

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Implementace řízení pulzního měniče**

**vedoucí práce: Ing. Luboš Streit  
autor: Bc. Bedřich Bednář**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bedřich BEDNÁŘ**  
Osobní číslo: **E10N0155P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Implementace řízení pulzního měniče**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte druhy řízení pulzních měničů.
2. Vyberte vhodný procesor pro řízení pulzního měniče.
3. Implementujte PWM řízení měniče.
4. Experimentálně ověřte dynamické chování systému.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

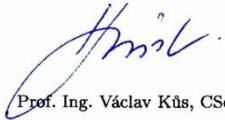
**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Streit**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je součástí projektu elektrické motokáry. V této práci jsou popsány jednotlivé použité komponenty. Dále je práce věnována druhům řízení pulzních měničů a krátce zmiňuje postavený pulzní měnič. V další části práce seznamuje se základním užitím procesorů a stručně popisuje co se v procesoru nachází a jak se tyto části využívají. Také se věnuje programování těchto čipů. Ve čtvrté části se nachází popis zvolených čidel a jejich využití na motokáře. Další část práce popisuje návrh regulátoru stejnosměrného motoru. Závěrná část práce seznamuje s programovým řešením řízení pulzního měniče a snímání použitých čidel.

## **Klíčová slova**

Elektrická motokára, pulzní měnič, programování AVR, AT90CAN32

## **Annotation**

This master thesis is part of a project of an electric go-kart. In this thesis the individual components are described. Then there are described the types of pulse converters and the one that has been built. The next section introduces the basic use of processor and briefly describes what the processor is and how to use these parts. It also deals with programming these microchips. In the fourth part is a description of the sensors and their use in go-kart. The next part describes the design of a DC motor controller. Closing part of the paper introduces a software solution for controlling the pulse converter and used sensors.

## **Keywords**

Electric go-kart, buck/boost converter, programming AVR, AT90CAN32

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 9.5.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Lubošovi Streitovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat za pomoc Ing. Karlu Čermákovi za uvedení do problematiky mikrokontrolérů AVR a panu Ing. Michalu Kubíkovi za poskytnutí desky programátoru a několika společných konzultací. Chtěl bych také poděkovat svým kolegům z teamu motokáry. Konkrétně Bc. Luděkovi Elisovi za navrhnutí univerzální desky pro procesor AT90CANxx a Bc. Janu Štěpánkovi za realizaci pulzního měniče, pro který byl řídicí algoritmus vyvíjen.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>I</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>III</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1 ELEKTRICKÁ MOTOKÁRA</b> .....	<b>2</b>
1.1 POUŽITÉ KOMPONENTY .....	4
1.1.1 <i>Baterie</i> .....	4
1.1.2 <i>Motor</i> .....	4
1.1.3 <i>Výkonové tranzistory</i> .....	5
1.1.4 <i>Univerzální deska procesoru</i> .....	5
<b>2 PULZNÍ MĚNIČ</b> .....	<b>6</b>
2.1 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ PULZNÍCH MĚNIČŮ .....	6
2.1.1 <i>Řízení s konstantním kmitočtem spínání</i> .....	6
2.1.2 <i>Dvouhodnotové řízení</i> .....	6
2.1.3 <i>Řízení s konstantní dobou sepnutí</i> .....	8
2.1.4 <i>Porovnání jednotlivých variant řízení</i> .....	8
2.2 NAVRŽENÝ PULZNÍ MĚNIČ .....	8
<b>3 VOLBA VHODNÉHO PROCESORU PRO ŘÍZENÍ PULZNÍHO MĚNIČE</b> .....	<b>10</b>
3.1 MIKROKONTROLÉRY NA JÁDRĚ AVR .....	10
- TINYAVR .....	10
- MEGAAVR .....	11
- XMEGA .....	11
3.2 ARCHITEKTURA AVR .....	11
3.3 AT90CAN32 .....	11
3.4 JÁDRO .....	13
3.5 SYSTÉM HODIN .....	14
3.6 PAMĚTI .....	16
3.6.1 <i>Paměť pro data</i> .....	17
3.6.2 <i>Vnitřní programová paměť</i> .....	17
3.6.3 <i>Vnitřní paměť EEPROM</i> .....	17
3.6.4 <i>Přerušení</i> .....	17
3.7 I/O PORTY .....	18
3.7.1 <i>Čítače a časovače</i> .....	18
3.7.2 <i>SPI - Sériové periferní rozhraní</i> .....	19
3.7.3 <i>USART</i> .....	19
3.8 PROGRAMÁTOR .....	20
3.9 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ .....	20
<b>4 ČIDLA</b> .....	<b>21</b>
4.1 ČIDLO PROUDU .....	21
4.2 ČIDLO POLOHY .....	22
4.3 MAGNETICKÝ SNÍMAČ OTÁČEK .....	23
4.4 KOMPENZACE RUŠENÍ .....	24
<b>5 REGULACE STEJNOSMĚRNÉHO POHONU</b> .....	<b>26</b>
5.1 NÁVRH REGULÁTORU .....	26
5.2 NÁVRH REGULÁTORU PROUDU .....	26
5.2.1 <i>Určení bloku regulátoru proudu</i> .....	26



5.2.2	Určení elektrické části motoru .....	27
5.3	NÁVRH REGULÁTORU OTÁČEK .....	29
5.3.1	Určení bloku setrvačnosti .....	29
5.3.2	Určení bloku konstanty $k\phi$ .....	29
5.3.3	Určení uzavřené smyčky regulace proudu .....	30
5.3.4	Frekvenční charakteristiky vypočítaného regulátoru.....	30
5.4	SIMULAČNÍ OVĚŘENÍ REGULACE OTÁČEK V PROGRAMU MATLAB .....	32
<b>6</b>	<b>PROGRAM .....</b>	<b>33</b>
6.1	REALIZACE ŘÍZENÍ V PROCESORU .....	33
6.2	ČTENÍ ČIDEL – ZPĚTNÁ VAZBA REGULÁTORU .....	37
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>39</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>40</b>
	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>

## Seznam obrázků

OBR. 1.1	TOPOLOGIE ŘÍDICÍ ELEKTRONIKY .....	2
OBR. 1.2	ROZMÍSTĚNÍ SILOVÉ ELEKTRONIKY NA MOTOKÁŘE .....	3
OBR. 1.3	LiFeYPO <sub>4</sub> LP12V80AH OD FIRMY THUNDER-SKY .....	4
OBR. 1.4	UNIVERZÁLNÍ DESKA AT90CAN .....	5
OBR. 2.1	ŘÍZENÍ PULZNÍHO MĚNIČE S KONSTANTNÍM KMITOČTEM -A) BLOKOVÉ SCHÉMA, B) PRINCIP PŮSOBENÍ ...	6
OBR. 2.2	DVOUHODNOTOVÉ ŘÍZENÍ PULSNÍHO MĚNIČE - A) BLOKOVÉ SCHÉMA, B) PRINCIP PŮSOBENÍ.....	7
OBR. 2.3	ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA MOSFETOVÉHO MĚNIČE .....	9
OBR. 2.4	NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY – SPÍNACÍ PULZY TRANZISTORŮ A ZVLNĚNÍ PROUDU MOTOREM .....	9
OBR. 3.1	AT90CAN32-TQFP .....	10
OBR. 3.2	AT90CAN32-TQFP - POPIS PINŮ.....	11
OBR. 3.3	KOMPLETNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA PROCESORU.....	13
OBR. 3.4	ZÁKLADNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA ARCHITEKTURY.....	14
OBR. 3.5	HLAVNÍ HODINOVÝ SYSTÉM A JEHO DISTRIBUCE V AVR .....	15
OBR. 3.6	ZAPOJENÍ EXTERNÍHO ZDROJE .....	16
OBR. 3.7	ZAPOJENÍ ZDROJE S KRYSTALEM .....	16
OBR. 3.8	ZÁKLADNÍ VYUŽITÍ PORTŮ .....	18
OBR. 3.9	USB PROGRAMÁTOR STK500.....	20
OBR. 4.1	HALLŮV GENERÁTOR .....	21
OBR. 4.2	PRINCIP ČINNOSTI ČIDLA LEM .....	21
OBR. 4.3	LINEÁRNÍ HALLOVA SONDA A1302 .....	22
OBR. 4.4	A1302 – REALIZACE ČIDEL POLOHY PEDÁLŮ POMOCÍ HALLOVÝCH SOND.....	23
OBR. 4.5	MAGNETICKÝ SNÍMAČ OTÁČEK AS5040 – VLEVO PRINCIP SNÍMÁNÍ, VPRAVO UNIVERZÁLNÍ TESTOVACÍ DESKA.....	23
OBR. 4.6	ZAPOJENÍ OCHRAN AD VSTUPŮ.....	25
OBR. 5.1	ZJEDNODUŠENÉ BLOKOVÉ SCHÉMA REGULACE MOTORU.....	26
OBR. 5.2	ÚPLNÉ NÁHRADNÍ SCHÉMA REGULÁTORU .....	26
OBR. 5.3	BLOK ELEKTRICKÉHO MĚNIČE.....	26
OBR. 5.4	BLOK ELEKTRICKÉ ČÁSTI MOTORU .....	27
OBR. 5.5	REGULÁTOR PROUDU S DOSAZENÝMI HODNOTAMI.....	28
OBR. 5.6	FÁZOVÁ A FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA - SIMULOVANÁ .....	28
OBR. 5.7	NÁHRADNÍ ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA REGULÁTORU OTÁČEK .....	29
OBR. 5.8	BLOK SETRVAČNOSTI SOUSTAVY .....	29
OBR. 5.9	BLOK $k\phi$ .....	30
OBR. 5.10	BLOK $F_n$ .....	30
OBR. 5.11	FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY VYPOČTENÉHO REGULÁTORU .....	31
OBR. 5.12	VÝSLEDKY SIMULACE NAVRŽENÉHO REGULÁTORU .....	32
OBR. 6.1	VÝVOJOVÝ DIAGRAM REGULACE PROUDU MOTORU .....	33
OBR. 6.2	PRINCIP VYTVÁŘENÍ PWM V PROCESORU .....	35
OBR. 6.3	NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY - DÉLKA ŘÍDICÍCH PULZŮ .....	36
OBR. 6.4	NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY - MRTVÝ ČAS DT.....	36
OBR. 6.5	NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY - ODEZVA REGULÁTORU .....	37
OBR. 6.6	PŘÍŘAZENÍ REGISTRU ADCW DO PROMĚNNÝCH PLYN A I_MOT .....	38
OBR. 6.7	PŘÍŘAZENÍ REGISTRU ADCW DO PROMĚNNÝCH I_MOT A PLYN .....	38
OBR. 0.1	UNIVERZÁLNÍ DESKA PROCESORU AT90CAN.....	1
OBR. 0.2	UMÍSTĚNÍ ČIDLA OTÁČEK U HRÍDELE MOTORU .....	2
OBR. 0.3	KOMPLETNÍ SOUSTAVA ELEKTRONIKY DRIVERU, PULZNÍHO MĚNIČE A PROCESORU .....	3
OBR. 0.4	ZOBRAZOVACÍ JEDNOTKA .....	3
OBR. 0.5	CELKOVÝ POHLED NA ELEKTRICKOU MOTOKÁŘU .....	4

## Úvod

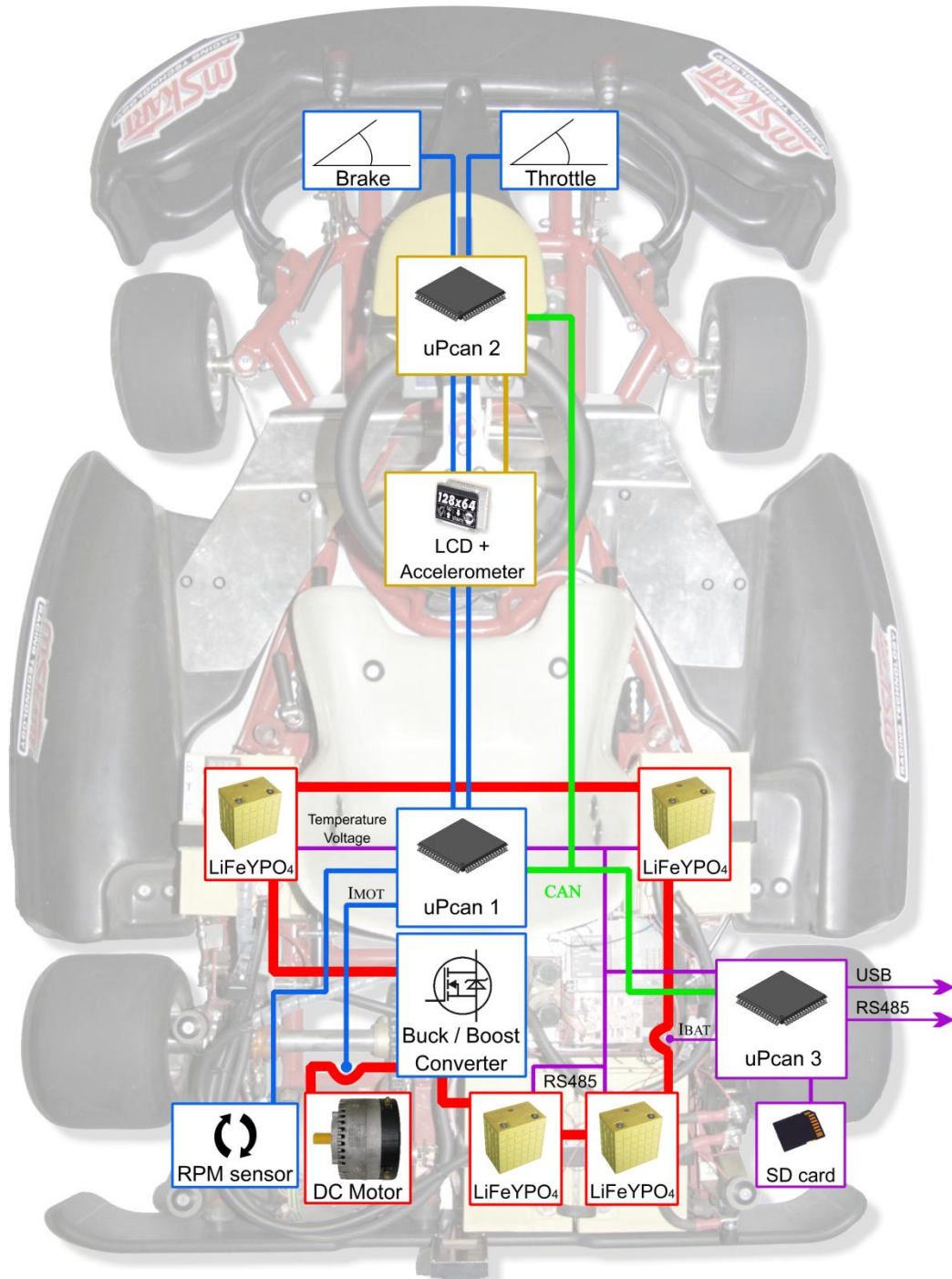
Tato diplomová práce je součástí projektu elektrické motokáry. Tento projekt vznikl za účelem reprezentace školy. Zároveň si v této práci student prakticky vyzkouší dosažené znalosti a schopnost tyto znalosti aplikovat na konkrétním projektu. Jedná se o teamovou práci, kde je uplatněno hned několik samostatných disciplín, které jsou navzájem propojeny. Je zde navržen a sestaven pulzní měnič, dále je navrženo jeho řízení. Byla navržena a sestavena zobrazovací jednotka, která je propojená s ostatními jednotkami pomocí rozhraní CAN.

V rámci této práce byl vybrán vhodný procesor k řízení pulzního měniče užitého pro řízení stejnosměrného motoru. Úkolem je seznámit se s možnostmi moderních programovatelných procesorů tzv. mikrokontrolérů. Součástí práce s procesorem bylo navrhnutí a usazení čidel snímajících elektrické i neelektrické veličiny a tyto veličiny následně v procesoru zpracovat. V práci je také navrženo regulátor stejnosměrného pohonu, který je implementován do řídicího procesoru, kde pomocí PWM modulace reguluje proud pohonem.

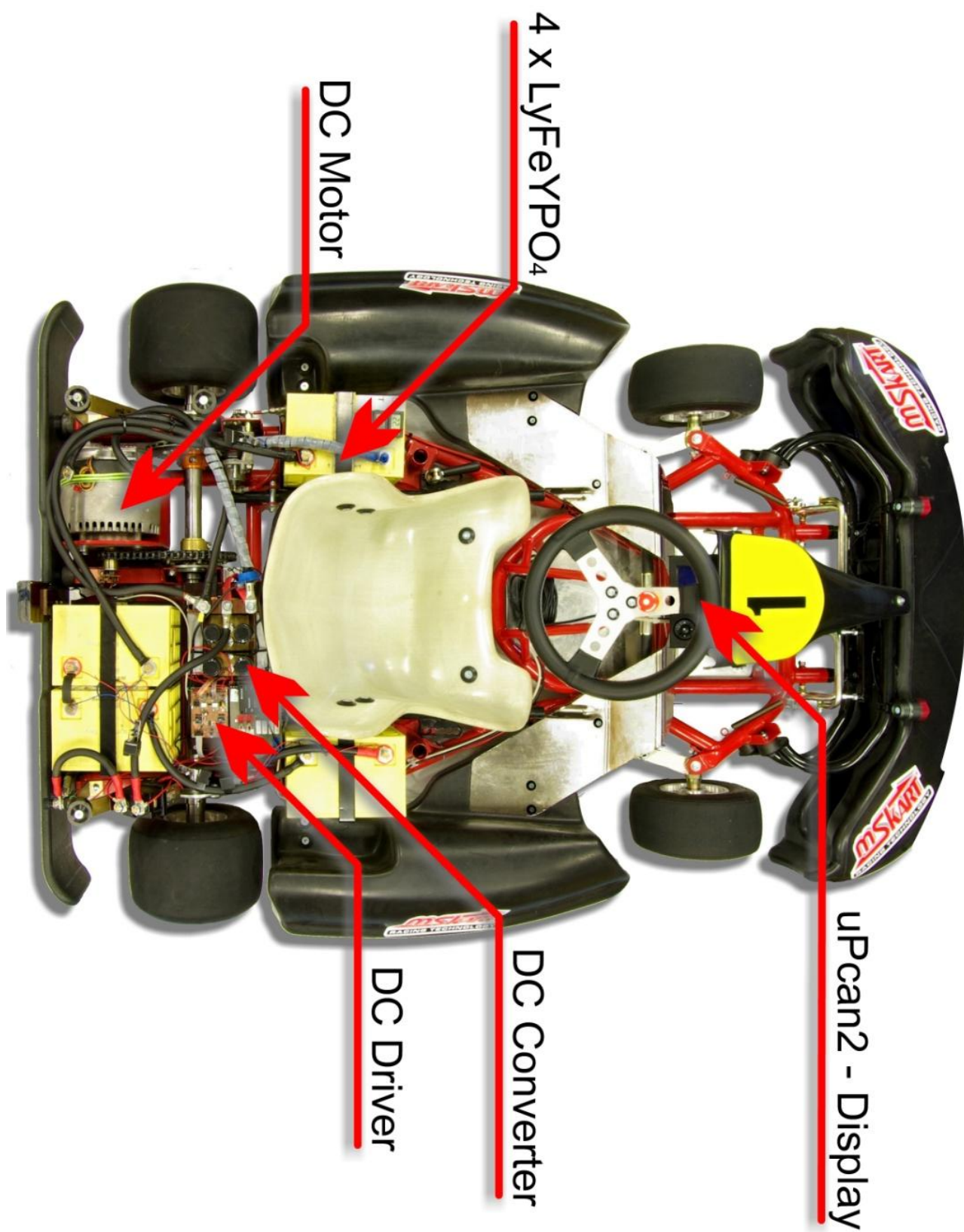
Problémem klasických spalovacích motokár je malý moment v nízkých otáčkách, nutnost vysokých stropů a ventilace v uzavřeném objektu, kde jsou motokáry často provozovány. Dalším záporem je velká hlučnost spalovacích motorů. V tomto ohledu má elektrická motokára mnoho výhod a je tedy vhodné se podobnými návrhy zabývat.

# 1 Elektrická motokára

Motokáry v půjčovnách se spalovacím motorem mají výkon cca 5kW, proto pohon sestavené motokáry je navržen tak, aby parametry odpovídal klasické motokáře. Umístění a vzájemné propojení řídicí elektroniky je zobrazena na *Obr. 1.1*.



*Obr. 1.1 Topologie řídicí elektroniky*



Obr. 1.2 Rozmístění silové elektroniky na motokáře

## 1.1 Použité komponenty

Na motokáře je použit stejnosměrný motor, snižovací pulzní měnič s jeho driverem, tři nezávislé řídicí jednotky a moderní Lithiové baterie. Na *Obr. 1.2* je zobrazeno rozmístění silové elektroniky na elektrické motokáře.

### 1.1.1 Baterie

Baterie  $\text{LiFeYPO}_4$  jsou speciálně navrženy pro dopravní prostředky. Jedná se o komerčně využívaný typ baterií z kategorie Li-ion. Na tyto baterie je kladen velký důraz na bezpečnost a dlouhou životnost. Na motokáře jsou 4 baterie spojeny do série. Nominální hodnota napětí každého článku je 12V. V zapojení do série je tedy dosaženo 48V při 80Ah nominální kapacity. Pouzdro baterie je zobrazeno na obrázku *Obr. 1.3*.




*Obr. 1.3 LiFeYPO<sub>4</sub> LP12V80AH od firmy Thunder-Sky*

### 1.1.2 Motor

Jako pohon byl zvolen stejnosměrný komutátorový motor s permanentními magnety o výkonu 4,8 kW. V tabulce *Tab. 1.1* je přehled důležitých parametrů.


*Tab. 1.1 Parametry motoru ME 0708 od firmy MARS Electric LLC*

Parametry motoru ME0708			
	Jmenovité napětí	48	V
	Jmenovitý výkon	4,8	kW
	Trvalý proud	100	A
	Max proud (1 min)	300	A
	Účinnost	85	%
	Jmenovité otáčky	3200	ot/min
	Jmenovitý moment	38	Nm

### 1.1.3 Výkonové tranzistory

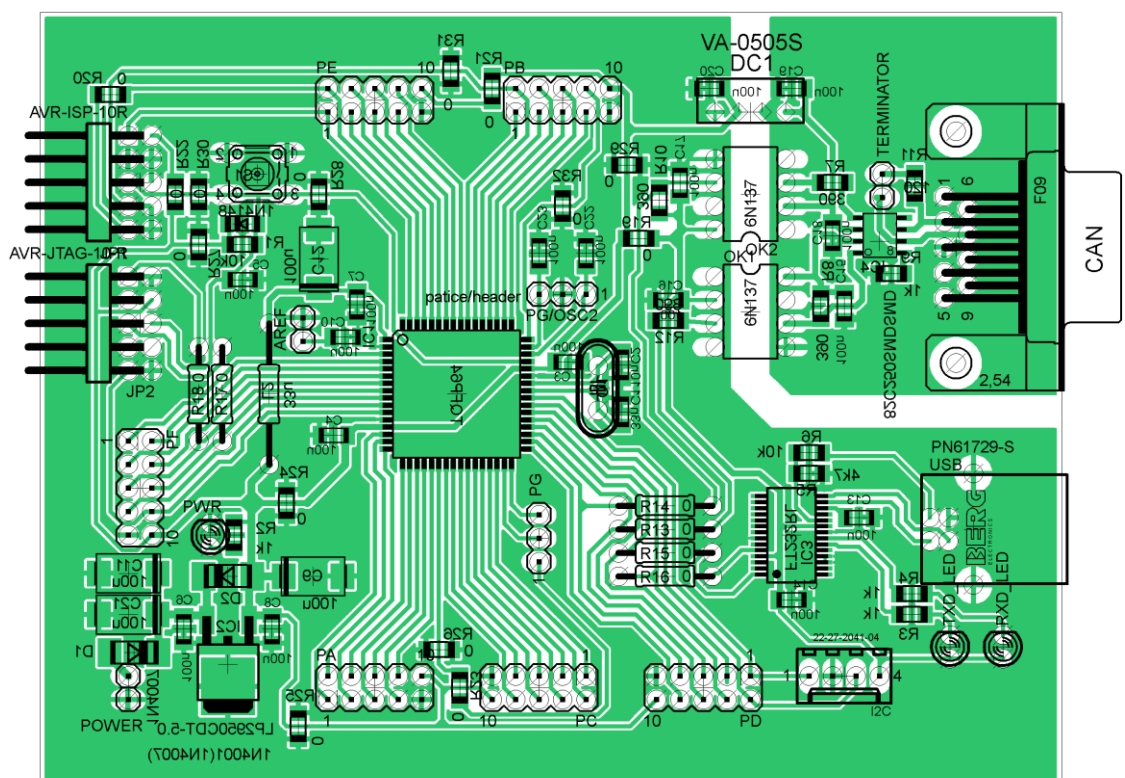
Vzhledem k vysoké spínací frekvenci (16kHz) byli zvoleny rychlé MOSFET tranzistory od firmy IRF. Požadavky na tranzistory jsou zmíněny v kapitole 2 *Pulzní měnič*. Hlavní parametry zvolených tranzistorů jsou zobrazeny v tabulce *Tab. 1.2*

*Tab. 1.2 Parametry MOSFET tranzistoru IRFP4568*

Parametry IRFP4568			
	$V_{DSS}$	150	V
	$R_{DS(ON)}$	4,8	m $\Omega$
	$I_D$ ( $T_c=25^\circ\text{C}$ )	171	A
	$I_D$ ( $T_c=100^\circ\text{C}$ )	121	A
	$C_{iss}$	10,4	nF

### 1.1.4 Univerzální deska procesoru

Pro vývojové použití byla navržena univerzální programovatelná deska s procesorem AT90CAN32, vyvedenými vstupy/výstupy, rozhraním CAN a programovacími konektory JTAG a ISP. Na *Obr. 1.4* je zobrazen návrh univerzální desky procesoru.



*Obr. 1.4 Univerzální deska AT90CAN*

## 2 Pulzní měnič

### 2.1 Způsoby řízení pulzních měničů

Pulzní měniče jsou řízeny poměrnou dobou sepnutí. Řízení může být dosahováno různými způsoby. Řízení s konstantním kmitočtem spínání, řízení dvouhodnotové a řízení s konstantní dobou sepnutí.

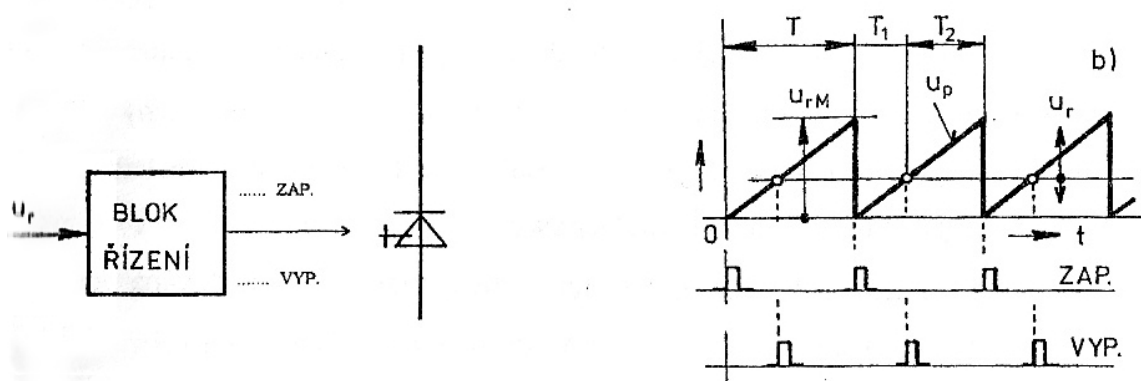
#### 2.1.1 Řízení s konstantním kmitočtem spínání

Toto řízení se provádí při konstantním kmitočtu spínání dle vztahu (2-1) a řídí se vztahem (2-2).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-1)$$

$$z = \frac{T_1}{T} \quad (2-2)$$

Princip řízení vyplývá z obrázku *Obr. 2.1*, kde blok řízení *Obr. 2.1a*) obsahuje generátor pilového napětí s konstantním kmitočtem. V intervalu poklesu pilového napětí k nule se provádí zapnutí spínače *Obr. 2.1b*). Pilové napětí je porovnáváno s řídicím napětím  $u_r$ . V okamžiku koincidence se provádí vypnutí spínače. Se změnou  $u_r$  se mění  $z$ .



*Obr. 2.1* Řízení pulzního měniče s konstantním kmitočtem -a) blokové schéma, b) princip působení

*Obrázek převzat z [3]*

#### 2.1.2 Dvouhodnotové řízení

Toto řízení pracuje tak, že hodnota  $\Delta i_d$  se udržuje konstantní. Do bloku řízení zde vstupuje signál úměrný žádané hodnotě proudu dle (2-3).



$$I'_d = \frac{(i_{dM} + i_{dMIN})}{2} \approx I_d \quad (2-3)$$

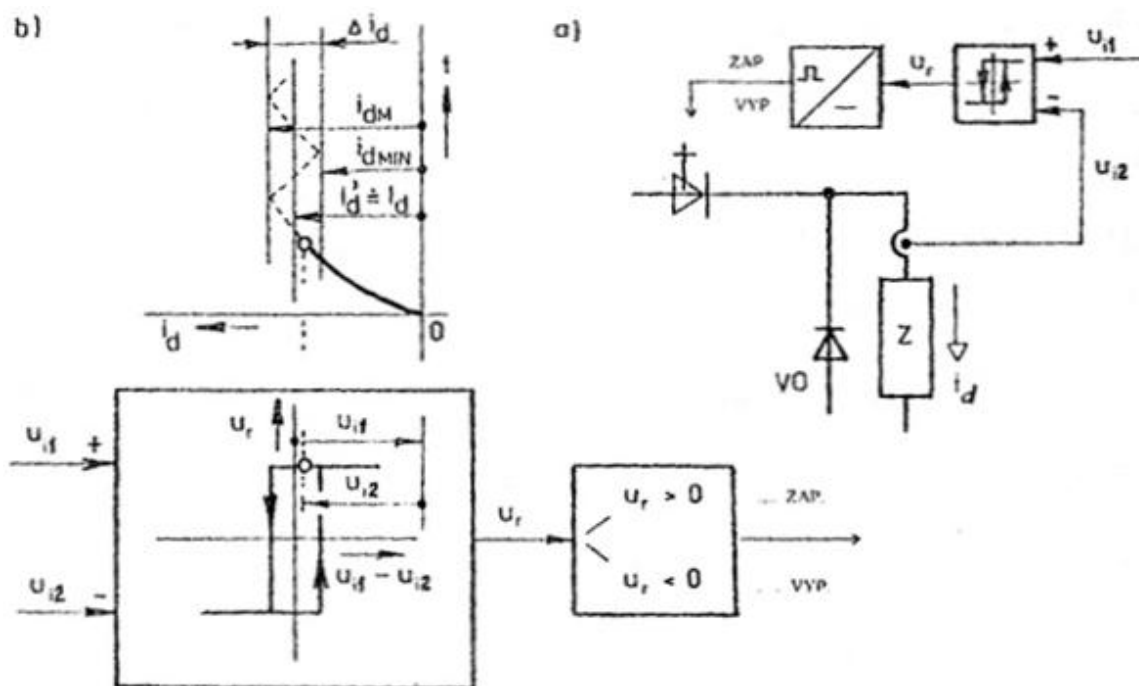
Zavedením vhodné zpětné vazby se docílí, že dosáhne-li skutečná hodnota proudu zátěže stavu (2-4), spínač vypíná a proud tedy klesá. Jakmile klesne na hodnotu (2-5) spínač znovu zapíná. Při udržování konstantní hodnoty  $\Delta i_d$  se zřejmě, v závislosti na parametrech zátěže, mění  $f$  a taktěž  $z$ . Princip činnosti dvouhodnotového řízení vyplývá z Obr. 2.2. Podstatnou částí řízení je zde klopný obvod s necitlivostí úměrnou hodnotě  $\Delta i_d$ . Do klopného obvodu vstupuje signál  $u_{i1}$  úměrný žádané hodnotě  $I'_d$  a signál  $u_{i2}$  úměrný skutečné hodnotě proudu  $i_d$ . Rozdíl těchto signálů určuje pracovní bod na statické charakteristice klopného obvodu a tím  $sgn$  výstupního signálu  $u_r$  Obr. 2.2b). Je-li  $u_r > 0$ , je na spínač trvale vysílán signál „zap.“, je-li  $u_r < 0$ , je trvale vysílán signál „vyp.“. Je-li žádán proud s hodnotou (2-6), dochází k trvalému vypnutí spínače a proud zaniká. Z toho také vyplývá, že u měniče s dvouhodnotovým řízením není možný chod s přerušovaným proudem.

Převzato z [3]

$$I'_d + \frac{\Delta i_d}{2} \quad (2-4)$$

$$I'_d - \frac{\Delta i_d}{2} \quad (2-5)$$

$$I_d = i_d < \frac{\Delta i_d}{2} \quad (2-6)$$



Obr. 2.2 Dvouhodnotové řízení pulzního měniče - a) blokové schéma, b) princip působení  
Obrázek převzat z [3]

### 2.1.3 Řízení s konstantní dobou sepnutí

U tohoto řízení se udržuje hodnota  $T_1 = konst.$  A řízení poměrů  $z$  se provádí změnou  $f$ . Tento způsob řízení má význam jen v případě, že tyristorový spínač je řešen s tyristorem, který využívá k vypnutí komutační obvod. Řídící impulsy se zde vysílají jen na jediný tyristor spínače. Jejich kmitočet udržuje žádaná hodnota  $z$ . Sepnutím tyristoru je současně uváděn do činnosti komutační obvod tak, že vždy za stejnou dobu  $T_1$  nastane jeho vypnutí. V komutačním obvodu se tím ušetří vedlejší tyristor.

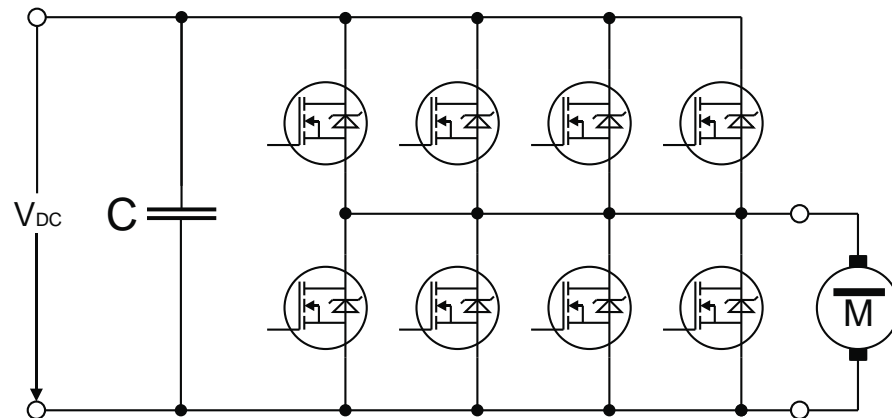
*Převzato z [3]*

### 2.1.4 Porovnání jednotlivých variant řízení

Nejpoužívanější je řízení s konstantním kmitočtem. Rušení od tohoto řízení lze díky konstantnímu kmitočtu lehce eliminovat na straně rušeného zařízení. U ostatních variant je kmitočet spínání proměnný a odrušování je proto náročnější. Dvouhodnotové řízení současně plní funkci regulátoru proudu.

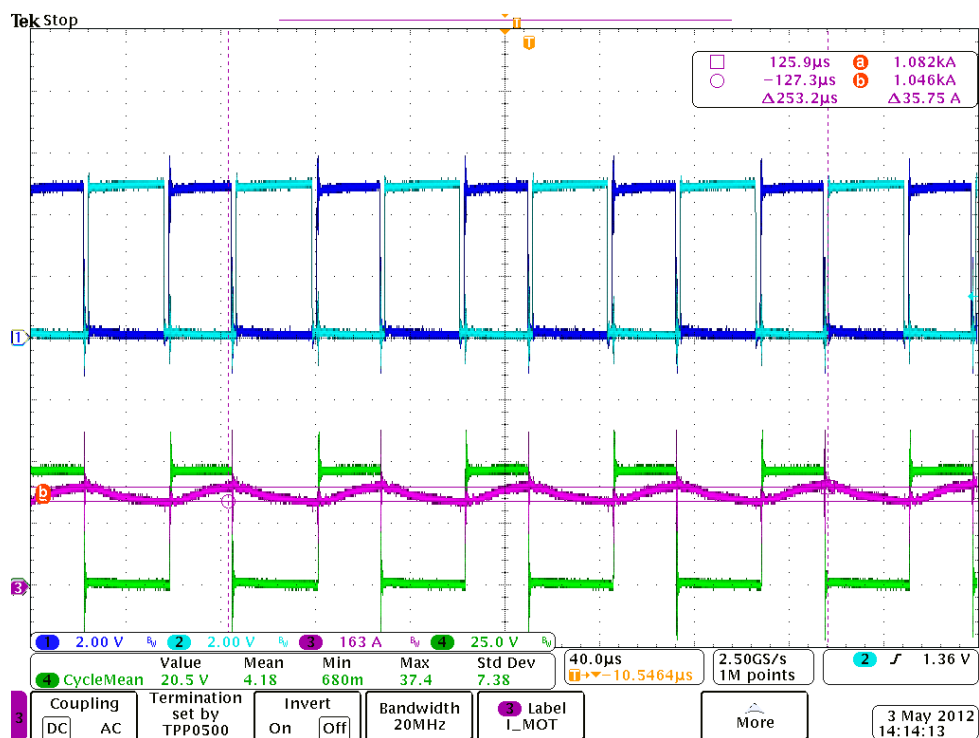
## 2.2 Navržený pulzní měnič

Navržený měnič pro tento projekt je sestaven z 8-mi MOSFETových tranzistorů. Konstrukce měniče je zobrazena v příloze. U motokár se nepoužívá couvání, z čehož vyplývá volba jen dvoukvadrantového měniče. Jeden kvadrant s horní řadou čtyř paralelně spojených tranzistorů a spodních diod tvoří snižovací pulzní měnič a spodní řada tranzistorů a horních diod tvoří zvyšovací pulzní měnič. Po měniči je požadován trvalý proud 100 A s přetížitelností až 300 A, proto bylo zvoleno paralelní spojení čtyř tranzistorů v obou skupinách. Horní řada tranzistorů se nazývá TOP a slouží pro „pohon“. Dolní řada se nazývá BOTTOM a slouží pro režim „brzda“. Zapojení výkonového obvodu snižovacího a zvyšovacího měniče je zobrazeno na *Obr. 2.3*.



Obr. 2.3 Zjednodušené schéma MOSFETového měniče

Pulzní měnič je řízen s konstantním kmitočtem ( $f = \text{konst.}$ ). Vzhledem k indukčnosti kolem  $40 \mu\text{H}$  stejnosměrného motoru je žádoucí zvolit spínací kmitočet co nejvyšší. Tím se podstatně omezí zvlnění proudu motorem. Spínací frekvence byla zvolena  $16 \text{ kHz}$  a to s ohledem na maximální vzorkovací frekvenci měření proudu v mikroprocesoru. Změřené zvlnění proudu motorem při proudu  $300 \text{ A}$  na je vidět na *Obr. 2.4 – růžově* a činí  $35 \text{ A}$ .



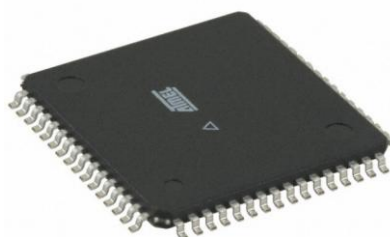
Obr. 2.4 Naměřené průběhy – Spínací pulzy tranzistorů a zvlnění proudu motorem

Na *Obr. 2.4* jsou také vidět spínací pulzy poměrného sepnutí tranzistorů. Horní skupině tranzistorů TOP náleží tmavě-modrý průběh a dolní skupině tranzistorů BOTTOM náleží světle-modrý průběh. Zelený průběh je napětí měřené na svorkách motoru.

Realizací a kompletním návrhem pulzního měniče se zabývá diplomová práce Bc. Jana Štěpánka – Stavba pulzního měniče s MOSFET tranzistory [7].

### 3 Volba vhodného procesoru pro řízení pulzního měniče

V současnosti jsou na trhu dva nejrozšířenější výrobci mikrokontrolérů a to firmy Microchip a Atmel. Pro tuto aplikaci byl zvolen mikrokontrolér od firmy Atmel a to s architekturou AVR. Atmel Corporation je výrobce polovodičů a integrovaných obvodů založený roku 1984. Mezi jeho produkty patří mikrokontroléry (včetně klonů 8051, AT91SAM založených na architektuře ARM). Mezi vlastní architektury patří Atmel AVR a AVR32, rádiové (RF) zařízení EEPROM a Flash paměťové čipy, ASIC, WiMAX, a mnoho jiných. Je schopen nabídnout řešení „system on chip“.



*Obr. 3.1 AT90CAN32-TQFP*

*Obrázek převzat z [4]*

#### 3.1 Mikrokontroléry na jádře AVR

Toto jádro je využito u čtyř skupin mikrokontrolerů:

AT90S

Tato řada se dnes již nevyrábí. Jedná se o původní řadu s jádrem AVR. Rozdíl oproti novější řadě mega AVR je počtem možných přeprogramování a sadou instrukcí.

- **TinyAVR**

1 – 8 kB programové paměti

8 – 32 pinová pouzdra

periferní sada

Počet instrukcí 90

### - **MegaAVR**

4 – 256 kB programové paměti

28 – 100 pinová pouzdra

Rozsáhlá periferní sada

Počet instrukcí 130

2,7 – 5,5 V Operační napětí

### - **XMEGA**

16 – 256 kB programové paměti

44 – 100 pinová pouzdra

Rozšířené technologické vlastnosti jako DMA a šifrování

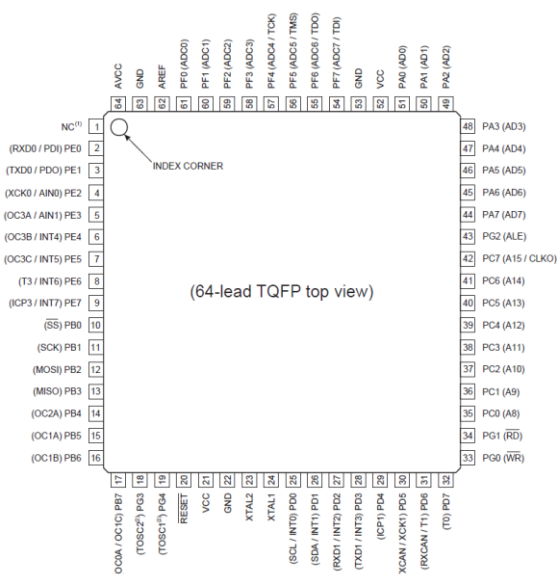
Rozsáhlá periferní sada s DAC a ADC převodníky

1,6 – 3,6 V Operační napětí

## 3.2 Architektura AVR

Procesory AVR mají tzv. Harvardskou architekturu. To znamená, že mají oddělené paměťové prostory (a sběrnice) pro data i program. Častěji je využíván s druhý typ – tzv. Von Neumannova architektura – například v běžném PC. Zde jsou data i program v jedné RAM paměti, nebo na jednom disku.

## 3.3 AT90CAN32



Obr. 3.2 AT90CAN32-TQFP - popis pinů

Obrázek převzat z [4]

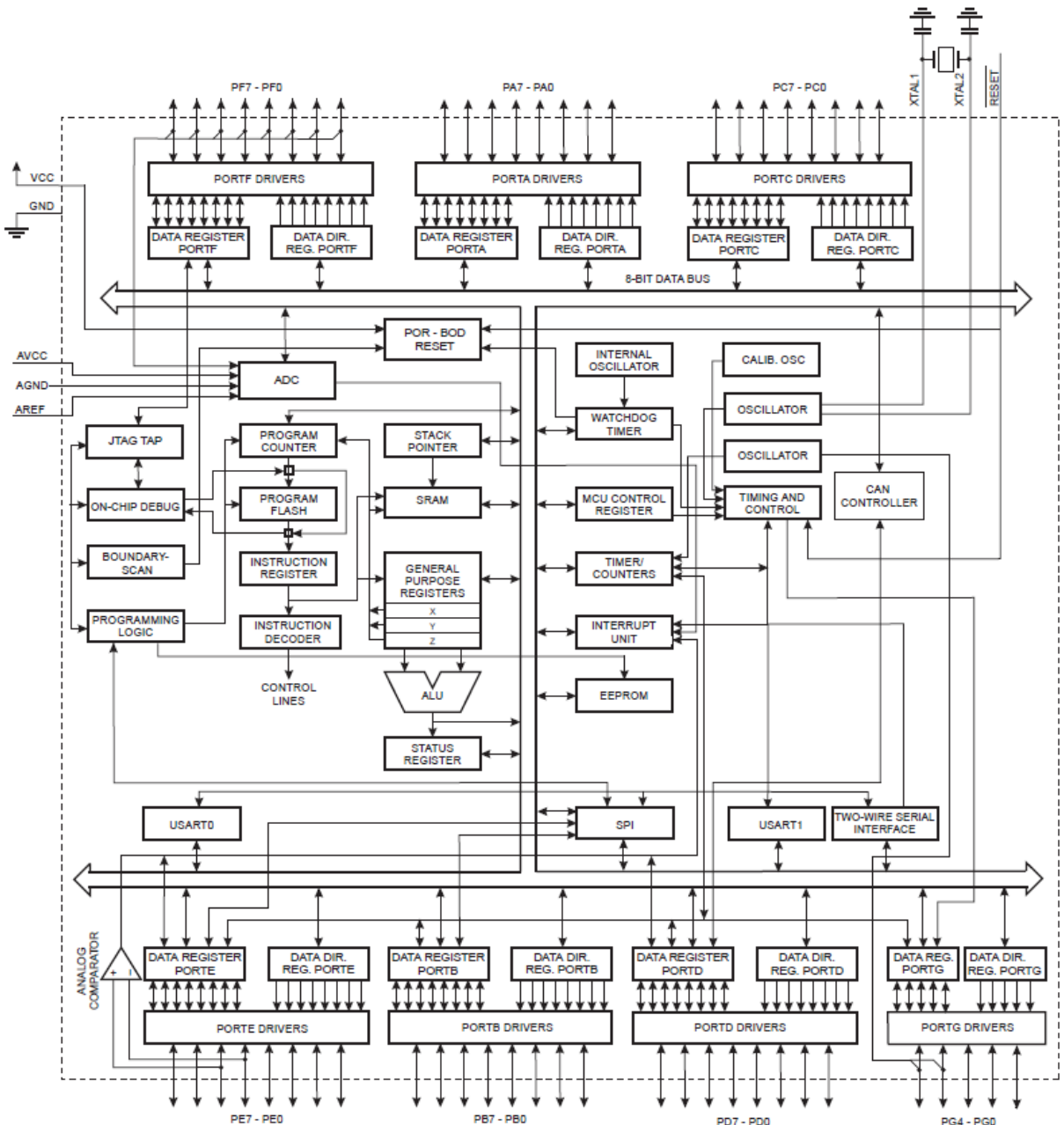
Jako vhodný procesor vzhledem k podpoře komunikačního rozhraní CAN byl vybrán procesor AT 90CAN32. Jde o tzv. jednočipový počítač, neboli mikrokontrolér s technologií RICS. V tomto jediném čipu jsou obsaženy všechny komponenty, které jsou potřeba pro běh počítače:

- Mikroprocesor AVR pracující na frekvenci až 16 MHz
- 32 kB Flash paměť - Tato paměť slouží k nahrání vlastního programu, zachovává se i po vypnutí a umožňuje až 10 000 přepisů.
- 2 kB RAM - Volně přístupná paměť na provozní data, po vypnutí se smaže.
- 1 kB EEPROM - Trvanlivá paměť na dlouhodobé ukládání provozních dat, která umožňuje až 100 000 přepsání.

Další zabudované obvody:

- JTAG interface
- CAN – Komunikační interface používaný v automobilovém průmyslu.
- 1x 8bit synchronní, 1x 8bit asynchronní a 2x 16bit synchronní čítač/časovač
- 2x 3PWM výstupy – Součástí 16bit timerů.
- 8 kanálů 10bitového A/D převodníku
- USART – Komunikuje přes sériový port.
- SPI – Další sériová komunikace.
- Vnitřní oscilátor 1 – 8 MHz - Slouží jako zdroj taktovací frekvence, pokud není čip přetaktován vnějším krystalem nebo RC obvodem.
- Watchdog timer – Automatický reset v případě zamrznutí programu.

Napájení celého jednočipového počítače je 5V. Spotřeba proudu je malá a závislá na frekvenci. Například při frekvenci 1 MHz je to řádově 3 mA. Procesor disponuje 53-mi programovatelnými vstupy/výstupy. Na *Obr. 3.3* Je zobrazeno celé blokové schéma procesoru se zobrazenými periferiemi.

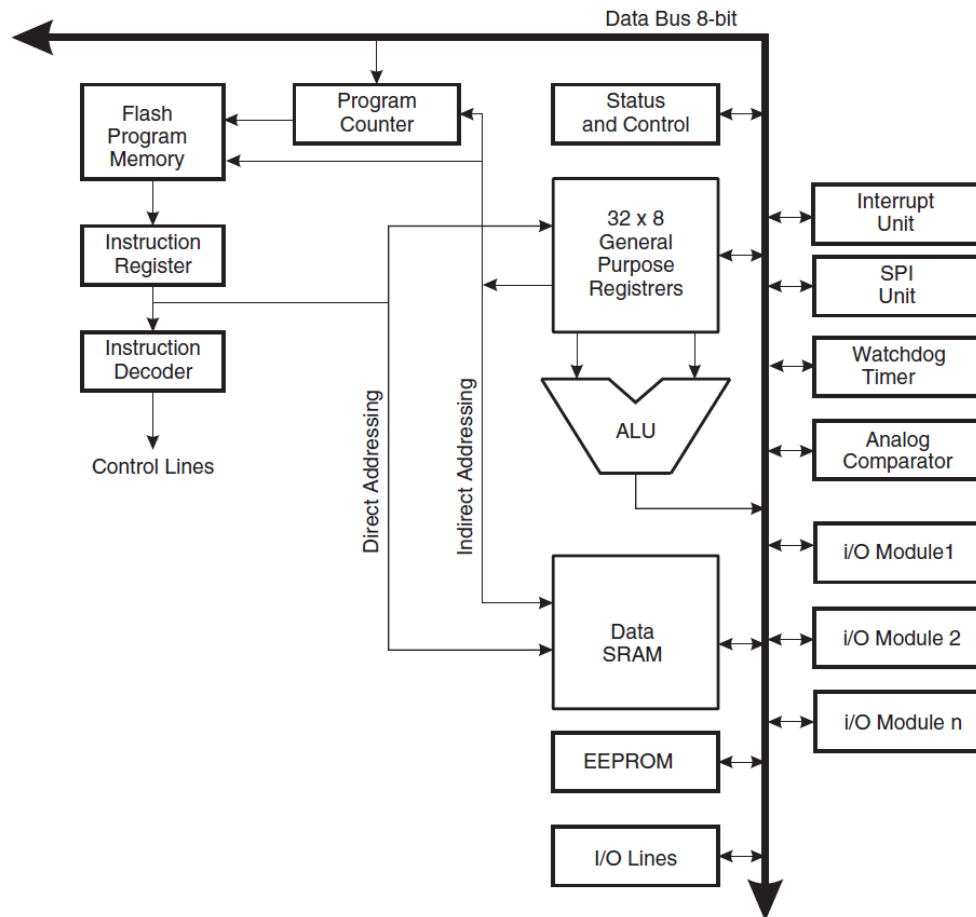


Obr. 3.3 Kompletní blokové schéma procesoru

Obrázek převzat z [4]

### 3.4 Jádro

Jádro je založené na AVR architektuře s malým počtem instrukcí. Jedná se o 8-bitovou modifikovanou Harvardskou architekturu s redukovanou instrukční sadou RISC. Skládá z 32 stejných 8bitových registrů přímo propojených s ALU, které mohou obsahovat jak data, tak adresy. To umožňuje mnohonásobnou rychlost oproti CISC mikroprocesorům.



Obr. 3.4 Základní blokové schéma architektury

Obrázek převzat z [4]

Atmel optimalizoval architekturu do jazyka C, tudíž je snadno použitelná, šetří náklady a dobu vývoje aplikací. Procesory používají předvýběr instrukce tzv. prefetch, tím dosahují výkonu až 1MIPS na MHz.

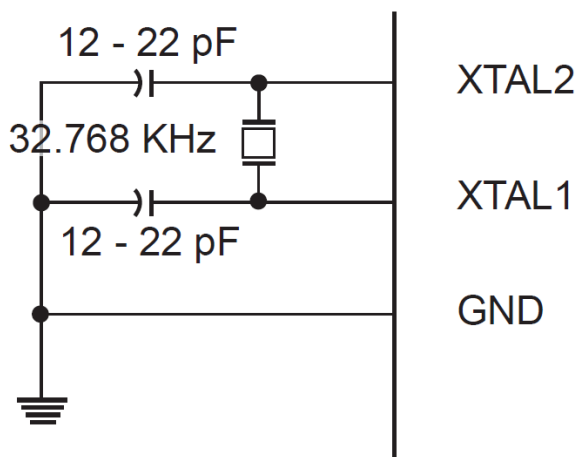
### 3.5 Systém hodin

Hlavní distribuce hodin je naznačena na Obr. 3.5 Dělí se na:

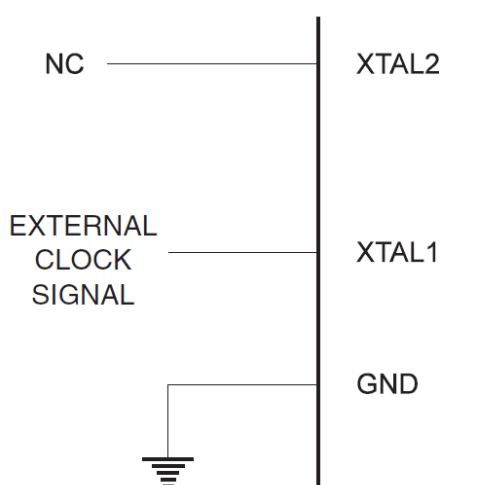
- CPU clock a I/O clock, ty se používají většinou u vstupních a výstupních jednotek, jako čítače, SPI a USART.
- Flash clock se starají o Flash rozhraní a jsou většinou aktivní s CPU hodinami.
- Asynchronní časovač dovoluje časování přímo z externího 16MHz krystalu.







Obr. 3.6 Zapojení externího zdroje



Obr. 3.7 Zapojení zdroje s krystalem

Obrázky převzaty z [4]

### 3.6 Paměti

Jak je vidět z *Obr. 3.4* AVR obsahují celkem tři druhy paměti:

- Paměť programu FLASH
- Paměť dat (přechodných) RAM (SRAM)
- Paměť dat EEPROM

Paměť RAM slouží k uchování přechodných dat. Je rozdělena na několik desítek registrů (bajtů). Tato data mohou být pouze pracovní nebo také řídicí – většina registrů ovládá periferie nebo samotný chod procesoru. Jiné zase informují o stavu, v jakém se procesor nachází. Po vypnutí napájení jsou data z paměti smazána.

Paměť programu, slouží k uložení programu a konstant, které jsou v programu využity. Tato data se ukládají pouze za použití programátoru.

Paměť EEPROM slouží pro uchování dat, která mají být po vypnutí napájení zachována. Příkladem mohou být konfigurační data anebo například kód v případě kódového zámku.

### 3.6.1 Paměť pro data

Vnitřní datová paměť je tvořena buňkami statické paměti SRAM. Tato paměť začíná blokem pracovních registrů odpovídajícím 32 registrům registrového pole (R0 až R31). Za nimi je umístěno 64 registrů I/O řídicí periferie. Jako poslední blok je volně použitelná paměť, jejíž kapacita také závisí na typu procesoru a pohybuje se od 0 B do 4 kB.

### 3.6.2 Vnitřní programová paměť

Vnitřní adresová paměť (Flash) je adresována po 2 B. Její kapacita závisí na typu procesoru a pohybuje se od 1 kB do 128 kB. Minimální zaručený počet programovacích cyklů je dle typu buď 10 000, nebo 100 000.

### 3.6.3 Vnitřní paměť EEPROM

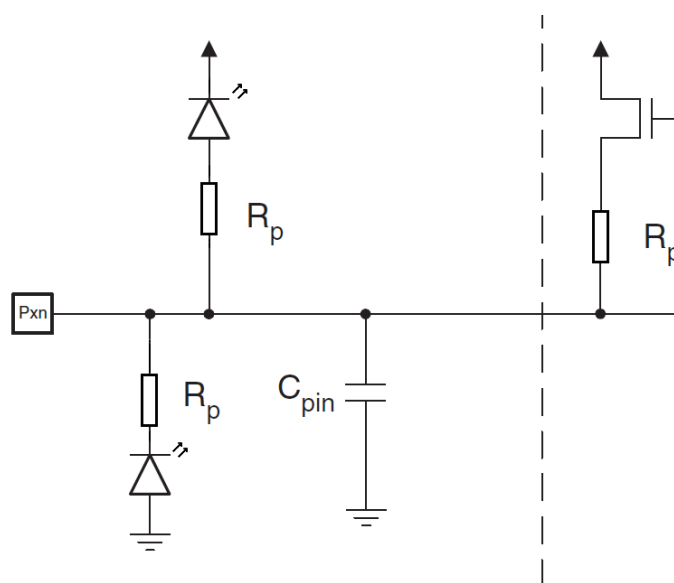
Datová paměť EEPROM se vymaže elektrickým signálem. Používá se hlavně k uložení konfiguračních dat, konstant a podobně. Minimální počet mazacích cyklů je 100 000. Zápis do této paměti je mnohem pomalejší, než do paměti SRAM. Do paměti se zapisuje po 1 B. Při mazání se oproti paměti FLASH nemaže celá paměť, ale jen potřebný bajt. Zápis lze provádět jak programově, tak i pomocí programátoru. Pro úspěšnost zápisu je třeba dodržet určité posloupnosti instrukcí. Veškerá komunikace s pamětí se děje prostřednictvím instrukcí IN a OUT. Vnitřní paměť je rozvržena na 32 hlavních registrů, 64 IN/OUT registrů a 1024 Byte paměti SRAM přístupných ve všech adresových režimech.

### 3.6.4 Přerušování

Přerušování je reakce procesoru na určitou vnitřní nebo vnější událost. Například přetečení čítače/časovače, přijetí byte sériovým kanálem SPI, změna stavu na pinu procesoru a jiné. Umožňuje, aby se normální běh programu přerušil a pokračoval na jiném místě vykonáním obslužné rutiny. Po jejím vykonání se program vrátí zpět na místo, odkud byl přerušován. Při volání přerušování program skočí na adresu paměti programu, která je určena právě pro tento druh přerušování. Na tomto řádku bývá umístěn skok na obslužnou rutinu.

### 3.7 I/O Porty

AT90CAN32 má šest 8-bitových portů PORTA, PORTB, PORTC, PORTD, PORTE a PORTF a jeden 6bitový PORTG. Zapojení v procesoru je názorné na *Obr. 3.3*. Jejich jednotlivé piny mohou fungovat jako vstupní nebo výstupní. To se určí pro každý pin jednotlivě v registrech DDRx. Nejjednodušší použití portů je například přímé rozsvícení LED v OUT režimu, nebo využití tlačítek v IN režimu. Možnosti zapojení tlačítek a LED diod ukazuje *Obr. 3.8*.



*Obr. 3.8 Základní využití portů*

*Obrázek převzat z [4]*

U většiny pinů je uvedeno více popisků. Takové piny je možno za běhu programu přepnout mezi tím, zda se chovají jako digitální port nebo zda využívají jiné předurčené funkce, které jim jsou přiřazeny.

#### 3.7.1 Čítače a časovače

Procesory AT90CAN32 obsahují celkem čtyři čítače/časovače. Dva 8-bitové a dva 16-bitové. Výstupní signály mohou být předděleny předřadnou předděličkou, a to v hodnotách 8, 64, 256, nebo 1024. Jedná se o samostatné části procesoru, nezávislé na probíhajících instrukcích. Čítače a časovače nastavujeme speciálními registry:

TCNT(N) – obsahuje načítanou hodnotu

OCR (N) – obsahuje hodnotu, s níž se TCNT(N) porovnává

TCCR(N) – řídí funkce čítače/časovače

TIMSK – masky přerušení

**Čítač** – čítá impulzy z vnějšího zdroje. Pravidelným čtením a nulováním můžeme měřit frekvenci signálu.

**Časovač** – načítá pulzy, které jsou určeny vnitřním zdrojem hodinových impulzů a případnou předřazenou předděličkou. Tento způsob se nejčastěji využívá pro časování pravidelných intervalů (blikání, odesílání zpráv a podobně). Další možností je odměření času načítáním vnějších pravidelných impulzů.

### 3.7.2 SPI - Sériové periferní rozhraní

SPI dovoluje vysokorychlostní synchronní přesun dat mezi AT90CAN32 a periferními zařízeními či mezi několika AVR zařízeními. V procesoru je možné SPI využívat k:

- 3 vodičový synchronní přenos dat (MOSI, MISO, SCK)
- volitelná funkce Master nebo Slave
- 4 programovatelné rychlosti
- duplexní provoz
- volba sledu bitů (MSB – LSB nebo LSB – MSB)
- příznak konce přenosu
- příznak kolize přenosu
- ukončení činnosti módu Idle po příjmu dat v módu Slave

### 3.7.3 USART

USART – Univerzální synchronní a asynchronní sériový přijímač a vysílač.

Jednotka se dělí na tři části:

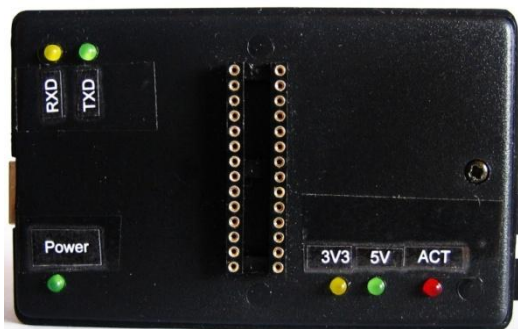
**Generátor hodinových pulzů** slouží k synchronizaci vysílací i přijímací části. Používá se pro synchronní sériový režim.

**Vysílač.** Je-li jednotka USART korektně nastavena, provede se odeslání byte pouhým zapsáním do registru UDR. Po úspěšném odvysílání je nastaven příznak TXC v registru UCSRA.

**Přijímač.** Je-li jednotka USART korektně nastavena, je po příjmu znaku nastaven příznak RXC v registru UCSRA. Poté je možno přečíst přijatý znak opět z registru UDR. Důležité je, že znak může být čten pouze jednou.

### 3.8 Programátor

U USB programátorů je využíváno přenosu tzv. virtuální sériovou linkou. Toto propojení je zajištěno připojením převodníku FTDI RS232 na USB port. Takové řešení využívá i USB programátor STK500 AVR ISP Programmer. Jedna z modifikací tohoto programátoru je k dispozici na internetových stránkách ZČU - katedry aplikované elektroniky. Sestavený programátor je zobrazen na *Obr. 3.9*.



*Obr. 3.9 USB programátor STK500*

### 3.9 Vývojové prostředí

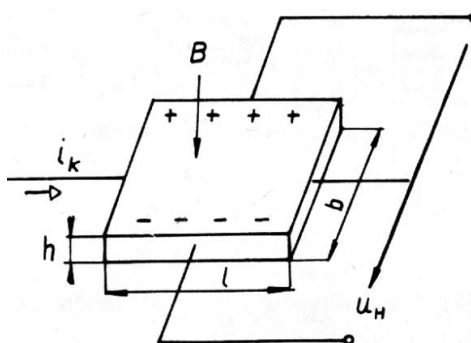
Pro tvorbu programu je potřeba vývojového prostředí. Je možné využít prostředí AVR Studio firmy Atmel. Získat jej můžeme zdarma po registraci na stránkách Atmelu. Další prostředí, které je k dispozici, se nazývá CodeVisionAVR. Toto prostředí má jednoduché ovládání a celkem funkčního průvodce. Při vytváření projektu si můžeme pomocí něj přednastavit veškeré porty, nastavit používání čítačů a časovačů a další užitečné přednastavení nového projektu. Všechna vývojová prostředí využívají programování v jazyce C.

## 4 Čidla

Aby motokára mohla řádně fungovat, tak je potřeba měřit hned několik veličin. Ať už se jedná o elektrické veličiny jako je proud motorem, tak i o veličiny neelektrické, což jsou například polohy pedálů plynu a brzdy.

### 4.1 Čidlo proudu

Nejdůležitějším čidlem z hlediska regulace je čidlo proudu. Snímaný průběh proudu je neharmonický. Je tedy vhodné použití čidla s Hallovým generátorem. Princip tohoto generátoru je zobrazen na *Obr. 4.1*.

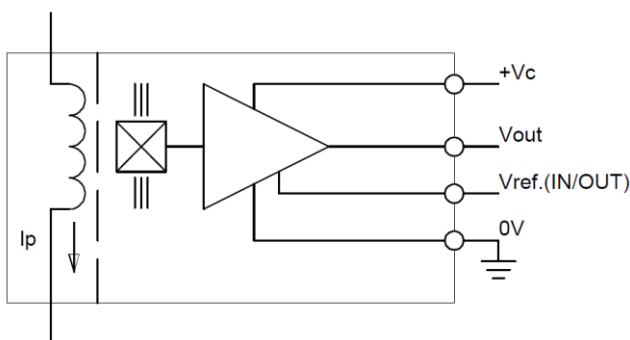


*Obr. 4.1* Hallův generátor

Napětí na svorkách Hallova generátoru je dáno rovnicí (4-1), kde  $R_H$  je Hallova konstanta závislá na materiálu destičky a také na teplotě.

$$U_H = R_H \frac{B \cdot i_k}{h} \quad (4-1)$$

Jedním z nejvýznamnějších výrobců těchto typů čidel je švýcarská firma LEM, ta využívá Hallovy generátory ve svých čidlech pracujících na kompenzačním principu. Další popis principu je vztahován k obrázku *Obr. 4.2*.



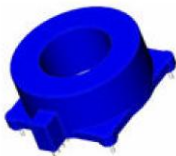
*Obr. 4.2* Princip činnosti čidla LEM

Měřený proud  $I_p$  vytváří v magnetickém obvodu primární magnetický tok. Na Halově generátoru, který je umístěn ve vzduchové mezeře, vzniká napětí úměrné toku a předává je do zesilovače. Zesilovač pracující jako zdroj proudu napájí kompenzační vinutí magnetického obvodu s  $N$  závitů. Proud tohoto kompenzačního vinutí vytváří sekundární magnetický tok orientovaný proti toku primárnímu, dokud jej nevykompenzuje. V tomto okamžiku jsou primární a sekundární toky shodné, takže pro proudy, které jej vytváří, musí platit vztah (4-2).

$$I_m = \frac{I_p}{N} \quad (4-2)$$

Tento proud je tedy zmenšenou kopií proudu primárního a můžeme jej měřit přímo na AD vstupu mikropočítače. Vzhledem k rušení od měniče je však připojen přes filtrační obvod popsaný v kapitole 4.4 *Kompenzace rušení*. Parametry čidla LEM HTFS 400-P jsou zobrazeny v Tab. 4.1.

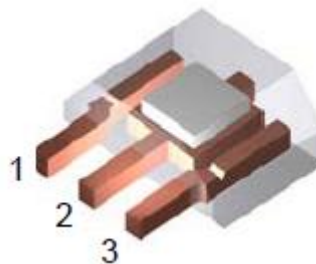
Tab. 4.1 Parametry LEM HTFS 400-P

Parametry HTFS 400-P			
	Měřicí rozsah	$\pm 600$	A
	Napájení	5	V
	Přesnost	$\leq \pm 1$	%
	Frekvenční rozsah	DC-20kHz	kHz

## 4.2 Čidlo polohy

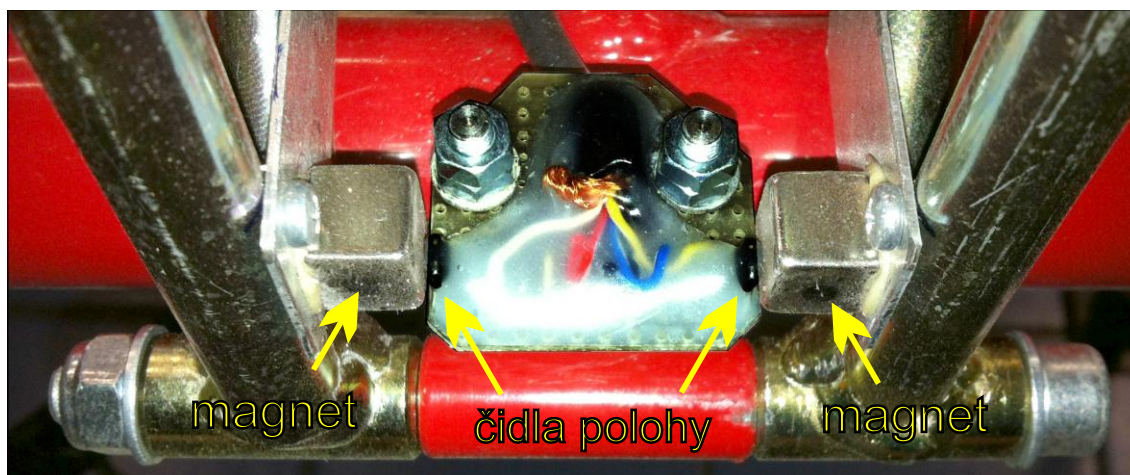
K vyhodnocení polohy pedálů je využít opět Hallův jev. Jedná se o lineární Hallovu sondu A1302 Obr. 4.3. Výstup z tohoto čidla má rozsah 0 až 5V. Umístění čidel na motokáře je ukázáno na Obr. 4.4.

1. VCC
2. GND
3. VOUT



Obr. 4.3 Lineární Hallova sonda A1302



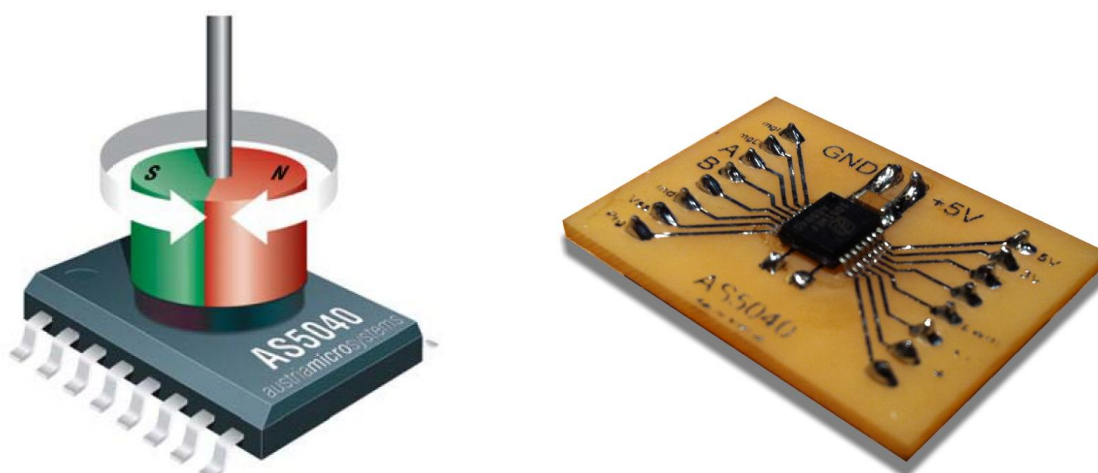


Obr. 4.4 A1302 – Realizace čidel polohy pedálů pomocí Hallových sond

### 4.3 Magnetický snímač otáček

Jedná se o programovatelný snímač otáček. Senzor umožňuje několik režimů. Jedna z možností je PWM výstup, to je vhodné na vyhodnocení úhlu natočení. Pro aplikaci měření otáček je ideální inkrementální režim. V tomto režimu čidlo na výstupu A a B dává TTL pulzy. Na jednu otáčku je přesně 256 pulzů na každém kanále. Dále má čidlo nulový signál, který se neguje každou celou otáčku. Pro vyhodnocení rychlosti a ujeté vzdálenosti stačí snímat pouze jeden z kanálů A nebo B. Informace postačí spolehlivě na vyhodnocení ujeté vzdálenosti s přesností 0,95 mm. Přesnost je určena ze vztahu (4-3). Čidlo otáček je zobrazeno na Obr. 4.5.

$$l = o_{pneu} \cdot \frac{\text{pulzy}}{\text{převod}} \cdot 1000 = 0,85 \cdot \frac{256}{3,5} \cdot 1000 = 0,9487 \text{ mm} \quad (4-3)$$

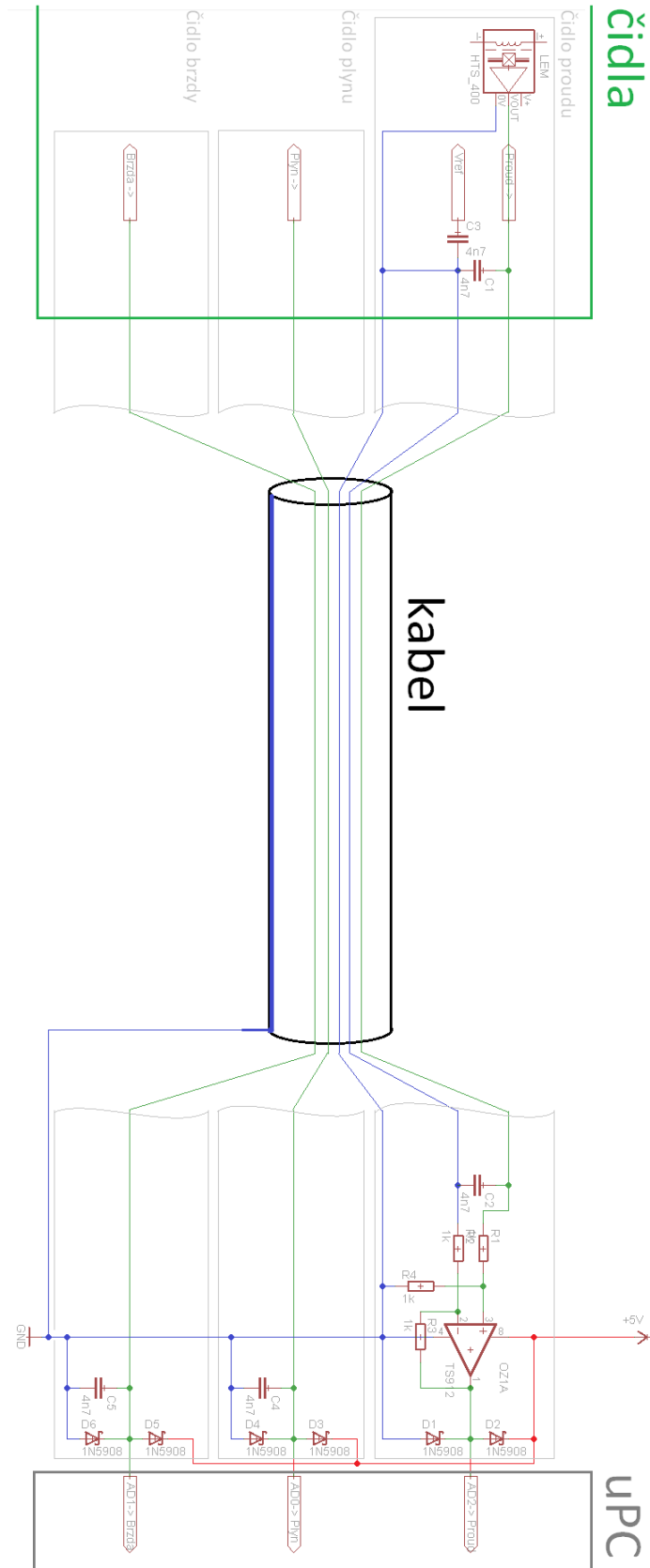


Obr. 4.5 Magnetický snímač otáček AS5040 – vlevo princip snímání, vpravo univerzální testovací deska

#### 4.4 Kompenzace rušení

Vlivem spínání pulzního měniče dochází k nezanedbatelnému rušení všech měřených signálů. Proto je nutné co nejvíce tato rušení eliminovat. Jsou zde dvě možnosti snížení vlivu rušení, buď softwarově, nebo také pomocí hardwarového řešení. Hardwarově se dají oříznout vzniklá přepětí a podpětí pomocí Schotkyho diod. Dále je signál filtrován pomocí diferenčního operačního zesilovače. Vhodný je také filtr typu dolní propust, který odfiltruje nežádoucí vysoké frekvence od pulzního měniče.

Na *Obr. 4.6* je schéma zapojení čidel pedálů a čidla proudu do AD vstupu mikrokontroléru. Důležité je uzemnění stíněného kabelu jen na jedné straně. Toto opatření odstraňuje problém se zemní smyčkou. Další ochranou jsou již zmíněné Schotkyho diody zapojené tak, aby odvedly kladné i záporné přepětí mimo chráněný AD vstup. Využití těchto diod je vhodné v extrémně rychlých spínacích obvodech či k usměrnění malých napětí s frekvencí až desítek GHz. K odstranění rušení na přenosové cestě měření proudu je zapojen diferenční operační zesilovač TS912.



Obr. 4.6 Zapojení ochran AD vstupů



$I_d^*$  ... Jmenovitý proud v programu odpovídá hodnotě 64 (100A).

$u_d$ ... Výstupní napětí z bloku regulátoru proudu odpovídá napětí pulzního měniče tedy 46V. Tato hodnota odpovídá za předpokladu plné střidy a započtení použitých mrtvých časů v měniči. Hodnota  $K_I$  tedy odpovídá vztahu (5-1)

$$K_I = \frac{u_d}{I_d} = \frac{46}{64} = 0,71 \quad (5-1)$$

Časovou konstantu  $T_{RI}$  lze vypočítat podle (5-2).

$$\tau_{PM} = \frac{1}{2 \cdot f} = \frac{1}{2 \cdot 16000} = \frac{1}{32000} = 0,00003125 \quad (5-2)$$

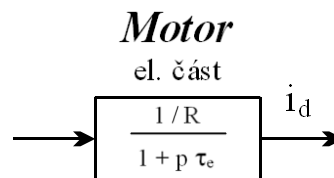
Frekvence zlomu pulzního měniče  $\omega_{PM}$  lze vyjádřit ze vztahu (5-3).

$$\omega_{PM} = \frac{1}{\tau_{RI}} = \frac{1}{\frac{1}{32000}} = 32000 \text{Hz} \quad (5-3)$$

Zesílení bloku měniče je vypočteno ze vztahu (5-4).

$$A_{PM} = 20 \cdot \log(K_I) = 20 \cdot \log(0,71) = -3 \text{dB} \quad (5-4)$$

## 5.2.2 Určení elektrické části motoru



Obr. 5.4 Blok elektrické části motoru

Do odporu elektrické části se započítává vše, co má vzhledem k připojenému motoru nějaký úbytek napětí. Tedy odpor přívodních vodičů, vnitřní odpor baterií, úbytek díky vloženým mrtvým časům v řízení měniče a další. Nejvýznamnější odpory se sečtou a stanoví se celkový odpor podle vztahu (5-5).

$$R = R_{mot} + R_{Bat} = 0,02 + 0,01 = 0,03 \Omega \quad (5-5)$$

Konstanta elektrické části je definována jako převrácená hodnota odporu dle vztahu (5-6).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{0,03} = 33,33 \quad (5-6)$$

Časová konstanta elektrické části  $\tau_e$  se získá poměrem indukčnosti vinutí motoru  $L$  k odporu celé sestavy  $R$  podle vztahu (5-7).

$$\tau_e = \frac{L}{R} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-2}} = 6,66 \cdot 10^{-4} \quad (5-7)$$

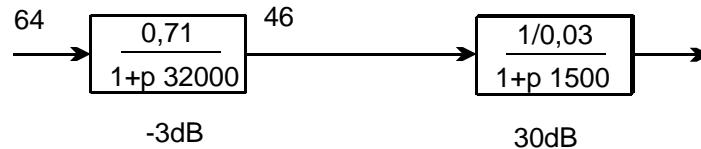
Mezní frekvence zlomu motoru  $\omega_{mot}$  lze vyjádřit ze vztahu (5-8).

$$\omega_{mot} = \frac{1}{\tau_e} = \frac{1}{6,66 \cdot 10^{-4}} = 1500 \text{ Hz} \quad (5-8)$$

Zesílení bloku motoru je vypočteno v rovnici (5-9).

$$A_{mot} = 20 \cdot \log \left( \frac{1}{R} \right) = 20 \cdot \log \left( \frac{1}{0,03} \right) = 30,46 \text{ dB} \quad (5-9)$$

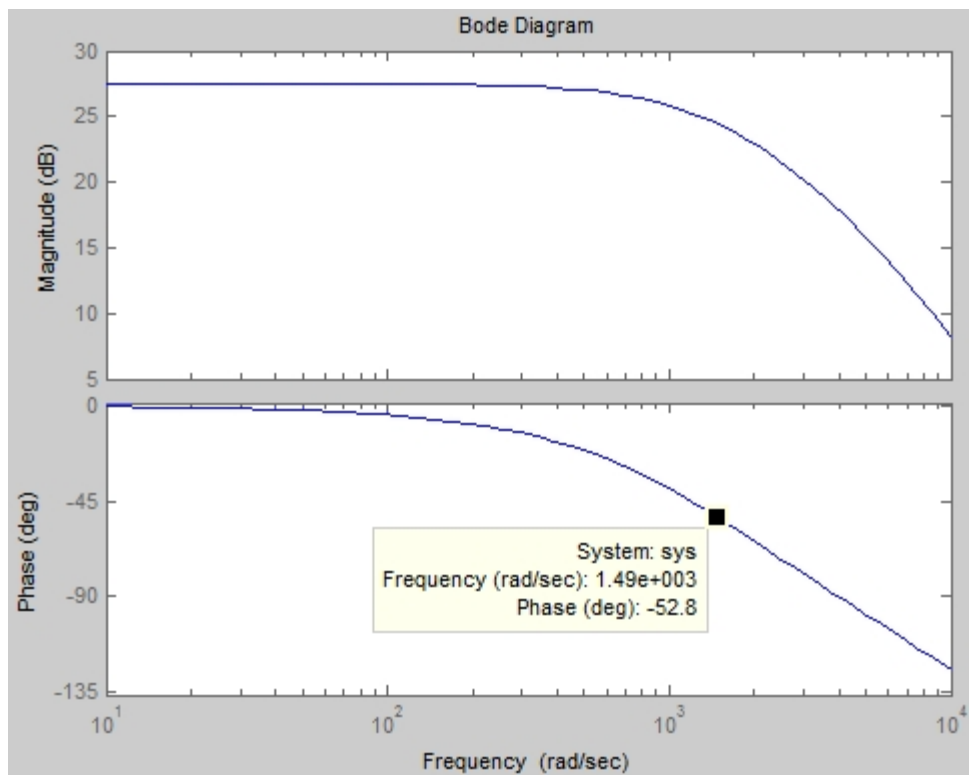
Zesílení obou bloků se následně sečte podle Obr. 5.5.



Obr. 5.5 Regulátor proudu s dosazenými hodnotami

$$A_I = A_{PM} + A_{mot} = -3 + 30 = 27 \text{ dB} \quad (5-10)$$

Výsledné zesílení proudového regulátoru se navrhne pomocí frekvenčních charakteristik z Obr. 5.6, nebo Obr. 5.11. Časová konstanta regulátoru se volí buď o dekádu níže (vlevo), nebo shodně s  $\tau_e$ . Zesílení regulátoru proudu  $K_{RI} = 0,71$  a časová konstanta  $\tau_{RI} = 6,66 \cdot 10^{-4}$ .

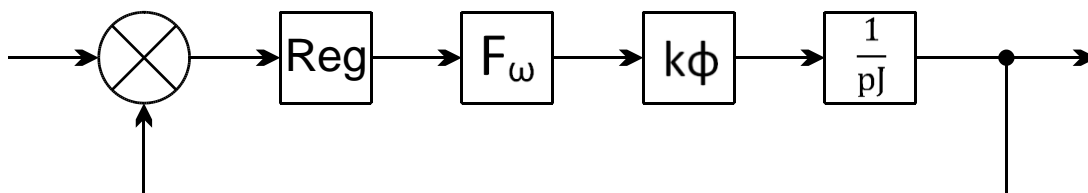


Obr. 5.6 Fázová a frekvenční charakteristika - simulovaná

Z fázového diagramu Obr. 5.6, na základě bezpečnosti ve fázi se volí úhel mezi  $45^\circ$  až  $60^\circ$ . Z Obr. 5.6 tedy vyplývá úhel  $52,8^\circ$ . Tento úhel odpovídá frekvenci 1500Hz.

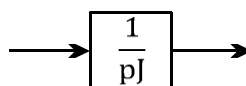
### 5.3 Návrh regulátoru otáček

Náhradní zjednodušené schéma uzavřené smyčky regulátoru je zobrazeno na Obr. 5.7.



Obr. 5.7 Náhradní zjednodušené schéma regulátoru otáček

#### 5.3.1 Určení bloku setrvačnosti



Obr. 5.8 blok setrvačnosti soustavy

Nejprve je nutné určit moment setrvačnosti celé motokáry. Ten se určí ze zákona zachování energie (5-11).

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (5-11)$$

Je třeba určit úhlový kmitočet  $\omega$  převodem ze známých otáček motoru ve jmenovitém stavu. Převod popisuje (5-12).

$$\omega = 3500 \left[ \frac{ot}{min} \right] = 58,3 \left[ \frac{ot}{sec} \right] = 366,5 \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (5-12)$$

Dále je třeba převést do základních jednotek maximální rychlost motokáry vztahem (5-13).

$$v_{k\acute{a}ry} = 55 \left[ \frac{km}{h} \right] = 15,27 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (5-13)$$

Úpravou zákona zachování energie (5-11) lze získat moment setrvačnosti soustavy (5-14).

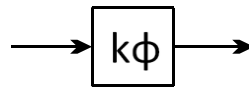
$$J = m \left( \frac{v}{\omega} \right)^2 = 250 \left( \frac{15,27}{366,5} \right)^2 = 0,433 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (5-14)$$

Stanovení konstanty pro blok setrvačnosti vychází ze vztahu (5-15).

$$\frac{1}{pJ} = \frac{1}{p\tau} \rightarrow \omega = \frac{1}{\tau} \quad (5-15)$$

#### 5.3.2 Určení bloku konstanty $k\phi$

Výpočet vychází ze vztahu pro výpočet napětí motoru (5-16).

Obr. 5.9 Blok  $k\phi$ 

$$U = k\phi\omega \quad (5-16)$$

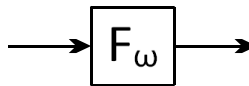
Úpravou předešlého vztahu získáme vztah (5-17) pro určení konstanty.

$$k\phi = \frac{U}{\omega} = \frac{46}{366,5} = 0,126 \quad (5-17)$$

Zesílení bloku  $k_\phi$  vyjadřuje rovnice (5-18).

$$A_{k\phi} = 20\log(k\phi) = 20\log(0,126) = -18dB \quad (5-18)$$

### 5.3.3 Určení uzavřené smyčky regulace proudu

Obr. 5.10 blok  $F_\omega$ 

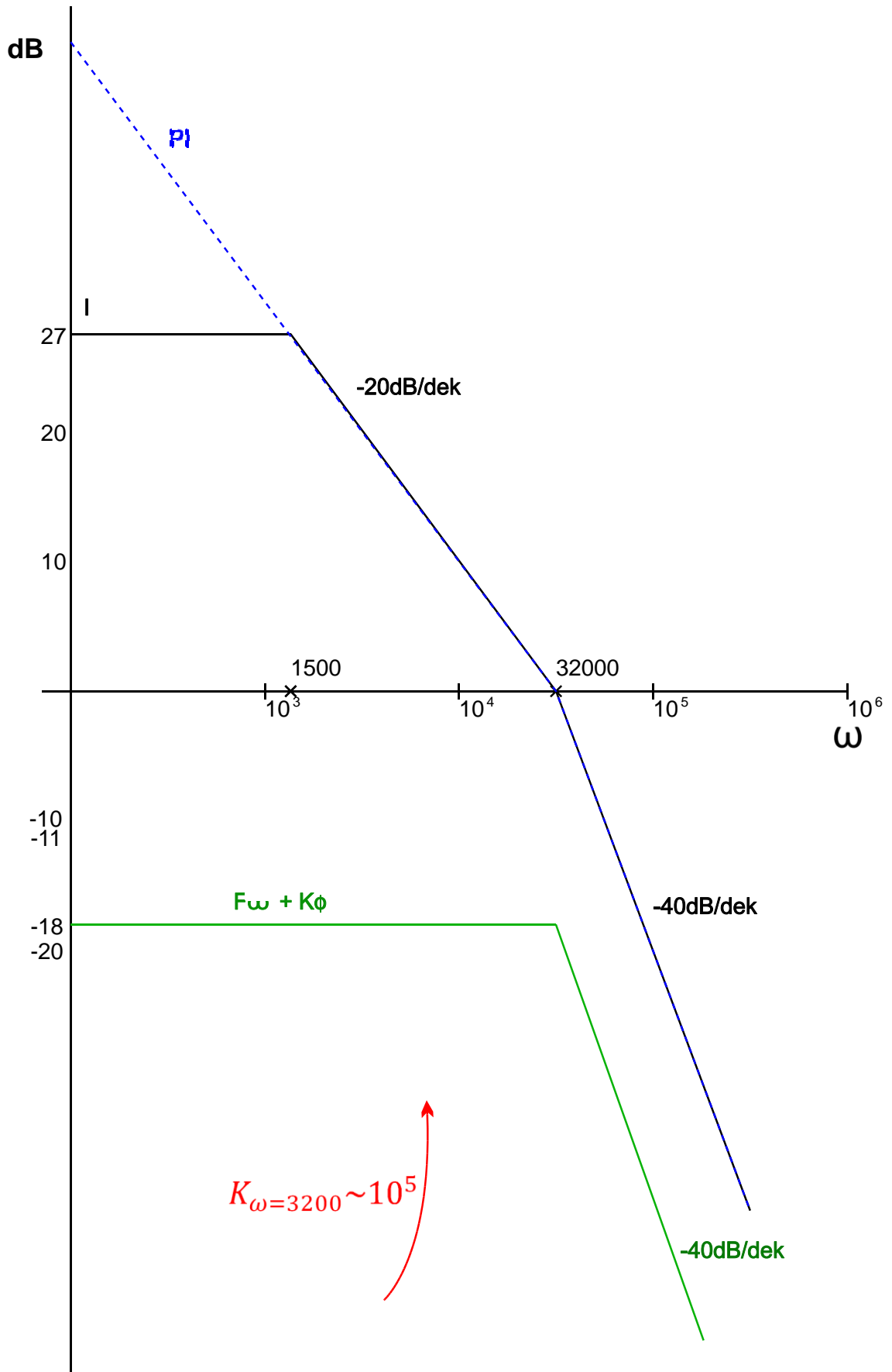
Uzavřením proudové regulační smyčky se dostane přenos, který je dán vztahem (5-19).

$$F_\omega = \frac{1}{\left(1 + p \frac{1}{32000}\right)^2} = 10,24 \cdot 10^8 \quad (5-19)$$

### 5.3.4 Frekvenční charakteristiky vypočítaného regulátoru

Frekvenční charakteristiky všech bloků regulátoru jsou zobrazeny v *Obr. 5.11*. Nejprve byla vytvořena charakteristika otevřené smyčky pro nastavení proudového regulátoru. Ta je naznačena černou čarou. První zlom byl vypočten ze vztahu (5-8) a to na úhlové frekvenci 1500Hz. Zde dochází k poklesu -20dB/dek. Další zlom byl určen vztahem (5-3). Výsledná frekvenční charakteristika otevřené smyčky s nastaveným PI regulátorem je znázorněna modrou přerušovanou čarou. Zelenou čarou je zobrazena charakteristika bloků  $F_\omega + k\phi$ . Což je uzavřená proudová smyčka včetně  $k\phi$ . Přerušovanou hnědou čarou je naznačena charakteristika momentu setrvačnosti. Znázornění charakteristik otáček by bylo mimo rozsah zvoleného měřítka. Při  $\omega=10^2$  je zesílení otáčkové smyčky -60 dB s poklesem -20dB/dek. Z uvedeného znázornění všech charakteristik vyplývá nutnost posunutí výsledné charakteristiky směrem nahoru konstantou  $K_\omega$  řádu minimálně  $10^5$ . Vypočítané hodnoty poslouží pro simulaci v programu Matlab.

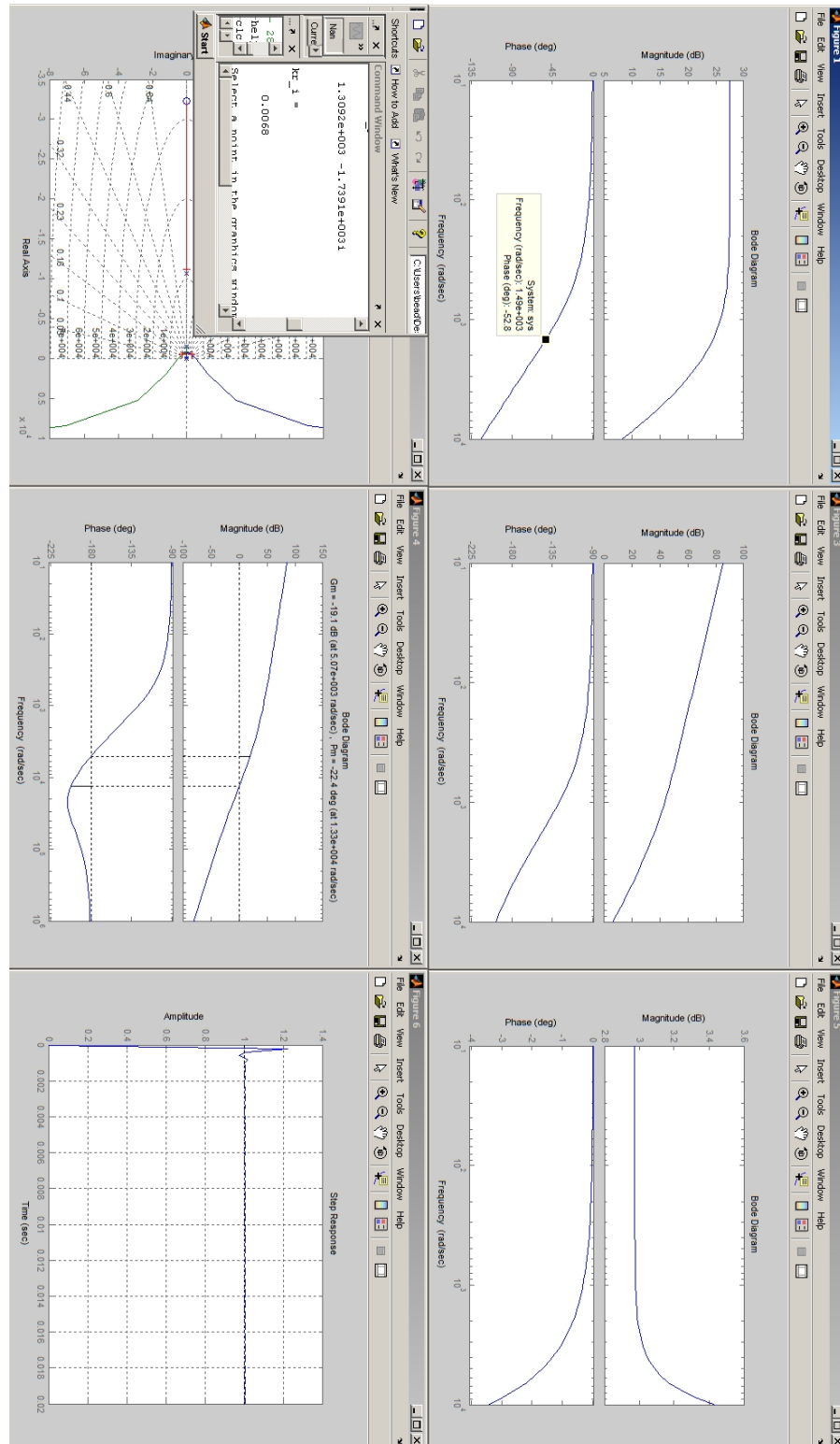




Obr. 5.11 Frekvenční charakteristiky vypočteného regulátoru

## 5.4 Simulační ověření regulace otáček v programu Matlab

Výsledky simulace jsou zobrazeny na Obr. 5.12. Na grafu číslo 6 je simulována odezva na jednotkový skok.



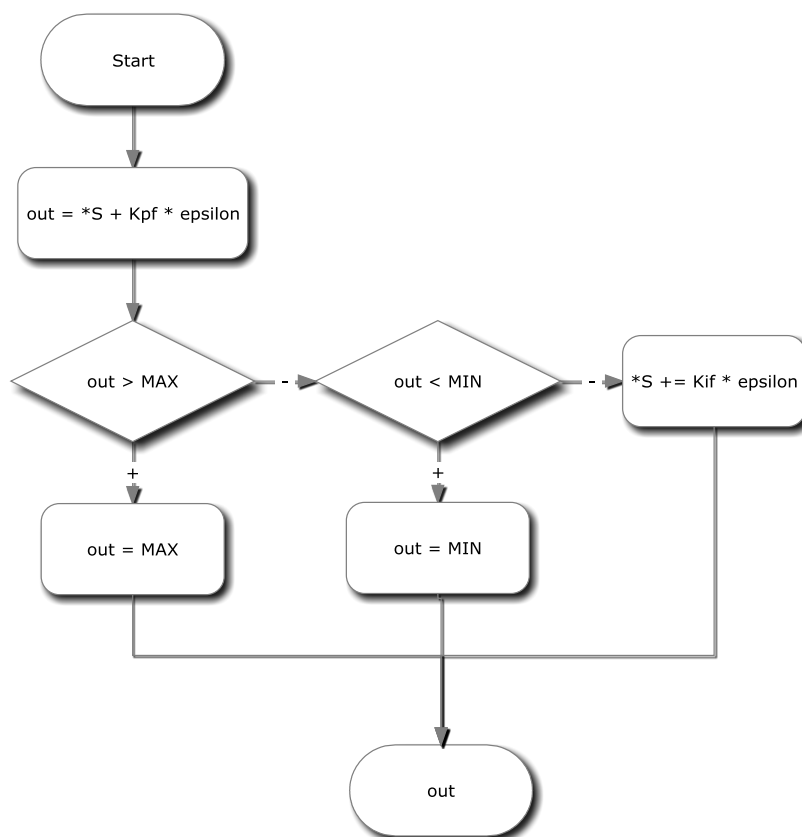
Obr. 5.12 Výsledky simulace navrženého regulátoru

## 6 Program

V následujících odstavcích je uveden popis hlavních částí programu. Celý program je uveden na příloženém CD.

### 6.1 Realizace řízení v procesoru

Ve vývojovém diagramu na obrázku *Obr. 6.1* lze nahlédnout do funkce regulátoru v programu. Výstup z regulátoru je v programu přiřazen do proměnné PWM. Tato proměnná je přiřazena do registrů pro tvorbu řídicích pulzů PWM. Tyto registry se jmenují OCR. V 16-ti bitovém TIMERU1 se nacházejí hned dva a to OCR1A a OCR1B.



*Obr. 6.1* Vývojový diagram regulace proudu motoru

Do registru OCR1B je přiřazena přímo hodnota proměnné PWM z regulátoru. Do registru OCR1A je hodnota přiřazena až po přičtení nezbytného mrtvého času DT. Tento čas se vkládá mezi vypnutím jednoho a zapnutím druhého tranzistoru, protože tento děj není okamžitý a není přípustné, aby sepnuly zároveň tranzistory horní (TOP) a dolní (BOTTOM) skupiny. Vložený mrtvý čas trvá 2  $\mu$ s, což odpovídá 32 taktům procesoru. Výpočet mrtvého času je uveden ve vztahu (6-1) a jeho změřená délka je na *Obr. 6.4*.

$$t_{DT} = \frac{1}{\frac{f_{clk}}{\text{počet taktů}}} = \frac{1}{\frac{16 \cdot 10^6}{32}} = 2 \mu s \quad (6-1)$$

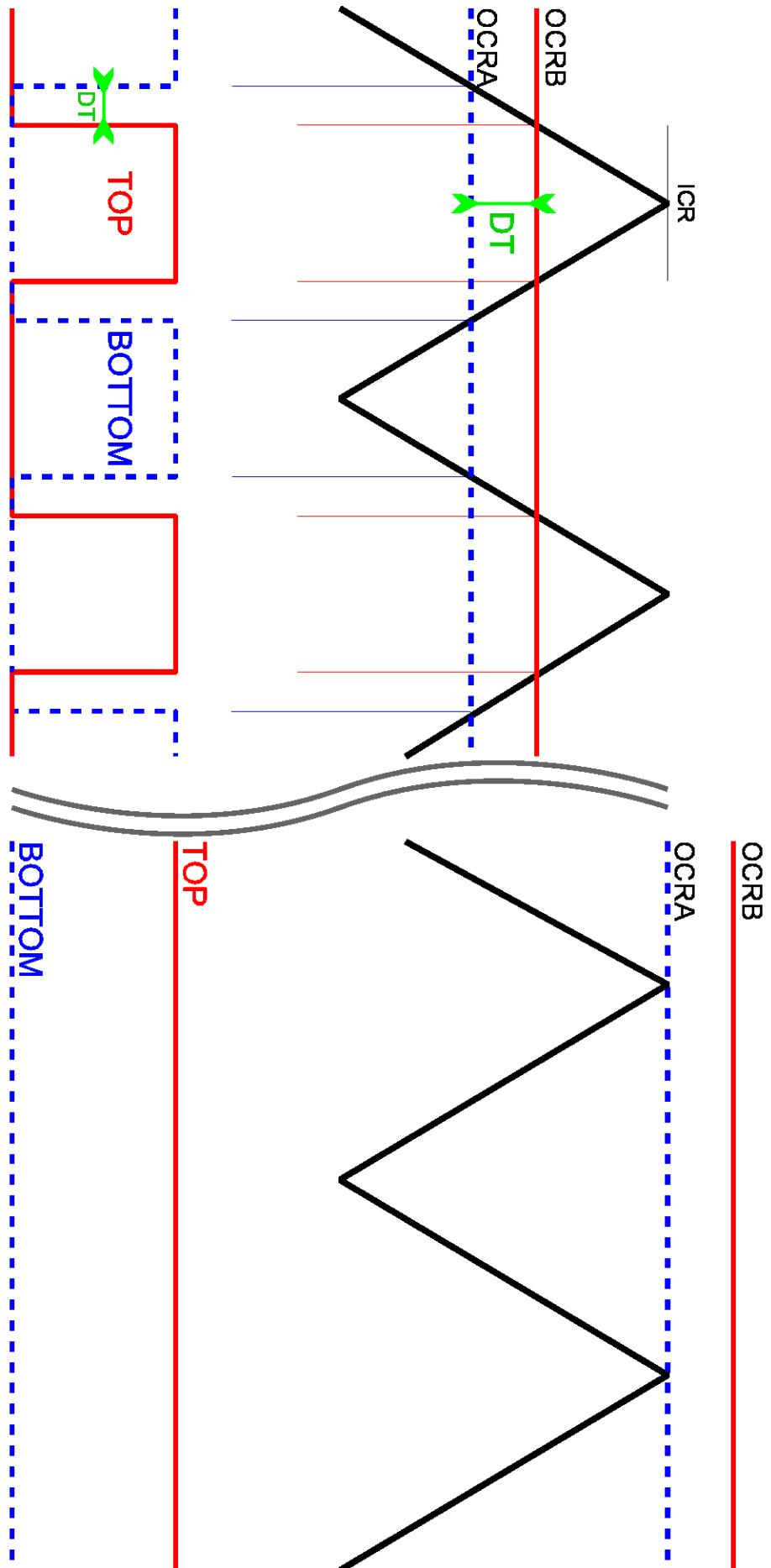
Na obrázku *Obr. 6.2* je zobrazen princip vytváření řídicích pulzů. Je zde zobrazen průběh symetrické pily nosného signálu (černý), který je protínán hodnotami uloženými v registrech OCR (OCRB červený a OCRA modrý). Tyto hodnoty jsou od sebe posunuty o zmíněný DT. Při koincidenci hodnot OCR s pilovým průběhem dojde ke změně stavu příslušného spínacího pulzu. Na levé straně obrázku jsou pulzy horní a dolní skupiny tranzistorů stejně široké. Takové poměrné sepnutí odpovídá polovině jmenovitého napětí motoru. Na pravé straně je naznačen průběh, který odpovídá plnému sepnutí horní skupiny, tedy jmenovité napětí motoru.

Periodu spínání lze upravit nastavením hodnoty registru ICR. Tento registr určuje, ve kterém okamžiku TIMER přestane načítat a začne svou hodnotu odečítat do nulové hodnoty, ve které opět začne načítat. Tímto způsobem si TIMER vytváří symetrický pilový průběh. Periodu spínání lze určit ze vztahu (6-2)

$$f_{OCnXPWM} = \frac{f_{clk_{I/O}}}{2 \cdot N \cdot TOP} = \frac{16 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 500} = 16 \cdot 10^3 = 16 \text{ kHz} \quad (6-2)$$

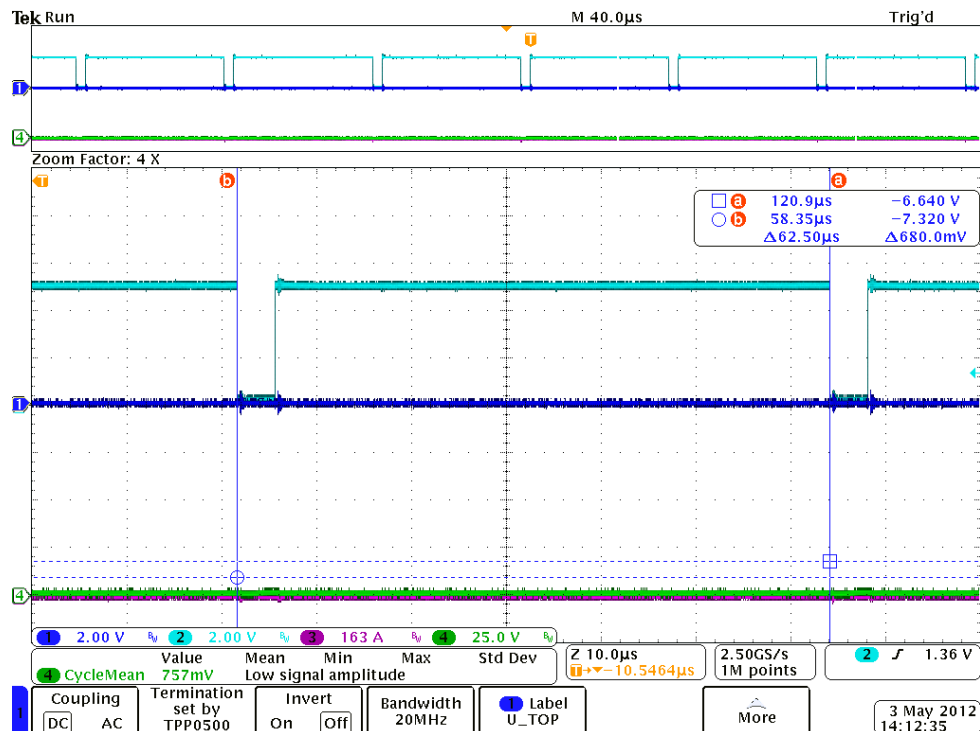
kde  $f_{clk_{I/O}}$  je frekvence externího krystalu, N je velikost zvolené předěličky a TOP je hodnota registru ICR. Ze vztahu (6-3) vyplývá, že perioda spínání tranzistorů trvá 62,5 ns. Tato doba je ověřena měřením na *Obr. 6.3*.

$$t_{periody} = \frac{1}{f_{OCnXPWM}} = \frac{1}{16 \cdot 10^3} = 62,5 \text{ ns} \quad (6-3)$$

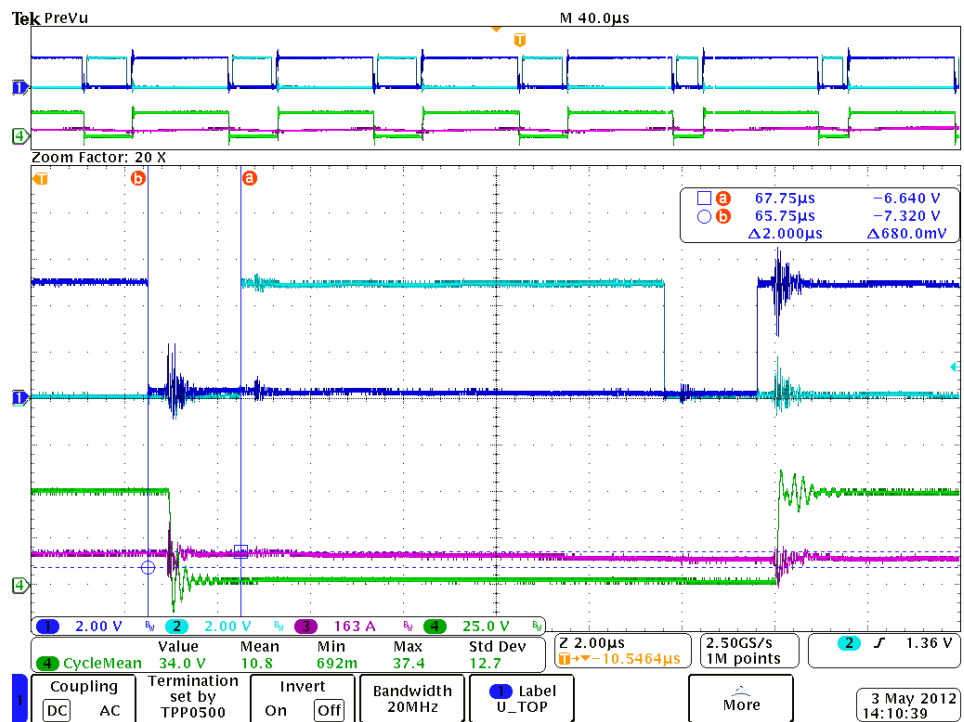


Obr. 6.2 Princip vytváření PWM v procesoru

Na Obr. 6.3 a Obr. 6.4 je změřena délka perioda a délka mrtvého času. V měřených úsecích jsou kurzory osciloskopu a v okénku vpravo nahoře je změřená hodnota času. Tmavě-modře jsou zobrazeny spínací pulzy horní skupiny tranzistorů, světle-modře jsou zobrazeny spínací pulzy dolní skupiny tranzistorů. Zeleně je zobrazeno napětí na svorkách motoru a červeně pak proud motorem.

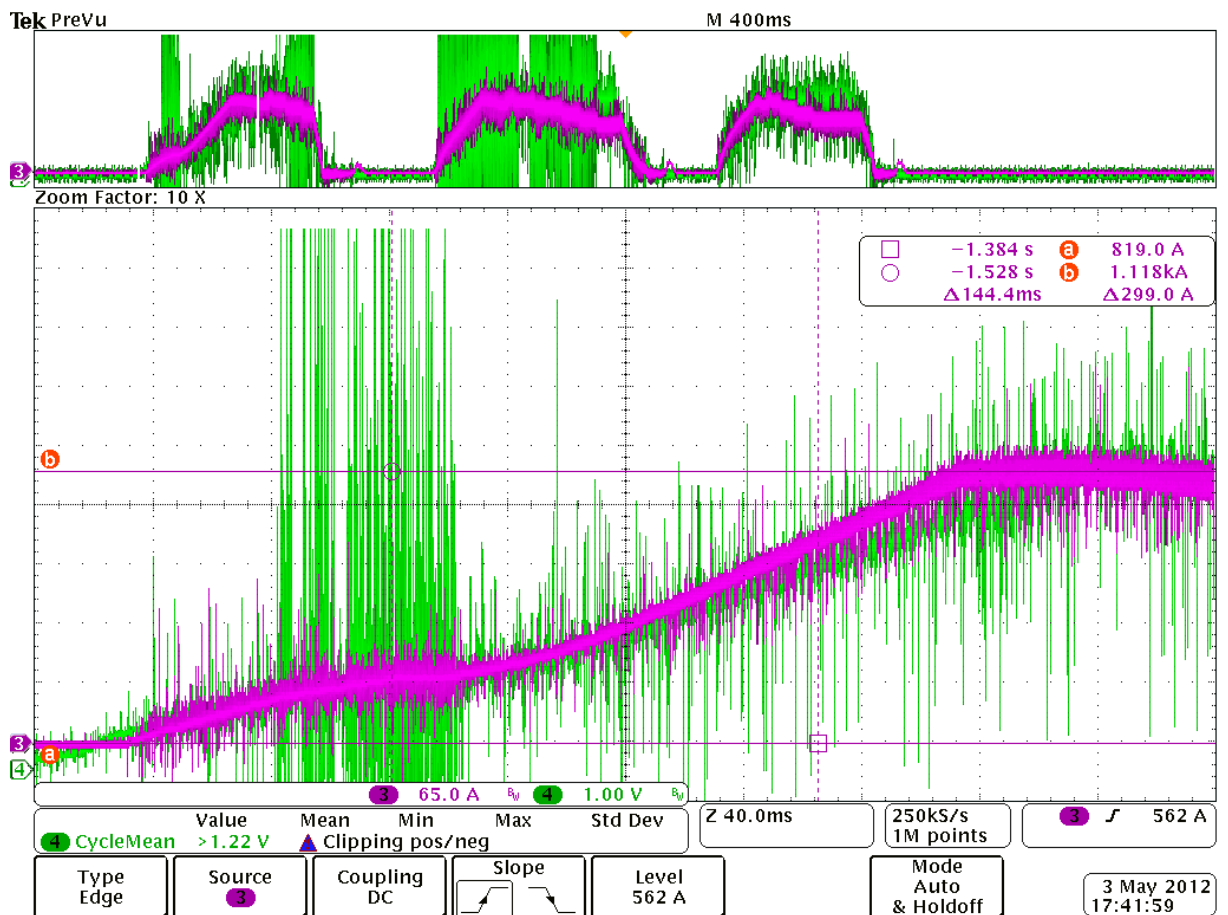


Obr. 6.3 Naměřené průběhy - délka řídicích pulzů



Obr. 6.4 Naměřené průběhy - mrtvý čas DT

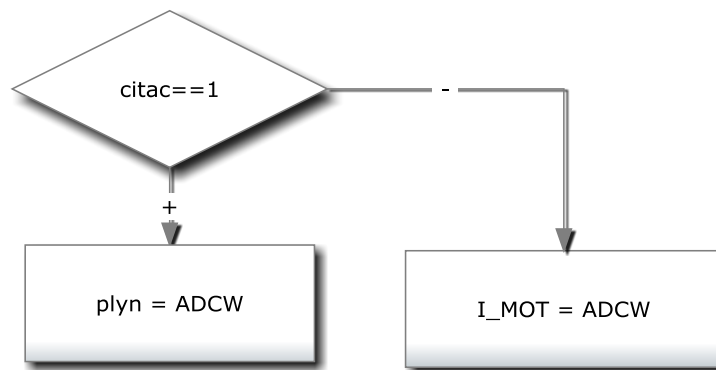
Na Obr. 6.5, je zobrazena odezva regulátoru proudu na požadavek plynového pedálu. Zeleně je měřena hodnota napětí z čidla polohy pro plynový pedál. Růžový průběh je měřený proud motorem. Při tomto měření byl plynový pedál několikrát rychle stisknut a motor byl brzděn. Z naměřeného vyplývá správně navržený regulátor, který reaguje na aktuální požadavek téměř okamžitě.



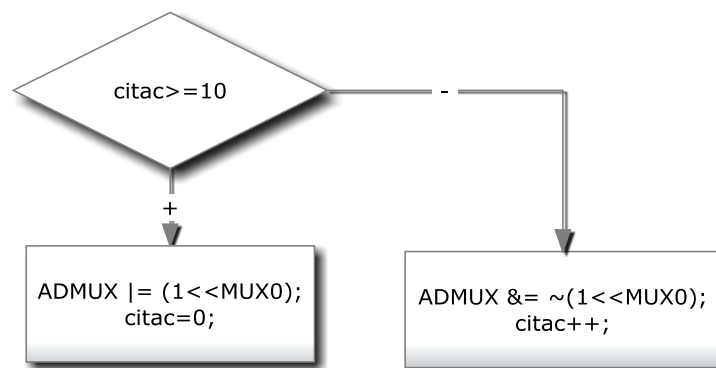
Obr. 6.5 Naměřené průběhy - odezva regulátoru

## 6.2 Čtení čidel – zpětná vazba regulátoru

Aby regulátor mohl pracovat, potřebuje zpětnou vazbu. K tomu slouží čidlo proudu a čidla polohy pedálů. Jelikož hodnota proudu má větší důležitost než poloha pedálů, tak čtení hodnot z tohoto čidla probíhá v poměru 1:10. Na obrázcích Obr. 6.6 a Obr. 6.7 jsou vývojové diagramy tohoto procesu.



Obr. 6.6 Přřazení registru ADCW do proměnných plyn a I\_MOT



Obr. 6.7 Přřazení registru ADCW do proměnných I\_MOT a plyn

Vlastní zápis do programu je uveden v *Kód programu 1*.

#### *Kód programu 1 AD převod*

```

// AD převod -----
if (citac==1) plyn=(((int)ADCW-100)>>2); // ctení převodu (po změně kanálu jsou další
// výsledky pro změněný kanál), plyn je Q5.10
else I_MOT=(((int)ADCW-507); // I-MOT je Q5.10, offset=-4

if (citac>=10) // jednou z 10 měř z PF1(plyn) jinak z PF0(I_MOT)
{
ADMUX |= (1<<MUX0); // vstup PF1 pro AD ~ plyn (výsledek z tohoto kanálu bude
// v dalším přeručení)
citac=0;
}
else ADMUX &= ~(1<<MUX0); // vstup PF0 pro AD ~ I_MOT (výsledek z tohoto kanálu
// bude v dalším přeručení)

citac++;
  
```



## Závěr

Výsledkem této práce je plně funkční elektrická motokára, která svými parametry v mnoha ohledech překonává motokáry se spalovacím motorem. Vznikl funkční vzorek, díky kterému je možné, aby se mohla fakulta elektrotechnická prezentovat.

Výsledky naměřených jízdních vlastností jsou v celku uspokojivé. Maximální naměřená rychlost je 58km/h. Doba aktivní jízdy „brzda/plyn“ z plně nabitých baterií přesahuje 2 hod. Ujetá vzdálenost na jedno nabití byla naměřena na 40 km. Nabíjení při nabíjecím proudu 50 A trvá cca 1,5 hod.

Postavená elektrická motokára je k dispozici na fakultě elektrotechnické v Plzni, na katedře elektromechaniky a výkonové elektrotechniky.

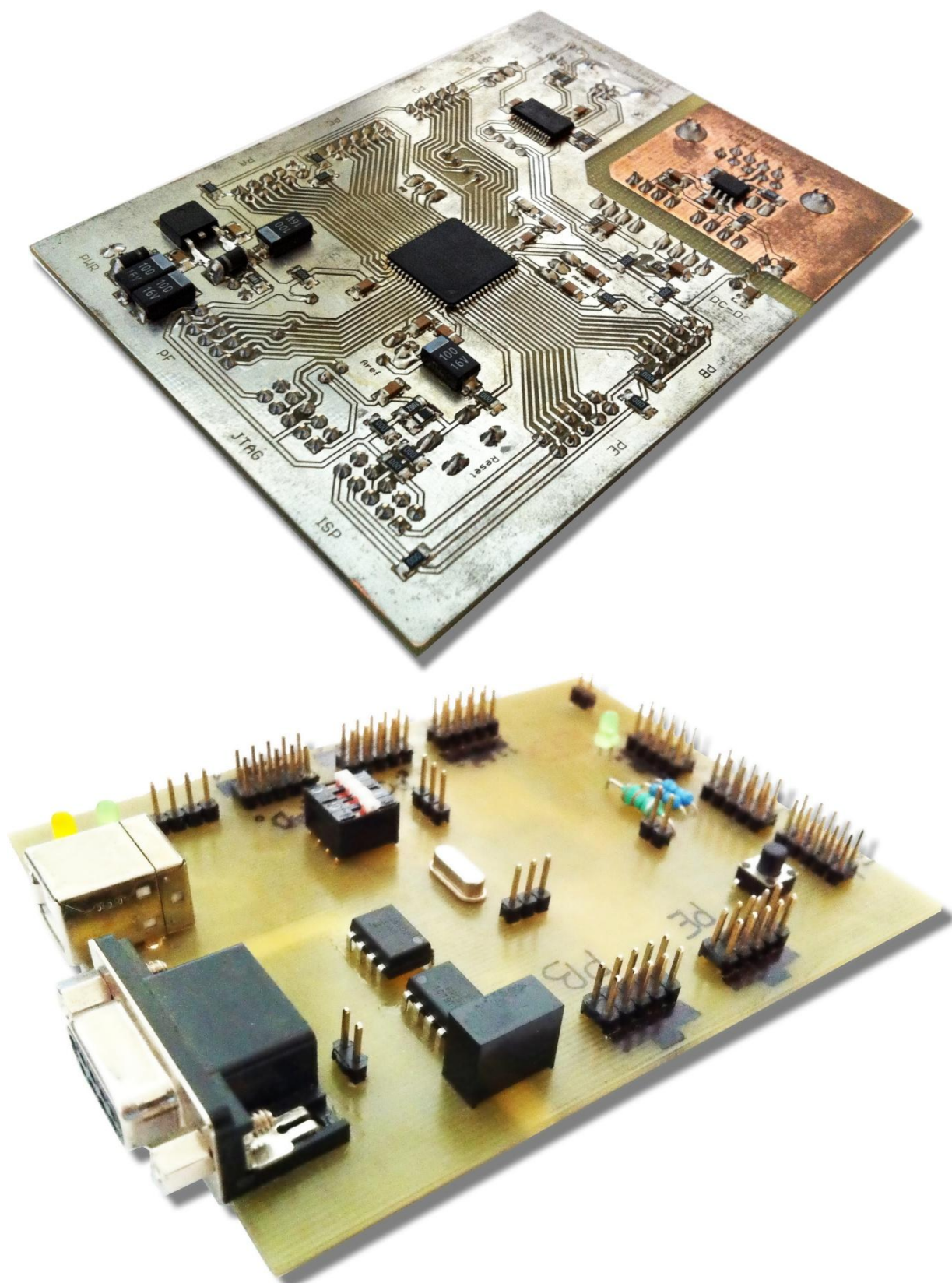
V projektu si každý účastník vyzkoušel práci v teamovém kolektivu. Tato zkušenost může být nenahraditelná pro budoucí povolání.

Další předpokládaný vývoj elektrické motokáry předpokládá rozšíření o data-logging, což znamená zprovoznění třetího procesoru. Tento procesor se též bude starat o battery management.

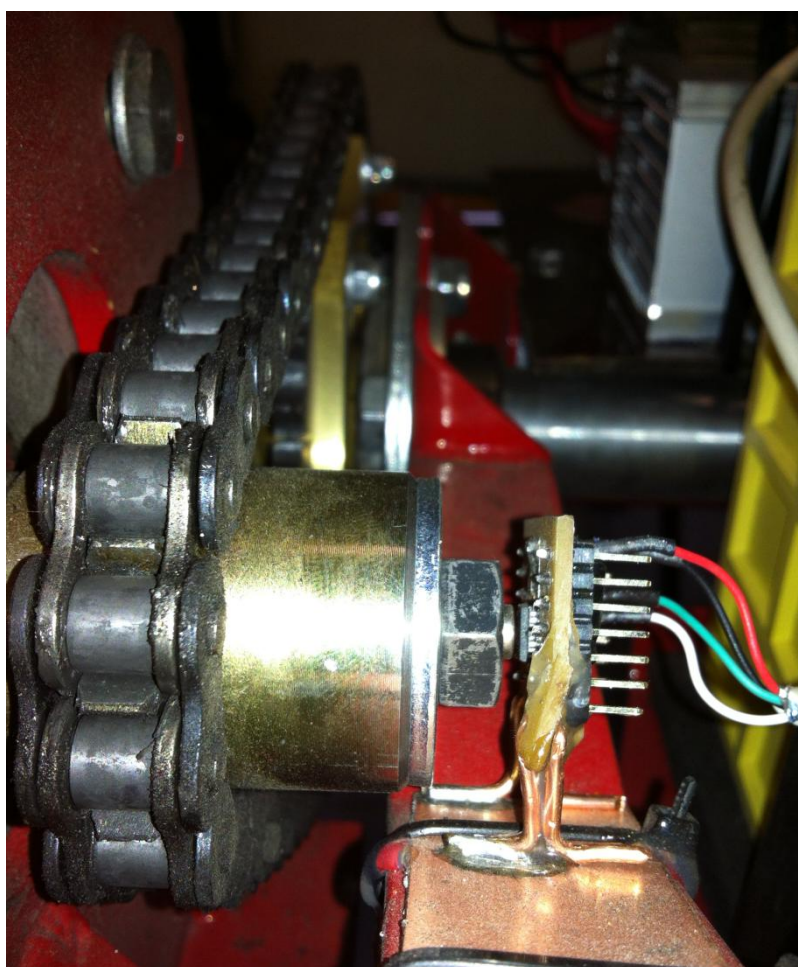
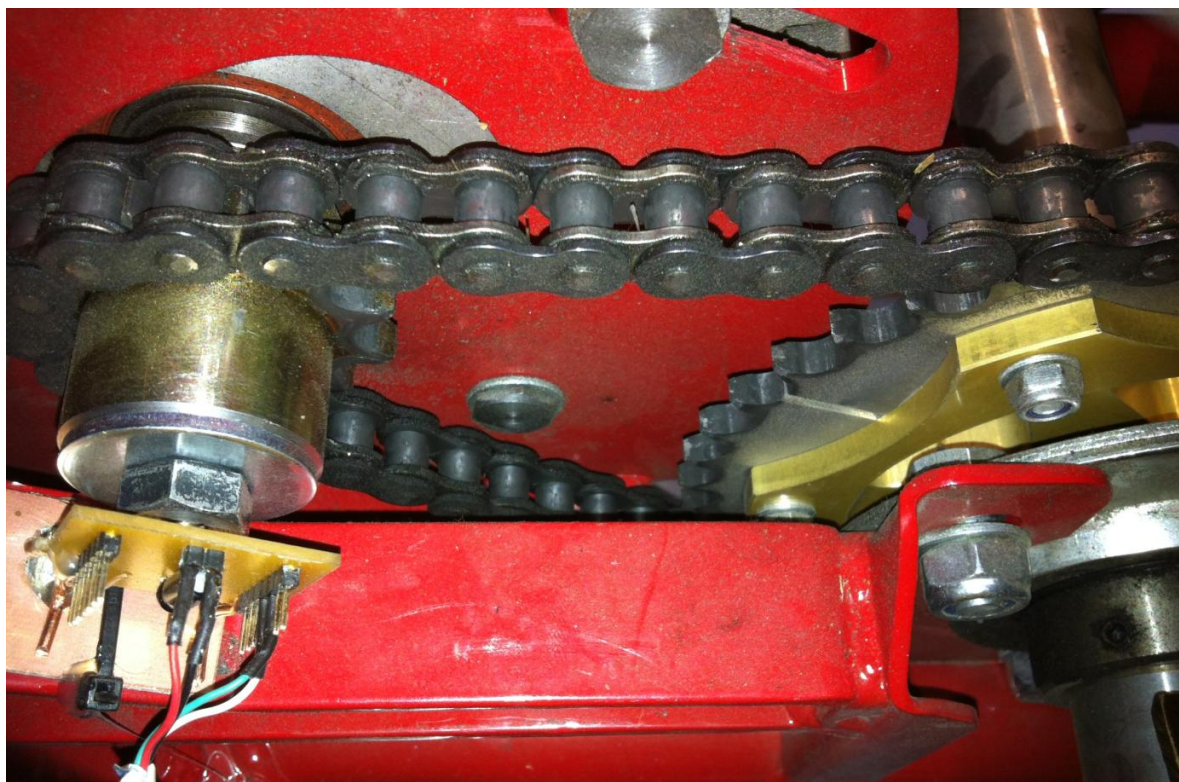
## Použitá literatura

- [1] VÁŇA, Vladimír. *Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C : popis a práce ve vývojovém prostředí CodeVisionAVR* C. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 215 s. ISBN 80-730-0102-0
- [2] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2009. ISBN 978-80-7232-383-8
- [3] Vondrášek Výkonová elektronika svazek 3
- [4] ATMEL. *Datasheet: AT90CANxx* [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/>
- [5] ZČU. *Programátor AVR: STK500* [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/+sac/Programator\\_AVR/](http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/+sac/Programator_AVR/)
- [6] ZČU. *Materiály pro výkonovou elektroniku: KEV* [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://educon.zcu.cz>
- [7] ŠTĚPÁNEK, Jan. FEL ZČU. *Stavba pulzního měniče s MOSFET tranzistory: diplomová práce*. Plzeň, 2012.
- [8] STREIT, Luboš. *Concept of Electric Kart with LiFeYPO4 Batteries*. [online]. [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06049138>

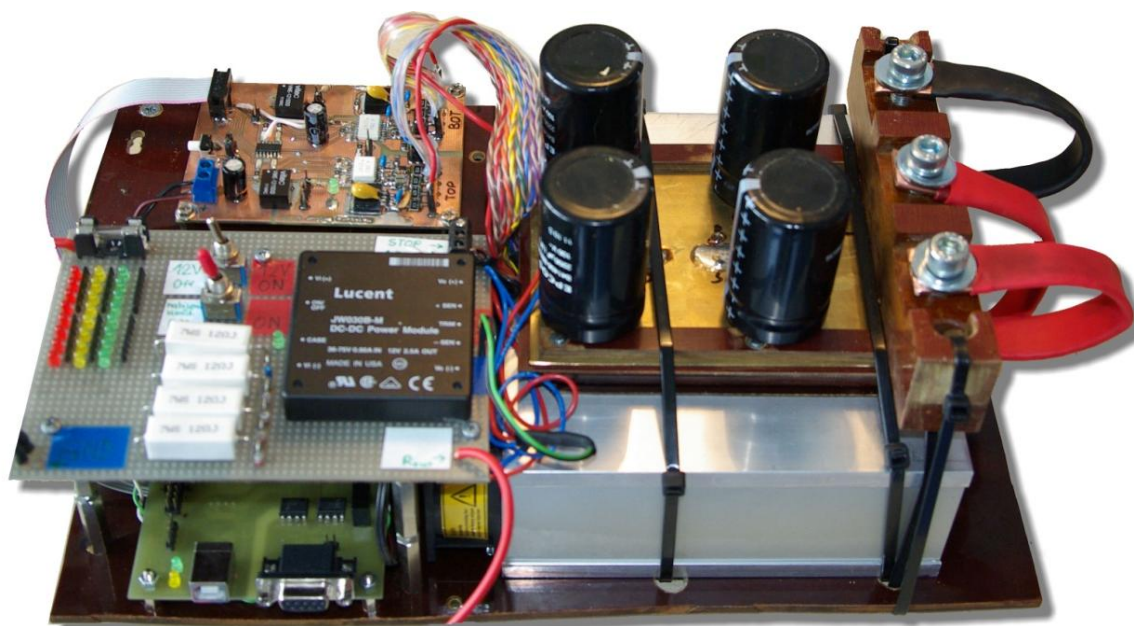
## Přílohy



Obr. 0.1 Univerzální deska procesoru AT90CAN



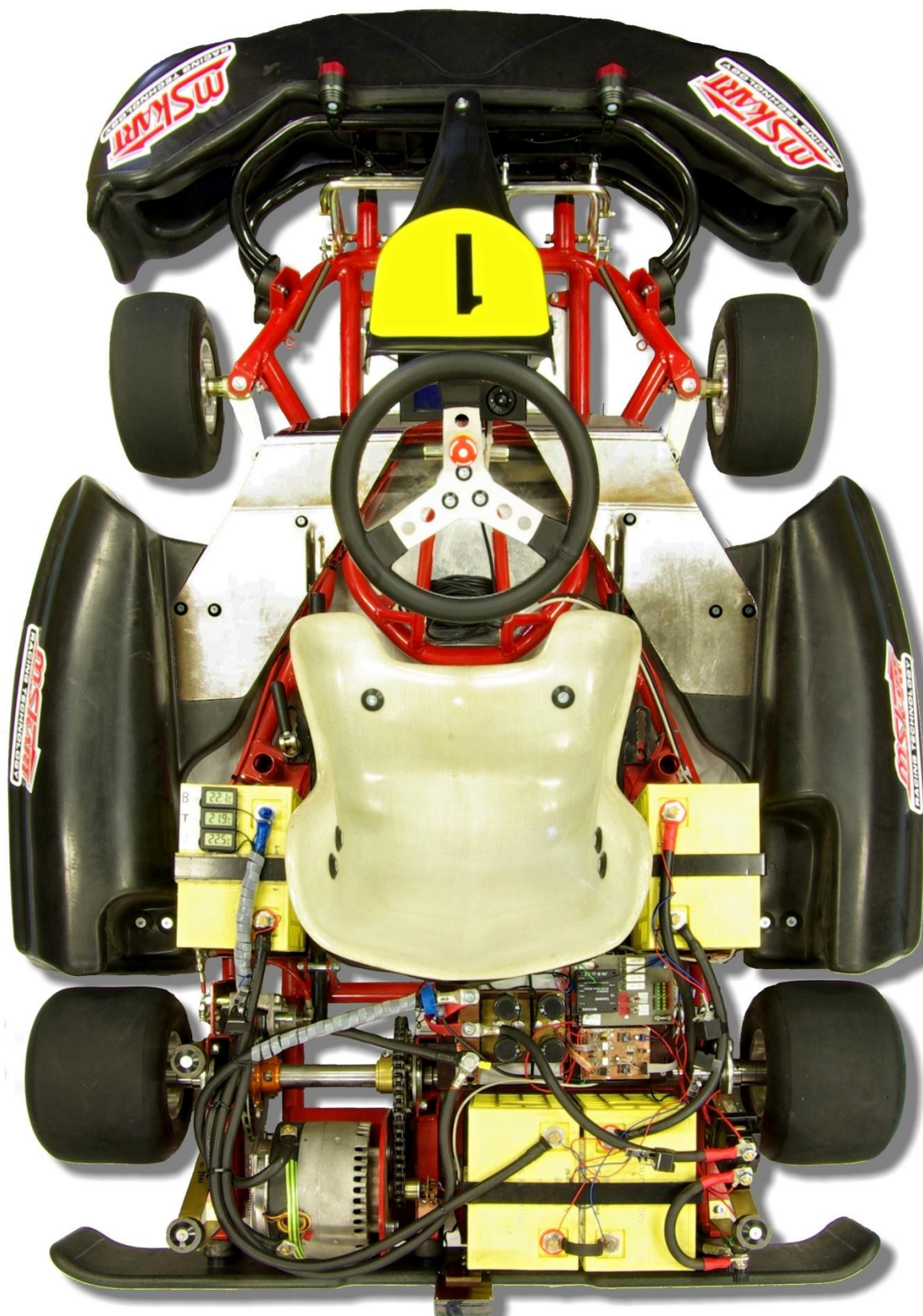
Obr. 0.2 Umístění čidla otáček u hřídele motoru



Obr. 0.3 Kompletní soustava elektroniky driveru, pulzního měniče a procesoru



Obr. 0.4 Zobrazovací jednotka



Obr. 0.5 Celkový pohled na elektrickou motokáru