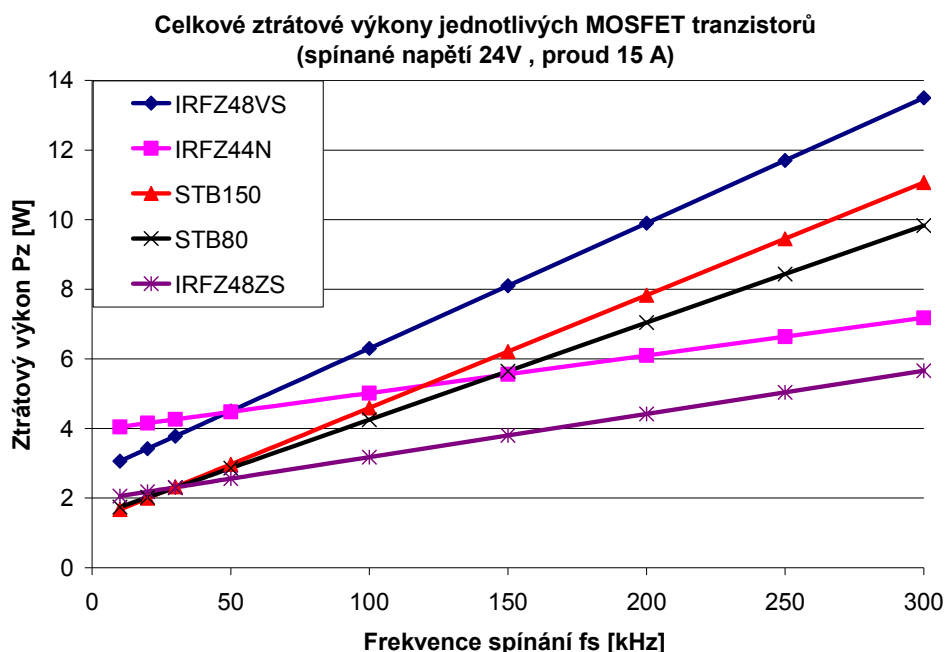
Z toho vychází průměrný ztrátový výkon při spínání  $P_z$ .

tranzistor	fs[kHz]	10	20	30	50	100	150	200	250	300
	T[s]	1.0E-04	5.0E-05	3.3E-05	2.0E-05	1.0E-05	6.7E-06	5.0E-06	4.0E-06	3.3E-06
	Ts[s]	5.0E-05	2.5E-05	1.7E-05	1.0E-05	5.0E-06	3.3E-06	2.5E-06	2.0E-06	1.7E-06
IRFZ48ZS	$P_z$ [W]	2.1	2.2	2.3	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.7
IRFZ48VS	$P_z$ [W]	3.1	3.4	3.8	4.5	6.3	8.1	9.9	11.7	13.5
IRFZ44N	$P_z$ [W]	4.0	4.2	4.3	4.5	5.0	5.6	6.1	6.6	7.2
STB150	$P_z$ [W]	1.7	2.0	2.3	3.0	4.6	6.2	7.8	9.5	11.1
STB80	$P_z$ [W]	1.7	2.0	2.3	2.9	4.3	5.6	7.0	8.4	9.8

Tabulka 5.2 - Celkový ztrátový výkon tranzistorů při různé frekvenci spínání

Příklad výpočtu pro tranzistor IRFZ48ZS při frekvenci spínání  $f_s = 10$  kHz:

$$P_z = \left( \frac{t_r}{T_s} \cdot P_{Z2} \right) + P_{Z1} = \left( \frac{6.9 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10^{-5}} \cdot 90 \right) + 1.935 = \underline{2.1W}$$



Graf 5.1 - Celkové ztrátové výkony jednotlivých MOSFET tranzistorů

### 5.2.2 Výhody diskrétního H-můstku

- volitelné výkonové spínače (MOSFET tranzistory)
- vlastní možnost řízení výkonových spínačů

### 5.2.3 Nevýhody diskrétního H-můstku

- velikost výsledné DPS
- cena

## 5.3 MOŽNOSTI KOMUNIKACE S NADŘÍZENÝM SYSTÉMEM

### 5.3.1 Seriová komunikace RS232

Standard RS-232, resp. jeho poslední varianta RS-232C z roku 1969, (také sériový port nebo sériová linka) se používá jako komunikační rozhraní osobních počítačů a další elektroniky. RS-232 umožňuje propojení a vzájemnou sériovou komunikaci dvou zařízení, tzn. že jednotlivé bity přenášených dat jsou vysílány postupně za sebou (v sérii) po jediném vodiči, podobně jako u síťové technologie Ethernet nebo rozhraní USB. [13]

### 5.3.2 Sériová sběrnice RS422 a RS485

RS 422 & 485 používá poněkud odlišný princip. Pro každý signál používá jedno twistedpair (TP) vedení, tj. 2 vodiče smotané kolem sebe. Z elektrického hlediska mluvíme tzv. Balanced data transmission, nebo také Differential voltage transmission. Laicky řečeno, označíme-li si jeden vodič z TP jako A druhý jako B, pak je-li signál neaktivní, je napětí na A záporné a na B kladné. V opačném případě, signál je aktivní, je A kladné a B záporné. Pochopitelně se jedná o rozdíl (diferenci) mezi vodiči A a B. Pro RS 422 & 485 může délka vedení dosahovat až cca 1200 metrů a běžně vyráběné obvody dosahují přenosových rychlostí 2.5 MB/s. [14]

### 5.3.3 Sériová sběrnice CAN

CAN-BUS je sběrnice využívaná nejčastěji pro vnitřní komunikační síť senzorů a funkčních jednotek v automobilu, z čehož plyne také použití pro automobilovou diagnostiku. Z této aplikační oblasti se CAN rychle rozšířil také do sféry průmyslové automatizace. Jedná se o sériovou datovou sběrnici vyvinutou firmou Robert Bosch GmbH. Elektrické parametry fyzického přenosu jsou

specifikované normou ISO 11898. Maximální teoretická rychlost přenosu na sběrnici je 1 Mbit/s. [15]

## 5.4 MOŽNOSTI ZPRACOVÁNÍ DAT Z INKREMENTÁLNÍHO ENKODÉRU

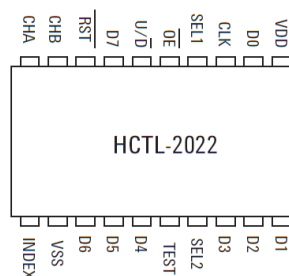
### 5.4.1 Softwarové řešení pomocí mikrokontroleru

Toto řešení zpracovává signály z jednoho nebo více inkrementálních enkodérů za pomoci samostatného mikrokontroleru. Tento softwarový výpočet je hodně náročný a proto mikrokontrolér může zpracovávat pouze impulzy z inkrementálních snímačů.

- Výhody
  - velikost pouzdra
  - cena
- Nevýhody
  - rychlost

### 5.4.2 Kvadrurní čítač HCTL-2022

Obvod HCTL-2022 slouží jako rozhraní mezi enkodérem a mikroprocesorem. Dokáže dekódovat z jednoho inkrementálního snímače, vyšší řada jako HCTL-2032 dokáže zpracovávat ze dvou inkrementálních snímačích. Připojení k mikroprocesoru je zajištěno 8 – bitovou tří-stavovou paralelní sběrnici.[16]



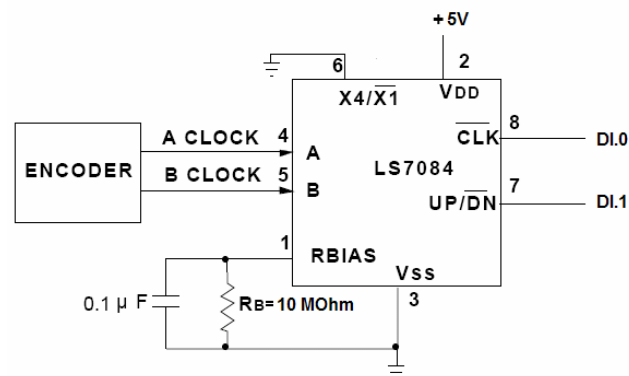
**Obrázek 5.1 – Pouzdro kvadrurního čítače HCTL-2022**

- Výhody
  - snadná realizace
  - rychlost zpracování z enkodéru

- Nevýhody
  - paralelní sběrnice
  - velikost pouzdra

#### 5.4.3 Kvadrurní dekodér LS7083/84-S

Kvadrurní dekodér se používá pro dekódování pulzů a směru z inkrementálního snímače otáček (magnetického i optického). LS7083/84 je integrovaný kvadrurní dekodér s pulsními výstupy (pulsy a směr, nebo pulsy kladný směr a pulsy záporný směr). Tyto výstupy musí zpracovávat buďto obousměrný čítač nebo dva jednosměrné čítače. Typické zapojení kvadrurního dekodéru je názorně vidět na obrázku 5.2. [17]

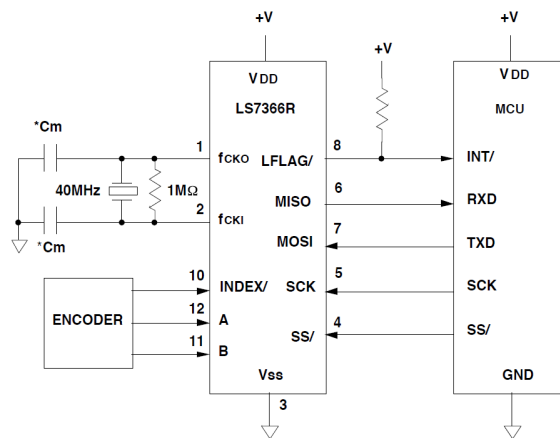


Obrázek 5.2 – Typické schéma zapojení IO LS7083/84 s enkodérem

- Výhody
  - snadná implementace
- Nevýhody
  - není v ČR dostupný

#### 5.4.4 Kvadrurní čítač LS7366R-S

Integrovaný obvod LS7366R-S je 32-bitový CMOS čítač s přímým rozhraním pro příjem z inkrementálního enkodéru. Pro komunikaci s mikroprocesory nebo mikrokontrolery používá čtyř-vodičovou SPI/MICROWIRE sběrnici. Standardní sběrnice vstupy/výstupy jsou SS/, SCK, MISO a MOSI. Tato sběrnice sníží počet vodičů k mikrokontroleru oproti obvodu HCTL-2022 na polovinu. [18]



**Obrázek 5.3 – Typické schéma zapojení k mikrokontroleru**

- Výhody
  - sériová sběrnice
  - dekodér + čítač
- Nevýhody
  - není v ČR zatím dostupný

#### 5.4.5 Kvadrurní dekodér IRCDEK2

Integrovaný obvod kvadrurního dekodéru IRCDEK2 je naprogramované hradlové pole Xilinx XC9536XL, které obsahuje program pro dekódování signálu z jednoho IRC nebo jiného inkrementálního snímače v režimech 1x, 2x a 4x. [19]

Obvod se dodává v pouzdře PLCC 44 a nebo v SMD pouzdře VQFP 44.



**Obrázek 5.4 – Hradlové pole XILINX**

- Výhody
  - hradlové pole je velmi rychlé
- Nevýhody
  - velikost pouzdra

## 6. POPIS ŘÍDÍCÍHO MODULU

Každý pohon tj. motor A a motor B má svůj řídicí modul a ten se skládá z jednotlivých částí které jsou uvedeny a popsány níže.

### 6.1 ŘÍDÍCÍ ČÁST

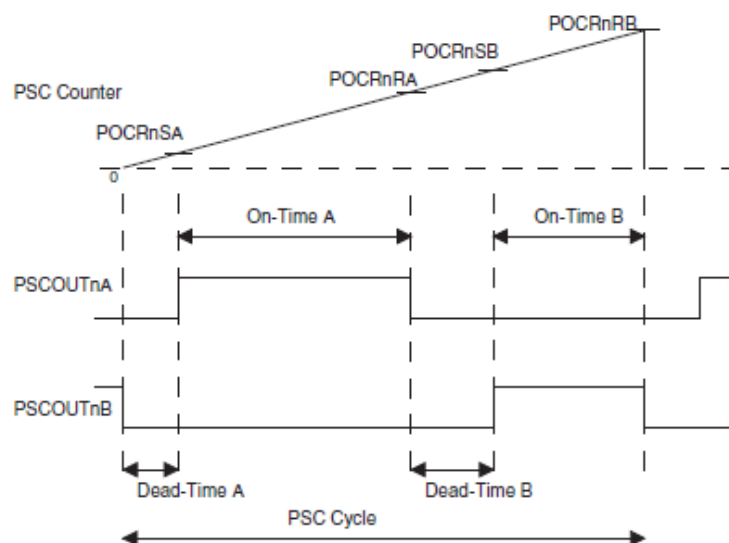
Řídicí část tvoří vybraný mikrokontrolér ATmega32M1, jehož schéma zapojení je znázorněn v příloze 5. Jednotlivé použité funkce mikrokontroléru jsou popsány dále.

#### 6.1.1 PSC – výkonový řízený kontrolér

Tento PSC modul je vysoce výkonný a plně nastavitelný kontrolér. Svými šesti výstupy dokáže řídit např. tři půl-mosty, pro řízení asynchronních nebo BLDC motorových pohonů a může být použit i v řízení světelných systémů. PSC obsahuje i tři digitální vstupy.

##### 6.1.1.1 - One ramp mode(jedna rampa)

Na obrázku 6.1 je znázorněna jedna perioda PSC cyklu s názvem One Ramp , kde můžeme pomocí těchto hodnot DT-A(Dead Time A), OT-A(On-Time A), OT-B(On-Time B), DT-B(Dead Time B) nastavovat velikost střídání PWM.



Obrázek 6.1 – Ukázka nastavení PWM v režimu ONE RAMP

### **6.1.1.2–Vlastnosti PSC**

- plně programovatelné výstupy PSC pro řízení třech půl-mostů
- programovatelné řízení DT(Dead Time = čas mezi sepnutí horního a dolního tranzistoru)
- 12-bitové rozlišení PWM (pulsně šířková modulace)
- automatická ochrana proti překrytí signálu
- PWM snímací frekvence až do 64MHz

### **6.1.2 ADC – analogově digitální převodník s diferenčním zesilovačem**

Tento mikrokontrolér ATmega32M1 obsahuje 10-bitový analogově digitální převodník, který obsahuje 15 vstupních kanálů. Tento převodník umožňuje také 3 diferenční vstupy s programovatelným zesílením 14, 20, 26 a 32 dB. ADC obsahuje tvarovač se vzorkovačem, který podrží vstupní hodnotu napětí během převodu. Také používá odděleného napájecího napětí  $AV_{CC}$ , jehož hodnota nesmí být větší  $\pm 0.3V$  než  $V_{CC}$ . Jmenovitá hodnota interního referenčního napětí je nastavitelná na 2.56V nebo na  $AV_{CC}$ . Pokud se připojí externí kondenzátor na AREF pin, tak se zvýší odolnost vůči šumu.

#### **6.1.2.1 - Vlastnosti ADC**

- 10-bitové rozlišení
- vstupní napěťový rozsah 0-5V
- výběr referenčního napětí
- 3 diferenční kanály s programovatelným zesílením  
5x,10x,20x,40x
- čas převodu 8-250  $\mu s$

## 6.2 VÝKONOVÁ ČÁST

Výkonovou část tvoří H-MOST složený z diskretních součástek, dva budiče půl-mostu IR2101S a snímací rezistory R5–R9 pro proudovou zpětnou vazbu. Tento úbytek napětí  $U_{AMP0} = (AMP0+) - (AMP0-)$  je přiveden na diferenciální vstup s programovatelným zesílením do mikrokontroléru. Schéma výkonové části je v příloze 6.

### 6.2.1 Diskrétní H-MOST

#### 6.2.1.1 Popis vybraného MOSFET tranzistoru IRFZ48ZS

Tento MOSFET tranzistor je specificky navržen pro automobilové aplikace. Disponuje svojí odolností vůči lavinovému průrazu, velmi rychlým spínáním, ultra nízkým odporem mezi kolektorem a emitorem v sepnutém stavu  $R_{DS(ON)}$  a maximální provozní teplotou 175°C.

Technická data		
Typ tranzistoru		N-MOSFET
Maximální spínané napětí	$V_{DSS}$	55 V
$R_{DS(ON)}$		0.0086 $\Omega$
Maximální spínací proud	$I_D$	61 A
Napětí hradlo-emitor	$V_{GS}$	$\pm 20$ V
Prahové napětí	$V_{GS(th)}$	2 - 4 V
Doba sepnutí	$t_{d(on)}$	15 ns
Doba rozepnutí	$t_{d(off)}$	35 ns
Pouzdro tranzistoru		TO-220AB, D <sup>2</sup> Pak

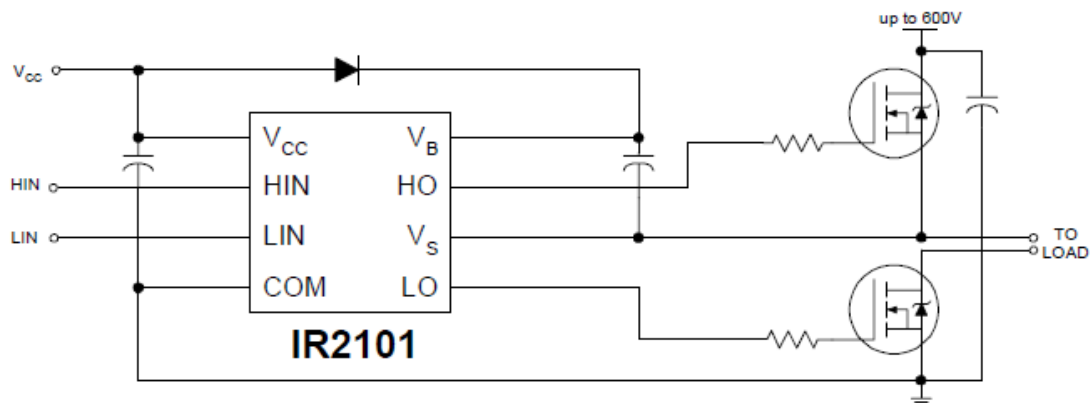
**Tabulka 6.1-Technická data použitého tranzistoru IRFZ48ZS**



**Obrázek 6.2 - Pouzdra tranzistoru-vlevo TO-220AB,vpravo D<sup>2</sup>Pak**

### 6.2.1.2 Popis vybraného budiče IR2101S

Tyto budiče půl-mostu jsou vhodné pro ovládání vysokorychlostních MOSFET a IGBT tranzistorů. Patentovaná HVIC a odolná CMOS technologie tvoří robustní monolitickou konstrukci. Logické vstupy jsou kompatibilní se standardy CMOS nebo LSTTL. Logické výstupy pro ovládání tranzistorů jsou navrženy jako krátkodobé vysoké proudové pulzy.



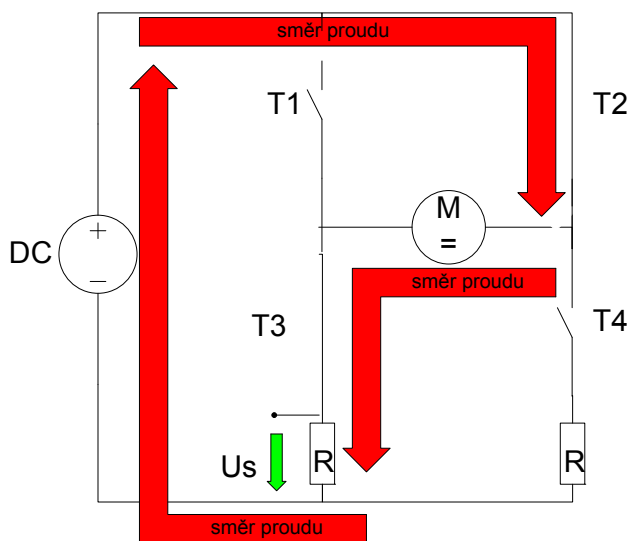
Obrázek 6.3 -Typické zapojení budiče půl-mostu k dvojici MOSFET tranzistorů

Technická data		
Napájecí napětí	$V_{CC}$	max 25V
Výstupní napětí	$V_{OUT}$	10-20 V
Výstupní proud	$I_{O+}$	130mA / 270mA
Logické vstupy		kompatibilní s 3.3V,5V a 15V
$t_{ON/OFF}$		160 & 150ns
Deadtime		520ns

Tabulka 6.2 - Technická data budiče půl-mostu

### 6.2.2 Snímací rezistory pro zpětnou proudovou vazbu

Snímání proudu motorem bylo řešeno pomocí SMD snímacích rezistorů. Každá větev obsahuje snímací rezistor R. Příklad snímání proudu je znázorněno na obrázku 6.4, kde směr proudu vyjadřují sepnuté spínače T2 a T3. Pro druhý směr jsou naopak sepnuty spínače T1a T2. K dispozici jsou snímací rezistory o hodnotě 0.1Ω.



Obrázek 6.4 – Příklad snímání proudu motoru

#### 6.2.2.1 - Výpočet snímacího napětí

Pro snížení celkového odporu použijeme paralelní kombinace snímacích rezistorů.

Celkový odpor v každé větvi:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.1} = \frac{4}{0.1} = 40S$$

$$R = \frac{1}{R} = \frac{0.1}{4} = 0.025\Omega$$

Budu snímat proud motorem maximálně  $I_{MAX}=10A$ , pokud bude proud víc než  $I_{MAX}$ , tak bezpečnostní modul odpojí pohon.

Nyní musíme ověřit že vypočtená hodnota snímacího rezistoru  $R$ , bude výkonově dostatečná pro proud  $I_{MAX}=10A$ .

$$P_{MAX} = R \cdot I_{MAX}^2 = 0.025 \cdot 10^2 = 2.5W$$

Výkon  $P_{MAX}$  je rozdělen na 4 SMD snímací rezistory. Každý snímací rezistor snese 1W.

Z toho plyne výkon vztážený na 1 snímací rezistor:

$$P_{MAX} / 1rezistor = P_{MAX} / 4 = 2.5W / 4 = 0.625W$$

Nyní vypočítáme maximální úbytek napětí na snímacích rezistorech:

$$U_{MAX} = R \cdot I_{MAX} = 0.025 \cdot 10 = 0.25V$$

Použitý mikrokontrolér ATMEGA32M1 obsahuje diferenční konfigurovatelný zesilovač pro vstup na AD převodník. Pro zpracování snímaného napětí musíme tímto integrovaným diferenčním zesilovačem zesílit hodnotu maximálního napětí  $U_{MAX}$  tak aby pokryl celý rozsah 10-bitového AD převodníku. Konfigurovatelné zesílení je možné volit 5,10,20,40dB. Plný rozsah AD převodníku je 5V.

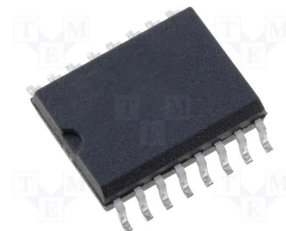
$$U_{ZES} = U_{MAX} \cdot GAIN = 0.25 \cdot 20 = 5V$$

Pro plný rozsah bylo zvoleno zesílení  $GAIN = 20dB$ .

## 6.3 KOMUNIKAČNÍ ČÁST

### 6.3.1 Komunikace s nadřazeným systémem pomocí RS232

Komunikace s nadřazeným systémem je řešena pomocí sériového rozhraní RS232. Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a nadřazeným systémem tvoří integrovaný obvod ST232 (viz Obrázek 6.5), který převádí digitální signál z UART rozhraní mikrokontroléru na rozhraní RS232 pro nadřazený systém a naopak. Schéma zapojení komunikační části je v příloze 7.



Obrázek 6.5 – SMD pouzdro IO ST232

### 6.3.2 Komunikace s nadřazeným systémem pomocí CAN

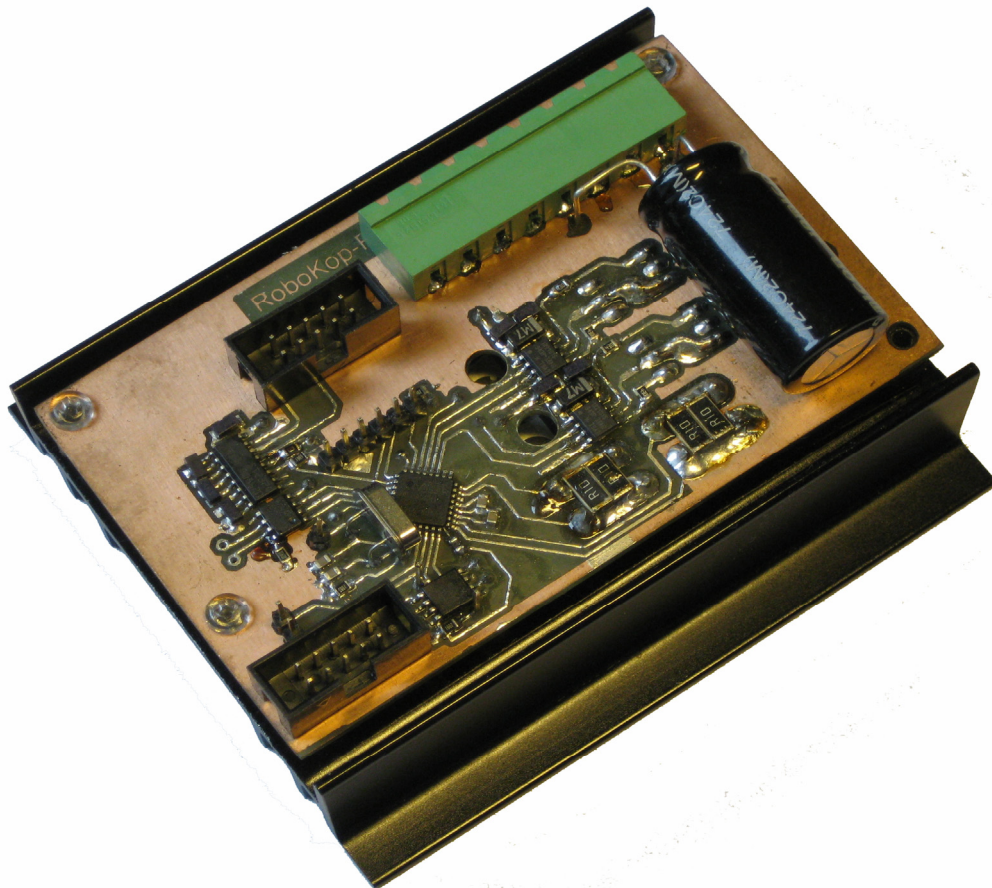
Další možností jak komunikovat s nadřazeným systémem je pomocí sběrnice CAN, kterou mikrokontrolér ATMEGA32M1 podporuje. Mezi sběrnicí CAN a mikrokontrolérem je zapotřebí integrovaného obvodu MCP2551, který zajišťuje vysokorychlostní komunikaci a výbornou odolnost vůči šumu. Schéma zapojení komunikační části je v příloze 7.

#### 6.4 KVADRATURNÍ DEKODÉR

Pro dekódování dat z inkrementálního enkodéru byla zvolena možnost softwarového řešení, z důvodu nedostupnosti integrovaných hardwarových dekodérů. Pro tento úkol byl navržen mikrokontrolér ATtiny13s, který má dostačující početní výkon pro zpracování z jednoho inkrementálního enkodéru. Schéma zapojení je obsaženo v příloze 8.

#### 6.5 VÝSLEDNÉ PROVEDENÍ MODULU

Z předešlých možností návrhu bylo navrženo celkové schéma řídicího modulu, které je znázorněno v příloze 2. Z tohoto schématu byla poté navržena deska plošného spoje pomocí programu Eagle. Tato deska plošného spoje obsahuje oboustranné rozložení součástek. Jednotlivé vrstvy desky plošného spoje jsou znázorněny v přílohách 3 a 4.



Obrázek 6.6 – Výsledné provedení řídicího modulu

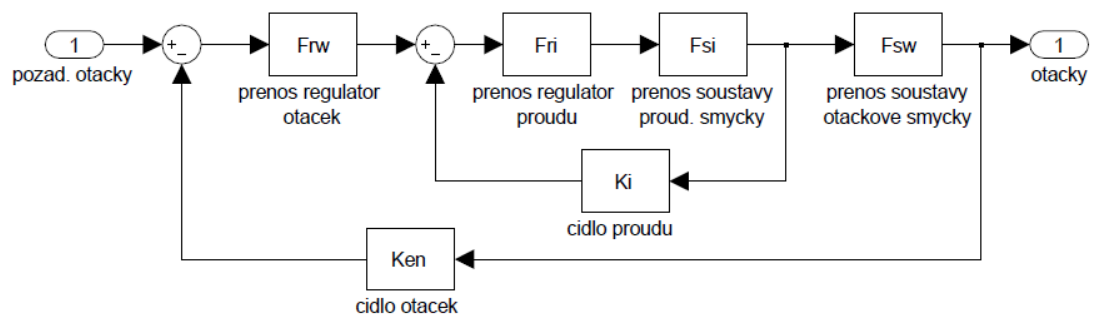
### 6.5.1 Seznam použitých součástek

Seznam použitých součástek			
Označení	Hodnota	Součástka	Pouzdro
ATmega32M1		mikrokontrolér	TQFP32-08
MAX232CSE		převodník nap. úrovní	SO-16
ATtiny13S		mikrokontrolér	SOIC-8
IC4,IC5	IR2101S	budiče tranzistorů	SO-08
U1	MCP2551S	budič sběrnice CAN	SO-08
R1,R2,R3,R10	39R	rezistory	SMD 0805
R4,R5,R7,R8	20mΩ	rezistory	SMD 2512
R6,R11	10kΩ	rezistory	SMD 0805
R13,R15	100kΩ	rezistory	SMD 0805
R14	1 kΩ	rezistor	SMD 0805
R9	10R	rezistor	SMD 0805
C1,C2,C6	22nF	keramický kondenzátor	SMD 0805
C3	100nF	keramický kondenzátor	SMD 0805
C4,C5,C7,C8	1μF/35V	tantalový kondenzátor	SMD 0805
C9,C14,C15	1μF/35V	tantalový kondenzátor	SMD 0805
C16	1μF/35V	tantalový kondenzátor	SMD 0805
C10	2200μF	elektrolytický kondenzátor	
Q6	16MHz	krystal	HC49U-V
L1	10 μH	indukčnost	SMD 0805
D1,D2	1N4007	dioda	SMD
Q1,Q2,Q3,Q4	IRFZ48Z	MOSFET tranzistory	TO-220
Encoder		konektor pro enkodér	MLW10G
RS232		konektor pro RS232	MLW10G
K1,K2		svorkovnice	ARK500/4

Tabulka 6.3 – Seznam použitých součástek v modulu řízení

## 7. NÁVRH REGULÁTORŮ

Návrh regulátoru je jednou z nejdůležitější částí návrhu pohonu. Pro řízení pohonu je vhodné řídit více veličin. Proto jsem zvolil kaskádní regulaci pohonu, které se skládá z podřízené proudové smyčky a nadřazené otáčkové smyčky (viz. Obrázek 7.1).



Obrázek 7.1 – Kaskádní regulace otáček s podřízenou proudovou smyčkou

### 7.1 POUŽITÉ PARAMETRY

Parametry pro identifikaci pohonu		
$m = 30$	[kg]	hmotnost robota
$v = 1.027$	[ms <sup>-1</sup> ]	rychlost robota
$r = 0.16$	[m]	poloměr kola
$J_{KOLA} = 1.39e-2$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti kola
$J_{MOT} = 3.35e-6$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti motoru
$J_{PŘEV} = 9.40e-7$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti převodovky
$i = 113$	[-]	převod převodovky
Parametry motoru		
$U_{AN} = 24$	[V]	nominální napětí
$I_{AN} = 3.36$	[A]	nominální proud
$R_A = 0.605$	[Ω]	odpor kotvy motoru
$n_n = 6910$	[rpm]	nominální otáčky motoru
$\omega_n = 723.61$	[rads <sup>-1</sup> ]	nominální otáčky motoru

Tabulka 7.1 – Parametry motoru a pohonu

Konstanty pro návrh regulátoru proudu		
$\tau_A = 3.1570e-4$	[s]	časová konstanta kotvy motoru
$K_{MEN} = 24/5$	[-]	zesílení tranzistorového měniče
$\tau_{MEN} = 9.6154e-6$	[s]	časová konstanta měniče
$K_I = 5/10$	[-]	zesílení proudového čidla
Konstanty pro návrh regulátoru otáček		
$C\Phi = 0.0304$	[Vs]	momentová konstanta motoru
$K_{EN} = 3.0680$	[-]	zesílení enkodéru

**Tabulka 7.2 - Parametry pro výpočet regulátorů**

## 7.2 IDENTIFIKACE MOMENTU SETRVAČNOSTI POHONU

Pro návrh regulátoru otáček s podřízenou proudovou vazbou metodou symetrického optima je potřeba znát moment setrvačnosti celého robotu přepočítaný na hřídel motoru.

### 7.2.1 Moment setrvačnosti motoru přepočítaný na hřídel kola

$$J_{MK} = J_{MOT} \cdot i^2 = 3.35 \cdot 10^{-6} \cdot 113^2 = 4.28 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

### 7.2.2 Ekvivalentní moment setrvačnosti robota

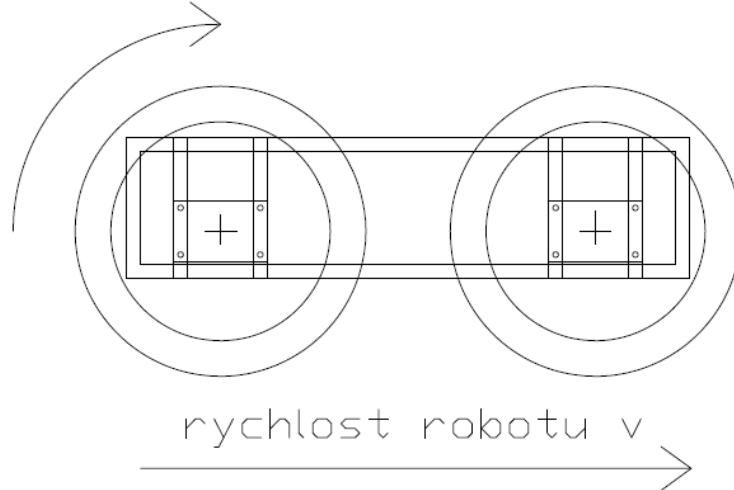
Úhlová rychlost hřídele kola:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{1.027}{0.16} = 6.424 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Setrvačná hmota robota přepočítaná na ekvivalentní moment setrvačnosti:

$$J_{RAM} = m \cdot \left( \frac{v}{\omega} \right)^2 = 30 \cdot \left( \frac{1.027}{6.424} \right)^2 = 0.7667 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

úhlová rychlost kola  $w$



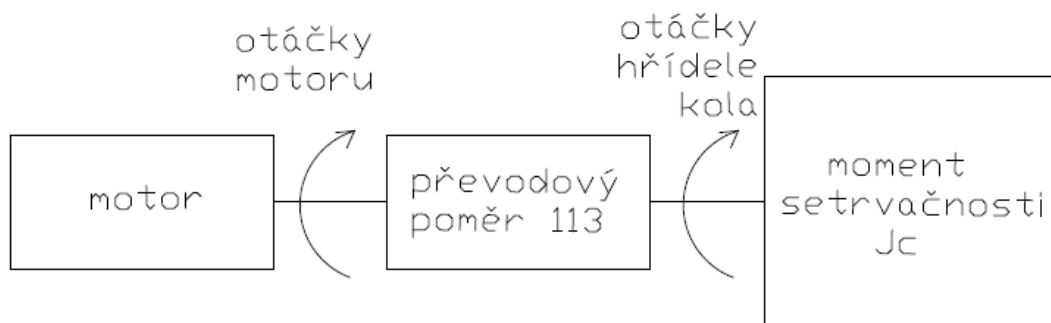
Obrázek 7.2 – Znázornění přepočtu setrvačné hmoty robota na hřídel kola

### 7.2.3 Celkový moment setrvačnosti na kole

$$J_C = J_{KOLA} + J_{PRE} + J_{MK} + J_{RAM} = 3.99 \cdot 10^{-2} + 9.4 \cdot 10^{-7} + 4.28 \cdot 10^{-2} + 0.7667 = 0.8494 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

### 7.2.4 Celkový moment setrvačnosti přepočítaný na hřídel motoru

$$J = \frac{J_C}{i^2} = \frac{0.8494}{113^2} = 6.65 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$



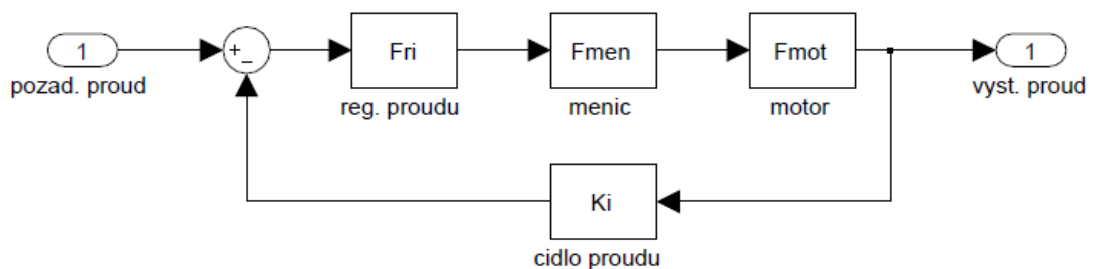
Obrázek 7.3 – Celkový moment setrvačnosti přepočítaný na hřídel motoru

### 7.3 NAVRH PI REGULÁTORU PROUDU METODOU OPTIMÁLNÍHO MODULU (OM)

Pro návrh regulátoru proudu se zpravidla zpětná vazba od indukovaného protinapětí zanedbává. Důvodem je skutečnost, že pro optimálně nastavenou uzavřenou regulační smyčku proudu je elektromagnetická časová konstanta  $T_a$  vykompenzována regulátorem proudu a zbývající malá časová konstanta usměrňovače je podstatně menší než mechanická časová konstanta  $T_m$ . Dalším důvodem je způsob nastavování regulátoru proudu na reálném pohonu. Regulátor se nastavuje na skok řízení (žádané hodnoty proudu) při zabrzděném rotoru, tj. při nulovém indukovaném napětí. Přesto proudová smyčka pracuje optimálně i při nenulových rychlostech.[20]

#### 7.3.1 Blokové schéma proudové smyčky

Pro návrh regulátoru proudu  $F_{ri}$  musíme znát ostatní přenosy z obrázku 7.4.



Obrázek 7.4 – Blokové schéma proudové smyčky

Přenos tranzistorového měniče  $F_{MEN}$ :

$$F_{MEN}(p) = \frac{K_{MEN}}{\tau_{MEN} \cdot p + 1} = \frac{\frac{24}{5}}{9.6154e-6 \cdot p + 1} = \frac{4.8}{9.6154e-6 \cdot p + 1},$$

kde  $K_{MEN} = \frac{24V}{5V} = 4.8$        $\tau_{MEN} = \frac{1}{2 \cdot f} = \frac{1}{2 \cdot 52kHz} = 9.6154e-6 \text{ s}$

Přenos obvodu kotvy SS motoru  $F_{MOT}$ :

$$F_{MOT}(p) = \frac{1}{R_A \cdot p + 1} = \frac{1}{3.1570e-4 \cdot p + 1} = \frac{1.6529}{3.1570e-4 \cdot p + 1},$$

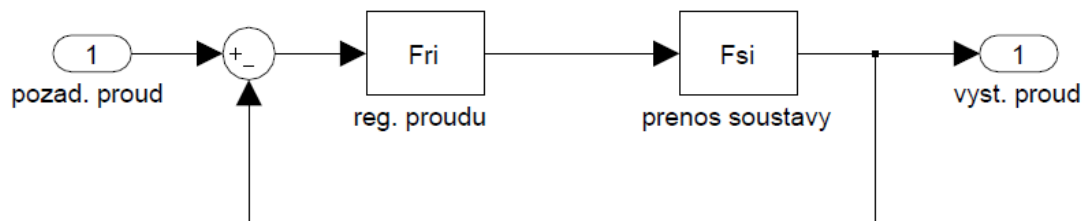
kde 
$$\tau_A = \frac{L_A}{R_A} = \frac{0.191e-3}{0.605} = 3.1570e-4 \text{ s}$$

Přenos proudového čidla  $K_I$ :

$$K_I = \frac{U_{PWM}}{I_{MAX}} = \frac{5V}{10A} = 0.5$$

### 7.3.2 Výpočet přenosu soustavy proudové smyčky

Pro zjednodušení a výpočet regulátoru proudu je přenos soustavy  $F_{SI}$  vytvořen z tranzistorového měniče, obvodu kotvy stejnosměrného motoru a čidlem proudu.



**Obrázek 7.5 – Zjednodušené blokové schéma proudové smyčky**

Pro přenos soustavy  $F_{SI}$  platí:

$$F_{SI}(p) = F_{MEN} \cdot F_{MOT} \cdot K_I = \frac{K_{MEN}}{\tau_{MEN} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\tau_A \cdot p + 1} \cdot K_I$$

### 7.3.3 Návrh PI regulátoru proudu metodou optimálního modulu

Požadovaný přenos otevřené proudové smyčky metody optimálního modulu:

$$F_O(p) = \frac{1}{\tau_{MEN} \cdot p(\tau_{MEN} \cdot p + 1)}$$

Výsledný přenos spojitého regulátoru proudu:

$$F_{RI}(p) = \frac{F_O(p)}{F_{SI}(p)} = \frac{1}{\tau_{MEN} \cdot p(\tau_{MEN} \cdot p + 1)} \cdot \frac{1}{F_{SI}} = \frac{1 + \tau_{I1} \cdot p}{\tau_{O1} \cdot p},$$

kde  $\tau_{I1} = \tau_A = 3.1570e-4 \text{ s}$   $\tau_{O1} = 2 \cdot \tau_{MEN} \cdot K_{MEN} \cdot K_I \cdot \frac{1}{R_A} = 7.6287e-5 \text{ s}$

Výpočet přenosu uzavřené proudové smyčky  $F_{WI}$ :

$$F_{WI}(p) = \frac{F_o(p)}{1 + F_o(p)} \cdot \frac{1}{K_I} = \frac{\frac{1}{K_I}}{2 \cdot \tau_{MEN} \cdot p(\tau_{MEN} \cdot p + 1)} \cong \frac{\frac{1}{K_I}}{2 \cdot \tau_{MEN} \cdot p + 1}$$

### 7.3.4 Diskrétní přenos regulátoru proudu

Pro řízení pohonu pomocí mikrokontroléru se musí tento spojitý přenos PI regulátoru diskretizovat s periodou vzorkování  $T_{VZI} = 0.004s$ . Pro diskretizaci regulátoru jsem použil MATLABovskou funkci `c2d`.

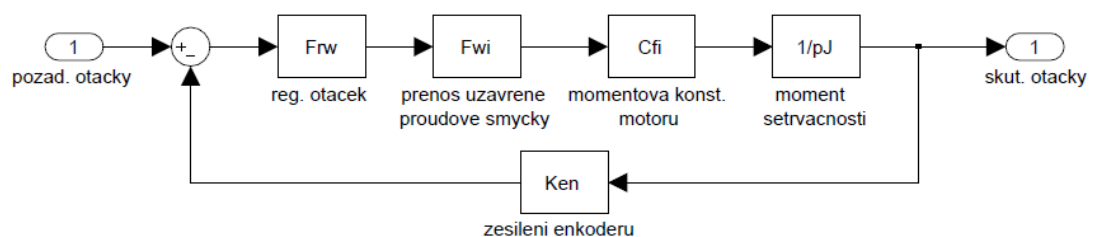
Výsledný přenos diskrétního regulátoru proudu:

$$F_{RI}(z) = \frac{4.138 \cdot z + 48.3}{z - 1}$$

## 7.4 NAVRHNUTÍ REGULÁTORU OTÁČEK METODOU SYMETRICKÉHO OPTIMA (SO)

### 7.4.1 Regulace rychlosti s podřízenou proudovou smyčkou

Na obrázku 7.6 je znázorněno blokové schéma uzavřené otáčkové smyčky, kterou tvoří regulátor otáček  $F_{RW}$ , přenos uzavřené proudové smyčky  $F_{WI}$ , momentová konstanta motoru  $C_{FI}$ , moment setrvačnosti přepočítaný na hřídel motoru  $M_S$  a zesílení inkrementálního enkodéru  $K_{EN}$ .



Obrázek 7.6 – Blokové schéma uzavřené otáčkové smyčky

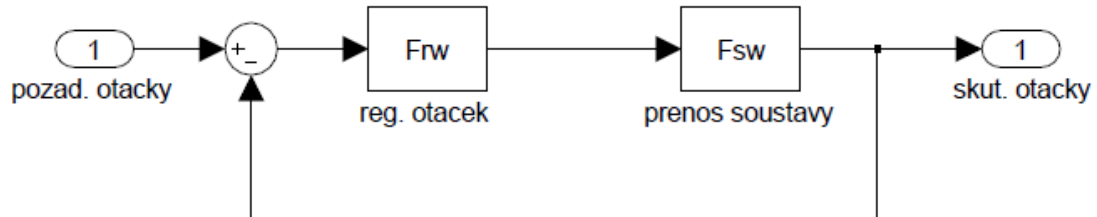
Přenos uzavřené proudové smyčky:

$$F_{WI}(p) = \frac{\frac{1}{K_I}}{2 \cdot \tau_{MEN} \cdot p(\tau_{MEN} \cdot p + 1)}$$

Výpočet momentové konstanty motoru  $C\Phi$ :

$$C\Phi = \frac{U_{AN} - (R_A \cdot I_{AN})}{\omega_n} = 0.0304 \text{Vs}$$

#### 7.4.2 Výpočet přenosu soustavy otáčkové smyčky



Obrázek 7.7 – Zjednodušené blokové schéma otáčkové smyčky

Pro přenos soustavy  $F_{SW}$  platí:

$$F_{SW}(p) = F_{WI} \cdot C\Phi \cdot \frac{1}{pJ} \cdot K_{EN} = \frac{1}{\frac{K_I}{2 \cdot \tau_{MEN} \cdot p + 1}} \cdot C\Phi \cdot \frac{1}{pJ} \cdot K_{EN} = \frac{K_S}{p(1 + p\tau_\Sigma)}$$

$$\text{kde } K_S = \frac{1}{K_I} \cdot C\Phi \cdot K_{EN} \cdot \frac{1}{J} = 2.80 \cdot 10^3 \quad \tau_\Sigma = 2 \cdot \tau_{MEN} = 1.9231 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

#### 7.4.3 Návrh PI regulátoru otáček metodou symetrického optima

Požadovaný přenos PI regulátoru metody SO:

$$F_{RW}(p) = \frac{1 + p \cdot \tau_{1W}}{p \tau_{0W}}$$

$$\tau_{1W} = 4 \cdot \tau_\Sigma = 7.69 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad \tau_{0W} = 8 \cdot K_S \cdot \tau_\Sigma^2 = 8.29 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$F_{RW}(p) = \frac{1 + p \cdot \tau_{1W}}{p \cdot \tau_{0W}} = \frac{1 + 7.69 \cdot 10^{-5} \cdot p}{8.29 \cdot 10^{-6} \cdot p}$$

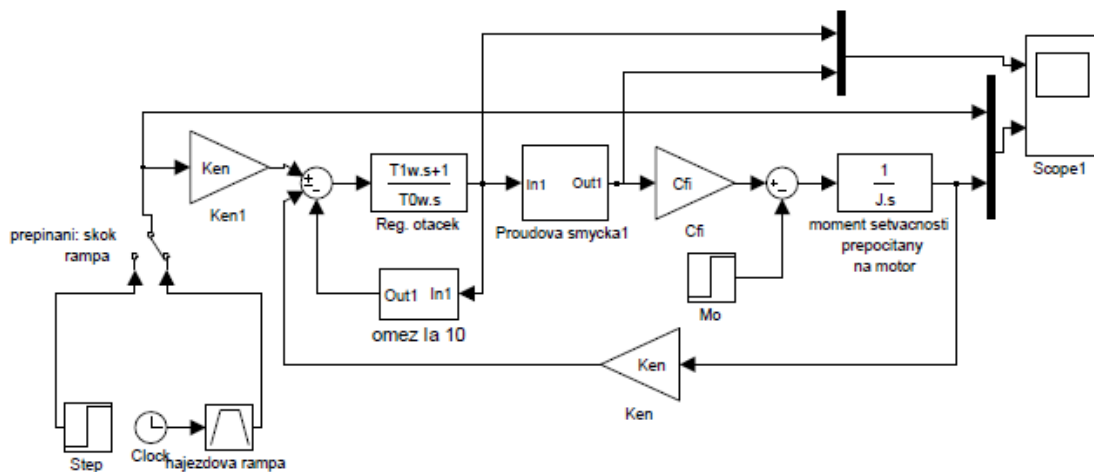
#### 7.4.4 Diskrétní přenos regulátoru otáček

Diskretizací spojitého přenosu PI regulátoru otáček s periodou vzorkování  $T_{VZW} = 4 \text{ ms}$  za použití tvarovače nultého řádu vznikne pomocí MATLABovské funkce diskrétní regulátor s přenosem:

$$F_{RW}(z) = \frac{9.276 \cdot z + 473.2}{z - 1}$$

## 7.5 SIMULACE V SIMULINKU

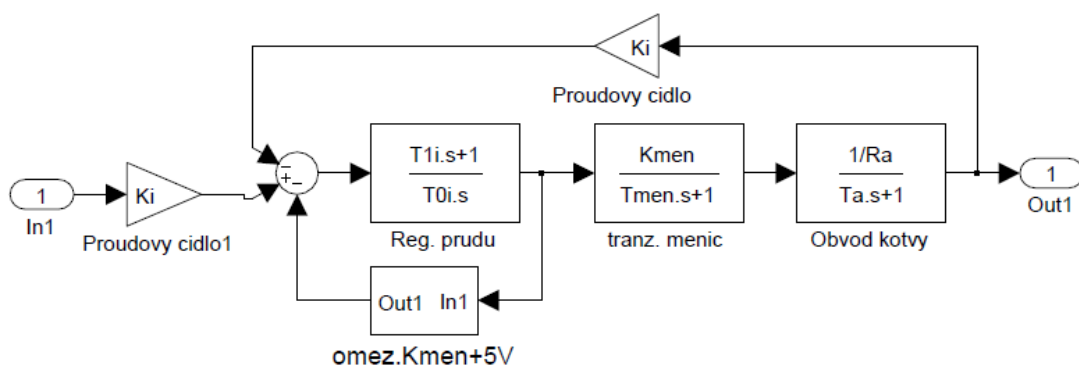
Celkové simulační schéma (viz Obrázek 7.8) zobrazuje kaskádní rychlostní regulaci s podřízenou proudovou smyčkou. Vstupem jsou otáčky motoru  $\omega$  udávané v rad/s. Chování systému je možné ovlivnit přepínáním vstupních otáček na skokovou změnu nebo pomocí náběžné rampy. Pro realizovatelnost simulace bylo vloženo omezení proudu na  $I_{MAX} = 10A$  a omezení velikosti řídicího napětí měniče  $U_{PWM} = 5V$ . V příloze 10-12 jsou zobrazeny proudové i otáčkové odezvy na jednotkový skok a nájezdovou rampu.



Obrázek 7.8 – Celkové schéma simulace

### 7.5.1 Podřízená proudová smyčka

Proudová smyčka je realizována přenosem regulátoru proudu, tranzistorovým měničem, obvodem kotvy a proudovým čidlem.



Obrázek 7.9 – Blokové schéma podřízené proudové smyčky

## 8. ZÁVĚR

Podařilo se teoreticky nastudovat, navrhnout a následně vyrobit řídicí modul pro řízení pohonů mobilního robotu.

Návrh záložního výkonového modulu pro stávající řízení mobilního robotu obsahuje integrovaný H-můstek VN3SP30, který může spínat teoreticky zátěž (pohon) pomocí PWM až 30A. Po vyrobení plošného spoje a následného osazení bylo zjištěno, že modul nepracuje správně. Ze stávajícího řídicího modulu byl ovládán nový můstek frekvencí spínání o hodnotě 63kHz. Poté bylo zjištěno, že nový můstek dokáže spínat frekvenci PWM pouze do 10kHz. Když byla tato frekvence snížena na frekvenci PWM 10kHz, tak motor a můstek při zvyšování střídavé PWM se začaly projevovat nepříjemným pískáním. Další negativní vlastností bylo ohřívání můstku i přes dostatečné chlazení.

V této práci se podařilo vytvořit nový řídicí modul jehož skutečné provedení je vidět na obrázku 6.7 obsahuje tři základní části: řídicí, výkonovou, komunikační. Ve výkonové části byl proveden výběr a návrh výkonových MOSFET tranzistorů podle jejich spínacích ztrát. Snímání proudu motorem zajišťují čtyři paralelně zapojené rezistory s celkovým odporem  $R=0.025 \Omega$ . Takto navržený snímací rezistor výkonově stačí přenášet proud až 10A. Při proudu nad 10A odpojí bezpečnostní modul motor od napájení.

Dále byl proveden kaskádní návrh regulátoru otáček s podřízenou proudovou smyčkou pomocí metod optimálního modulu a symetrického optima. Pro výpočet obou regulátorů bylo zapotřebí přepočítat celkový moment setrvačnosti na hřídel motoru. Součástí celkového momentu setrvačnosti je i setrvačná hmota mobilního robotu, která musela být převedena na ekvivalentní moment setrvačnosti. Výsledná navržená regulace byla simulována v SIMULINKu. Schéma této simulace je ukázáno na obrázku 7.8. Pro zahrnutí všech reálných omezujících faktorů bylo do simulace přidáno omezení proudu a omezení zesílení tranzistorového měniče. Výsledné simulované odezvy proudu a otáček motoru na jednotkový skok i na nájezdovou rampu jsou zobrazeny v přílohách 9,10,11.

## 9. SEZNAM LITERATURY

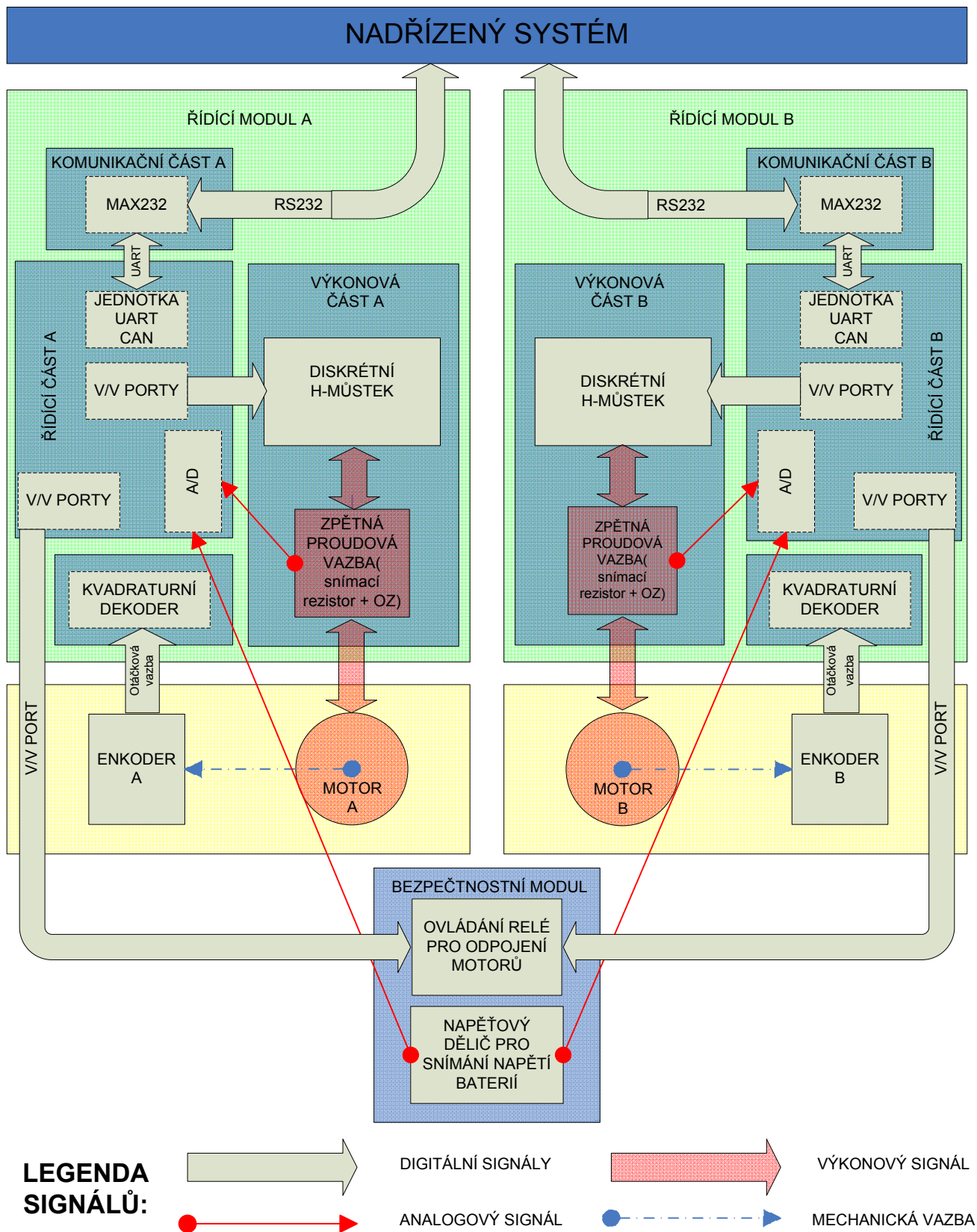
- [1] *Darpa.mil* [online]. 2004 [cit. 2010-05-13]. Darpa. Dostupné z WWW: <<http://www.darpa.mil/grandchallenge/>>.
- [2] *Robotika.cz* [online]. 2006 [cit. 2010-05-13]. Robotour (Robotika.cz > Soutěže). Dostupné z WWW: <<http://robotika.cz/competitions/robotour/cs>>.
- [3] *Cs.wikipedia.org* [online]. 2010 [cit. 2010-05-13]. Robot - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Robot>.
- [4] *Uzimec.cz* [online]. 2010 [cit. 2010-05-17]. Snímače MR. Dostupné z WWW: <<http://www.uzimec.cz/Vyrobce/maxon-motor-ag/Snimace/Snimace-MR.html>>.
- [5] *Hw.cz* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. Ovladač stejnosměrného motoru využívající PWM. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART406-Ovladac-stejnosmerneho-motoru-vyuzivajici-PWM.html>>.
- [6] Řízení stejnosměrného motoru-Ing. Martin Locker  
Prezentace:Rizeni\_stejnosmerneho\_motoru.ppt
- [7] *Datasheet ST VN3SP30-E* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. ST. Dostupné z WWW: <<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/12688.pdf>>.
- [8] *Datasheet Atmel ATmega32M1* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. Atmel. Dostupné z WWW: <[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc7647.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7647.pdf)>.
- [9] *Datasheet Freescale MC56F8322* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. Agilent technologies. Dostupné z WWW: <[www.freescale.com/files/dsp/doc/data\\_sheet/MC56F8322.pdf](http://www.freescale.com/files/dsp/doc/data_sheet/MC56F8322.pdf)>.
- [10] *Cs.wikipedia.org* [online]. 2010 [cit. 2010-05-17]. MOSFET - Wikipedie, otevřená encyklopedie .Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/MOSFET>>.
- [11] STENGL, J; TIHANYI, J. *Výkonové tranzistory MOSFET*. Praha : BEN, 2000. 191 s. ISBN 80-86056-54-6.

- [12] *Hw.cz* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. Nové AVR mikrokontroléry pro řízení motorů. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/novinky/atmel/art3099-nove-avr-mikrokontrolery-pro-rizeni-motoru.html>>.
- [13] *Cs.wikipedia.org* [online]. 2010 [cit. 2010-05-17]. RS-232. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/RS-232>>.
- [14] *Hw.cz* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. RS 485 & 422. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/docs/rs485/rs485.html>>.
- [15] *Cs.wikipedia.org* [online]. 2010 [cit. 2010-05-17]. CAN-BUS. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/CAN-BUS>>.
- [16] *Datasheet Agilent HCTL-2022* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. Agilent technologies. Dostupné z WWW: <<http://www.chipcatalog.com/Agilent/HCTL-2022.htm>>.
- [17] *Datasheet LS7083/84* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. LSI Computer Systems. Dostupné z WWW: <[http://www.lsicsi.com/pdfs/Data\\_Sheets/LS7083\\_LS7084.pdf](http://www.lsicsi.com/pdfs/Data_Sheets/LS7083_LS7084.pdf)>.
- [18] *Datasheet LS7366R-S* [online]. 2009 [cit. 2010-05-17]. LSI Computer Systems. Dostupné z WWW: <<http://www.lsicsi.com/pdfs/LS7366.pdf>>.
- [19] *Strasil.net* [online]. 2008 [cit. 2010-05-17]. Kvadrurní dekodér pro inkrementální snímače IRCDEK2 - Ivo Strašil elektronika. Dostupné z WWW: <<http://www.strasil.net/index.php?text=ircdek2>>.
- [20] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony*. Brno, 2007. 122 s. Skripta. VUT Brno.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

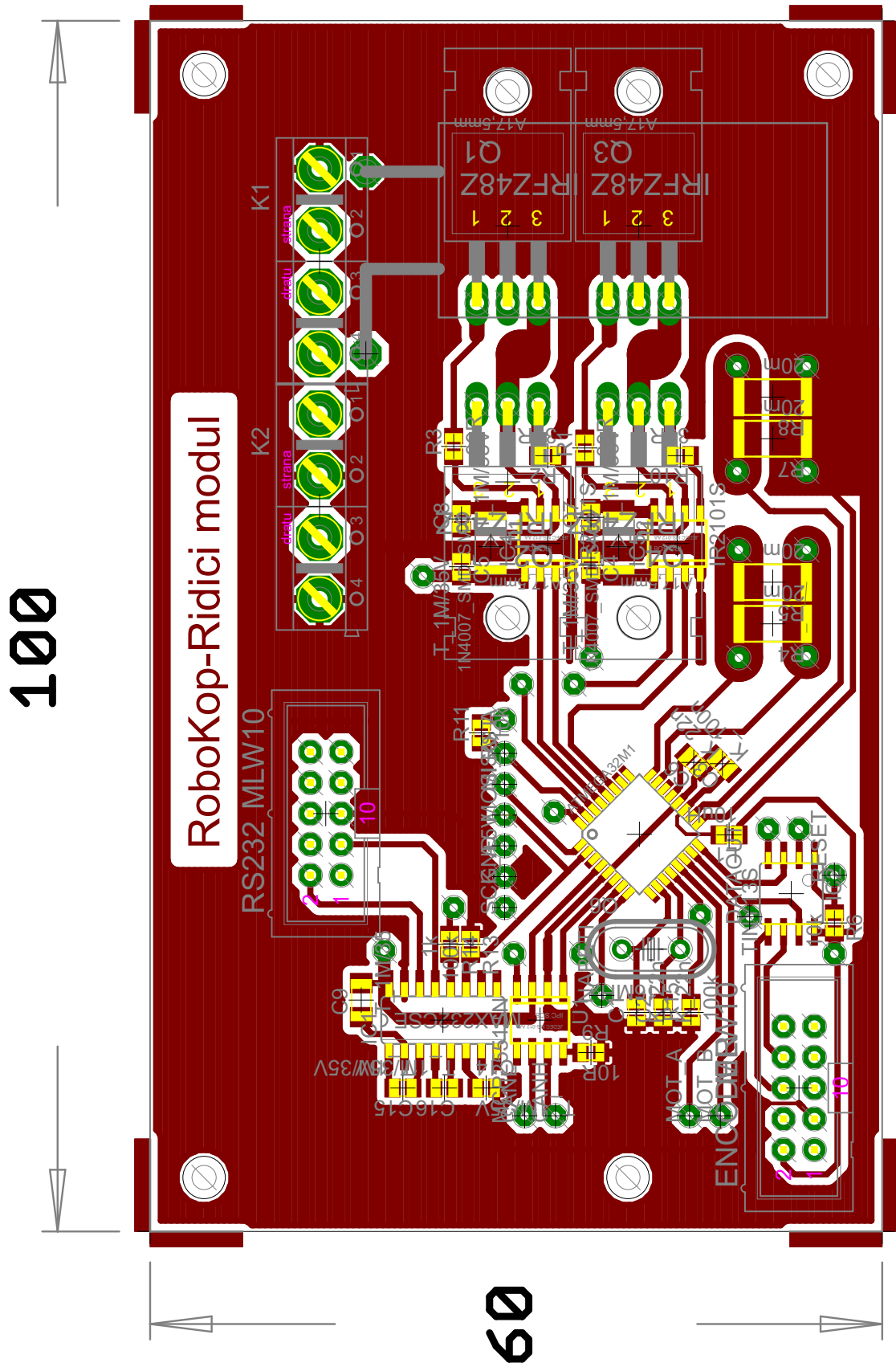
- Příloha 1      Blokové schéma systému řízení a regulace pohonů
- Příloha 2      Schéma celkového modulu řízení
- Příloha 3      DPS modulu řízení - TOP
- Příloha 4      DPS modulu řízení - BOTTOM
- Příloha 5      Schéma řídicí části modulu
- Příloha 6      Schéma výkonové části modulu
- Příloha 7      Schéma komunikační části
- Příloha 8      Schéma kvadrurního dekodéru
- Příloha 9      Schéma bezpečnostního modulu
- Příloha 10     Odezva proudu a otáček motoru na nájezdovou rampu
- Příloha 11     Odezva proudu a otáček motoru na nájezdovou rampu-výřez
- Příloha 12     Odezva proudu a otáček motoru na jednotkový skok

# Příloha 1 - Blokové schéma systému řízení a regulace pohonů

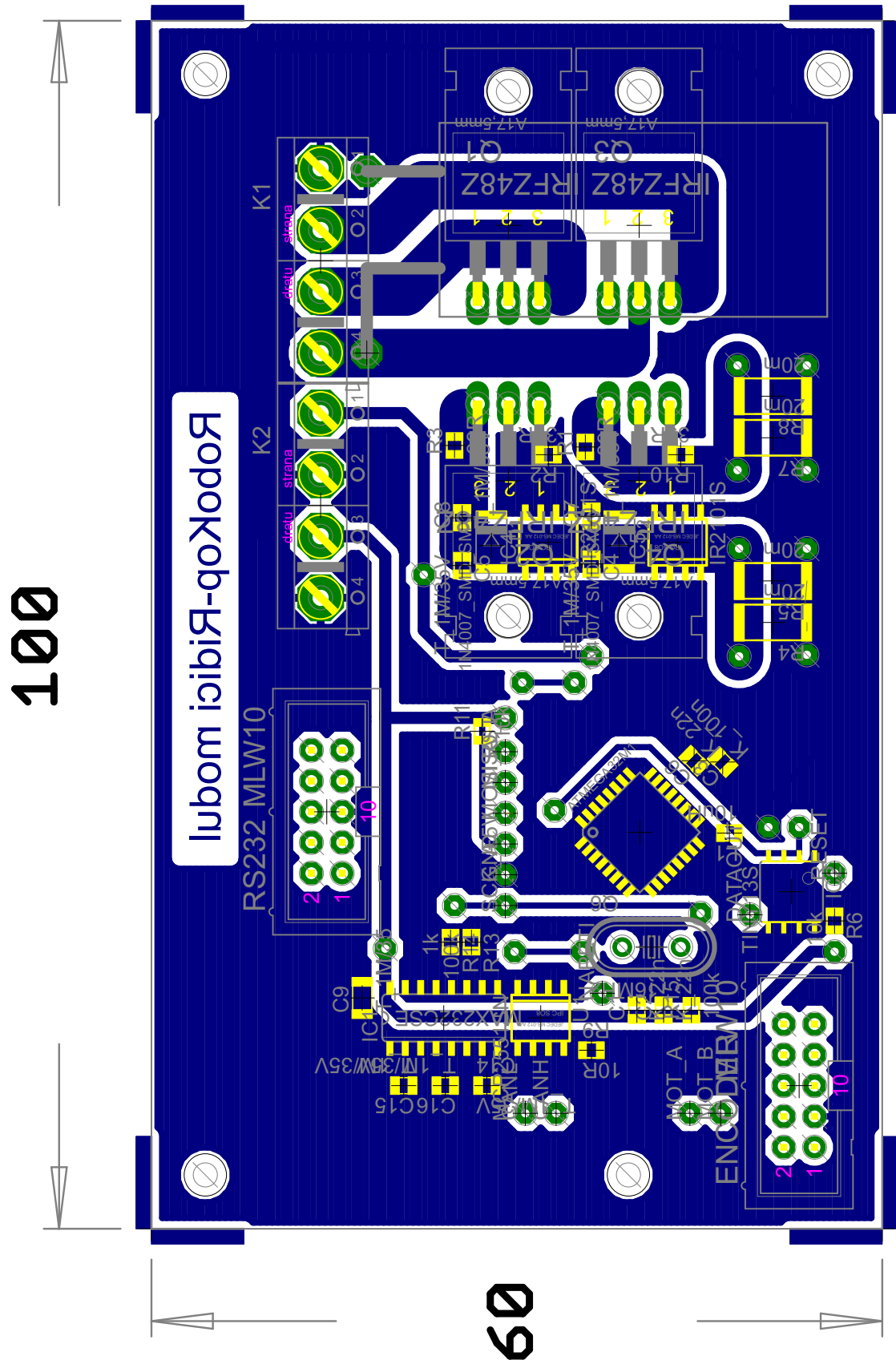




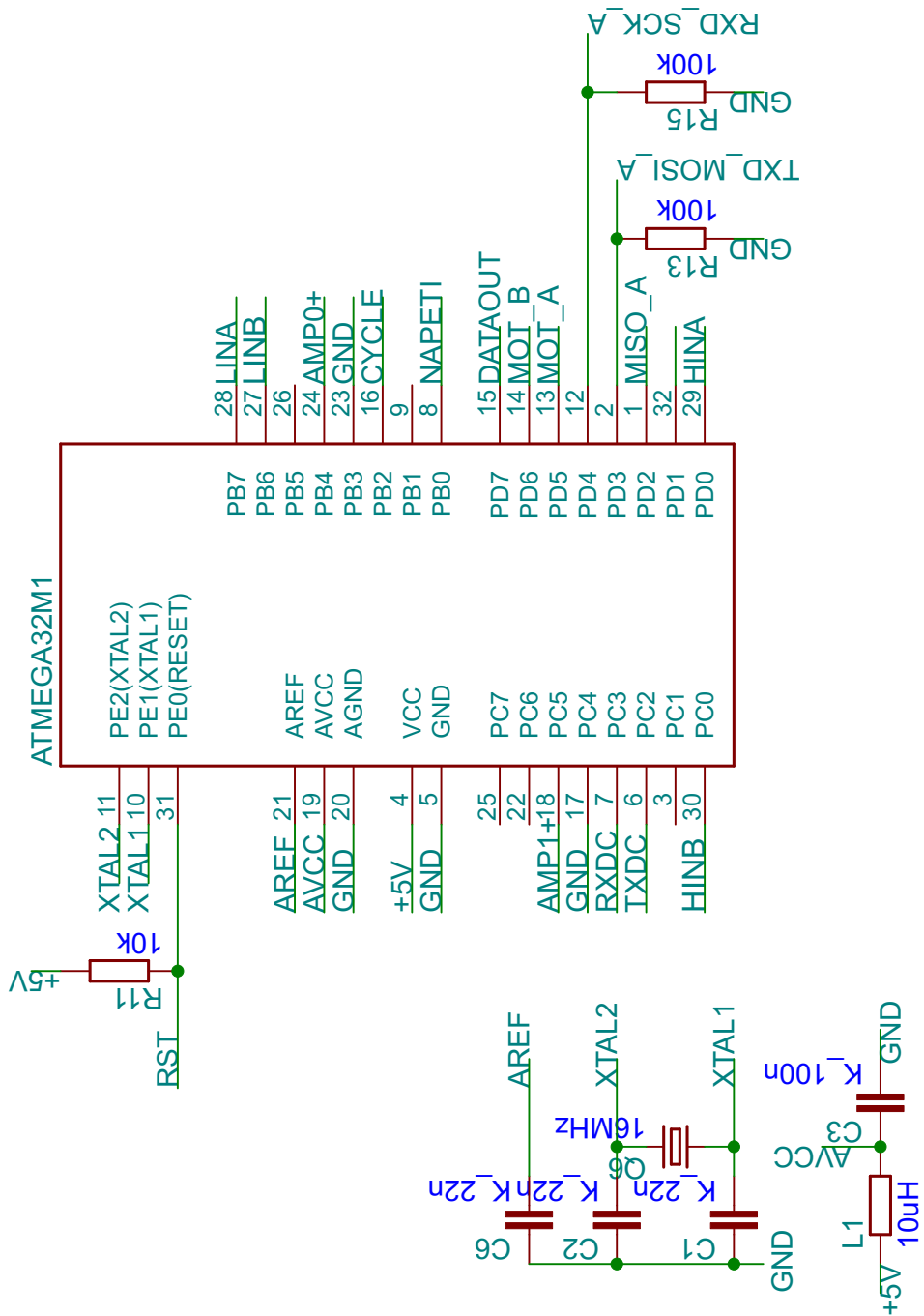
# Příloha 3 - DPS modulu řízení - TOP



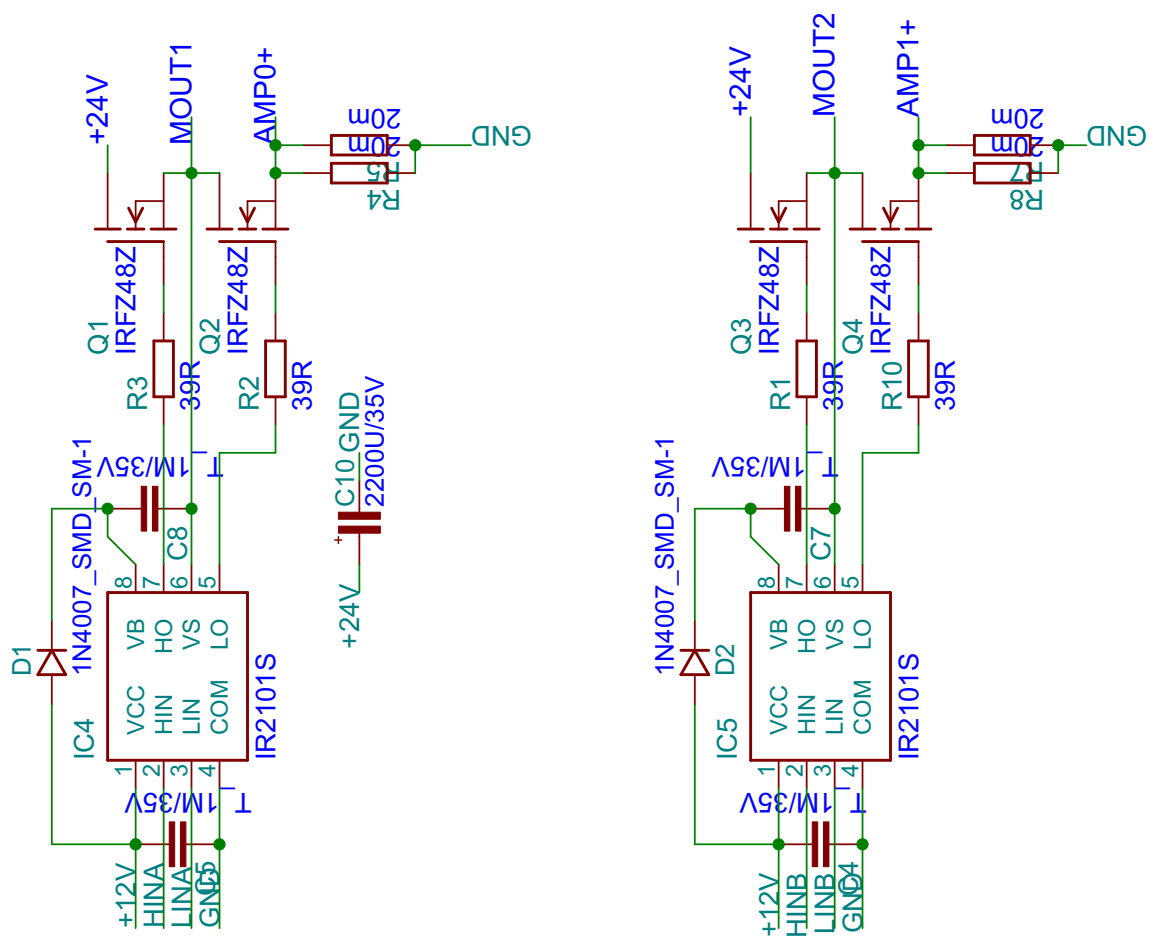
# Příloha 4 - DPS modulu řízení - BOTTOM



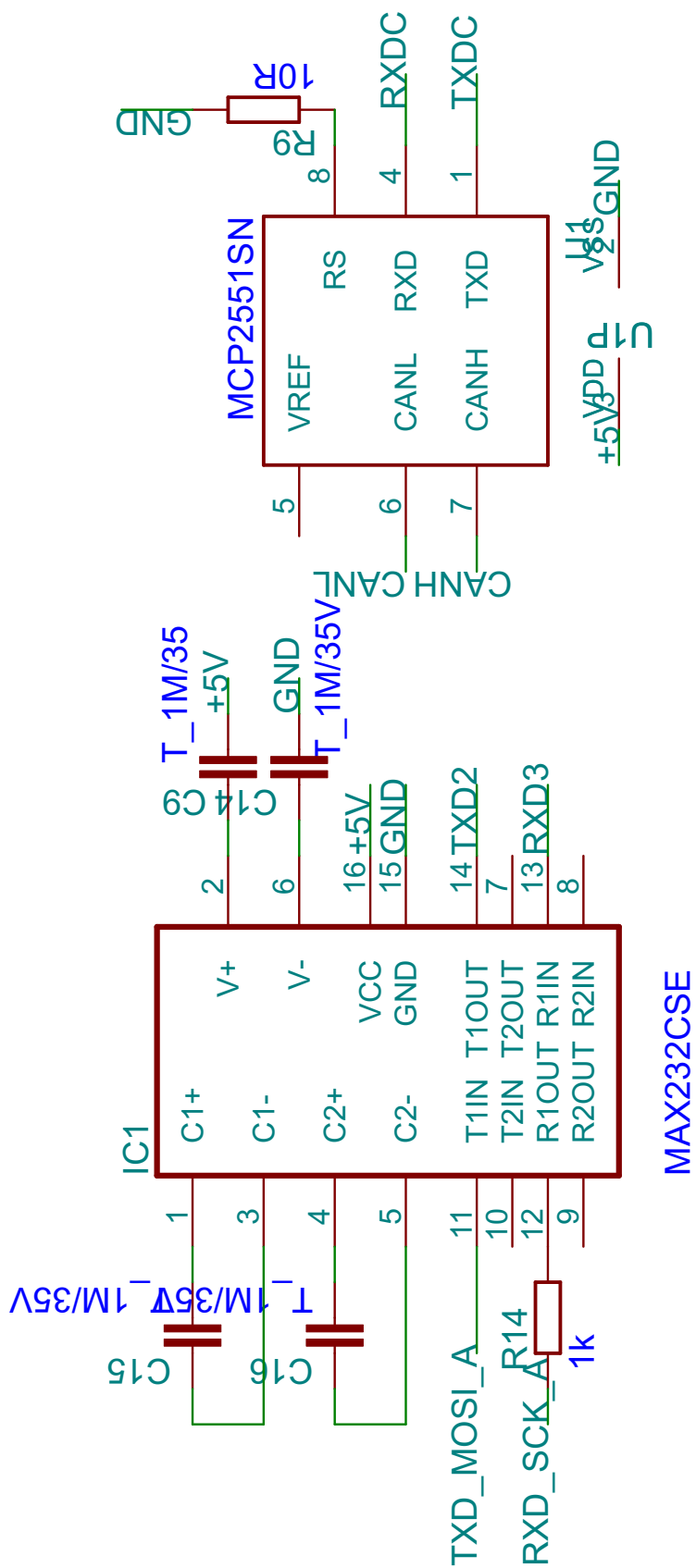
# Příloha 5 - Schéma řídicí části



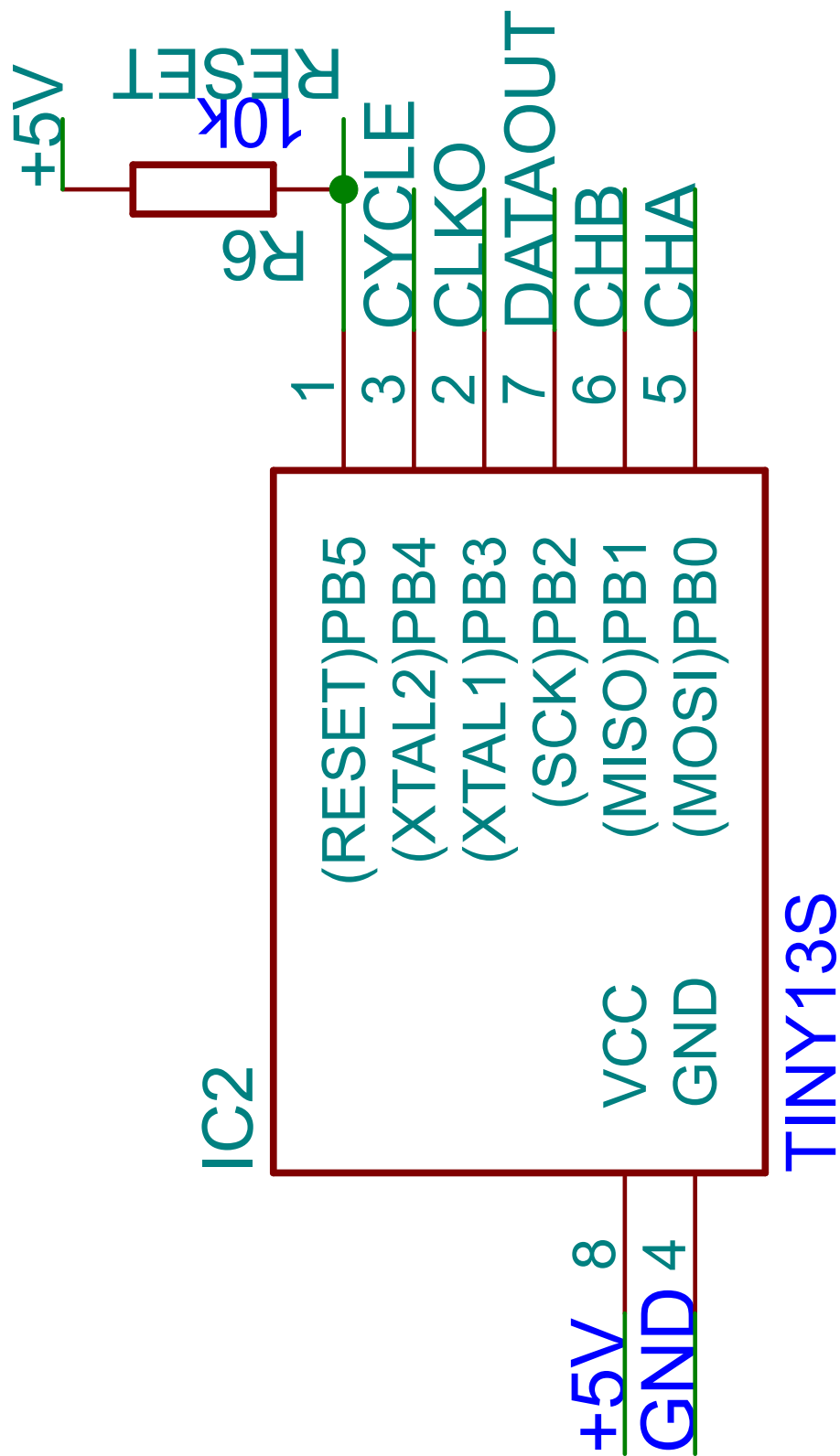
# Příloha 6 - Schéma výkonové části



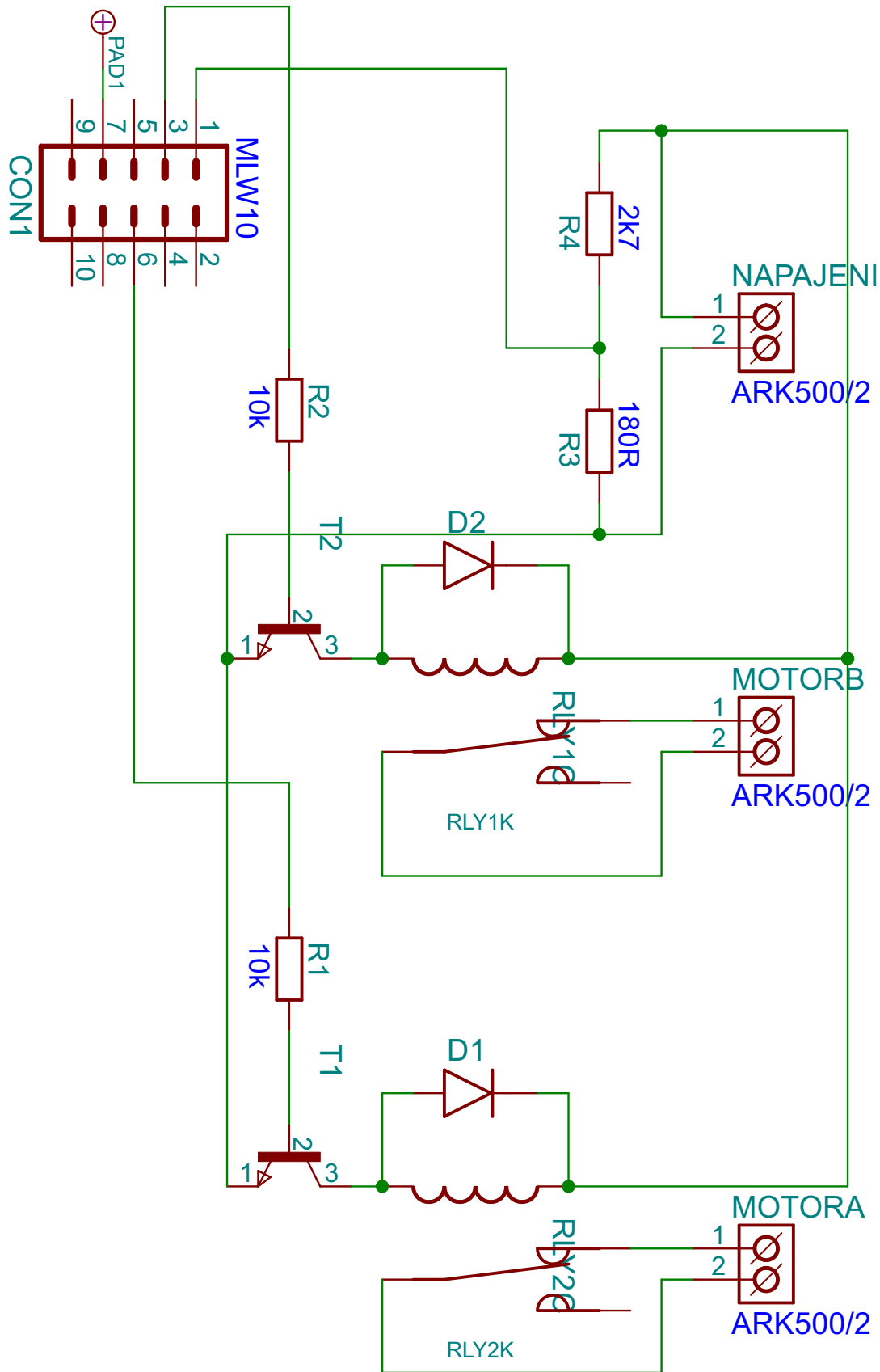
# Příloha 7 - Schéma komunikační části



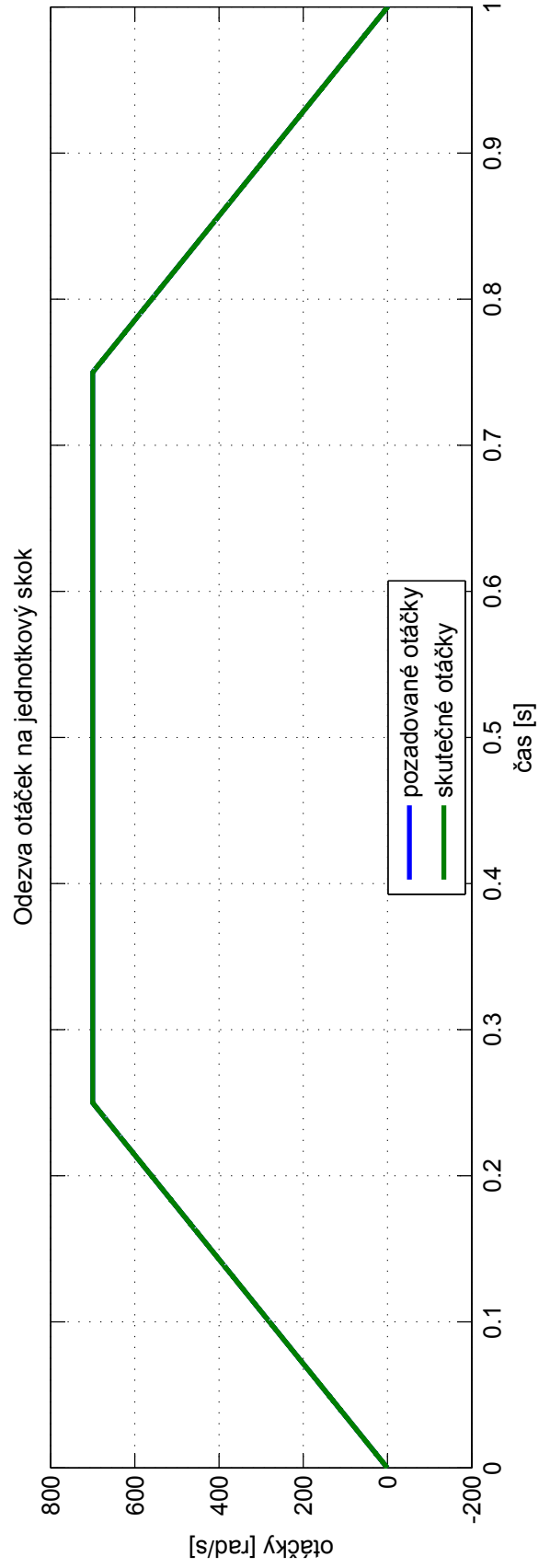
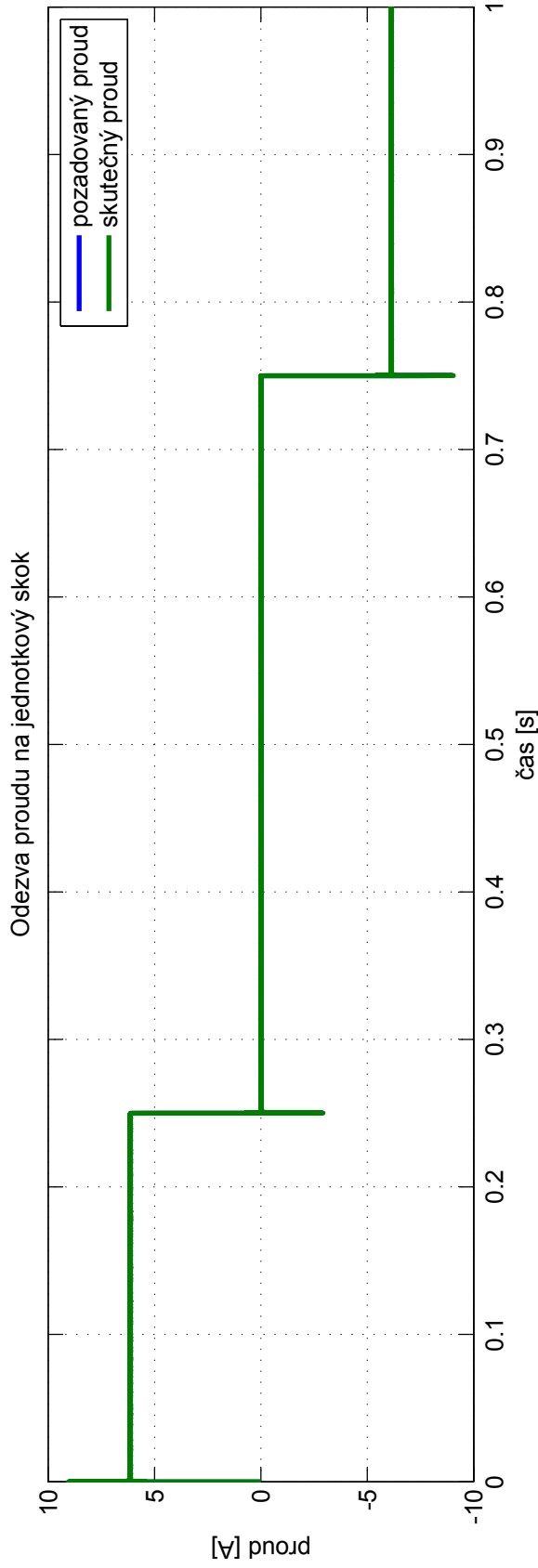
# Příloha 8 - Schéma kvadrurního dekodéru



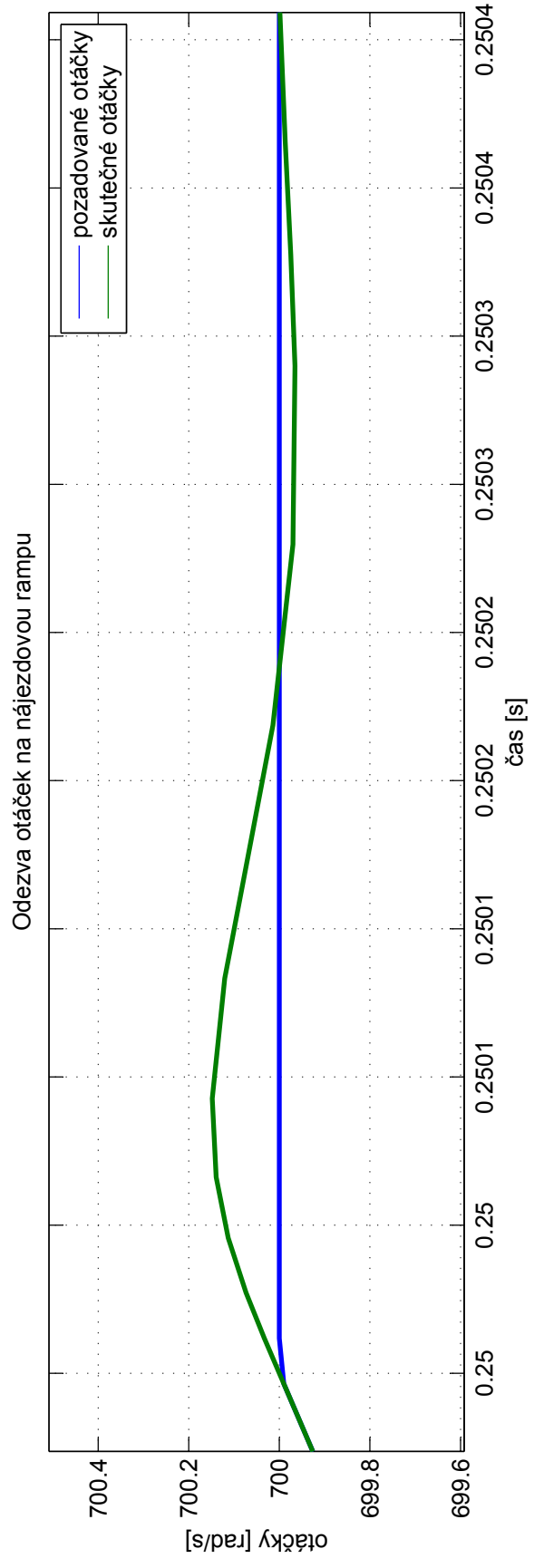
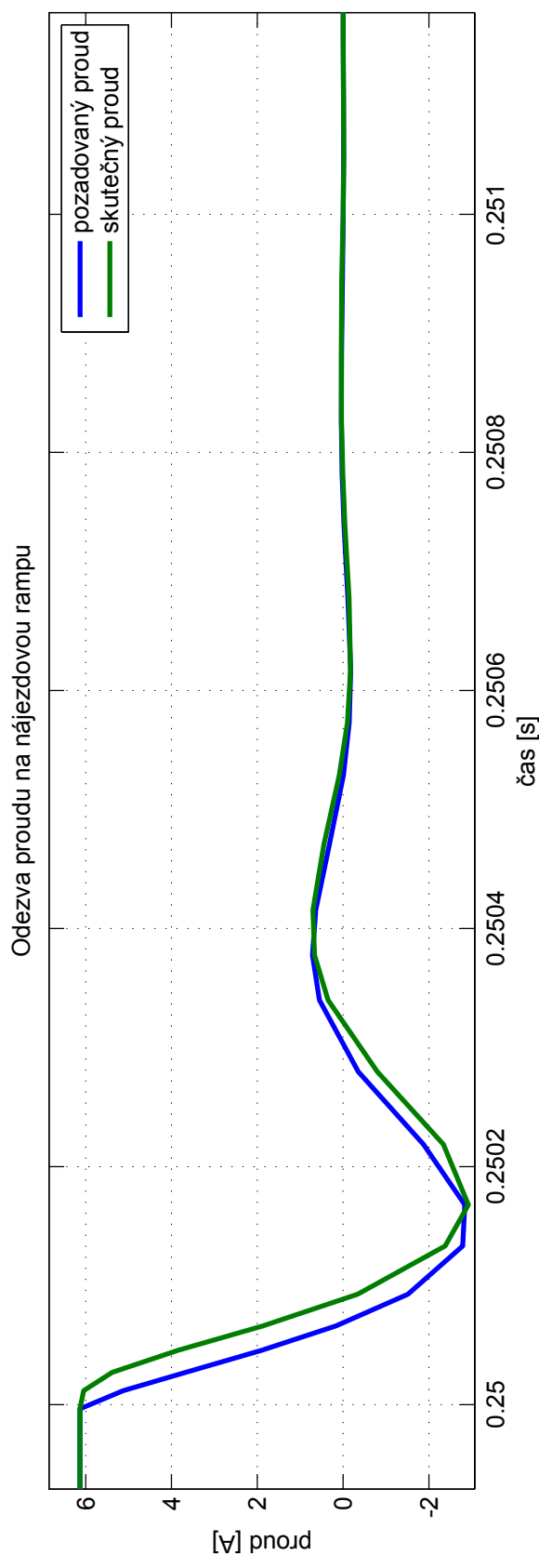
# Příloha 9 - Schéma bezpečnostního modulu



# Příloha 10 - Odezva proudu a otáček na nájezdovou rampu



# Příloha 11 - Odezva proudu a otáček na nájezdovou rampu-výřez grafu



# Příloha 12 - Odezva proudu a otáček na jednotkový skok

