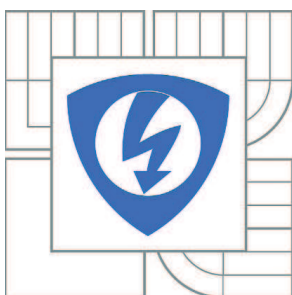


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## REGULÁTOR OTÁČEK PRO STŘÍDAVÉ MOTORY

CONTROLLER FOR BRUSHLESS MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

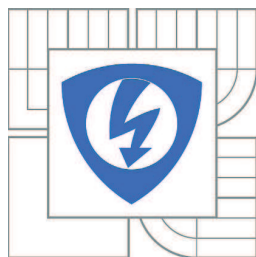
Bc. TOMÁŠ ZDAŘIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK KINCL

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Tomáš Zdařil

**ID:** 77944

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

### Regulátor otáček pro střídavé motory

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte koncepci a obvodové zapojení regulátoru pro jednosměrné řízení bezkomutátorových střídavých motorů používaných v leteckém modelářství. Regulátor bude napájen dvěma až třemi články Li-Pol, tudíž bude nezbytné vyřešit příslušné ochrany článků. Dále musí obsahovat obvod BEC pro napájení přijímače. Regulátor by měl umožňovat monitorování odebíraného proudu a svorkového napětí na jednotlivých člancích akumulátoru. Ve výsledné aplikaci se předpokládá použití motoru řady AXI 2208.

Navržený regulátor pokusně realizujte, ověřte jeho funkčnost a změřte jeho parametry.

Vytvořte obslužný program na PC pro zobrazení všech monitorovaných veličin a konfiguraci parametrů regulátoru. Jednotku kompletně realizujte a proveďte reálné testy v modelu.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KADANÍK, P. Řízení asynchronního motoru bez použití zpětné otáčkové vazby. Disertační práce. Praha: FEL ČVUT v Praze, 2004.

[2] Wikipedia [online]. Brushless DC electric motor. [cit. 14. 12. 2009]. Dostupné na [www:](http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor/)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless\\_DC\\_electric\\_motor/](http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor/)

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 18.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Zdeněk Kincl

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*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**

Cílem této práce bylo navrhnout a vytvořit regulátor otáček pro jednosměrné řízení bezkomutátorových střídavých motorů (BLDC) používaných v leteckém modelářství. Celé zapojení je ovládáno mikroprocesorem Atmel AVR. Jako pohonná jednotka pro motor je použita akumulátorová sada typu Li-pol. Regulátor je vybaven obvodem BEC pro napájení přijímače a umožňuje monitorování odebíraného proudu a napětí na pohonném akumulátoru. Změřená data je možné uploadovat do PC, kde je možné je pomocí programu RegulátorPC zobrazit v grafické podobě.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

AC regulátor otáček, bezkomutátorový motor (BLDC), bezsenzorové řízení, Li-pol akumulátor, balancer, PWM modulace

## **ABSTRACT**

The goal of the thesis was to design and create one-way speed controller for brushless DC motors, that is used in air modeling. The circuit is controlled by the Atmel AVR. As power unit for motor is used Li-pol accumulator. The controller is equipped with BEC to power the receiver and allows monitoring of current consumption and voltage on the accumulator. Measured data can be upload to a PC where they can be displayed by RegulatorPC in graphical form.

## **KEYWORDS**

AC speed controller, brushless DC motor, without sensors control, Li - pol accumulator, balancer, PWM modulation

ZDAŘIL, T. *Regulátor otáček pro střídavé motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Kincl.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Regulátor otáček pro střídavé motory 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 18. května 2012

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce ing. Zdeňku Kinclovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 18. května 2012

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Obsah</b>	<b>vi</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>ix</b>
<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Teoretický Úvod</b>	<b>11</b>
1.1 Elektromotor .....	11
1.2 Stejnosměrný komutátorový motor s permanentním magnetem .....	11
1.3 Regulátor otáček .....	12
1.4 BLDC motory a jejich komutace .....	13
1.4.1 Konstrukce statoru a rotoru.....	14
1.4.2 Komutace BLDC motoru.....	14
1.4.3 Metody řízení BLDC motoru.....	15
1.4.4 Řízení pomocí senzorů.....	15
1.4.5 Řízení bez použití senzorů.....	15
1.4.6 Řídící a výkonová jednotka BLDC motoru .....	16
1.5 Porovnání vlastností střídavých a stejnosměrných motorů.....	17
1.6 Akumulátory Li-pol .....	18
1.7 Vyrovnavač článků (balancer) .....	20
<b>2 Návrh Hardware</b>	<b>21</b>
2.1 Balancer .....	21
2.1.1 Návrh zapojení.....	21
2.1.2 Funkce.....	22
2.1.3 Realizace balanceru .....	23
2.2 Mikrokontrolér ATmega8.....	24
2.3 Měření odebíraného proudu.....	25
2.4 Napájecí část + BEC 5V .....	28
2.5 Měření napětí na akumulátoru .....	29
2.6 Vstupní signál pro regulátor .....	30
2.7 Výkonová část.....	31
2.7.1 Spínací tranzistory MOSFET.....	32
2.7.2 Půl můstkový budič IR2302 .....	33
2.8 Připojení externí EEPROM .....	34
2.9 Vstupní obvod pro úpravu velikosti „EMF“ .....	35

2.10	Realizace regulátoru .....	36
<b>3</b>	<b>Softwarové Řešení</b>	<b>37</b>
3.1	Řídící software pro regulátor .....	37
3.1.1	Běh hlavního programu .....	38
3.1.2	Vyhodnocování řídicích impulsů z přijímače .....	39
3.1.3	Rozběh motoru.....	40
3.1.4	Regulace otáček .....	41
3.1.5	Generování PWM .....	43
3.1.6	Zápis a čtení z EEPROM .....	44
3.1.7	Využití USART pro komunikaci s PC.....	45
3.2	Software pro PC.....	46
<b>4</b>	<b>Dosažené výsledky</b>	<b>49</b>
4.1	Měření generovaných průběhů .....	49
4.2	Testování regulátoru .....	50
4.2.1	Ověření správné funkce komutace motoru .....	50
4.2.2	Měření oteplení pouzdra výkonových tranzistorů .....	51
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam zkratk</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>56</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Střídavý (vlevo) a stejnosměrný (vpravo) elektromotor [7] .....	11
Obr. 1.2:	Ukázka stejnosměrného motoru s permanentním magnetem [7].....	12
Obr. 1.3:	Střídavý regulátor napětí od firmy JETI [4] .....	12
Obr. 1.4:	Vnitřní uspořádání BLDC motoru [16].....	14
Obr. 1.5:	Ukázka modelářského motoru s neodymovými magnety [4].....	14
Obr. 1.6:	Průběhy napětí na jednotlivých fázích motoru s vyznačením EMF .....	16
Obr. 1.7:	Řídicí a výkonová jednotka BLDC motoru .....	17
Obr. 1.8:	Ukázka akumulátoru Li-pol [7] .....	18
Obr. 1.9:	Průběh vybíjení jednoho článku akumulátoru Li-pol [2].....	19
Obr. 2.1:	Blokové schéma regulátoru.....	21
Obr. 2.2:	Schéma zapojení balanceru.....	22
Obr. 2.3:	Simulace funkce vyrovnavače napětí v programu PSpice .....	23
Obr. 2.4:	Fotografie realizovaného vyrovnavače článků .....	23
Obr. 2.5:	Katalogové zapojení proudového monitoru ZXCT 1021 [11].....	25
Obr. 2.6:	Závislost šířky vodiče DPS na maximálním procházejícím proudu [12]. ...	26
Obr. 2.7:	Schéma zapojení proudového monitoru ZXCT 1021 .....	27
Obr. 2.8:	Schéma napájecí části .....	28
Obr. 2.9:	Měření napětí na akumulátoru .....	29
Obr. 2.10:	Řídicí impulsy regulátoru .....	30
Obr. 2.11:	Vstupní část regulátoru.....	30
Obr. 2.12:	Zapojení výkonové části regulátoru .....	32
Obr. 2.13:	Propojení polovodičové EEPROM s mikroprocesorem.....	35
Obr. 2.14:	Úprava velikosti „EMF“ pro mikroprocesor.....	35
Obr. 2.15:	Pohled na osazený regulátor .....	36
Obr. 3.1:	Vývojový diagram běhu hlavního programu .....	39
Obr. 3.2:	Princip rozběhu motoru .....	41
Obr. 3.3:	Princip komutace dle komutační tabulky.....	42
Obr. 3.5:	Organizační struktura paměti .....	44
Obr. 3.6:	Aplikace RegulatorPC .....	46
Obr. 3.7:	Skenování dostupných COM portů .....	47
Obr. 3.9:	Chybová hláška zobrazující se když uživatel nevybere žádný port .....	47
Obr. 3.10:	Vykreslené grafy průběhů napětí a proudu při provozu regulátoru .....	48
Obr. 3.11:	Ukončení programu RegulatorPC .....	48
Obr. 4.1:	Generované průběhy na výstupu regulátoru bez připojeného motoru .....	49
Obr. 4.2:	Testovací pracoviště.....	50

# SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1:	Vhodné procesory Atmel AVR.....	24
Tab. 2.2:	Některé vybrané parametry obvodu ZXCT1021 [11].....	25
Tab. 2.3:	Ověření přesné hodnoty Rsense.....	27
Tab. 2.4:	Některé vybrané parametry nízko úbytkového stabilizátoru LF50 [13] .....	28
Tab. 2.5:	Proudové odběry regulátoru .....	28
Tab. 2.6:	Vybrané parametry tranzistoru IRLR8256PBF [14].....	33
Tab. 2.7:	Význam jednotlivých vývodů obvodu IR2302 [15] .....	34
Tab. 3.1:	Jednotlivé moduly programu regulátoru .....	37
Tab. 3.2:	Komutace do jednotlivých stavů.....	42
Tab. 4.1:	Měření teploty pouzdra výkonových tranzistorů .....	51

# ÚVOD

Regulátory otáček jsou elektronická zařízení sloužící k řízení rychlosti otáčení elektrických motorů. Uplatnění nacházejí v nejrůznějších odvětvích elektroniky. Setkáváme se s nimi v oblasti průmyslové výroby, ale využívají se také jako řídicí obvody otáček modelářských motorků. V současné době se vyrábí celá škála regulátorů pro stejnosměrné a střídavé motory. Liší se svými parametry. Mezi nejdůležitější z nich patří například velikost maximálního zatěžovacího proudu a napájecího napětí.

Práce se zabývá problematikou související s návrhem mikroprocesorově řízeného regulátoru otáček pro jednosměrné řízení střídavých modelářských motorů menších výkonů (BLDC motorů). Jejím úkolem je navrhnout a zkonstruovat takový jednosměrný regulátor, který je možné využít v leteckém modelářství, ale i v jiných odvětvích pracujících s těmito typy motorů.

BLDC motory neobsahují mechanický komutátor. O komutaci se stará řídicí jednotka. Modelářské střídavé motory jsou konstruovány tak, že neobsahují čidla, která by řídicí jednotce dávala informaci o aktuální poloze rotoru. Z tohoto důvodu musí být regulátor schopný pracovat na principu bezsensorového řízení.

Jelikož se ve výsledné aplikaci předpokládá využití napájecích Li-pol akumulátorů, které jsou náchylné na poškození při vybíjení, řeší práce i návrh zařízení, které je schopno toto poškození eliminovat. Jedná se o vyrovnávač článků, neboli takzvaný „balancer“.

Regulátor obsahuje obvod BEC pro napájení přijímače. Dále umožňuje monitorovat odebíraný proud a napájecí napětí akumulátoru. V případě poklesu jeho napětí pod hodnotu 8,1 V dojde automaticky k omezení funkce otáčení motoru, napájení přijímače zůstává zachováno. Změřené hodnoty napětí a proudů jsou během provozu ukládány do paměti EEPROM a je možné je následně uploadovat do PC, kde je možné je graficky zobrazit v programu RegulátorPC, jež byl v rámci práce vytvořen.

Při návrhu zařízení bylo bráno v potaz, že bude umístěno uvnitř modelu letadla. Z tohoto důvodu bylo důležité navrhnout a zkonstruovat zařízení s co nejmenšími rozměry a váhou.

Po obsahové stránce je text dělen do několika hlavních kapitol. V první kapitole je čtenář seznámen s elektrickými motory obecně a blíže jsou pak specifikovány vlastnosti a metody řízení bezkomutátorových (BLDC) motorů. Kapitola také obsahuje srovnání vlastností stejnosměrných a střídavých modelářských motorů, popisuje parametry Li-pol akumulátorů a druhy regulátorů obecně. V kapitole druhé je popsán vlastní návrh regulátoru a vyrovnávače napětí. Třetí kapitola se zabývá softwarovým vybavením regulátoru a popisem programu RegulatorPC. V následující čtvrté kapitole jsou popsány výsledky práce, kterých bylo dosaženo při praktickém testování funkce regulátoru. Poslední, pátou kapitolou, je závěrečné zhodnocení celé práce.

# 1 TEORETICKÝ ÚVOD

## 1.1 Elektromotor

Elektromotor (obr. 1.1) je elektrický stroj, který mění elektrickou energii na mechanickou práci. Obvykle se jedná o otáčení, ale existují i motory posuvné. Drtivá většina elektromotorů pracuje na elektromagnetickém principu. Existují však i motory pracující na základě elektrostatické síly nebo piezoelektrického jevu. Hlavním principem pro elektromagnetické motory je vzájemné silové působení elektromagnetických polí, které se vytvářejí po průchodu proudu vinutími motoru. Tyto síly definuje tzv. Lorenzův zákon. [1]



Obr. 1.1: Střídavý (vlevo) a stejnosměrný (vpravo) elektromotor [7]

Elektromotor se skládá ze dvou základních částí. Pohyblivá část se jmenuje rotor. Nepohyblivá (statická) část se pak nazývá stator. Rotační motor je konstruován tak, že na sebe působí elektromagnetická pole statoru a rotoru a tím se vytváří kroučící moment, který je přenášen na výstupní hřídel motoru. Tak dochází k jeho točení a tedy i přeměně elektrické energie na mechanickou práci.

## 1.2 Stejnosměrný komutátorový motor s permanentním magnetem

Je nejjednodušším typem motoru využívající stejnosměrného proudu. Stator je tvořen permanentním magnetem. Rotor se nazývá kotva a podle tvaru své konstrukce opravdu připomíná lodní kotvu. Ta je tvořena formou elektromagnetu se dvěma póly. Obvykle obsahuje tři vinutí, která jsou připojena k lamelám komutátoru. Obecně se tedy ta část motoru, která je napájena pracovním proudem nazývá kotva a to i v případě, že ji svým tvarem nepřipomíná. Přepínač polarity elektrického proudu (tzv. komutátor) postupně připojuje napájecí napětí na odpovídající cívku ve správné polaritě. Tímto mechanismem se zajistí, že síla působící na póly rotoru má stále stejný směr. Během takzvaného mrtvého úhlu (doba mezi jednotlivými přepnutími polarity) si motor udržuje smysl svého otáčení setrvačností.

Moderní stejnosměrné motory s permanentním magnetem se dnes využívají například v modelářství. Příklad takového motoru je znázorněn na obr. 1.2. Konstrukčně jsou shodné jen s tím rozdílem, že kotva je tvořena jako tři pólůvá. Zabráňuje se tím problému s mrtvým úhlem. Regulace jejich výkonu je prováděna

změnou napájecího napětí, nebo pomocí PWM modulace, kdy se záměrně mění střední hodnota tekoucího proudu. Smysl otáčení je u nich možné změnit pouhým přepólováním zdroje.



Obr. 1.2: Ukázka stejnosměrného motoru s permanentním magnetem [7]

### 1.3 Regulátor otáček

Regulátory otáček jsou elektronická zařízení, která se používají k řízení otáček modelářských i jiných typů elektrických motorů. Podle typu motoru, pro který jsou určeny, se dělí na dvě základní skupiny. Jsou to regulátory stejnosměrné a střídavé, jehož ukázka je vidět na obr. 1.3. Navíc se ještě tyto dvě základní skupiny dělí na jednosměrné a obousměrné. Jedsměrné regulátory se využívají k řízení motoru jedním směrem, tedy tam kde není třeba zpětného chodu jako například u modelů letadel. Obousměrné regulátory umožňují i obrácený chod a jsou proto vhodné zejména pro modely lodí a automobilů.



Obr. 1.3: Střídavý regulátor napětí od firmy JETI [4]

Většina moderních regulátorů je vybavena takzvaným obvodem BEC. Jedná se v podstatě o obyčejný jednoduchý, ale kvalitní stabilizátor napětí. Ten slouží k tomu, aby „palubní elektronika“ modelu (přijímač, serva a nebo například osvětlení...) měla stejný napájecí zdroj jako motor. Odpadá tím nutnost využít pro napájení přijímače další zdroj, na kterém mohou vznikat poruchy. Další výhodou je i jisté „odlehčení“ modelu, jenž například u letadel hraje důležitou roli.

Některé regulátory obsahují elektroniku, která hlídá stav vybití napájecích článků baterie (funkce PCO). Zejména při použití článků typu Li-pol je tato funkce velice užitečná. Při poklesu napětí baterie pod určitou mez regulátor sníží otáčky motoru, nebo jinak uživatele upozorní na tuto skutečnost. Případně pokud je již stav baterie kritický, dojde k úplnému omezení ovládní motoru, aby nedošlo k poškození jednotlivých článků akumulátoru. Napájení přijímače a palubní elektroniky je i v tomto případě

zachováno. U modelů aut je obvykle žádáno, aby byl regulátor vybaven brzdou pro úplné zastavení motoru. Tu lze podle potřeby odpojit a to buď mechanickou propojkou, nebo u modernějších typů programově. Programovatelné regulátory lze navíc podle požadavků do jisté míry konfigurovat. Tato operace je ale pro běžného uživatele poněkud složitější a doporučuje se proto zkušenějším modelářům.

Jedním z nejdůležitějších parametrů každého regulátoru je bezpochyby jeho proudová zatížitelnost. Jde o velikost trvalého, případně špičkového proudu, který může regulátor dodávat, aniž by došlo k jeho poškození. Základní typy se podle odběru dělí na 10, 15 a 25A. Pro modely letadel a aut mohou být vyráběny i s odběrem kolem 100A. Existují však i typy s proudovou zatížitelností mnohem vyšší. Aby se předcházelo zničení regulátorů během jejich provozu, bývají některé z nich vybaveny proudovou pojistkou nebo tepelným senzorem pro případ jejich přehřátí. Obvykle je vhodné, když obsahují i svoje chlazení. V případě nižších proudových odběrů vystačí i klasické pasivní chlazení realizované například kovovým pouzdem s žebrováním. Při vyšších odběrech se u regulátorů lodí používá vodního chlazení. Souhrn nejdůležitějších parametrů na trhu běžně dostupných regulátorů je následující:

- maximální trvalý proud (běžně od několika jednotek A až po řádově desítky A)
- vnitřní odpor (jednotky až desítky mΩ)
- spínací frekvence PWM (8, 10, 22 kHz, některé typy i více)
- napájecí napětí (2 – 4 články Li-pol nebo příslušný počet Ni-Mh článků)
- BEC

## 1.4 BLDC motory a jejich komutace

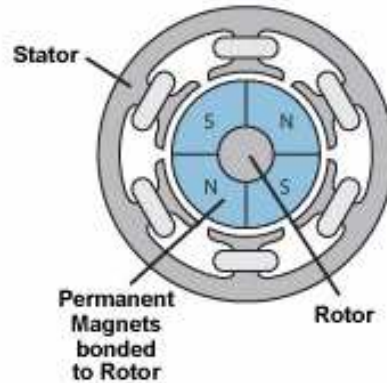
BLDC motory (též brushless DC) patří do skupiny synchronních motorů. To znamená, že elektrické pole generované státorem má stejnou frekvenci jako elektrické pole rotoru. Tomuto typu motorů se běžně v praxi říká „střídavé“. Rotor těchto strojů je tvořen permanentními magnety. Stator pak bývá obvykle složen ze tří vinutí zapojených do hvězdy nebo trojúhelníku.

Jejich hlavním rozdílem oproti klasickým DC motorům je fakt, že neobsahují mechanický komutátor. Ten je nahrazen komutátorem elektronickým. To s sebou přináší spoustu výhod. BLDC motory mají větší účinnost, delší životnost, lepší dynamiku a díky absenci mechanického komutátoru odpadá možnost vysokofrekvenčního rušení vznikajícím při jiskření kartáčů. Na druhou stranu jsou tyto motory konstrukčně složitější a tedy i dražší. Navíc, jak již bylo zmíněno, je nutné k jejich řízení použít elektroniku zajišťující komutaci jednotlivých vinutí.

Rotující magnetické pole potřebné k roztočení motoru je vytvářeno postupným připojováním jednotlivých vinutí ke zdroji stejnosměrného napětí.

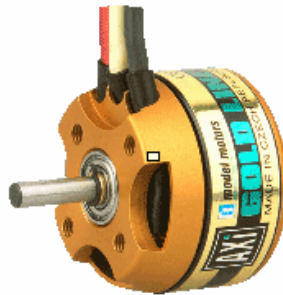
### 1.4.1 Konstrukce statoru a rotoru

BLDC motory se vyrábějí jako jednofázové, dvoufázové, nejčastěji však jako třífázové s odpovídajícím počtem vinutí. Jednotlivá vinutí mohou být složena z několika cívek, přičemž jsou obvykle spojena do hvězdy. Na obr. 1.4 je znázorněno vnitřní uspořádání BLDC motoru [16].



Obr. 1.4: Vnitřní uspořádání BLDC motoru [16]

Rotor BLDC motorů je tvořen permanentními magnety. Může obsahovat různý počet pólových dvojic, přičemž se vždy střídá severní a jižní magnetický pól. V závislosti na požadované velikosti intenzity magnetického pole se rotory vyrábí z různých materiálů. Nejpoužívanější jsou feritové magnety. Stále častěji jsou však k výrobě magnetů voleny ušlechtilé slitiny jako například neodym. Ty jsou sice drahé, ale jejich použitím je dosaženo stejné intenzity magnetického pole při menších rozměrech rotoru a tedy i celého motoru. Příklad takového motoru je vidět na obr. 1.5.



Obr. 1.5: Ukázka modelářského motoru s neodymovými magnety [4]

### 1.4.2 Komutace BLDC motoru

Elektronická komutace bezkartáčového motoru je poměrně složitou záležitostí. Její princip spočívá v postupném spínání jednotlivých vinutí statoru. Během každého komutačního kroku je postupně připojováno napájecí napětí vždy ke dvěma ze tří vinutí, přičemž jedno je vždy buzeno kladným napětím a druhé záporným napětím. Třetí vinutí zůstává plovoucí (není v daném komutačním kroku napájeno).

Kroutící moment je vytvořen působením magnetického pole generovaným státorem a magnetickým polem rotoru. Největšího kroutícího momentu je dosaženo tehdy, jsou-li

tato pole vůči sobě pootočena o  $90^\circ$ . Rotor se snaží dostat do polohy, kdy je vektor magnetického pole statoru shodný s vektorem magnetického pole rotoru. To je pro něj impulsem k vykonání pohybu. Následuje komutace do dalšího stavu. Jedna otáčka o  $360$  stupňů obsahuje celkem  $6$  komutačních kroků. Cyklus se neustále opakuje a tím dochází k tomu, že magnetické pole rotoru neustále dohání magnetické pole statoru a motor se otáčí.

### 1.4.3 Metody řízení BLDC motoru

Řízení BLDC motoru obstarává řídicí jednotka. Ta provádí komutaci jednotlivých vinutí, která musí být prováděna ve vhodný okamžik, aby byl celý proces co nejefektivnější. K tomuto účelu je nezbytné znát polohu natočení rotoru. Podle způsobu zjišťování této informace rozlišujeme:

- a) Řízení pomocí senzorů
- b) Řízení bez použití senzorů

### 1.4.4 Řízení pomocí senzorů

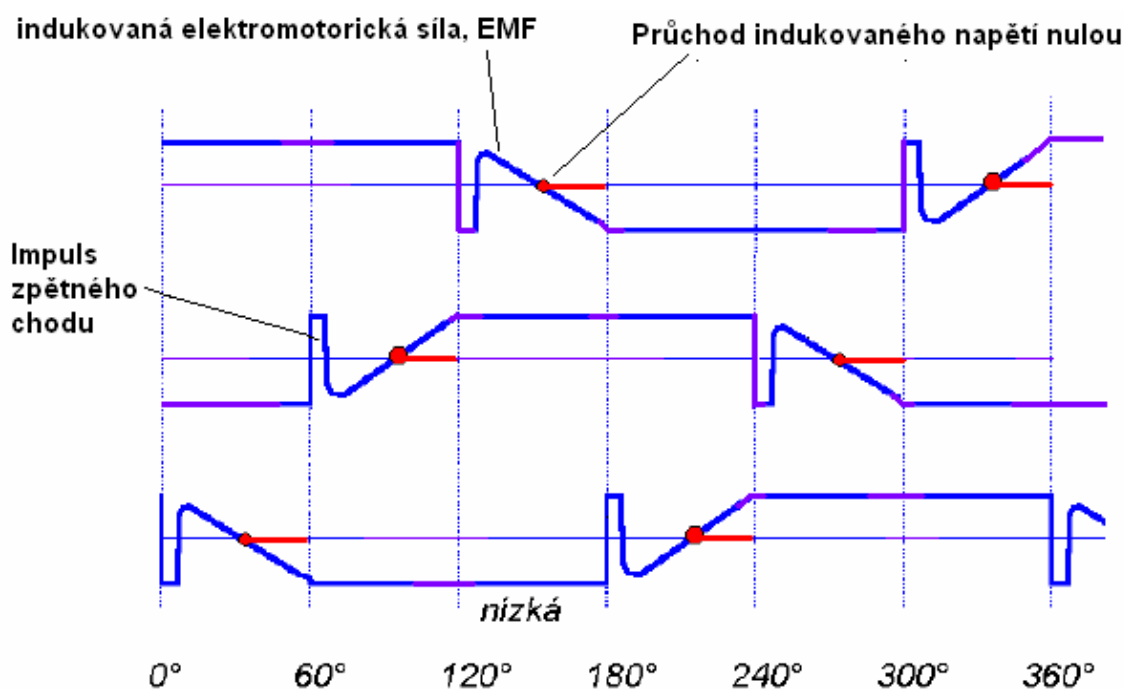
Při použití tohoto způsobu dodávají informaci o poloze rotoru řídicí jednotce senzory. Nejčastěji je využíváno třech Hallových senzorů. Tato metoda se používá v náročnějších aplikacích požadujících přesné informace o poloze rotoru. Nevýhody jsou pak zřejmé. Hallové senzory vyžadují pro umístění určitý prostor a tím se zvětšují rozměry motoru a celkově i jeho cena. Navíc senzory potřebují svoje napájení.

Pokud se v blízkosti senzoru objeví magnetické pole, dochází ke generování kladného nebo záporného napětí (v závislosti na severním nebo jižním pólu magnetu). Třífázové BLDC motory obsahují většinou tři Hallové senzory, které bývají umístěny na statoru a vzájemně jsou od sebe posunuty o  $60^\circ$  nebo  $120^\circ$ . Důležité přitom je, aby bylo umístění senzorů co nejpřesnější. V opačném případě hrozí špatné určování polohy rotoru a tím i nepřesná komutace.

### 1.4.5 Řízení bez použití senzorů

Tato metoda řízení motoru se využívá v méně náročných aplikacích a v případech, kde hrozí znečištění Hallových sond, které by již nebyly schopny dodávat řídicí jednotce informaci o poloze rotoru. Princip spočívá v měření naindukovaného napětí v cívce, která není v daném komutačním kroku připojena k napájecímu napětí (neprotéká jí žádný proud). Toto napětí se nazývá „zpětná elektromotorická síla“ (EMF) a v jeho velikosti je obsažena informace o poloze rotoru. Výhoda této metody spočívá v tom, že není zapotřebí k motoru připojovat žádná externí čidla. Na druhou stranu, aby bylo možné naindukované napětí v plovoucí cívce vůbec měřit, je nejprve nutné rotor motoru roztočit do určitých minimálních otáček, ve kterých je toto napětí možné detekovat.





Obr. 1.6: Průběhy napětí na jednotlivých fázích motoru s vyznačením EMF

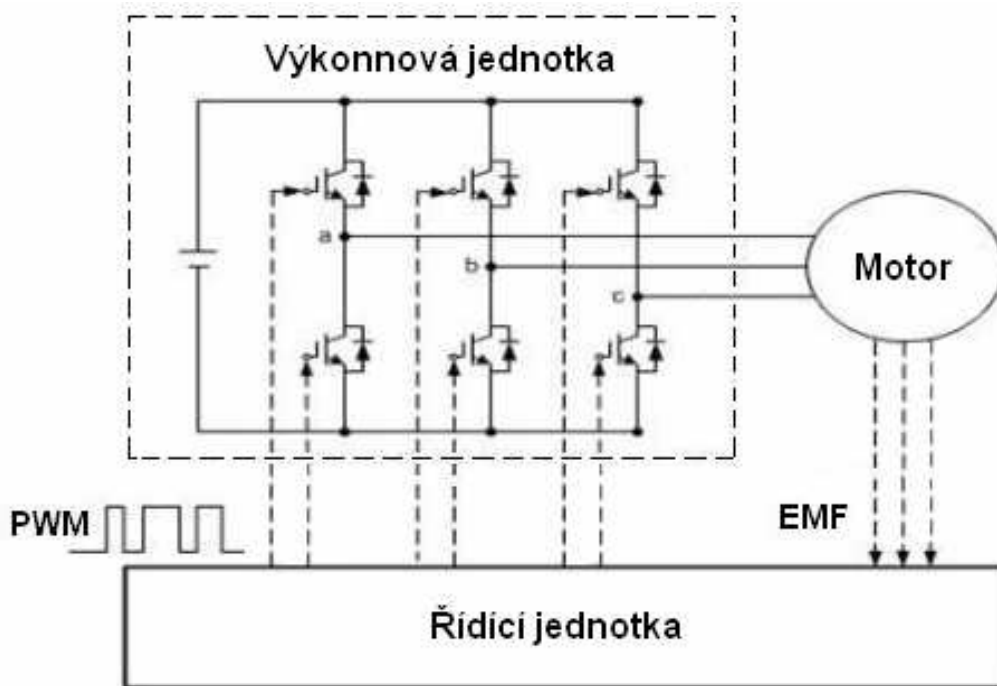
Na obr. 1.6 jsou znázorněny průběhy napětí na jednotlivých fázích motoru s vyznačením EMF. Celý jeden cyklus je rozdělen na celkem 6 částí, z nichž každá je dlouhá 60°. Dohromady je tedy možné na jednom úseku dlouhém 360° nalézt celkem 6 průchodů indukovaného napětí nulou. Úkolem řídicí jednotky je detekovat tyto body a pomocí nich správně určit okamžik, kdy provést komutaci. Jako nejvhodnější okamžik je komutaci provést 30° po průchodu indukovaného napětí nulou. Mluvíme o takzvaném předstihu motoru.

Již tedy víme, že správný okamžik pro provedení komutace, při použití bezsenzorového řízení motoru, je v době po uplynutí 30° po průchodu indukovaného napětí nulou. Z technického hlediska je možné jej zjišťovat:

- V době neaktivní části PWM signálu
- V době aktivní části PWM signálu

#### 1.4.6 Řídicí a výkonová jednotka BLDC motoru

Řídicí jednotka obstarává na základě signálu o poloze rotoru komutaci jednotlivých vinutí motoru a stará se o buzení výkonové části. Jejím dalším obvyklým úkolem je ovládat otáčky motoru, případně v některých aplikacích natočení rotoru do určité polohy. Výkonová jednotka bývá obvykle složena z 6 výkonových tranzistorů a jejich budičů. Na základě signálu z řídicí části jsou jednotlivé tranzistory spínány tak, že v jeden komutační krok je vždy jedna cívka motoru připojena ke kladnému potenciálu napájecího napětí a druhá k zápornému potenciálu. Principiální schéma zapojení je naznačeno na obr. 1.7.



Obr. 1.7: Řídicí a výkonová jednotka BLDC motoru

Otáčky BLDC motoru jsou úměrné napájecímu napětí a jejich rychlost otáčení tedy můžeme měnit napětím. K tomuto účelu se využívá pulzně šířkové modulace (PWM modulace). Princip spočívá v rychlém spínání a vypínání napájecího napětí. Díky setrvačnosti motoru a dostatečně vysoké frekvenci spínání, rotor nestačí tyto změny sledovat. Motor se chová, jako kdyby byl napájen napětím o velikosti střední hodnoty, která je dána poměrem doby zapnutí a vypnutí (střídou PWM signálu). [5]

Spínání jednotlivých tranzistorů v můstkovém zapojení na obr. 1.7 může být obecně řešeno:

- a) Vždy horní i spodní tranzistor spínán PWM signálem.
- b) Horní tranzistor spínán PWM signálem, dolní je trvale sepnut.
- c) Dolní tranzistor spínán PWM signálem, horní je trvale sepnut.

## 1.5 Porovnání vlastností střídavých a stejnosměrných motorů

Díky svým dobrým vlastnostem a především vysoké účinnosti se v poslední době čím dál tím častěji začínají jako pohony modelů rozšiřovat střídavé (bezkartáčové BLDC) motory. Jsou sice oproti stejnosměrným motorům složitější a dražší, zato však nabízejí řadu výhod. Rotor těchto strojů je od statoru oddělen vzduchovou mezerou obdobně jako u stejnosměrných motorů a nevzniká tak během provozu žádné tření. Jelikož motory pracují na principu elektromagnetické indukce s točivým polem, odpadá nutnost

použití komutátoru, jež je hlavním zdrojem poruch. Navíc tyto motory neobsahují kartáčky, při jejichž „jiskření“ může docházet k rušení signálu modelářských přijímačů. Není tedy nutné je odrušovat připojením kondenzátoru ke svorkám motoru.

Střídavé motory se vyrábějí v různých velikostech s širokou škálou výkonů. Jsou oproti stejnosměrným motorům stejného výkonu lehčí v průměru o 30-50 % a mají vyšší účinnost, která bývá 80 až 90% (stejnosemřné motory jen kolem 50%). Další obrovskou výhodou „stříďáků“ je jejich vysoký kroutící moment. Díky němu je možné používat vrtule větších rozměrů a stoupání bez nutnosti připojení přídatných převodových stupňů. Mají však i své nevýhody. Jejich regulace výkonů se provádí náročnějšími postupy (u stejnosměrných motorů je v nejjednodušších případech možné regulovat pouhou změnou napájecího napětí). K řízení se obvykle využívá jednočipového mikrokontroléru. Musejí být ovládány speciálními regulátory k tomu určenými. I vzhledem k těmto několika relativně větším mínusům převažují výhody pohonů tvořené střídavými motory nad jejich nevýhodami a v dnešní době v oblasti pohonů modelů již téměř nahradily klasické komutátorové motory.

## 1.6 Akumulátory Li-pol

Na obr. 1.8 je znázorněna ukázka akumulátoru Li-pol (Lithium-polymer) tvořeného třemi články o celkovém jmenovitém napětí 11,1V. Akumulátory Li-pol patří v oblasti modelářských pohonů k velice žádaným zdrojům elektrické energie díky jejich zajímavým vlastnostem shrnutým v následujícím odstavci [2]. Zejména lze vystihnout jejich velmi nízkou hmotnost, malé rozměry, vysoké vybíjecí a nabíjecí proudy a vysoké napětí na článek. Pokud je s nimi zacházeno dle základních provozních pravidel, je jejich provoz bezpečný. Pomocí sériového, případně sérioparalelního spojení několika článků můžeme realizovat akumulátorové sady různých napětí a kapacit.



Obr. 1.8: Ukázka akumulátoru Li-pol [7]

### Vlastnosti Li-pol akumulátorů [2]:

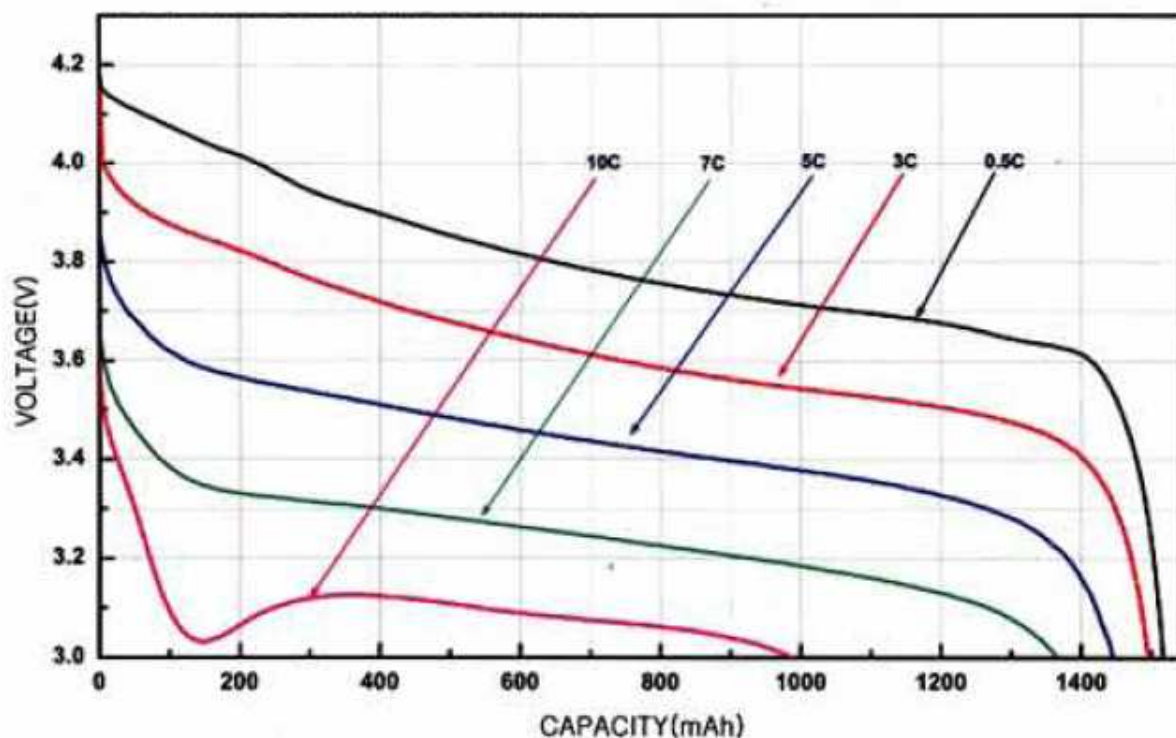
- kladný hliníkový vývod plátován niklem pro jednodušší pájení
- neobsahuje žádné vložené pojistky (není zvyšován vnitřní odpor)
- udává se 500 nabíjecích/vybíjecích cyklů při proudu 0,5C a pokles kapacity na 80% (kde C je hodnota kapacity článku)
- po 100 cyklech při maximálním vybíjecím proudu pokles kapacity o 15 až 20%
- střední vybíjecí napětí 3,7V/článek
- maximální provozní napětí 4,2V, minimální 2,7V (při nárůstu, respektive poklesu pod tuto hodnotu dochází k poškození článku)

pozn: velikost maximálního a minimálního provozního napětí se může u různých výrobců lišit

- minimální samovybíjení (jednotky procent za měsíc)
- nemají napěťovou disperzi a „paměťový efekt“

### Vybíjení Li-pol akumulátorů

Při procesu vybíjení akumulátoru typu Li-pol je důležité držet se několika následujících pravidel, jinak hrozí možnost snížení jeho kapacity, nebo úplného zničení. Příklad vybíjecí charakteristiky si můžeme prohlédnout na obr. 1.9. Vybíjecí proudy pro standardní články jsou 2 až 3C, 5 až 8C pro akumulátory nesoucí označení „HD“ a u některých speciálních typů se můžou pohybovat i kolem 40C. Vybíjení proudy vyššími než doporučené maximum vede obvykle k poškození nebo zničení článku. Důležité je dodržovat provozní teplotu při vybíjení, která by měla být v intervalu  $-10$  až  $+60^{\circ}\text{C}$ . Při hodnotě  $3-2,7\text{V}/\text{článek}$  je nutné proces ukončit z důvodu nebezpečí poškození či zničení článku. Důležité je také vyvarovat se zkratu.



Obr. 1.9: Průběh vybíjení jednoho článku akumulátoru Li-pol [2].

## 1.7 Vyrovnavač článků (balancer)

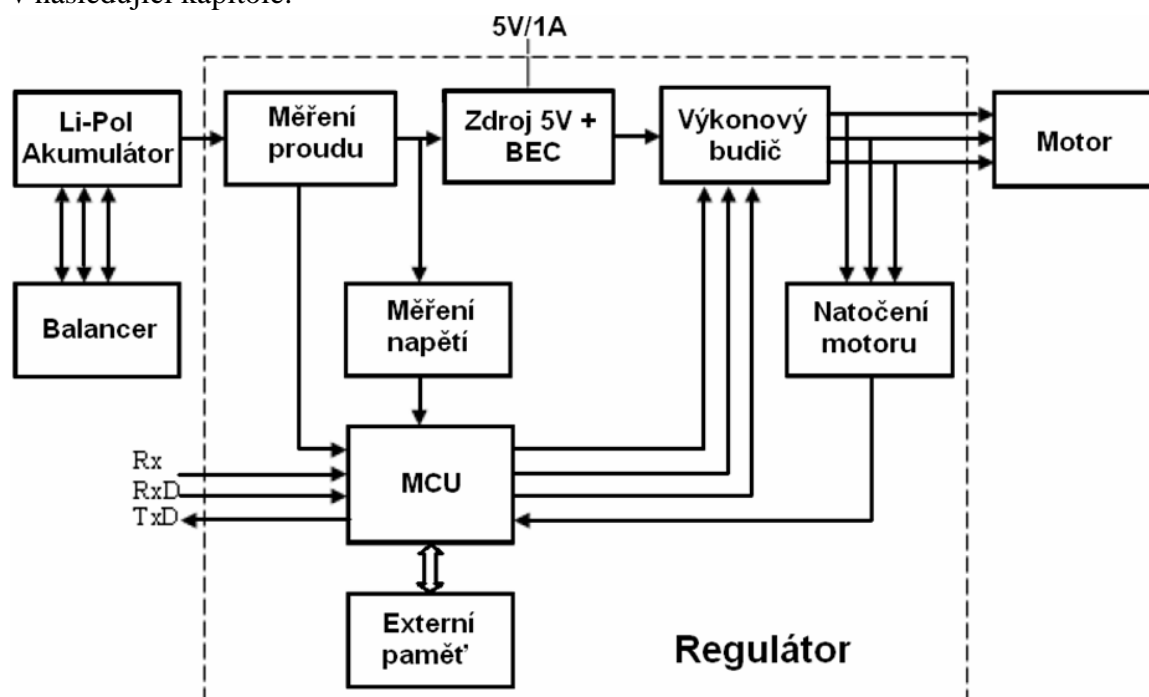
Jelikož bude navrhovaný regulátor pracovat s akumulátory typu Li-Pol, je vhodné jej vybavit takzvaným „vyrovnavačem článků“. Z důvodu co nejmenší konstrukce regulátoru je navržen na samostatné desce plošných spojů. K akumulátoru se připojuje pomocí servisního konektoru (viz. obr 1.8.).

Vyrovnavač napětí jednotlivých článků (neboli takzvaný „balancer“) se stará o to, aby docházelo ke správnému nabíjení, případně vybíjení akumulátoru Li-pol. Je vhodné, aby tímto obvodem byl vybaven každý regulátor napětí pracující s akumulátorem tvořeným jednotlivými články Li-pol. Jak je známo, baterie Li-pol jsou velice náchylné k poškození při nabíjení i vybíjení. Jednotlivé články se nemusejí vybíjet stejnoměrně a jejich napětí se tak mohou postupem času „rozcházet“. Bude-li se tak dít, „slabší“ články se budou vybíjet na úkor „silnějších“ a postupně dojde k jejich nenávratnému poškození. Aby k tomu nedocházelo, bude obsahovat navrhovaný regulátor takovýto vyrovnavač článků.

## 2 NÁVRH HARDWARE

Blokové schéma regulátoru pro jednosměrné řízení střídavých modelářských elektromotorů je vidět na obr. 2.1. Zařízení se skládá ze dvou částí, samotného regulátoru a vyrovnavače článků (balanceru). Regulátor je osazen mikroprocesorem ATmega8 z rodiny Atmel AVR. Ten pomocí PWM modulace ovládá výkonový budič složený z MOSFET tranzistorů a budičů IR2302. Regulátor obsahuje blok sloužící k monitorování odebíraného proudu a k měření napětí na napájecí baterii. Aby bylo možné změřená data ukládat a následně zpracovávat, obsahuje zapojení externí EEPROM. Dále disponuje částí starající se o napájení „palubní elektroniky“, tzv. BEC.

Vyrovnavač článků „hlídá“ stav vybití akumulátoru. Je podrobně popsán v následující kapitole.



Obr. 2.1: Blokové schéma regulátoru

### 2.1 Balancer

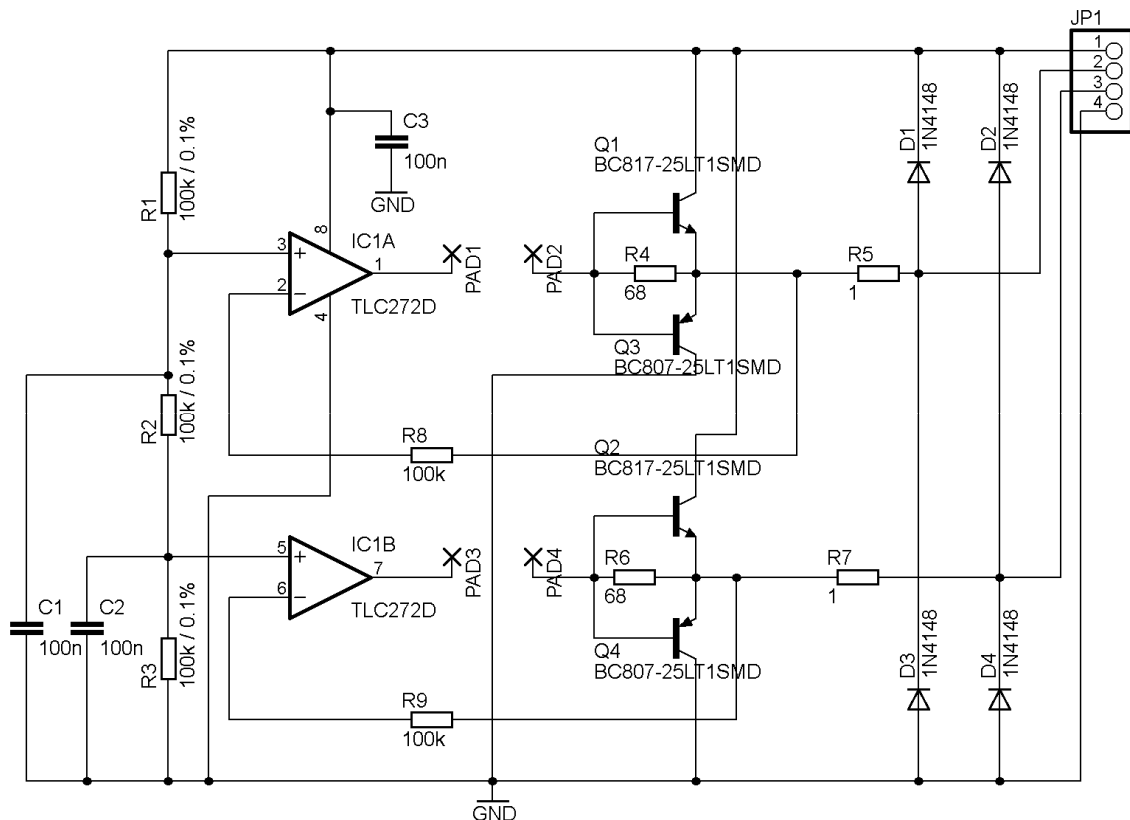
#### 2.1.1 Návrh zapojení

Celkové schéma zapojení vyrovnavače článků je vidět na obr. 2.2. Jedná se o poměrně jednoduchou konstrukci složenou ze základních elektronických součástek. Klíčovou částí je zde operační zesilovač TLC 272D. Je napájen nesymetrickým napětím z akumulátorové sady. Pro rezistory R1, R2 a R3 musí platit, že jejich hodnoty by se měly lišit jen minimálně, nebo v ideálním případě vůbec. Byla tedy zvolena výrobní řada s tolerancí hodnoty  $\pm 0,1\%$ . To je důležité z toho důvodu, aby se vstupní napětí rozdělilo rovnoměrně na hodnoty  $1/3$  a  $2/3$  celkového napětí akumulátorové sady.

Tranzistory Q1 a Q3 (respektive Q2 a Q4) jsou zde zapojeny z důvodu proudového

zesílení. Jedná se o klasické komplementární zapojení PNP (BC807) a NPN (BC817) bipolárních tranzistorů. Rezistory R5 a R7 mají hodnotu 1Ω. Jelikož přes ně bude procházet vyrovnávací proud do jednotlivých článků akumulátorové sady, jsou zvoleny v pouzdře 1210. Rezistory R8 a R9 o hodnotě 100 kΩ slouží jako ochranné rezistory pro invertující vstupy operačního zesilovače.

Zapojení dále obsahuje ochranné diody D1-D4. Jsou zde pro případ, aby se při připojování baterie ke konektoru nedostalo na vstupy OZ vyšší napětí než na napájecí svorky. Diody jsou klasické univerzální 1N4148 v pouzdře 0805. Pro indikaci, zda prochází vyrovnávací proud z/do baterie, byly použity dvoubarevné LED diody L-57EGW. Kondenzátory C1-C3 slouží pouze jako blokovací kapacity.



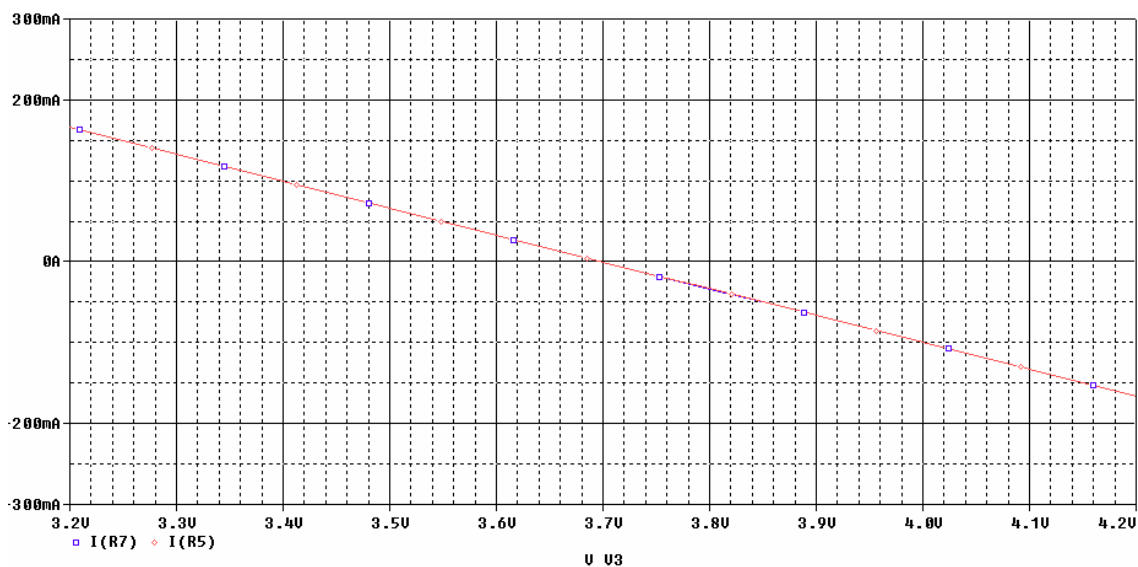
Obr. 2.2: Schéma zapojení balanceru

### 2.1.2 Funkce

Vyrovnavač článků je navržen pro vyrovnávání jednotlivých napětí tříčlánkového akumulátoru Li-pol. Sada obsahuje kromě napájecího konektoru i takzvaný servisní konektor, na jehož jednotlivých pinech jsou vyvedeny napětí z každého samostatného článku. Tato napětí jsou přivedena do invertujících vstupů operačních zesilovačů OC1A a OC2B. Z celkového napětí akumulátoru je pomocí děliče, složeného z odporů R1 - R3 vytvářeno a k neinvertovaným vstupům OC1A a OC2B přiváděno vhodné referenční napětí. V této fázi je z článků akumulátoru dodáván do zátěže proud.

Nyní se začne akumulátor vybíjet a jeho celkové napětí začíná klesat. Stejně tak se zmenšuje i napětí na jednotlivých článcích akumulátoru a referenční napětí na neinvertujících vstupech operačních zesilovačů OC1A a OC1B. Nyní dojde například

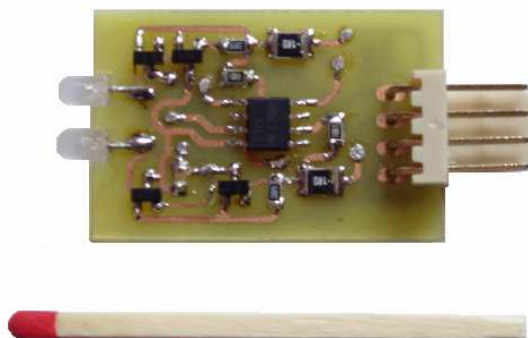
k situaci, že článek 1 se začne vybíjet rychleji než zbývající dva ostatní. Tím se na invertující vstup OZ dostává napětí, které je menší než referenční, přivedené k neinvertujícímu vstupu OZ. Operační zesilovač začne spojitě otvírat tranzistory Q2, Q4 a do článku 1 začne téci proud přes rezistor R7. Jeho napětí se tak pomalu začíná zvedat až do té doby, než dojde k vyrovnání s ostatními články akumulátoru. Na obr. 2.3 je pro názornost simulována v programu PSpice funkce vyrovnavače.



Obr. 2.3: Simulace funkce vyrovnavače napětí v programu PSpice

### 2.1.3 Realizace balanceru

Vyrovnavač článků je postaven na jedné oboustranné desce plošných spojů o rozměrech 32 \* 21 mm. Výsledná navržená deska včetně osazovacího plánu je umístěna v příloze B. Je vytvořena metodou spojitých čar. V zapojení jsou použity klasické smd součástky. Většina rezistorů a kondenzátorů je velikosti pouzdra 0805. Výjimku tvoří rezistory R5 a R7, jež jsou z důvodu většího výkonového zatížení umístěny do pouzdra 1210. Signalizační diody LED1 a LED2, které jsou dvoubarevné a umožňují tak identifikaci směru toku proudu, se v pouzdru smd nevyrábějí a tak jsou v klasickém provedení LED3mm. Jsou připájeny k vývodům PAD1 a PAD2 respektive PAD3 a PAD4 tak, že jsou umístěny na kraji desky. Na obr. 2.4 je vidět fotografie zhotoveného vyrovnavače článků.



Obr. 2.4: Fotografie realizovaného vyrovnavače článků



## 2.2 Mikrokontrolér ATmega8

O řízení celé aplikace se stará jednočipový mikrokontrolér. V současné době se jich vyrábí celá škála nejrůznějších typů od různých výrobců. Mezi nejznámější patří například Freescale, Intel a Atmel. Vzájemně se od sebe liší svými parametry, vybavením a v neposlední řadě také cenou. Pro každou aplikaci je vhodný jiný mikrokontrolér. Je důležité, aby byl vybrán takový typ, který svou výbavou vyhovuje danému zapojení. Základní požadavky pro výběr byly:

- dostatečné množství vstupně/výstupních pinů
- externí přerušení
- AD převodník (alespoň 6 kanálů)
- 3 PWM kanály
- možnost připojení externí paměti (komunikace přes I2C)
- sériové programování pomocí SPI rozhraní

V tab. 2.1 je přehled vhodných mikrokontrolérů. Jedná se o procesory Atmel AVR. Jsou dostupné a většina z nich se dá efektivně programovat pomocí jazyka C.

Tab. 2.1: Vhodné procesory Atmel AVR

Mikroprocesor	ADC / kanálů	Programová paměť [kB]	Počet I/O pinů	Počet PWM kanálů	Pouzdro
ATmega32	8	32	32	4	TQFP
ATmega48, 88, 168	8	4/8/16	23	6	MLF
ATmega8	6	8	23	3	MLF
ATmega16	8	16	32	4	MLF

Jako nejvhodnější typ byl vybrán procesor ATmega8. Disponuje dostatečnou programovou pamětí, velkým množstvím I/O pinů a umožňuje připojení externí EEPROM paměti přes I2C sběrnici. Z důvodu co nejmenších rozměrů konečného zařízení bylo zvoleno smd pouzdro MLF. Základní vlastnosti jednočipového mikrokontroléru ATmega8 jsou: [10]

- nízkopříkonový AVR 8 bitový mikrokontrolér
- architektura typu RISC
- 32 pracovních registrů
- programová paměť 8kB
- dva 8 bitové čítače/časovače , jeden 16 bitový
- 3 PWM kanály
- 8 kanálový AD převodník
- napájení 4,5 – 5,5 V

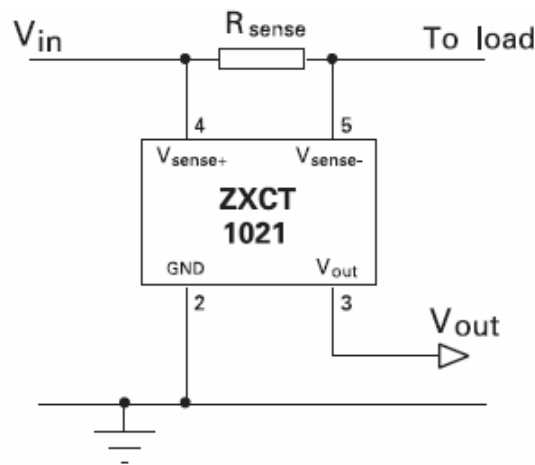
## 2.3 Měření odebíraného proudu

Navrhovaný regulátor umožňuje monitorování odebíraného proudu. Uživatel má možnost regulátor připojit k PC a zobrazit změřená data odběru.

K tomuto účelu se vyrábí velké množství specializovaných integrovaných obvodů. Zde byl vybrán obvod ZXCT1021 od firmy ZETEX. Jedná se o precizní high-side current monitor. Na obr. 2.5 je vidět doporučené katalogové zapojení tohoto obvodu, jenž pracuje na principu měření úbytku napětí na rezistoru  $R_{sense}$ , který je úměrný velikosti procházejícího proudu. Některé důležité parametry obvodu jsou shrnuty v tab. 2.2.

Tab. 2.2: Některé vybrané parametry obvodu ZXCT1021 [11]

Symbol	Parametr	Min	Typ	Max	Jednotka
$V_{IN}$	Vstupní napětí	2.5	-	20	V
$R_{OUT}$	Výstupní odpor	10	15	20	k $\Omega$
Acc	Zkreslení	-2	-	2	%
Gain	Zesílení	9.8	10	10.2	V/V
$T_{op}$	Teplotní rozsah	-45	-	85	$^{\circ}\text{C}$
BW	Šířka pásma (při $V_{sense}=100\text{mV}$ )	-	2	-	MHz



Obr. 2.5: Katalogové zapojení proudového monitoru ZXCT 1021 [11]

Úbytek napětí  $V_{sense}$  na rezistoru  $R_{sense}$  je 10 krát zesílen. Jeho hodnota musí být dostatečně malá, aby na něm vznikal co nejmenší ztrátový výkon. Na druhou stranu ale musí být takový, aby se daly procházející proudy měřit s danou přesností. Pro výstupní napětí  $V_{out}$  tedy platí vztah [11]

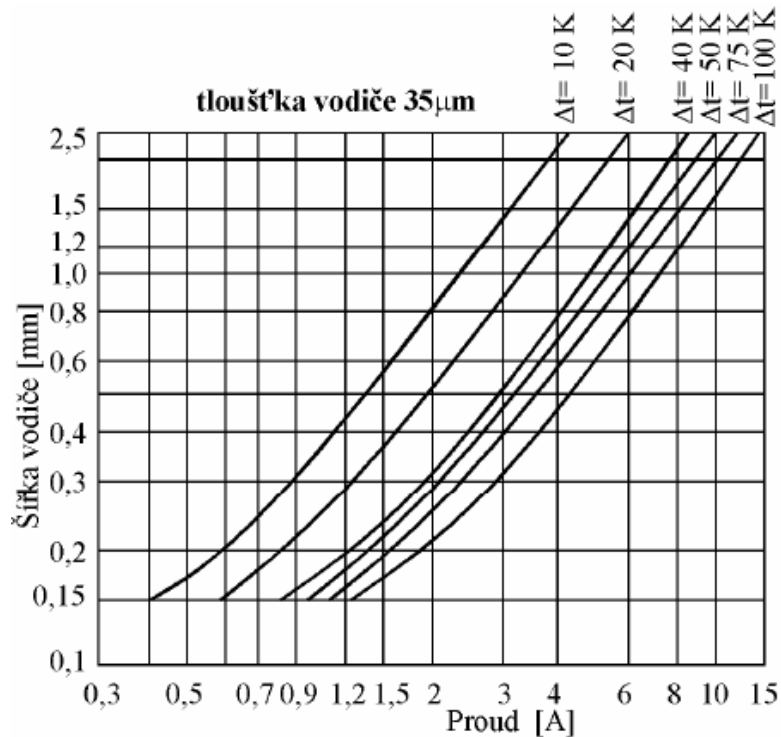
$$V_{OUT} = 10 \cdot V_{sense} \quad (2.1)$$

Monitor proudu ZXCT1021 je v regulátoru zapojen tak, jak naznačuje obr. 2.7. Pro měření proudu je na místo rezistoru  $R_{sense}$  použito odporu vodiče na DPS. Tento způsob byl zvolen z důvodu, že vodič na DPS, který má vhodně zvolené rozměry, snese větší výkonové zatížení než klasický smd rezistor. Dosadíme-li do vztahu (2.2) za  $I_{max} = 15\text{A}$ ,

pak při napětí  $V_{sense} = 0,086V$  (zvolený úbytek na  $R_{sense}$  pro požadovanou přesnost měření – původně zvoleno  $V_{sense} = 0,7V$  a následně korigováno na  $0,086V$ ) na vstupu proudového monitoru bude hodnota výkonu ztrácející se na bočnicku

$$P = V_{sense} \cdot I_{max} = 0,086 \cdot 15 = \underline{\underline{1,29W}} \quad (2.2)$$

Na obr. 2.6 je zakreslena závislost šířky vodiče DPS na maximálním trvalém procházejícím proudu pro tloušťku vodiče  $35\mu m$ .



Obr. 2.6: Závislost šířky vodiče DPS na maximálním procházejícím proudu [12].

Šířka vodiče je s ohledem na velikost maximálního procházejícího proudu 15 A odečtena z obr. 2.6. Pro oteplení vodiče o  $\Delta t = 50k$  by měla být přibližně  $w = 3,5mm$ . Potřebná délka vodiče je vypočtena dle následujících vztahů [12]:

Pro odpor vodiče na DPS platí [12]:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{t \cdot w} \quad (2.3)$$

kde  $\rho$  představuje velikost měrného odporu mědi ( $17,8 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$ ),  $l$  je délka vodiče v m,  $t$  představuje tloušťku vodiče v m (dáno výrobní technologií, v našem případě  $t = 35 \mu m$ ) a  $w$  je šířka vodiče v m. Maximální napětí na výstupu obvodu ZXCT1021 bylo zvoleno s ohledem na kompromis mezi využitím rozsahu A/D převodníku a velikostí úbytku napětí na vodiči DPS o malém odporu při velikosti proudu  $I_{max} = 15A$   $V_{OUT} = 0,7V$ . Vzhledem k možnosti následného prodloužení bočnicku při návrhu DPS a tím i zvětšení jeho odporu byla nakonec hodnota upravena na  $V_{OUT} = 0,86V$ , dle (2.1) pak platí:

$$V_{sense} = \frac{V_{OUT}}{10} = \frac{0,86}{10} = \underline{0,086V}. \quad (2.4)$$

Pro maximálním proudem  $I_{max} = 15A$  je velikost odporu na DPS rovna

$$R_{sense} = \frac{V_{sense}}{I_{max}} = \frac{0,086}{15} = \underline{5,73 \cdot 10^{-3} \Omega}. \quad (2.5)$$

Potřebnou délku  $l$  vodiče vyjádříme ze vztahu (2.3), tedy

$$l = \frac{R \cdot w \cdot t}{\rho} = \frac{5,73 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 35 \cdot 10^{-6}}{17,8 \cdot 10^{-9}} = \underline{\underline{0,0394m}} = 39,4mm$$

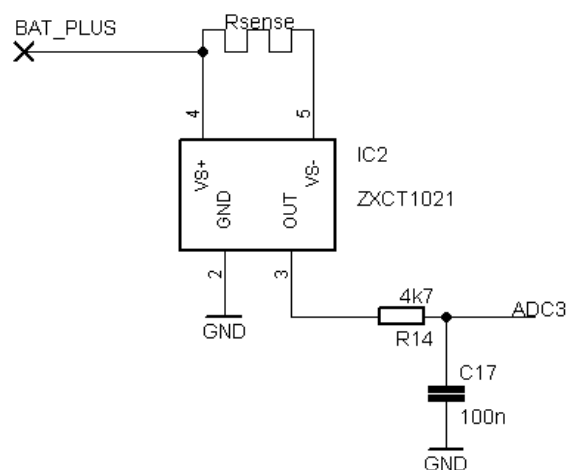
Pro ověření vypočtené hodnoty odporu  $R_{sense}$  byly pro různé hodnoty proudu změřeny a do tab. 2.3 zapsány hodnoty napětí  $U_{sense}$ . Ze vztahu (2.6) byla určena jeho přesná hodnota.

Tab. 2.3: Ověření přesné hodnoty Rsense

I [A]	0,5	0,8	1,2	1,5	2,0	2,5
$U_{sense}$ [mV]	3,2	5,1	7,7	9,7	12,8	16,0

$$R_{sense} = \frac{U_{sense}}{I} = \frac{16 \cdot 10^{-3}}{2,5} = \underline{6,4 \cdot 10^{-3} \Omega} \quad (2.6)$$

Dolní propust RC na obr. 2.7, jejíž mezní kmitočet vypočteme dle vztahu (2.7), slouží k vyhlazení napětí, přiváděného k A/D převodníku mikroprocesoru, kde je zpracováváno. Regulátor totiž pracuje ve spínaném režimu a v době neaktivní části signálu by docházelo k chybnému odečítání hodnoty proudu. Jelikož je úbytek napětí na vodiči DPS velmi malý (zesílen 10 krát), není rozsah převodníku plně využit. Pro měření proudů regulátoru však daná přesnost plně vyhovuje.



Obr. 2.7: Schéma zapojení proudového monitoru ZXCT 1021

$$f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 4,7 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = \underline{\underline{338Hz}} \quad (2.7)$$

## 2.4 Napájecí část + BEC 5V

Obvod BEC plní v regulátoru dvě základní funkce. Slouží k napájení přijímače, serv a veškeré ostatní „palubní“ elektroniky. Tím odpadá nutnost použít pro přijímač další nezávislý zdroj. Dále vytváří vhodné napájecí napětí 5V pro regulátor.

Na obr 2.8. je celkové schéma zapojení napájecí části. Jako vhodný typ pro stabilizaci napětí byl vybrán nízko úbytkový stabilizátor LF50 v pouzdru DPAK. Velmi důležitým parametrem je velikost maximálního dodávaného proudu do zátěže. Z datasheetu k jednotlivým součástkám byly odečteny a do tab. 2.5 sepsány proudové odběry jednotlivých částí, které budou stabilizátorem napájeny. V tab. 2.4 jsou shrnuty základní parametry obvodu LF50 .

Tab. 2.4: Některé vybrané parametry nízko úbytkového stabilizátoru LF50 [13]

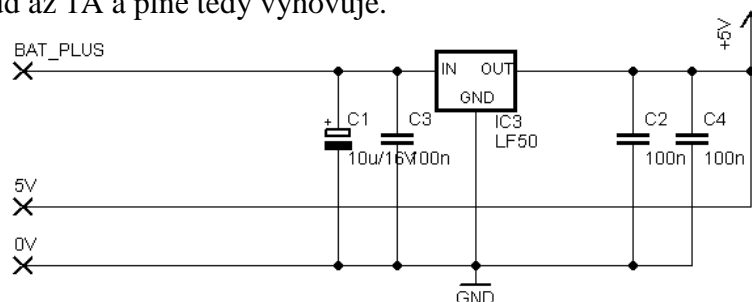
Symbol	Parametr	Min	Typ	Max	Jednotka
$V_O$	Výstupní napětí	4.9	5	5.1	V
$V_I$	Vstupní napětí			16	V
$I_O$	Výstupní proud			1	A
$V_d$	Úbytek na stabilizátoru (při $I_O = 500\text{mA}$ )		0.4	0.7	V
Top	Teplotní rozsah	-40		125	°C

Blokovací kondenzátor C1 v zapojení na obr. 2.8 je tantalový a jeho hodnota je 10uF/16 V. Kondenzátory C2, C3 a C4 jsou v klasickém smd provedení a mají hodnotu 100 nF.

Tab. 2.5: Proudové odběry regulátoru

Zařízení	Proudový odběr [mA]
Mikroprocesor	3,6
Paměť	5
Stabilizátor	12
RC přijímač	30
Standardní servo 4 ks	800
<b>Celkem</b>	<b>850</b>

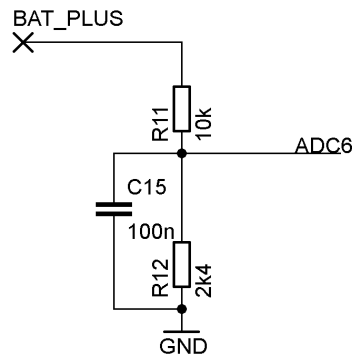
Celkový odebíraný proud je tedy při použití 4 standardních modelářských serv typu HS 422 stanoven přibližně na hodnotu 850mA. Stabilizátor LF50 umožňuje dodávat do zátěže proud až 1A a plně tedy vyhovuje.



Obr. 2.8: Schéma napájecí části

## 2.5 Měření napětí na akumulátoru

Při vybíjení akumulátoru Li-Pol pod určitou mez dochází ke snižování jeho životnosti. Proto mikroprocesor regulátoru měří během provozu napětí akumulátoru s pomocí vestavěného A/D převodníku a při dosažení určité minimální meze napětí provede příslušné opatření. Většinou se jedná o snížení otáček motoru, případně je-li napětí kritické, dojde k omezení otáček úplně. Napájení přijímače je i v tomto případě zachováno.



Obr. 2.9: Měření napětí na akumulátoru

Měřené napětí je nutné nejprve upravit na takovou velikost, kterou je schopen mikroprocesor zpracovat. Na obr. 2.9 je schéma zapojení části, která to zajišťuje. Je tvořena odporovým děličem složeným z rezistorů R11, R12 a blokovacím kondenzátorem C15 100 nF, jehož výstup je připojen na kanál ADC6 A/D převodníku mikroprocesoru. Předpokládejme, že maximální vstupní napětí plně nabitého akumulátoru Li-Pol složeného ze tří článků bude  $U_{in} = 12,6V$  (4.2V/ článek). Aby uvedený dělič co nejméně zatěžoval a nevybíjel zbytečně akumulátor, zvolíme maximální proud děličem  $I_D = 1mA$ . Pak celkový odpor  $R_D$  děliče napětí bude roven:

$$R_D = R11 + R12 = \frac{U_{in}}{I_D} = \frac{12,6}{1 \cdot 10^{-3}} = \underline{12,6k\Omega} \quad (2.8)$$

Referenční hodnotu pro A/D převodník nastavíme s ohledem na co nejlepší využití rozsahu převodníku na 2,5V. Poměr celkového odporu děliče  $R_D$  a rezistoru R12 zvolíme tak, aby při maximálním napětí 12,6V bylo výstupní napětí děliče právě 2,5V. Pak platí:

$$R12 = \frac{2,5}{12,6} \cdot 12,6^3 = \underline{2,5k\Omega} \quad (2.9)$$

a R11 vypočteme

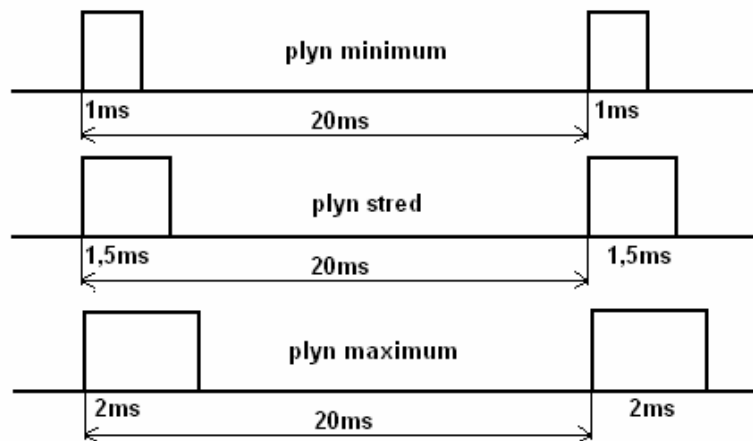
$$R11 = R_D - R12 = 12,6 - 2,5 = \underline{10,1k\Omega}$$

Z řady volíme E24 volíme hodnoty rezistorů  $R11 = 10k$  a  $R12 = 2k4$ .

## 2.6 Vstupní signál pro regulátor

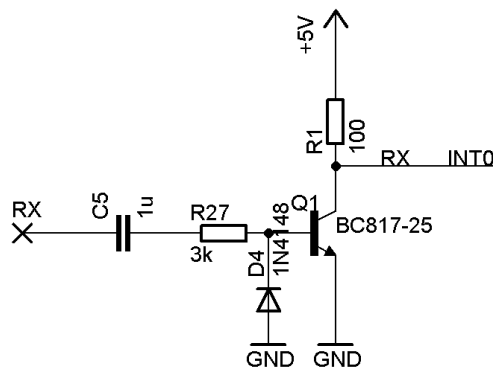
Vstupním signálem, na který regulátor reaguje, je výstupní signál z modelářského přijímače. Jedná se o sérii impulsů s proměnnou šířkou, která závisí na aktuální poloze plynové páky na modelářském vysílači a pohybuje se přibližně v rozmezí 1-2 ms.

Úkolem regulátoru je reagovat na změnu těchto impulsů zvýšením / snížením otáček motoru. Situaci nastiňuje obr. 2.10. Při nastavení páky plynu na vysílači do polohy „plyn minimum“, je délka impulsu na výstupu RC přijímače (vstupu regulátoru) minimální a je rovna přibližně 1 ms. Naopak při maximální možné výchylce plynové páky je délka pulzu maximální, tedy asi 2 ms. Impulsy se opakují s frekvencí 50Hz.



Obr. 2.10: Řídící impulsy regulátoru

Obr. 2.11 ukazuje zapojení vstupní části regulátoru, na něž je přiváděn řídicí signál z výstupu RC přijímače. Signál je přiveden přes tranzistor Q1 na pin mikroprocesoru disponujícím externím přerušením INT0. Rezistor R27 slouží k omezení proudu do báze tranzistoru, který pracuje ve spínacím režimu a jeho hodnotu vypočteme dle vztahu (2.12.) Jedná se o klasický bipolární tranzistor NPN typu BC817 v pouzdře SMD. Hodnotu rezistoru R1 volíme 100Ω. Kondenzátor C5 s diodou D4 oddělují případnou stejnosměrnou složku. Velikost vstupních impulsů je rovna velikosti napájení, tedy 5V.



Obr. 2.11: Vstupní část regulátoru

Z velikosti napětí  $U$  a hodnoty kolektorového odporu  $R_1$  stanovíme s pomocí vztahu (2.10) hodnotu kolektorového proudu  $I_C$ .

$$I_C = \frac{U - U_{CE}}{R_1} = \frac{5 - 0,4}{100} = 46 \cdot 10^{-3} \text{ A} \quad (2.10)$$

Proudový zesilovací činitel odečítáme z datasheetu pro daný tranzistor. Zde  $h_{21E} = 160$ . Pro proud do báze tranzistoru platí vztah:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{46 \cdot 10^{-3}}{160} = 0,288 \cdot 10^{-3} \text{ A} \quad (2.11)$$

Aby byl tranzistor spolehlivě sepnut, tak se v praxi volí proud bází 3 až 5x vyšší. Tedy  $I_B = 5 \cdot 0,288 \cdot 10^{-3} = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ A}$

Známe-li velikost proudu do báze  $I_B$ , pak dle (2.11) vypočteme hodnotu  $R_{27}$ :

$$R_{27} = \frac{U - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,7}{1,44 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{2986 \Omega}} \quad (2.12)$$

Vybíráme hodnotu  $R_{27} = 3 \text{ k}\Omega$

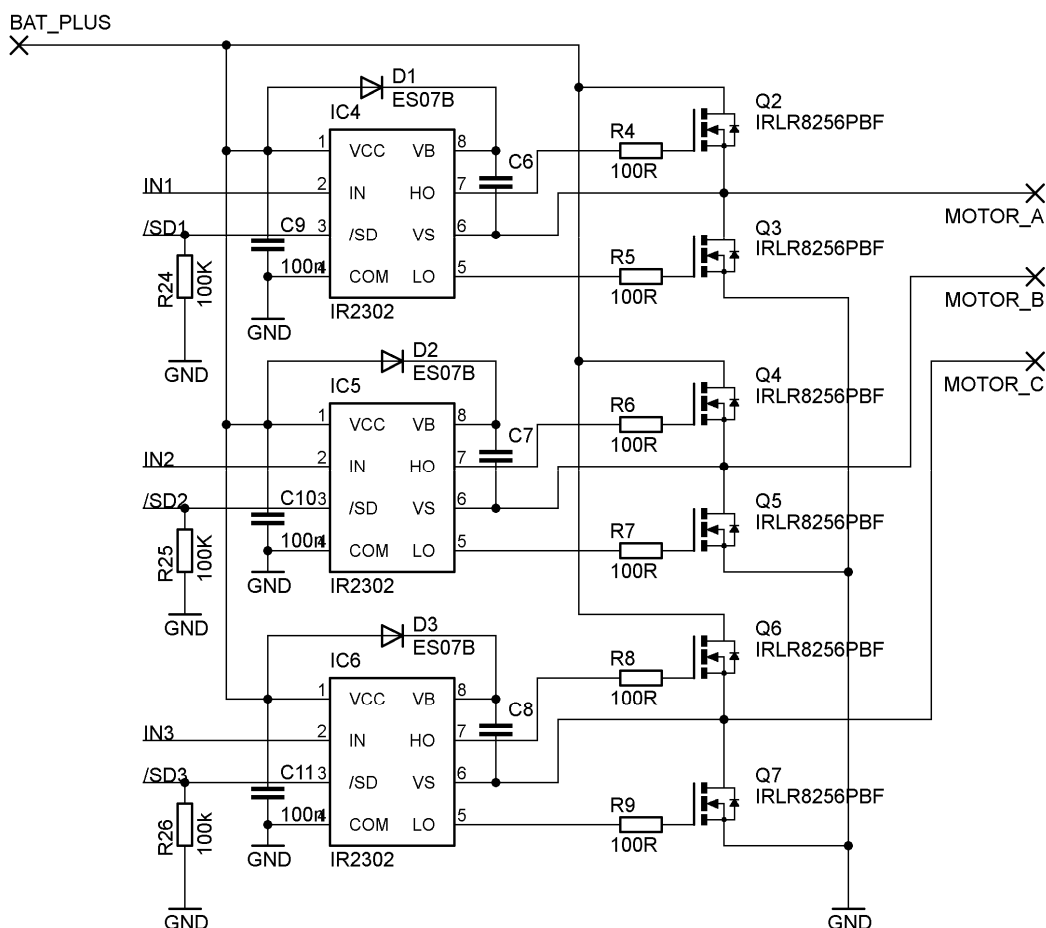
## 2.7 Výkonová část

Je ta část regulátoru, která se stará o dostatečné vybuzení připojeného třífázového modelářského motoru. Je umístěna mezi motorem a řídicím mikroprocesorem. Pomocí pulsně šířkové modulace je ovládán výkonový budič motoru.

Na obr. 2.12 je zapojení výkonové části regulátoru. Pro třífázový motor obsahuje tři dvojice výkonových tranzistorů. Obvykle se zapojení skládá z dvou typů tranzistorů. Jedná se o tranzistory s P-kanálem a N-kanálem. Tranzistory s P-kanálem však dosahují horších parametrů, než tranzistory s kanálem typu N. Z tohoto důvodu je vhodné použít koncepci zapojení skládající se z:

- Výkonových tranzistorů N-MOSFET v můstkovém zapojení
- Půl můstkových budičů (driverů)





Obr. 2.12: Zapojení výkonové části regulátoru

### 2.7.1 Spínací tranzistory MOSFET

Jak již bylo popsáno výše, výkonový budič bude složen z tranzistorů typu N-MOSFET. Na výběr vhodných spínacích tranzistorů byly kladeny následující požadavky:

- Co nejmenší odpor v sepnutém stavu -  $R_{DS(on)}$
- Vysoký proud  $I_D$
- Nízké prahové řídicí napětí
- Malá hodnota  $Q_g$
- Vysoká spínací frekvence

Asi nejdůležitějším kritériem pro výběr vhodného spínacího tranzistoru je jeho velikost odporu v sepnutém stavu  $R_{DS(on)}$ . Jak je známo, maximální výkon ztrácející se na tranzistoru je dán proudem  $I_{max}$  a velikostí odporu tranzistoru v sepnutém stavu mezi elektrodami D-S. Počítáme-li s maximálním zatížením, na něž je regulátor konstruován, dostáváme dle (2.13) velikost výkonu ztrácející se na jednom tranzistoru:

$$P_{max} = R_{DS(on)} \cdot I_{max}^2 \quad (2.13)$$

Čím větší je odpor  $R_{DS(on)}$ , tím větší výkon se na tranzistorech musí ztratit. To může být problém, jelikož při konstrukci regulátoru jsme omezeni jeho co nejmenšími

rozměry a váhou. Případný chladič by tyto parametry nemalým způsobem navyšoval.

Z velkého množství výkonových tranzistorů byl nakonec vybrán typ IRLR8256PBF od firmy International Rectifier, jenž vyniká právě velmi nízkým odporem  $R_{DS(on)}$  v sepnutém stavu. Jeho vybrané parametry jsou shrnuty v tab. 2.6.

Po dosažení do vztahu (2.13) pro proud  $I_{max}$  a typickou hodnotou  $R_{DS(on)}$  z tab. 2.6 dostáváme pro velikost výkonu ztrácející se na tranzistoru:

$$P_{max} = 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 15^2 = \underline{0,95W}$$

Tab. 2.6: Vybrané parametry tranzistoru IRLR8256PBF [14]

Symbol	Parametr	Min	Typ	Max	Jednotka
$V_{DS}$	Napětí D-S			25	V
$R_{DS(on)}$	Odpor v sepnutém stavu (při $V_{GS} = 10V$ )		4.2	5.7	m $\Omega$
$I_D$	Maximální proud (při $V_{GS} = 10V, T = 25^\circ C$ )			81	A
Pouzdro: DPAK					

## 2.7.2 Půl můstkový budič IR2302

Jednotlivé tranzistory v zapojení na obr. 2.12 jsou spínány svými budiči, které zajišťují dostatečné zesílení přicházejících signálů a starají se o správné spínání horních i dolních tranzistorů. Jako vhodný budič byl vybrán obvod IR2302 od firmy International Rectifier.

IR2302 je vysokonapěťový, velmi rychlý půl můstkový budič výkonových tranzistorů MOSFET s kanálem typu N. Jeho vstupy jsou kompatibilní se standardními CMOS a TTL logikou. Některé významné parametry tohoto obvodu jsou následující [15]:

- napájecí napětí  $V_{CC}$  až 25 V
- doba sepnutí  $t_r$  typ. 130ns
- doba rozepnutí  $t_f$  typ. 50ns
- doba zpoždění sepnutí budiče  $t_{on}$  typ. 750ns
- doba zpoždění vypnutí budiče  $t_{off}$  typ. 200ns

Aby bylo možné sepnout horní tranzistory v můstku, které nejsou připojeny na pevný potenciál, je nutné vytvořit dostatečný offset. Tuto funkci zastává právě tento obvod s pomocí externě připojené diody a kondenzátoru. Jako vhodná dioda byla vybrána součástka nesoucí označení ES07B.

Význam jednotlivých vývodů shrnuje tab. 2.7. Výstupy budičů HO a LO jsou přes rezistory R4 až R9 připojeny k řídicím elektrodám G všech výkonových tranzistorů. Aby došlo ke spolehlivému sepnutí, je nutné přivést na řídicí elektrodu dostatečné napětí. Obecně platí, že pro tranzistor v sepnutém stavu musí být napětí  $U_{GS} > U_{GS(th)}$  (th. threshold voltage - prahové napětí). U běžných nízkonapěťových MOSFET tranzistorů se  $U_{GS(th)}$  pohybuje okolo 4V [14]. Aby byla předchozí podmínka splněna, je nutné zvolit hodnotu odporu  $R_G$  dostatečně malou. Hodnoty rezistorů R4 až R9 tedy volíme o velikosti 100Ω

Ke vstupům /SD všech tří budičů jsou připojeny rezistory R24 až R26 o hodnotě 100Ωk. Touto metodou je zajištěno, že se na zmiňovaných vstupech neobjeví nežádoucí impulsy, které by v době nabíhání mikroprocesoru mohly způsobit nechtěné sepnutí jednoho z dvojice tranzistorů.

Tab. 2.7: Význam jednotlivých vývodů obvodu IR2302 [15]

Symbol	Význam
IN	Logický vstup (1 nebo 0), vybere výstup HO nebo LO
/SD	Vstup pro PWM, řízení spínání jednotlivých tranzistorů
$V_B$	Část napájení
HO	Výstup HO
$V_S$	Zpětná vazba
$V_{CC}$	Napájení
LO	Výstup LO
COM	Zem

## 2.8 Připojení externí EEPROM

Pro uchování změřených hodnot napětí a odebíraného proudu disponuje zapojení paměti, do níž jsou během provozu změřená data ukládána. Jedná se o polovodičovou paměť typu EEPROM, tudíž v ní zůstávají data zachována i po odpojení napájecího napětí.

Vybrána byla sériová paměť 24LC512 od firmy Microchip, která komunikuje přes sběrnici I2C. Má velikost 512Kb pro ukládaná data. Bude-li docházet k ukládání dvou hodnot (jedna napětí a jedna proud) vždy v intervalu po 1s, pak pro hodinový provoz je velikost uložených dat rovna:

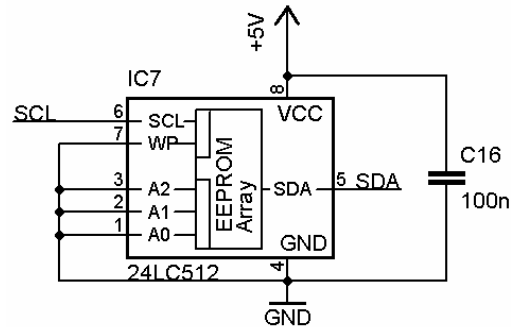
$$3600s * 2B * 2 = 14400 \text{ bytů } (< 15kB)$$

Do vybrané paměti o velikosti 512kB lze tedy uložit až:

$$512 / 15 = 34 \text{ hodin záznamu, což je naprosto dostačující hodnota.}$$

Na obr. 2.13 je zakresleno její propojení s mikroprocesorem. Vstup SCL (hodiny) jsou připojeny ke vstupu SCL mikroprocesoru a obdobě datový vstup SDA paměti ke

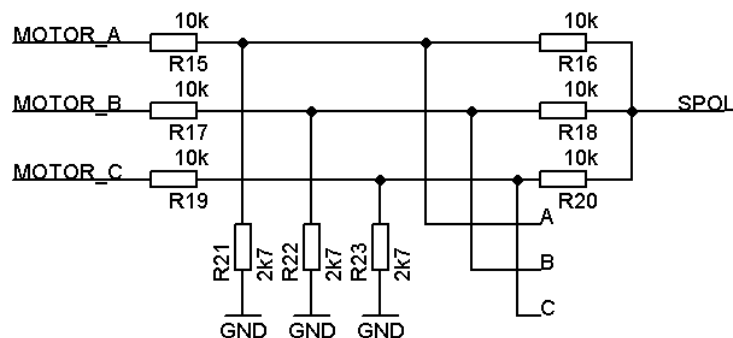
vstupu SDA na procesoru. Adresové vstupy A0 až A2 se používají pro odlišení stejných typů zařízení na sběrnici I2C a je možné pomocí nich rozšířit adresu zařízení. Jelikož zapojení obsahuje pouze jednu paměť, jsou tyto vstupy připojeny na zem. Adresa zařízení, na které MASTER (mikroprocesor) odesílá a přijímá z ní data je tak dána výrobním procesem a je vypálena uvnitř součástky. Kondenzátor C16 slouží pouze jako blokovácí kapacita napájení a je standardní hodnoty 100nF/keramický. Paměť je napájena ze stabilizátoru 5V.



Obr. 2.13: Propojení polovodičové EEPROM s mikroprocesorem

## 2.9 Vstupní obvod pro úpravu velikosti „EMF“

Jak již bylo popsáno v kapitole 1.4.5, pro zjišťování správného okamžiku, kdy má být provedena komutace, je snímáno na plovoucí cívice indukované napětí, tzv. „EMF“. Toto napětí je přiváděno k A/D převodníku mikroprocesoru. Aby bylo možné jej mikroprocesorem zpracovávat, je nutné jeho hodnotu upravit na požadovanou úroveň. To zajišťuje zapojení na obr. 2.14.



Obr. 2.14: Úprava velikosti „EMF“ pro mikroprocesor

Po bližším prozkoumání předchozího zapojení zjistíme, že se nejedná o nic jiného než klasický odporový dělič napětí. Jelikož jsou snímána tři napětí, obsahuje zapojení tři totožné děliče tvořené rezistory R15, R17, R19, R21, R22 a R23. Vstupy děličů jsou připojeny ke 3 fázím motoru MOTOR\_A až MOTOR\_C. Výstupy pak k jednotlivým kanálům A/D převodníku. Použijeme-li pro převod interní referenci 2,56V je nutné, aby na daném vstupu převodníku nebyla vyšší hodnota napětí, než je právě referenční. Z této podmínky určíme hodnoty odporů v děliči. Celkový odpor obou rezistorů R15 a

R21 v děliči je roven:

$$R_D = R15 + R21 = \frac{U_{in}}{I_D} \quad (2.14)$$

Zvolíme-li proud děličem  $I_D = 1\text{mA}$  a  $R15 = 10\text{k}\Omega$ , pak při vstupním napětí  $U_{in} = 12,6\text{V}$  vyjádříme ze vztahu (2.14) hodnotu R21 jako:

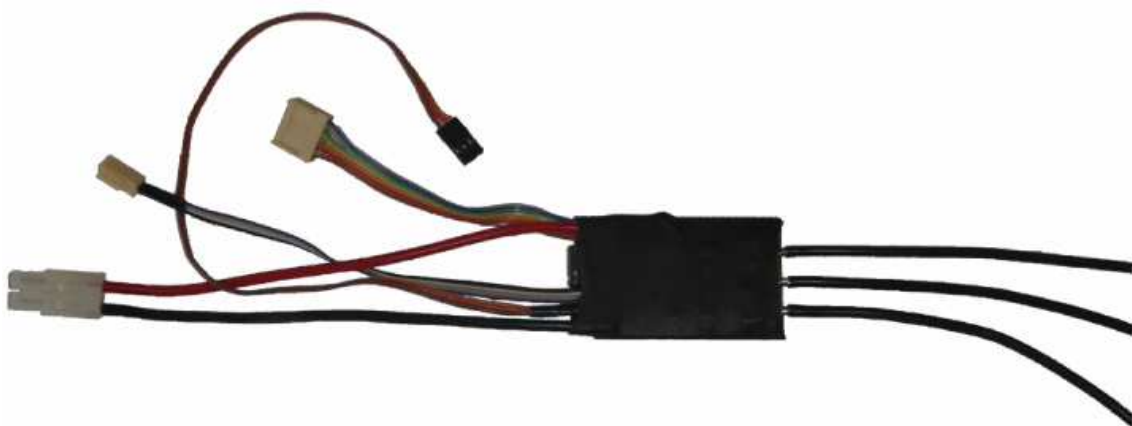
$$R21 = \frac{U_{in}}{I_D} - R15 = \frac{12,6}{1 \cdot 10^{-3}} - 10 \cdot 10^3 = \underline{\underline{2,6\text{k}\Omega}}$$

Z řady E24 vybíráme hodnoty  $10\text{k}\Omega$  a  $2,7\text{k}\Omega$

## 2.10 Realizace regulátoru

Regulátor je postaven na oboustranné desce plošných spojů o rozměrech  $55 * 35\text{mm}$ . Výsledná deska je vytvořena metodou spojitých čar a její motivy jsou včetně osazovacích výkresů umístěny v příloze B.

Při návrhu desky bylo nutné začít bočníkem pro proudový senzor, jehož rozměry jsou popsány v kapitole 2.3. Výkonové spoje, jimiž poteče do zátěže proud, byly navrženy dostatečnou šířkou, aby vydržely daný maximální proud až  $15\text{A}$ . Tomu jsou přizpůsobeny i prokovené otvory, které jsou na již zmiňovaných výkonových cestách tvořeny dráty o průměru  $1\text{mm}$  a pro jistotu jsou zdvojeny. Regulátor je z důvodu co nejmenší konstrukce osazen součástkami v pouzdrech smd. Ke svorkám  $5\text{V}$  a  $0\text{V}$  je připájen elektrolitický kondenzátor s malým ESR o hodnotě  $100\mu\text{F}/25\text{V}$ . Na obr. 2.15 je vidět kompletně sestavený regulátor připravený k programování.



Obr. 2.15: Pohled na realizovaný regulátor

## 3 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ

### 3.1 Řídící software pro regulátor

Program pro mikroprocesor regulátoru byl napsán v jazyce C. Jako vývojové prostředí bylo zvoleno AVR studio verze 4. Jedná se o komerčně dostupný, volně šiřitelný nástroj obsahující textový editor se zvýrazněním syntaxe, debugovací nástroj a jednoduchý simulátor.

Vlastní program regulátoru je pro jednoduchost a větší přehlednost rozdělen do několika modulů, jejichž popis je shrnut v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Jednotlivé moduly programu regulátoru

Modul	Funkce modulu
<i>regulator.c</i>	hlavní program, obsahuje stěžejní funkce pro řízení chodu motoru
<i>regulator.h</i>	hlavičky funkcí pro <i>regulator.c</i> , definice konstant, makra
<i>commutation.c</i>	obsahuje funkce pro rozběh motoru a provádění komutací
<i>commutation.h</i>	hlavičky pro <i>commutation.c</i> , konstanty, makra
<i>memcontroller.c</i>	funkce pro ukládání a čtení dat z paměti EEPROM
<i>memcontroller.h</i>	hlavičky pro funkce v <i>memcontroller.c</i>
<i>twi_lib.c</i> [8]	funkce pro komunikaci přes twi
<i>twi_lib.h</i> [8]	hlavičky pro funkce v <i>twi_lib.c</i>

Řídící jednotkou regulátoru je mikrokontrolér ATmega8, který se stará o komutaci jednotlivých vinutí motoru a zajištění dalších podružných funkcí. Je vybaven celou řadou periférií, kterých je s výhodou využito pro jednotlivé úkoly. V následujícím seznamu jsou sepsány ty periferie, které byly při vývoji softwaru pro regulátor využity včetně krátkého popisu jejich funkce.

- Timer/Counter0 – časování funkcí v programu – např. měření délky řídicích impulsů, určení časových intervalů
- Timer/Counter1, Timer/Counter2 – generování PWM pro spínání tranzistorů
- INT0 (externí přerušení) – společně s Timer/Counter0 pro měření délky impulsů
- ADC (analogově digitální převodník) – měření napětí, proudu
- USART – komunikace s PC (pro posílání změřených dat do PC)
- IWI (I2C) – sběrnice pro komunikaci mezi ATmega8 a externí EEPROM

V následujícím seznamu je uveden výčet některých důležitých funkcí, které regulátor využívá. Pro větší přehlednost jsou funkce rozděleny tak, jak jsou uloženy v jednotlivých modulech.

### **Modul regulator.c**

- *main ( )* – výchozí funkce programu. Nemá vstupní ani návratovou hodnotu. Po prvotní inicializaci periférií v ní dojde k zacyklení v nekonečné smyčce, ze které je volána funkce pro nastavování rychlosti motoru *set\_speed( )*.
- *PORT\_Init ( )* – inicializace vstupně/výstupních portů.
- *TIMERO\_Init ( )* – inicializace časovače0.
- *INTERRUPTS\_Init ( )* – inicializace přerušení
- *ADC\_Init ( )* – inicializace AD převodníku
- *USART\_Init ( )* – inicializace jednotky USART
- *memcontroller\_init ( )* – inicializace paměti EEPROM
- *motor\_start ( )* – funkce sloužící k počátečnímu roztočení motoru
- *set\_speed ( )* – stěžejní funkce celého programu, nastavuje rychlost otáčení motoru

### **Modul commutation.c**

- *Set\_start\_state ( )* – funkce sloužící k nastavení rotoru motoru do počáteční známe pozice
- *start\_sequence ( )* – startovací sekvence
- *Run\_ON ( )* – zajišťuje vlastní komutace vinutí motoru

### **Modul memcontroller.c**

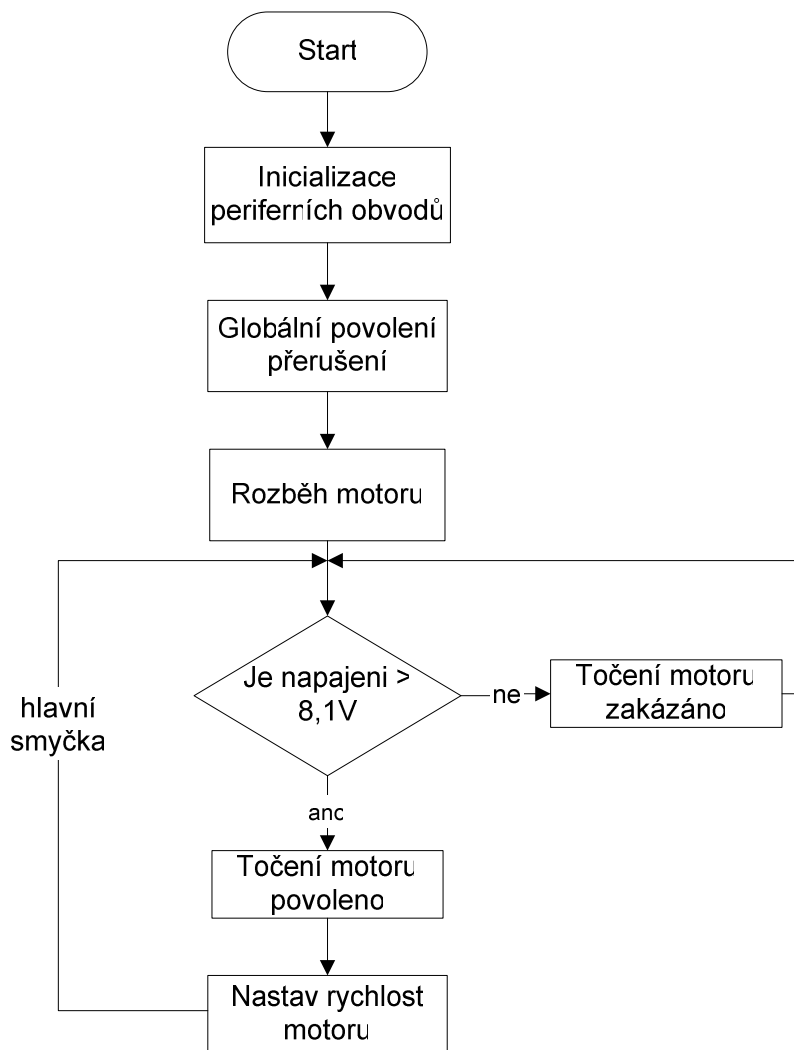
- *memcontroller\_writei ( )* – uloží změřená data do EEPROM
- *memcontroller\_readi ( )* – přečte data z EEPROM
- *find\_end( )* – najde poslední záznam v paměti
- *memcontroller\_getCount( )* – vrací počet prvků zapsaných v paměti

## **3.1.1 Běh hlavního programu**

Jádro programu je uloženo v modulu regulator.c, k němuž přísluší regulator.h. Po připojení napájecího napětí je automaticky spuštěna výchozí funkce *main ( )* a běh programu pokračuje tak, jak je naznačeno ve vývojovém diagramu na obr. 3.1.

Nejprve jsou inicializovány jednotlivé použité periferie. Proveďte se nastavení I/O portů, povolí se přerušení, čítač/časovač0, inicializuje se A/D převodník, USART a paměť EEPROM pro ukládání změřených dat. Zavolá se funkce *motor\_start ( )*, která zajistí počáteční roztočení motoru. Následuje odskok do hlavní smyčky programu, kde dojde k zacyklení.

V každém průchodu hlavní smyčkou se testuje, zda je hodnota připojeného napájecího napětí větší než 8,1 V (dáno podmínkou minimálního napětí jednoho článku akumulátoru Li-pol –  $2,7 \text{ V/čl} * 3\text{čl} = 8,1 \text{ V}$ ). V kladném případě se povolí točení motoru a zavolá se funkce *set\_speed* ( ) pro nastavování rychlosti otáčení. Není-li daná podmínka splněna, je naopak točení motoru zakázáno a testuje se dál. V případě, že během provozu regulátoru poklesne napájecí napětí pod uvedenou hodnotu, dojde automaticky k zakázání běhu motoru. Tímto způsobem je ošetřeno, aby nedocházelo k vybíjení Li-pol akumulátoru pod hodnotu 8,1V (2,7V/čl).



Obr. 3.1: Vývojový diagram běhu hlavního programu

### 3.1.2 Vyhodnocování řídicích impulsů z přijímače

Z kapitoly 2.6 je patrné, že regulátor reaguje na vnější impulzy z modelářského přijímače. Ty jsou přiváděny přes vstupní obvod na obr. 2.11 k pinu mikroprocesoru INT0, disponujícím funkcí externího přerušení. Po příchodu náběžné, nebo sestupné hrany impulsu je vygenerováno přerušení *ISR* (*INT0\_vect*). Nyní se testuje, zda se jedná o náběžnou nebo sestupnou hranu. V případě, že jde o první případ, dojde k vynulování čítacího registru *TCNT0*. Program vyskočí z obsluhy přerušení a pokračuje v běhu tam,



kde skončil před skokem do obslužné rutiny. Perioda přetečení časovače0 je nastavena při frekvenci interního oscilátoru 8MHz na přibližně 8ms. Po uplynutí impulsu dojde opět k vyvolání přerušení, tentokrát však z důvodu příchodu sestupné hrany. Předchozí podmínka již neplatí a do proměnné *imp\_length* se uloží hodnota z registru TCNT0, která je přímo úměrná délce trvání řídicího impulsu. Může dojít k situaci, že při nastavení plynové páky na vysílači v určité poloze dochází při vyhodnocování impulsu k přeskokům mezi dvěma hodnotami. Z tohoto důvodu bylo zavedeno průměrování. Tak je vždy změřeno 10 hodnot, ze kterých je následně vypočten aritmetický průměr.

```
ISR ( INT0_vect )
{
#ifdef USE_AVERAGE_IMP_LENGTH //zapne průměrování imp_length
    static int buf[10];
    static unsigned int buf_id = 0;
    static unsigned int buf_size = ARRAY_SIZE(buf);
#endif

    if((PIND & 0b00000100) != 0) { //pokud log. 1 (přišla náběžná
                                    hrana) - vynuluj časovač
        TCNT0 = 0;
    }
    else {
#ifdef USE_AVERAGE_IMP_LENGTH
        if(buf_id >= buf_size) {
            int sum = 0;

            int i;
            for(i=0; i<buf_size; i++) {
                sum += buf[i];
            }
            imp_length = sum / buf_size; //počítá průměr imp_length
            buf_id = 0;
        }
        buf[buf_id++] = TCNT0;
#else
        imp_length = TCNT0; //pokud log.0 - ulož do imp_length
                            obsah časovače
#endif
    }
}
```

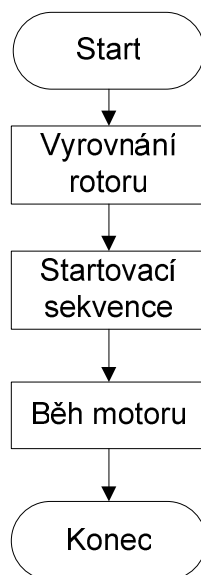
### 3.1.3 Rozběh motoru

Po připojení napájení je nutné nejprve motor roztočit do určitých minimálních otáček. To zajišťuje funkce *motor\_start* (). Nastartování motoru probíhá v několika krocích. Celý proces vystihuje vývojový diagram na obr. 3.2.

- 1) **Vyrovnaní rotoru** – rotor motoru je nastaven do počáteční známé pozice. Další stavy komutace se odvíjí od této pozice.
- 2) **Provedení startovací sekvence** – je provedeno několik prvních komutací dle startovací sekvence. V podstatě se jedná o pole hodnot komutačních časů, které se postupně snižují. Výsledkem je spolehlivé roztočení motoru do požadovaných minimálních otáček

### 3) **Běh motoru** – motor plynule přechází ze startovací sekvence v automatickou komutaci

Hodnoty časů ve startovací tabulce byly určeny experimentálně tak, aby po opuštění stavu, kdy se komutace provádějí podle startovací sekvence, byl motor roztočený a systém mohl přejít v automatickou komutaci. Start motoru musí být pozvolný, jinak by hrozilo jeho zablokování.



Obr. 3.2: Princip rozběhu motoru

#### 3.1.4 Regulace otáček

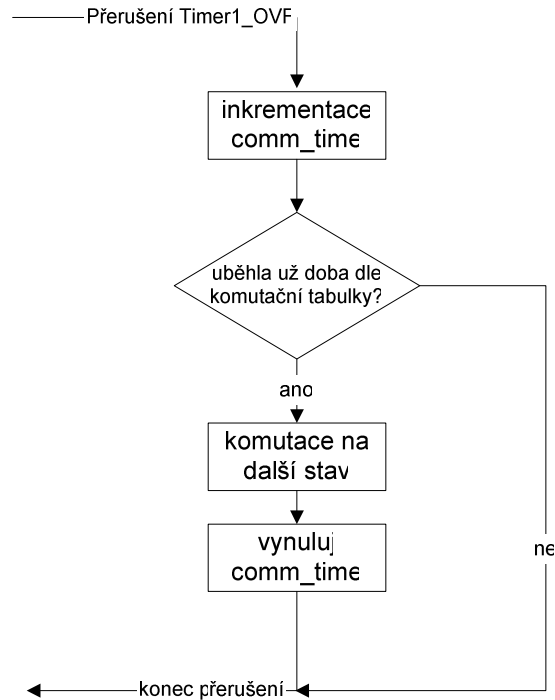
V kapitole 1.4.5 byla v teoretické rovině rozebrána metoda řízení BLDC motorů bez použití přídavných senzorů polohy rotoru. Ta spočívá v měření naindukovaného napětí v plovoucí cívce motoru, které s sebou nese informaci a poloze rotoru. Použití výše uvedené metody je pro danou situaci optimální.

Aplikací zmiňované metody však došlo k jistým komplikacím. Měřením bylo zjištěno, že dochází k značnému ovlivňování měřených signálů výrazným šumem. To znemožňovalo v zašuměném signálu určit přesně průchody indukovaných napětí v plovoucí cívce nulovou úrovní, od kterých se odvozují okamžiky komutace. Tím pádem nedocházelo ke zcela optimální komutaci pracovních vinutí. Motor měl poněkud nepravidelný chod a řízení bylo obtížné. Příčiny tohoto problému nejsou zřejmé. Může se jednat o špatně navrženou DPS (nebyla použita monolitická zem – zemnicí polygon), případně nedostatečné blokování u výkonových spínačů. Možnou metodou, která by mohla problém vyřešit, je použití některé z metod číslicové filtrace signálu.

Na základě těchto problémů bylo nakonec přistoupeno k současnému stavu řešení. Princip spočívá v sestavení komutační tabulky, která obsahuje vektory jednotlivých časů komutací. Ty jsou rozděleny rovnoměrně v celém intervalu od minimálních otáček (nejdelší čas komutací) po maximální otáčky (nejkratší časy). V závislosti na vyhodnocení údaje o délce řídicího impulsu (viz. kapitola 2.6) je pak pro danou rychlost nastaven komutační čas z tabulky.

Samotná metoda regulace otáček pracuje následujícím způsobem. Využívá se

k tomu přerušení při přetečení časovače1 a časovače2. To nastává při použití 32kHz PWM přibližně každých 32μs. Při každém skoku do přerušení se inkrementuje proměnná *comm\_time*, jejíž hodnota se porovnává s hodnotou z komutační tabulky pro danou nastavenou rychlost motoru. Jakmile dojde ke shodě (uplynula doba do další komutace), provede se samotná komutace a *comm\_time* se vynuluje. Situace je nastíněna ve vývojovém diagramu na obr. 3.3.



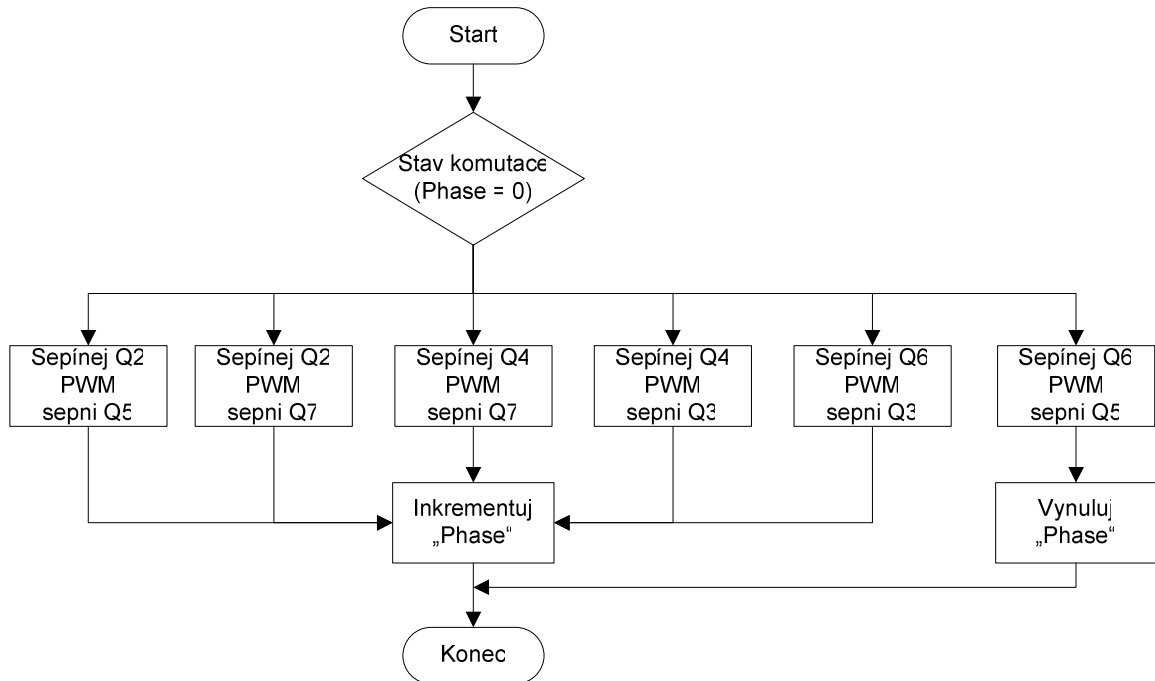
Obr. 3.3: Princip komutace dle komutační tabulky

O samotnou komutaci pracovních vinutí motoru se stará funkce *Run\_ON* ( ). Z teoretické části byla zvolena metoda, kdy je vždy horní tranzistor v můstkovém zapojení spínán v rytmu generované PWM frekvence a spodní tranzistor je během jednoho komutačního kroku sepnut trvale. Označíme-li nyní stavy, kdy jsou spínány horní tranzistory jako *Q2PWM\_ON*, *Q4PWM\_ON*, *Q6PWM\_ON* a spodní tranzistory jako *Q2\_ON*, *Q4\_ON* a *Q6\_ON*, pak pro provedení jedné otáčky (v případě použití dvoupólového motoru) je nutné provést komutaci do všech šesti jednotlivých stavů dle tab. 3.2. Značení tranzistorů koresponduje s uvedeným zapojením v příloze A.

Tab. 3.2: Komutace do jednotlivých stavů

Stav komutace	Sepnuty tranzistory
0	<i>Q2PWM_ON</i> , <i>Q5_ON</i>
1	<i>Q2PWM_ON</i> , <i>Q7_ON</i>
2	<i>Q4PWM_ON</i> , <i>Q7_ON</i>
3	<i>Q4PWM_ON</i> , <i>Q3_ON</i>
4	<i>Q6PWM_ON</i> , <i>Q3_ON</i>
5	<i>Q6PWM_ON</i> , <i>Q5_ON</i>

Běh programu uvnitř těla funkce je znázorněn ve vývojovém diagramu na obr. 3.4. Nejprve je definována proměnná *Phase*, a je do ní uložena počáteční hodnota 0. Následuje větvení programu a podle hodnoty *Phase* je provedeno příslušné sepnutí tranzistorů podle tab. 3.2. Poté je v případě stavů 0-4 proměnná inkrementována. V posledním případě je vynulována. Takto je proveden jeden komutační cyklus do všech šesti stavů, který se neustále opakuje.



Obr. 3.4: Vývojový diagram větvení programu uvnitř těla funkce *Run\_ON*

### 3.1.5 Generování PWM

K řízení motoru se používá změna napájecího napětí pomocí PWM modulace. Ke generování PWM je využito dvou časovačů mikrokontroléru ATmega8. Konkrétně se jedná o 16 bitový Timer/Counter1 disponující dvěma kanály a 8 bitový Timer/Counter2. Celkem jsou tedy k dispozici tři PWM kanály.

Frekvenci generovaného signálu Timer/Counter1 je možné vypočítat pomocí vztahu 3.1 [10]. Zde máme možnost nastavit maximální hodnotu čítání TOP a zvolený MODE pomocí bitů WG10 - WG13 v registrech TCCR1A a TCCR1B. Podle [10] byl vybrán MODE 5 - 8 bitů, FAST PWM. Pro zvolenou  $f = 32\text{kHz}$  musíme ještě nastavit předděličku interních hodin na hodnotu 1 (bit CS10 registru TCCRB na hodnotu 1).

$$f_{OCnxPWM} = \frac{f_{clk\_1/O}}{N \cdot (1 + TOP)} = \frac{8 \cdot 10^6}{1 \cdot (1 + 255)} = \underline{\underline{31,250\text{kHz}}} \quad (3.1)$$

Nastavení 8 bitového č/č2 je obdobné jako v předchozím případě. Zde ovšem není možnost výběru rozlišení, ani maximální hodnoty čítání TOP. Je pevně dána a má hodnotu 255. Generovanou frekvenci opět nastavujeme na  $f = 32\text{kHz}$ .

### 3.1.6 Zápís a čtení z EEPROM

Během provozu regulátoru dochází v pravidelných intervalech 1s k ukládání změřených hodnot napájecího napětí a odebíraného proudu do paměti EEPROM. Funkce sloužící pro ukládání a čtení změřených dat jsou obsaženy v modulu *memcontroller.c* a k němu příslušejícímu *memcontroller.h*. Pro zápis slouží *memcontroller\_writei( )* a analogicky pro čtení byla vytvořena funkce nesoucí název *memcontroller\_readi( )*. Obě funkce pro svůj běh využívají knihoven definujících komunikaci na sběrnici TWI (I2C) *twi\_lib.c* a *twi\_lib.h*, které byly staženy z [8].

Zápis je prováděn v obsluze přerušení *ISR (ADC\_vect)* při dokončení převodu hodnoty A/D převodníkem. Po převodu reálné hodnoty napětí (respektive proudu) na její číslíkový obraz je daná hodnota uložena do paměti pomocí funkce *memcontroller\_writei( )* jako datový typ *int*. Zpracování a následný přepočítání na reálnou hodnotu je pak již úkolem programu RegulátorPC pro zobrazování naměřených dat v PC (viz. kapitola 3.2).

Čtení probíhá pomocí funkce *memcontroller\_readi( )*. Ta je volána v přerušení při přijetí znaku přes USART po provedení testovací podmínky, zda byl přijat znak „V“. V kladném případě se provede vyčtení uložených hodnot z paměti a následné odeslání dat přes USART do PC.

#### Organizační struktura paměti.

Data se do paměti EEPROM ukládají s využitím stránkového zápisu. Organizace paměti je naznačena na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Organizační struktura paměti

Paměť je složena z tak zvaných stránek, přičemž na každou z těchto stránek se vejde celkem 128 bytů dat. Jelikož se velikost zapisovaného záznamu pohybuje v rozmezí 0 – 1024, je nutné jej vždy uložit v podobě 2 bytů. Na jednu stránku paměti se tak vleze celkem 64 záznamů. Jako první je vždy uložena hodnota napětí následující proudem a nakonec je uložen ukončovací znak 0xFF, aby bylo možné při čtení určit poslední záznam. Pak je ukazatel posunut o 2 byty doleva. Ukončovací znak je přepsán hodnotou napětí následující proudem a nakonec je zapsán ukončovací znak nový. Takto se pokračuje až do naplnění jedné stránky. Zápis na novou stránku musí být vždy uvozen adresou následující stránky.

### 3.1.7 Využití USART pro komunikaci s PC

Jedním z bodů zadání práce byl požadavek na komunikaci mezi regulátorem a PC z důvodu odesílání změřených hodnot napětí a proudů do PC. K tomuto účelu se přímo nabízí jednotka USART, kterou mikrokontroler ATmega8 disponuje.

USART (Univerzal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter) je obvod schopný obousměrné komunikace rychlostmi jednotek až desítek kbaud. Umožňuje jak synchronní, tak asynchronní přenos s možností nastavení 5 - 9 datových bitů, nastavení počtu stop-bitů a parity. Umožňuje samozřejmě také multiprocesorovou komunikaci. [6]

Před použitím jednotky USART je nejprve nutné určit některé parametry komunikace, neboli provést inicializaci. K tomu slouží funkce *USART\_Init* (*unsigned int baud*). Jako první je nastavena přenosová rychlost. To se provede zapsáním hodnoty vypočtené dle vztahu 3.2 do párového registru UBRRH a UBRRL. Pro asynchronní přenos a zvolenou rychlost  $BAUD = 57600$  baud dle [10] platí:

$$UBRR = \frac{f_{osc}}{16 \cdot BAUD} - 1 = \frac{8 \cdot 10^6}{16 \cdot 57600} - 1 = 8 \quad (3.2)$$

Dalším krokem je nastavení počtu datových bitů, stop bitů a případné parity. Zde bylo vybráno 8 datových bitů, 1 stop bit a žádná parita. Do registru UCSRC tak zapíšeme hodnotu:

```
UCSRC=(1<<URSEL) | (3<<UCSZ0);
```

Nakonec v registru USCRB povolíme příjem i vysílání zapsáním bitů RXEN a TXEN do hodnoty 1.

```
USCRB=(1<<RXEN) | (1<<TXEN);
```

Tímto je jednotka USART připravena ke komunikaci. Odvysílání dat je prováděno vložením znaku do vysílacího datového registru (bufferu). To zajišťuje funkce *USART\_Send*( ). Obdobně pro příjem dat přes USART je k dispozici funkce *USART\_Receive*( ). Ta vrací hodnotu přijímacího bufferu. Obě funkce byly převzaty z [10]. Celý zdrojový kód vypadá následovně:

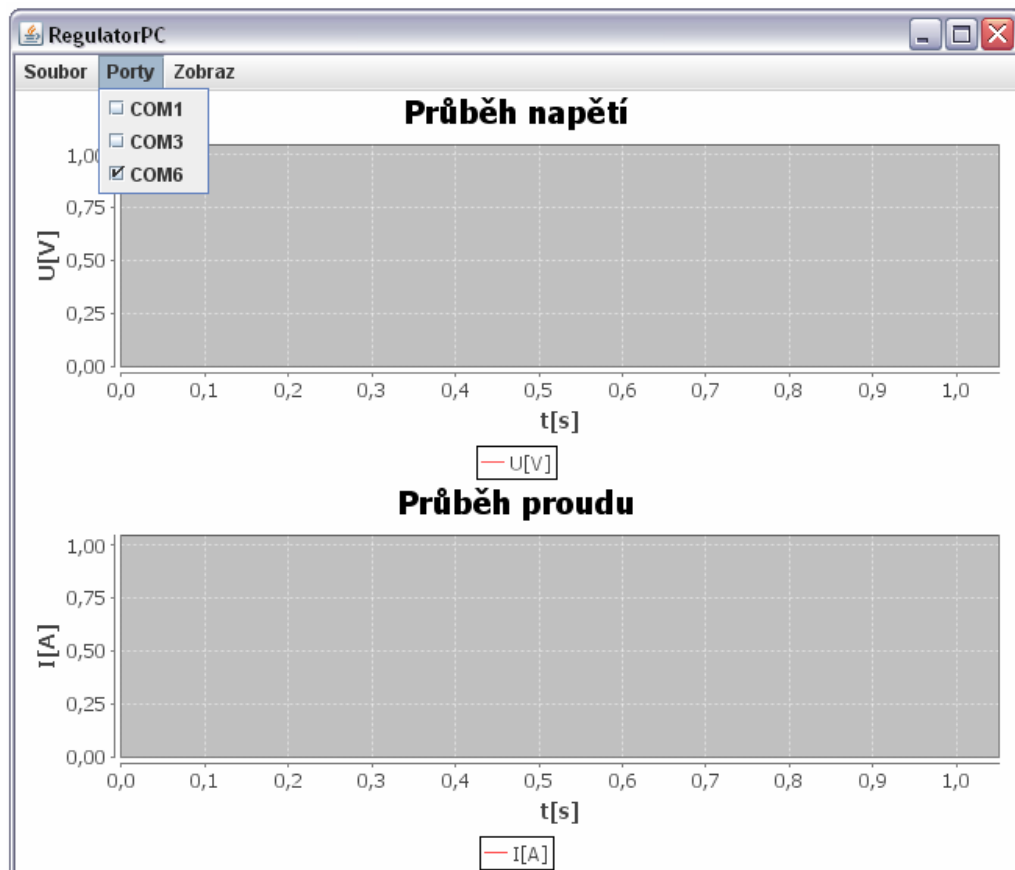
```
void USART_Send(unsigned char znak) //funkce pro odvysílání znaku
                                   přes USART
{
    while(!(UCSRA & (1<<UDRE))) //čeká na vyprázdnění bufferu
    {
    }
    UDR=znak; //vloží do bufferu znak
}
char USART_Receive() //funkce pro příjem znaku přes USART
{
    while(!(UCSRA & (1<<RXC))) // čeká na nastavení RXC do 1 -
                               příjem kompletní
    {
    }
    return UDR; //vrací znak z bufferu
}
```

## 3.2 Software pro PC

Jedním z bodů zadání bylo vytvořit obslužný program do PC, pomocí něhož je možné zobrazit nasbíraná data o odebíraném proudu a napájecím napětí. Uživatel připojí regulátor pomocí převodníku RS232->USB k PC a může načíst uložená data, která je možno vykreslit do grafů.

Program RegulatorPC byl napsán v jazyce Java ve vývojovém prostředí ECLIPSE. Díky této skutečnosti bylo docíleno takzvané multiplatformosti aplikace, tzn. že je možné jej provozovat s menšími úpravami na všech hlavních operačních systémech (Windows, Linux, OSX). Program využívá ke komunikaci s mikroprocesorem regulátoru volně dostupnou knihovnu pro práci se sériovým portem RxTx [17] a pro vykreslování grafů opensource knihovnu jfreechart [18].

Po otevření aplikace se zobrazí okno, jehož vzhled je vidět na obr. 3.6. V jeho levém horním rohu je možno vybírat z nabídky *Soubor*, *Porty*, *Zobraz*. Při startu programu se automaticky skenují všechny použité COM porty. Následně si uživatel zvolí COM port, na kterém je připojen regulátor, v našem případě COM6. Výběr příslušného portu je indikován jeho zaškrtnutím.



Obr. 3.6: Aplikace RegulatorPC

Pokud v době spuštění programu nebyl regulátor připojen k PC přes USB, nezobrazí se tento port v seznamu dostupných. V tomto případě je nutné v menu *Soubor* kliknout na

*Proskenuj porty* tak jak je naznačeno na obr. 3.7., které znovu provede skenování možných portů.



Obr. 3.7: Skenování dostupných COM portů

Kliknutím v menu na položku *Zobraz -> Vykresli grafy* uživatel vyšle do regulátoru příkaz, že chce načíst naměřená data, která jsou uložena v paměti, obr. 3.8.



Obr. 3.8: Načtení dat z paměti a vykreslení grafů

V případě, že nebyl uživatelem v předchozím kroku vybrán žádný z dostupných COM portů, program vypíše chybovou hlášku „Nejprve musíte vybrat port“, viz obr. 3.9. Hlášku potvrdíme, provedeme opětovný výběr a akci zopakujeme.



Obr. 3.9: Chybová hláška zobrazující se když uživatel nevybere žádný port

Je-li po kliknutí na *Zobraz -> Vykresli grafy* akce úspěšná, program načte data z paměti regulátoru a uložené hodnoty přepočítá na reálné napětí dle vztahu 3.3. respektive proudu dle vztahu 3.4.

$$realVoltage = \frac{voltage \cdot 2,56}{1024} \cdot 5,21, \quad (3.3)$$

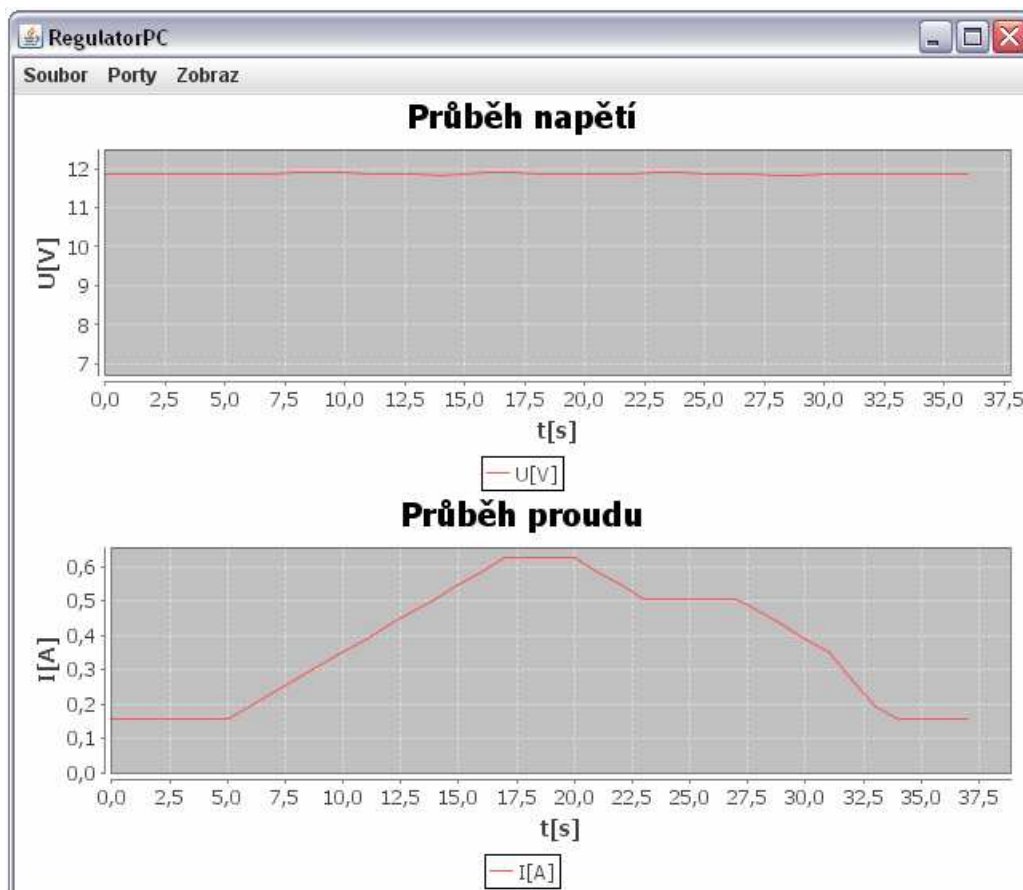
kde označení *voltage* je hodnota uložená v proměnné *gNapětí* po převodu. Napěťovou referenci reprezentuje číslo 2,56 a 1024 je počet hladin převodníku (10 bitový A/D převodník). Výsledek je tak ještě vynásoben konstantou 5,21 reprezentující podělení vstupního signálu napěťovým děličem (viz kapitola 2.5).

$$realCurrent = \frac{\frac{current \cdot 2,56}{1024} \cdot \frac{1}{10}}{0,0064}, \quad (3.4)$$

kde čitatel reprezentuje změřenou hodnotu napětí  $V_{sense}$  na vstupu proudového monitoru



ZXCT1021 (kapitola 2.3) a označení *current* reprezentuje hodnotu z proměnné *gNapeti* po převodu. Podělením konstantou  $R_{SENSE}$  (odporem bočníku) dostáváme reálnou hodnotu proudu. Z vypočtených hodnot jsou následně sestaveny grafy průběhů napětí a proudu v závislosti na čase. Výsledek je vidět na obr. 3.10. V zobrazeném grafu je možné najít na příslušný průběh a současným držet levého tlačítka myši společně s pohybem na nějakou stranu daný průběh přibližovat.



Obr. 3.10: Vykreslené grafy průběhů napětí a proudu při provozu regulátoru

Kliknutím na položku v menu *Soubor* -> *Konec* se program ukončí. Obr. 3.11.



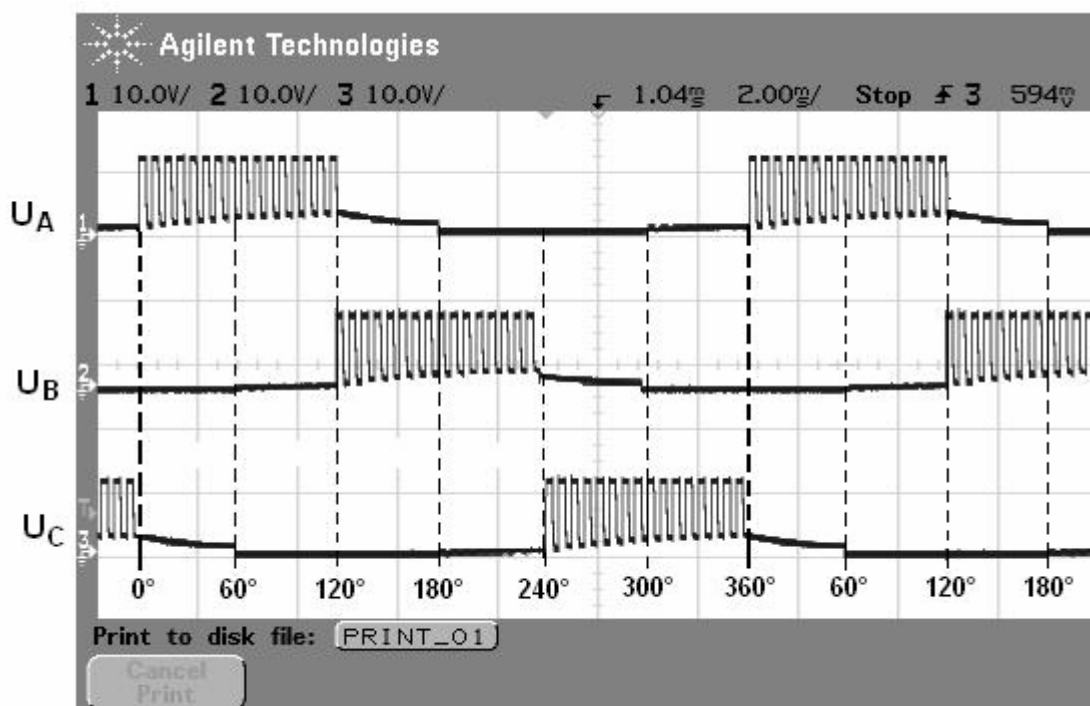
Obr. 3.11: Ukončení programu RegulatorPC

## 4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

V této kapitole jsou shrnuty nejdůležitější výsledky během řešení diplomové práce.

### 4.1 Měření generovaných průběhů

S pomocí ISP programátoru byl do regulátoru nahrán řídicí program a mohl být proveden test funkčnosti zařízení. Nejprve bylo nutné ověřit, zda dochází ke generování požadovaných průběhů napětí na výstupu regulátoru. Měření proběhlo s pomocí osciloskopu Agilent ve studentské dílně na ústavu radioelektroniky FEKT VUT. Na obr. 4.1. jsou znázorněny změřené průběhy napětí  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  na všech třech výstupech (fázích) regulátoru, sloužících k připojení motoru. V obrázku jsou vyznačeny jednotlivé okamžiky komutace, ke kterým dochází vždy v intervalech  $60^\circ$ . Celý cyklus se po uběhnutí  $360^\circ$  opakuje. Regulátor byl napájen napětím  $U = 12V$ .



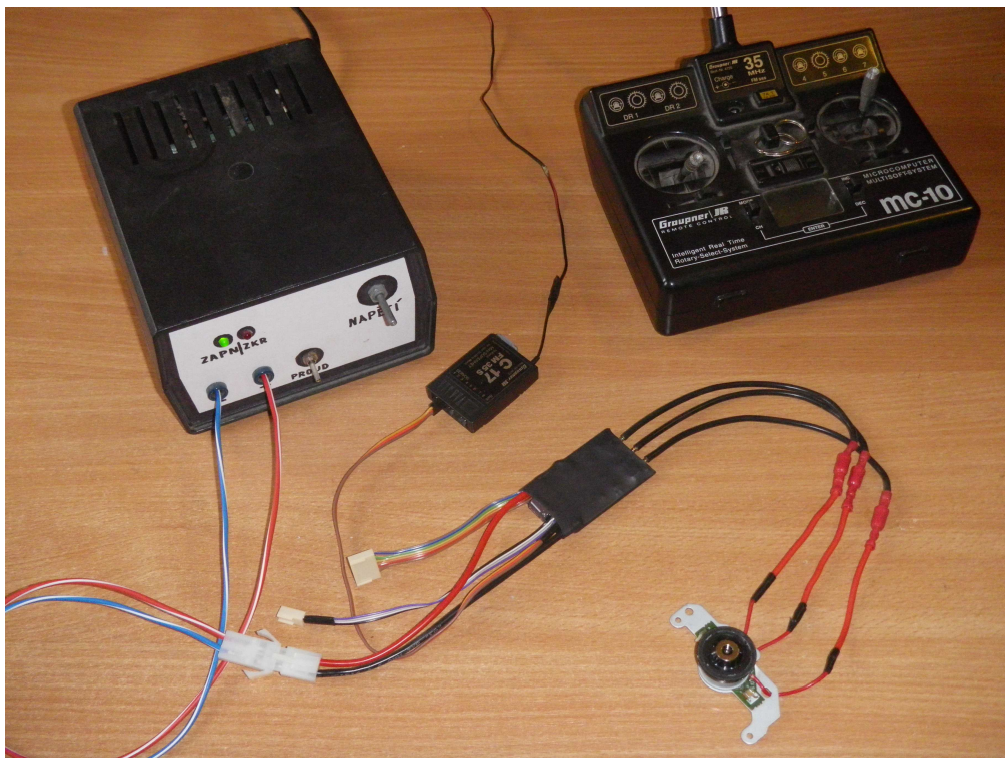
Obr. 4.1: Generované průběhy na výstupu regulátoru bez připojeného motoru

## 4.2 Testování regulátoru

Tato kapitola popisuje testování zařízení v reálném provozu.

### 4.2.1 Ověření správné funkce komutace motoru

Nejprve bylo nutné otestovat, zda dochází k správné komutaci cívek připojeného BLDC motoru. K tomuto účelu posloužil motor ze staré CD-ROM mechaniky. Dále bylo zapotřebí zajistit potřebné napájení (byl použit laboratorní zdroj) a zdroj řídicího signálu pro regulátor (modelářský vysílač společně s přijímačem RC signálu). Vzhled testovacího pracoviště je na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Testovací pracoviště

Po připojení motoru ke zdroji napájení došlo k jeho roztočení. Pak byl na modelářském vysílači přidán plyn a sledovala se reakce na tuto událost. Motor zrychloval podle nastavení plynové páky. Byla odzkoušena schopnost komutovat v minimálních a maximálních otáčkách. Motor na tyto změny reagoval poměrně dobře avšak někdy došlo k nepravidelnému chodu motoru. To je důsledek použití metody regulace pomocí komutační tabulky. Tento problém by byl odstraněn, kdyby se z indukovaného napětí v plovoucí cívce podařilo separovat šum, který znemožňoval určovat přesně přesné okamžiky průchodů indukovaných napětí nulou.

## 4.2.2 Měření oteplení pouzdra výkonových tranzistorů

Měření se provádělo s připojeným motorem bez zátěže (například vrtule a.j). Teplota okolí se pohybovala okolo 23°C. Výkonové tranzistory nebyly nějak chlazeny. Napájecí napětí bylo 12V. Došlo k postupnému zvyšování otáček motoru z minimálních do maximálních, přičemž byly odečítány a do tab. 4.1 zapisovány hodnoty odebíraného proudu a teploty pouzdra výkonových tranzistorů po ustálení. Na obr. 4.3 je vidět graf závislosti teploty pouzdra výkonových tranzistorů na odebíraném proudu regulátoru.

Tab. 4.1: Měření teploty pouzdra výkonových tranzistorů

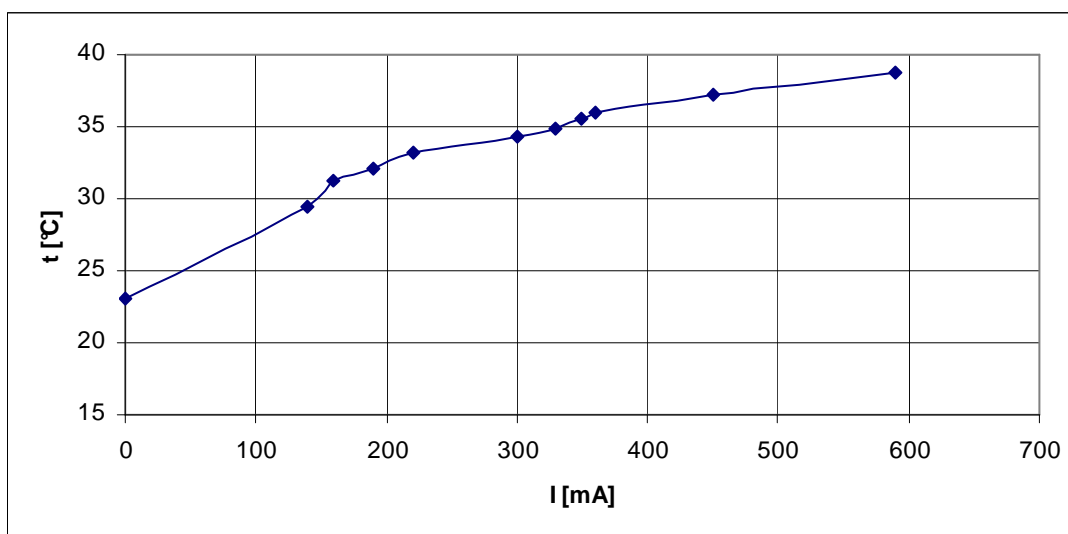
U [V]	I [mA]	t [°C]
11,98	0	23,2
11,99	140	29,4
11,99	160	31,2
12,0	190	32,1
12,0	220	33,2
12,0	300	34,3
11,98	330	34,9
11,98	350	35,5
11,96	360	36,0
11,94	450	37,2
11,90	590	38,7

Kde: U...napájecí napětí

I...odebíraný proud

t...teplota pouzdra tranzistorů

Z grafu na obr 4.3 je vidět, že teplota pouzdra tranzistorů je při malých proudech poměrně nízká. Dá se předpokládat, že při větším proudovém zatížení prudce poroste. Vybrané tranzistory jsou stavěny na větší proudy, než jakých je zde dosahováno. Teplota by tak neměla dosáhnout mezní hodnoty, která je pro  $I_D$  okolo 15A kolem 160°C. Při vyšším zatížení by tak nemělo hrozit zničení tranzistorů v důsledku jejich přehřátí.



Obr. 4.3: Závislost teploty pouzdra výkonových tranzistorů na odebíraném proudu

## 5 ZÁVĚR

V práci byl proveden návrh koncepce a obvodového zapojení regulátoru otáček pro jednosměrné řízení bezkomutátorových střídavých motorů používaných v leteckém modelářství. Regulátor je hardwarově uzpůsoben tak, že je schopen bezsensorového řízení motorů. Dále byl navržen i vyrovnavač napětí (balancer) pro ochranu článků akumulátorové sady Li-pol, která se předpokládá, že bude použita jako zdroj napětí pro motor. Na základě těchto schémat byly navrženy a vyrobeny desky plošných spojů a obě zařízení byla hardwarově realizována a oživena.

Regulátor disponuje možností měřit odebíraný proud a napájecí napětí akumulátoru. Změřené veličiny během provozu ukládá do paměti EEPROM a je možné je uploadovat do PC. Dále umožňuje napájet modelářský přijímač a až 4 standardní serva pomocí obvodu BEC.

V jazyce C ve vývojovém prostředí AVR studio byl napsán ovládací firmware pro mikrokontrolér a pomocí ISP programátor byl nahrán do regulátoru. Zdrojové soubory jsou umístěny v elektronické příloze.

Dále byl vytvořen program RegulatorPC, s jehož pomocí může uživatel v grafické podobě zobrazit nasbíraná data o napájecím napětí pohonného akumulátoru a odebíraného proudu regulátorem. Program se jeví jako jednoduchý na ovládání, přehledný a „uživatelsky příjemný“. Výsledky jsou podrobněji popsány v kapitole 3.2.

S pomocí osciloskopu se podařilo zobrazit generované průběhy napětí na všech třech fázích motoru. Výsledky měření jsou popsány v kapitole 4. K regulátoru byl připojen zdroj řídicího signálu a byla otestována schopnost ovládat otáčky připojeného BLDC motoru. Regulátor umožňuje měnit otáčky rovnoměrně v celém rozsahu od minima do maxima. Někdy však dochází k nepravdělnému chodu motoru, což je důsledkem použité regulační metody.

# LITERATURA

- [1] *Wikipedia* [online]. 2004 [cit. 2011-01-01]. Elektromotor. Dostupné WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>>.
- [2] [Http://vyuka.fel.zcu.cz](http://vyuka.fel.zcu.cz) [online]. 2005 [cit. 2010-05-06]. Akumulátory Lithium - Polymer. Dostupné z WWW: [http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/NSA/Texty/Akum\\_Lipol.pdf](http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/NSA/Texty/Akum_Lipol.pdf)>.
- [3] ROUBÍČEK, O. *Elektrické motory a pohony*. 1. vydání. Praha : BEN, 2004. 179 s. ISBN 80-7300-092-X.
- [4] *Model motors* [online]. 2006 [cit. 2011-01-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.modelmotors.cz/index.php?page=60&kategorie=2808>>.
- [5] LOCKER, Martin. Řízení stejnosměrného motoru .2008, [cit. 2011-05-20]. Dostupný z WWW: <[www.eurobot.cz](http://www.eurobot.cz)>.
- [6] Komunikujeme UART [online]. 2007 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.kvetakov.net/clanky/avr/59-komunikujeme-uart.html>>.
- [7] *RC modely* [online]. 2005 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.promodels.cz/>>.
- [8] AVR microcontrollers project [online]. 2006 [cit. 2011-05-20]. Peter Fleury. Dostupné z WWW: <<http://jump.to/fleury>>.
- [9] ČERNÍK, Martin. *Výkonové polovodičové spínače a výkonová elektronika* [online]. [s.l.], 2008. 94 s. Technická universita v Liberci.
- [10] *ATmega8 8-bit AVR Microcontroller, Data Sheet* [online]. [2010] Dostupný z WWW: <<http://www.atmel.com/>>.
- [11] ZXCT1021 ZETEX, *Data Sheet* [online]. [2010] Dostupný z WWW: <<http://www.diodes.com/zetex/>>.
- [12] *ZOLAČNÍ VZDÁLENOSTI NA PLOŠNÝCH SPOJÍCH* [online]. 2008 [cit. 2011-01-02] Dostupný z WWW: <[http://www.micro.feld.cvut.cz/home/zahlava/ppn/prednasky/Vlastnosti\\_DPS.pdf](http://www.micro.feld.cvut.cz/home/zahlava/ppn/prednasky/Vlastnosti_DPS.pdf)>.
- [13] LF50 low drop voltage regulator, *Data Sheet* [online]. [2010] Dostupný z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/>>.
- [14] *IRLR8256PBF MOSFET tranzistor, Data Sheet* [online]. [2010] Dostupný z WWW: <<http://www.irf.com/>>.
- [15] *IR2302 HALF-BRIDGE DRIVER, Data Sheet* [online]. [2010] Dostupný z WWW: <<http://www.irf.com/>>.

- [16] *Oriental motor* [online]. 2007 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z:  
WWW:<[http://www.orientalmotor.com/newsletter/february\\_2007.htm](http://www.orientalmotor.com/newsletter/february_2007.htm)
- [17] *RXTX* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z:  
WWW:<[http://rxtx.qbang.org/wiki/index.php/Main\\_Page](http://rxtx.qbang.org/wiki/index.php/Main_Page)
- [18] *JFreeChart* [online]. 2005 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z:  
WWW:<<http://www.jfree.org/jfreechart/>

# SEZNAM ZKRATEK

<b>A/D (ADC)</b>	Analog to digital converter - Analogově číslicový převodník
<b>BEC</b>	Zdroj napětí pro přijímač a palubní elektroniku modelu
<b>BLDC</b>	Brushless DC motor - stejnosměrný bezkartáčový motor
<b>EMF</b>	Electro Motive Force - zpětná elektromotorická síla
<b>EEPROM</b>	Electrically Erasable Programmable Read-Only - typ paměti uchovávající data i po odpojení napájení
<b>I2C</b>	Komunikační datová sběrnice
<b>Li-Pol</b>	Lithium-polymer - Akumulátor vyrobený z lithiových polymerů
<b>LED</b>	Light emitted diode - světlo vyzařující dioda
<b>MOSFET</b>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - Druh polem řízeného tranzistoru
<b>MCU</b>	Central Processing Unit – mikroprocesorová jednotka
<b>OZ</b>	Operační zesilovač
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation - pulsně šířková modulace
<b>RC</b>	Radio control
<b>SCL</b>	Serial clock - zdroj hodinového signálu
<b>SDA</b>	Serial Data
<b>USART</b>	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter - universální synchronní / asynchronní přijímač a vysílač

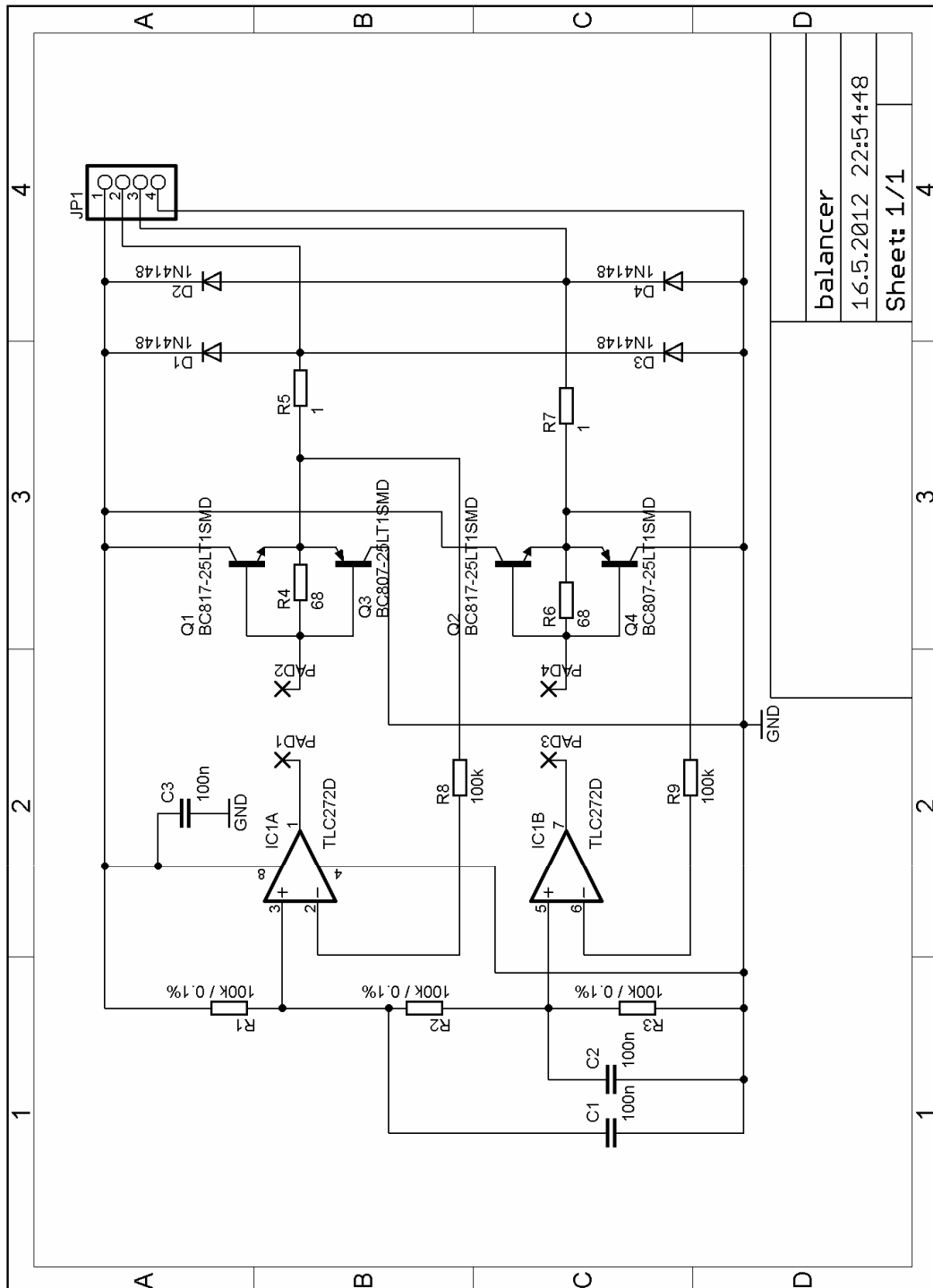


# SEZNAM PŘÍLOH

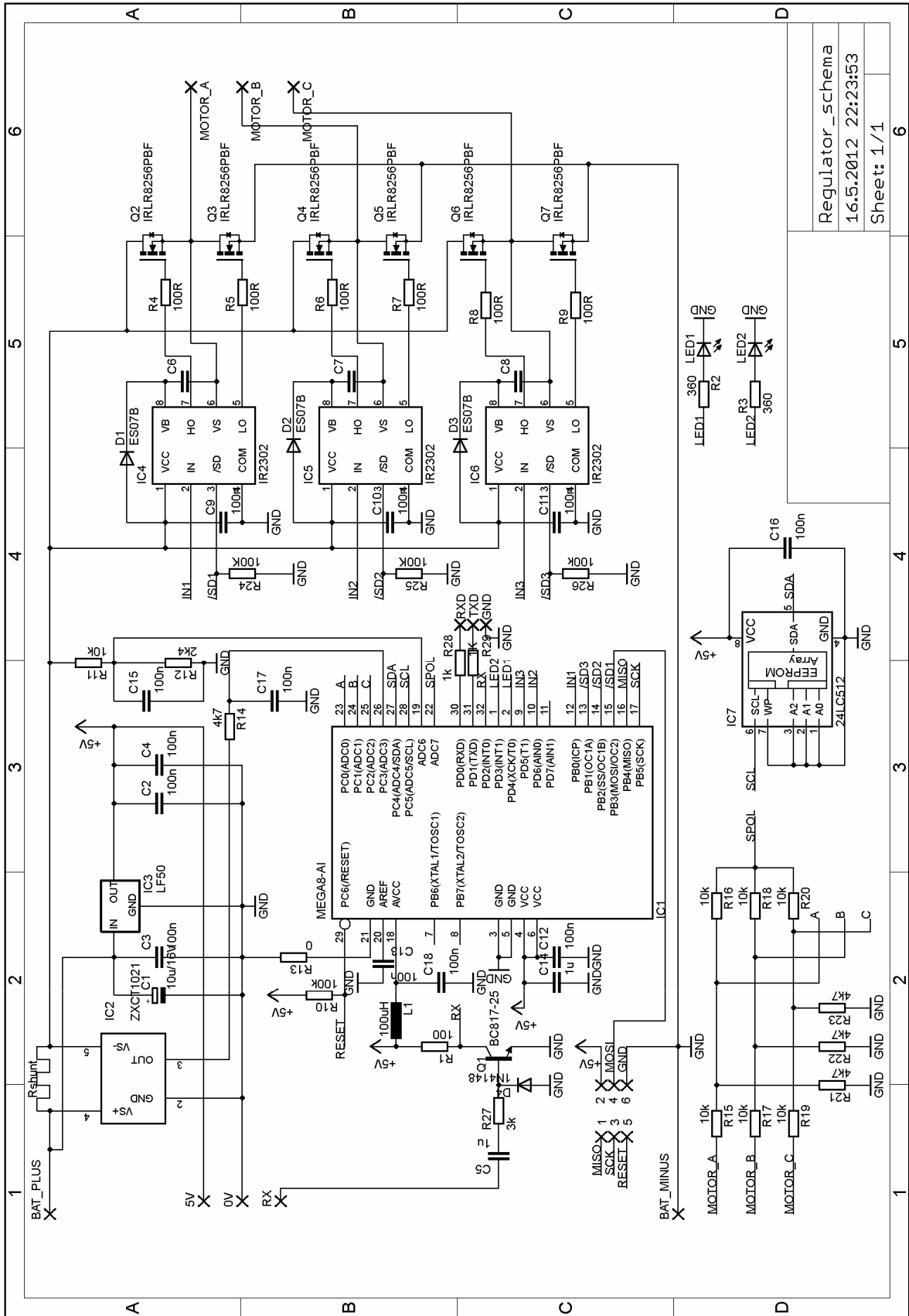
<b>A</b>	<b>Schéma zapojení</b>	<b>57</b>
A.1	Balancer .....	57
A.2	Regulátor.....	58
<b>B</b>	<b>Desky plošných spojů</b>	<b>59</b>
B.1	Balancer .....	59
B.2	Regulátor.....	60
<b>C</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>61</b>
C.1	Seznam součástek pro balancer .....	62
C.2	Seznam součástek pro regulátor .....	62
<b>D</b>	<b>Technické parametry</b>	<b>63</b>
D.1	Balancer .....	63
D.2	Regulátor.....	63

# A SCHÉMA ZAPOJENÍ

## A.1 Balancer



# A.2 Regulador

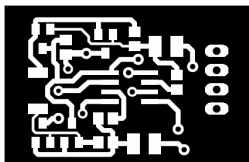


# B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

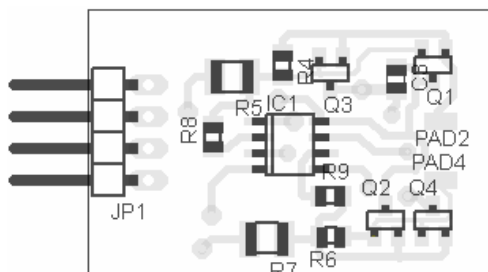
## B.1 Balancer

**Plošný spoj – TOP (strana součástek)**

Rozměr desky 32,7 x 21,3 [mm], měřítko M1:1



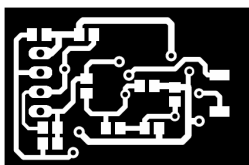
Osazovací plán – strana součástek



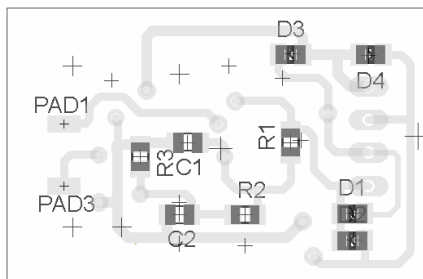
Není v měřítku 1:1

**Plošný spoj – BOTTOM (strana spojů)**

Rozměr desky 32,7 x 21,3 [mm], měřítko M1:1



Osazovací plán – strana spojů

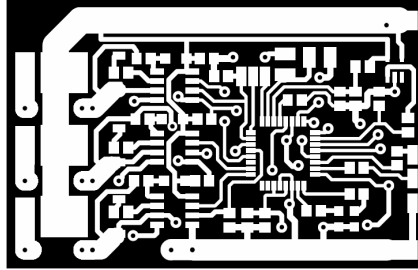


Není v měřítku 1:1

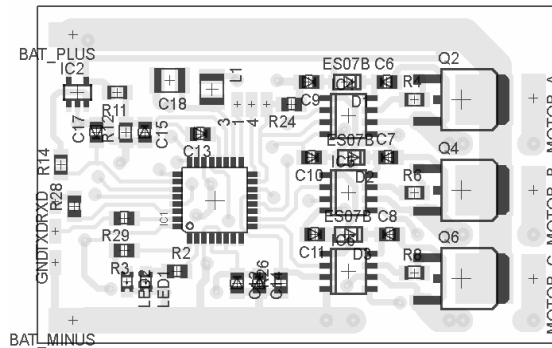
## B.2 Regulátor

### Plošný spoj – TOP (strana součástek)

Rozměr desky 55,2 x 35,7 [mm], měřítko M1:1



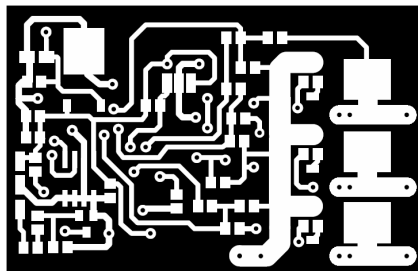
### Osazovací plán – strana součástek



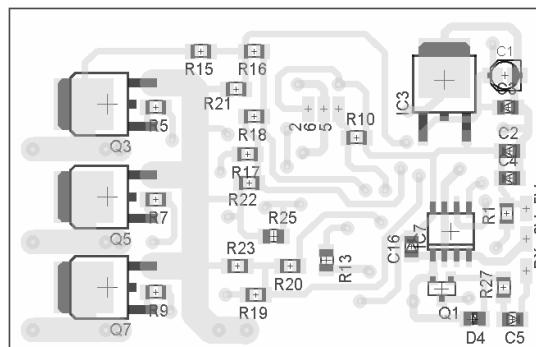
Není v měřítku 1:1

### Plošný spoj – BOTTOM (strana spojů)

Rozměr desky 55,2 x 35,7 [mm], měřítko M1:1



### Osazovací plán – strana spojů



Není v měřítku 1:1

# C SEZNAM SOUČÁSTEK

## C.1 Seznam součástek pro balancer

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1,C2,C3	100n	C0805	Keramický kondenzátor
D1,D2,D3,D4	1N4148	0805	Universální dioda
IC1	TLC272D	SO08	Operační zesilovač
JP1	PSH02-02WG	-	Vidlice do DPS 90°
LED1,LED2	L-937EGW	-	LED dvoubarevná
Q1,Q2	BC817	SOT23-BEC	Tranzistor NPN
Q3,Q4	BC807	SOT23-BEC	Tranzistor PNP
R1,R2,R3	100k /0,1%	R0805	Smd rezistor
R4,R6	68R	R0805	Smd rezistor
R5,R7	1R	R1210	Smd rezistor
R8,R9	100k	R0805	Smd rezistor

## C.2 Seznam součástek pro regulátor

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10u/16V	PANASONIC_A	Elektrolytický kondenzátor
C2,C3,C4,C6,C7 C8,C9,C10,C11	100n	C0805	Keramický kondenzátor
C12,C13,C15,C16 C17,C18	100n	C0805	Keramický kondenzátor
C5,C14	1U	C0805	Keramický kondenzátor
D1,D2,D3	ES07B	DO219-AB	Ultra rychlá dioda
D4	1N4148	0805	Universální dioda
IC1	ATmega8	MLF	Mikroprocesor
IC2	ZXCT1021	SOT23-5	Proudový monitor
IC3	LF50	DPAK	Stabilizátor 5V low drop
IC4,IC5,IC6	IR2302	SO08	Půl můstkový budič
IC7	24LC512	SO-08	Paměť I2C
L1	100uH	L1210	Cívka
LED1,LED2	LEDCHIPLED_0805	0805	LED dioda smd
Q1	BC817	SOT23-BEC	Tranzistor NPN
Q2,Q3,Q4,Q5 Q6,Q7	IRLR8256PBF	DPAK	MOSFET tranzistor
R11,R15,R16 R17,R18,R19,R20	10k	R0805	Smd rezistor
R2,R3	360R	R0805	Smd rezistor
R1,R4,R5,R6,R7 R8,R9	100R	R0805	Smd rezistor
R12	2K4	R0805	Smd rezistor
R13	0R	R0805	Smd rezistor
R14,R21,R22,R23	4k7	R0805	Smd rezistor
R10,R24,R25,R26,	100K	R0805	Smd rezistor
R28,R29	1K	R0805	Smd rezistor
R27	3K	R0805	Smd rezistor

# D TECHNICKÉ PARAMETRY

## D.1 Balancer

- Ochrana proti přepólování – mechanicky konektorem
- Rozměry 32 \* 21mm

## D.2 Regulátor

- Napájecí napětí ( 2 – 4 články Li-pol nebo příslušný počet Ni-Mh článků )
- Maximální trvalý proud až 15A
- Spínací frekvence PWM 4kHz (možno nastavit softwarově i více)
- BEC 1A / 5V
- Indikace poklesu napájení pod 8,1V – odpojení motoru
- Měření napájení a odebíraných proudů – možnost uploadu do PC
- Rozměry 55 \* 35mm