# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

NÁVRH NABÍJECÍHO ÚSTROJÍ BATERIÍ S BALANCEREM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

MICHAL PATÁK

BRNO 2011



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# NÁVRH NABÍJECÍHO ÚSTROJÍ BATERIÍ S BALANCEREM

DESIGN OF CHARGER WITH BALANCER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR MICHAL PATÁK

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR Ing. FRANTIŠEK BURIAN

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor Automatizační a měřicí technika

Student:Michal PatákRočník:3

*ID:* 106241 *Akademický rok:* 2010/2011

#### NÁZEV TÉMATU:

#### Návrh nabíjecího ústrojí baterií s balancerem

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je realizovat nabíječ baterií, který umožňuje trvalé připojení k externímu zdroji napětí a zajistí trvalý provoz bateriového zařízení, nezávislý na výkyvech vstupního napětí. V okamžiku odpojení konektoru přivádějící energii do nabíječe se musí nabíječ přepnout do stavu, kdy neodebírá z baterie žádný proud (zejména je odpojen balancer). Součástí nabíječe je měřicí ústředna, která dokáže s rozumným rozlišením měřit napětí na jednotlivých článcích baterie, a toto napětí pak umožňuje vyčíst po sériové lince.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

SIMPSON, CH.: Battery charging. National Semiconductor. 1998. [Dostupné online http://www.national.com/appinfo/power/files/f7.pdf]

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 30.5.2011

Vedoucí práce: Ing. František Burian

prof. Ing. Pavel Jura, CSc. Předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tento semestrální projekt pojednává o nabíjení baterií. V projektu jsou popsány vlastnosti a možnosti nabíjení lithiových a olověných baterií. Nabíječ je nezávislý na vstupním napětí a šetrně by měl nabíjet baterie. Kvůli šetrnému nabíjení je potřeba měřit napětí na jednotlivých článcích baterie a toto napětí následně vyrovnávat. Jelikož má být nabíječ implementován v robotu, je potřeba přepínat chod z externího zdroje a baterie. V první části práce se zabývám vlastností baterií a způsobu jejich nabíjení. V druhé části jsem blokově navrhl nabíječ. V třetí části jsem navrhl jednotlivé bloky nabíječe. A v poslední části jsem navrhl program pro nabíječ.

# KLÍČOVÁ SLOVA

balancer, nabíječ, baterie, regulátor

## ABSTRACT

This semestral project deals with battery charging. The project describes qualities and possibilities of lithium and lead-acid battery charging. The charger is independent on the input voltage and should considerately recharge the batteries. Due to considerate recharging process to measure the voltage at various articles of the battery is needed and then balance this voltage. Since the charger is to be implemented in a robot, it is needed to switch the operation from an external source and the battery. The first part of the project deals with qualities of batteries and the way of their recharging. In the second part I design a charger block. In the third part I design the individual blocks charger and in the last part I design a software for changer.

## **KEYWORDS**

balancer, charger, battery, regulator

PATÁK, Michal *Návrh nabíjecího ústrojí baterií s balancerem*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2011. 66 s. Vedoucí práce byl Ing. František Burian,

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Návrh nabíjecího ústrojí baterií s balancerem" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení  $\S 11$  a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení  $\S 152$  trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno .....

. . . . . .

(podpis autora)

# Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Františku Burianovi za odborné rady a pomoc při vypracování bakalářské práce.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

Ú	vod		12							
1	Bat	terie	13							
	1.1	Olověné baterie	13							
		1.1.1 Nabíjení konstantním napětím	13							
		1.1.2 Nabíjení konstantním proudem	13							
		1.1.3 Měkké nabíjení olovo-kyselinových baterií	13							
		1.1.4 Chytré nabíjení olovo-kyselinových baterií konstantním napětím	14							
		1.1.5 Udržovací nabíjení olovo-kyselinových baterií konstantním na-								
		pětím	14							
	1.2	Lithiové baterie	14							
		1.2.1 Nabíjení Lithium polymerové baterie	15							
ი	Har	ndrugnourí nármh nahťiožo	17							
4	паг о 1	Diskowé návrh nabijece	17							
	2.1		17							
	2.2		10							
	0.0	2.2.1 Navrn prepinani cianku baterie	18							
	2.3	Mereni napeti cianku baterie	19							
		2.3.1 Operacni zesilovace	19							
		2.3.2 Diferencii operacii zesilovac	19							
	2.4	2.3.3 Návrh operačního zesilovače na úpravu napětí	20							
	2.4	Mereni vystupniho napeti spinaneho zdroje	22							
	2.5	.5 Měření proudu tekoucího induktorem								
		ve spínaném zdroji	22							
	2.6	Měření teploty	26							
	2.7	Spínaný zdroj	26							
		2.7.1 Step-down spínaný regulátor napětí	26							
		2.7.2 Step-up spínaný regulátor napětí	28							
		2.7.3 Cívka	30							
		2.7.4 Návrh spínaného regulovaného zdroje pro napájení nabíječe	30							
	2.8	Spínací prvky	31							
		2.8.1 Spínání napětí pro robota	31							
		2.8.2 Spínání napětí pro dobíjení baterie	31							
	2.9	Balancer	33							
3	Mik	krokontroler	35							
	3.1	Modul A/D převodníku $\hdots$	35							

	3.2	Modul PWM	35
	3.3	Sériové sběrnice RS-485	36
	3.4	Modul CAN sériového rozhraní	37
	3.5	Modul PSC	37
4	Měi	ření proudu	41
	4.1	Určení doby startu měření proudu	41
	4.2	Výpočet výstupního proudu	42
		4.2.1 Přepočet proudu cívkou na výstupní proud v MCU	43
<b>5</b>	Náv	vrh regulátorů spínaného	
	zdro	oje	44
	5.1	Regulátor napětí	44
		5.1.1 Program PI regulátoru	48
	5.2	Regulátor proudu	50
		5.2.1 Program I regulátoru	50
6	Pos	tup nabíjení baterie	51
	6.1	Olovo-kyselinová baterie pb q 5,2-12U - vlastnosti $\ \ldots\ \ldots\ \ldots\ \ldots$	51
	6.2	Li-pol baterie KOKAM - vlastnosti	51
	6.3	Popis vlastního nabíjení	53
7	Pro	gram	55
8	Mo	dulárnost	56
9	Záv	ěr	57
Li	terat	ura	58
Se	znar	n symbolů, veličin a zkratek	60
Se	znar	n příloh	61
$\mathbf{A}$	$\mathbf{Sch}$	émata	62
	A.1	Celkové schéma nabíječe	62
	A.2	Motiv plošného spoje - spodní strana	63
	A.3	Motiv plošného spoje - horní strana	63
	A.4	Osazení plošného spoje - spodní strana	64
	A.5	Osazení plošného spoje - horní strana	64
_	_		

#### B Fotky demo desky

65

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Nabíjecí fáze lithiových baterií [5]	16
2.1	Blokové schéma nabíječe	17
2.2	Schéma přepínání článků baterie	18
2.3	Schéma diferenčního zapojení operačního zesilovače	19
2.4	Schéma diferenčního operačního zesilovače, který odečítá konstantní	
	napětí	20
2.5	Simulace úpravy napětí v programu Multisim 10	21
2.6	Graf simulace úpravy napětí měřených článků baterie	21
2.7	Schéma měření proudu pomocí diferenčního operačního zesilovače	22
2.8	Schéma simulace měření proudu	24
2.9	Graf ze simulace zobrazuje závislost vstupního napětí ku výstupnímu	
	napětí při měření proudu	25
2.10	Graf ze simulace zobrazuje závislost měřeného proudu ku výstupnímu	
	napětí při měření proudu	25
2.11	Schéma Step-down regulátoru napětí	27
2.12	Schéma Step-down regulátoru se sepnutým spínačem	27
2.13	Schéma Step-down regulátoru s rozepnutým spínačem	27
2.14	Průběh napětí a proudu na cívce	28
2.15	Schéma Step-up regulátoru napětí	29
2.16	Schéma regulátoru Step-up se spínačem v sepnutém stavu	29
2.17	Schéma regulátoru Step-up se spínačem v rozepnutém stavu	29
2.18	Schéma regulovaného zdroje Step-down-up	31
2.19	Schéma spínače baterie	32
2.20	Simulace spínače baterie - sepnutý	33
2.21	Simulace spínače baterie - rozepnutý	33
2.22	Schéma balanceru	34
3.1	Princip PWM modulace	36
3.2	Jeden rámec přenosu RS-485 [17]	36
3.3	Obrázek napěťových úrovní sériové sběrnice CAN	37
3.4	Ukázka jednoho cyklu čítače PSC v Ramp Mode režimu $[12]$	38
3.5	Ukázka jednoho cyklu čítače PSC v Centered Mode režimu [12]	38
3.6	Generování výstupního signálu A a B v Ramp Mode režimu $[12]$	39
3.7	Generování výstupního signálu A a B v Center Mode režimu $[12]$	40
4.1	Snímek z osciloskopu - měření proudu	41
4.2	Snímek z osciloskopu - proud cívkou a PSC signál	42
5.1	Blokový obrázek zpětnovazební regulace	44
5.2	Graf přechodové charakteristiky regulátoru napětí 	45

5.3	Asymptotická frekvenční charakteristika soustavy	46
5.4	Asymptotická frekvenční charakteristika soustavy s přidanou nulou $% \mathcal{A}$ .	47
5.5	Asymptotická frekvenční charakteristika soustavy s PI reguátorem se	
	zesílením 1	47
5.6	Přechodová charakteristika - Matlab	48
5.7	Blokové schéma regulátoru PI	49
6.1	Snímek baterie pbq 5,2-12U	51
6.2	Baterie Kokam 4800 $mAh$ - cell	52
6.3	Baterie Kokam 4800 $mAh$ - pack	52
6.4	Nabíjení lithiových baterií [9]	53
6.5	Vývojový diagram pro nabíjení Li-Pol baterie	54
7.1	Vývojový diagram hlavní části programu	55
8.1	Blokové schéma modulů nabíječe	56
A.1	Celkové schéma nabíječe	62
A.2	Motiv plošného spoje - spodní strana	63
A.3	Motiv plošného spoje - horní strana	63
A.4	Osazení plošného spoje - spodní strana	64
A.5	Osazení plošného spoje - horní strana	64
B.1	Fotka demo desky - horní strana	65
B.2	Fotka demo desky - spodní strana	65
B.3	Fotka převodníku USB na RS485	66

# SEZNAM TABULEK

2.1 Tabulka naměřených dat v simulaci		24
---------------------------------------	--	----

# ÚVOD

V dnešní době jsou běžně v průmyslu, v armádě, u záchranářů a nebo třeba i v domácnostech využíváni mobilní roboti, jejíchž nedílnou součástí jsou zdroje energie v podobě nejrůznějších baterií a akumulátorů. Nejvyužívanějšími bateriemi jsou dnes baterie typu Li-pol, protože mají dlouhou životnost, malé rozměry, nízkou cenu a vysokou hustotu energie uchované v baterii. Proto jsem se rozhodl ve své bakalářské práci zabývat návrhem nabíječe pro takovéto roboty s olověnými a Li-Pol bateriemi.

Cílem mé bakalářské práce je tedy navrhnout nabíječ baterií s balancerem pro olověné a Li-Pol baterie. Tento nabíječ nesmí být závislý na vstupním napětí, to zajišťuje Step-up a Step-down spínaný zdroj, který vyreguluje vstupní napětí na požadované výstupní napětí. Nabíječ bude implementovaný přímo do robota, a proto je potřeba vyřešit přepínání napětí, ze kterého je robot napájen. V žádném případě nesmí dojít k přebíjení Li-Pol baterie (mohlo by dojít k vzplanutí baterie), proto je nutné je nabíjet co nejšetrněji. Pro šetrné nabíjení je nutno vyrovnávat napětí na jednotlivých článcích baterie, takzvané balancování. Pro olověné baterie není toto vyrovnávání jednotlivých článků baterie tak kritické a proto na běžně dostupných olověných bateriích není balancovací konektor zabudován.

V práci jsem navrhl, nakreslil a vypočítal jednotlivé bloky nabíječe. Vybral jsem vhodný microprocesor pro měření a řízení celého nabíjení, spínání a regulování spínaného zdroje. Nabíječ bude schopen komunikovat s robotem přes sériové rozhraní. Vybral jsem sériovou sběrnici CAN, která byla sice vyvinuta pro automobily, ale dnes se začíná uplatňovat i v průmyslové automatizaci. Toto rozhraní jsem zvolil, protože bych chtěl, aby byl nabíječ modulární (možnost nabíjení více článkových baterií), proto bude potřeba, aby jednotlivé moduly spolu komunikovaly. Jelikož se jedná o sériovou sběrnici, kterou lze jednoduše galvanicky oddělit, bude tento typ nejlepší volbou.

# 1 BATERIE

# 1.1 Olověné baterie

Podle článku [4] jsou v článcích baterie olověné desky kladné a záporné polarity, které jsou uloženy střídavě. Mezi deskami jsou separátory na zabránění dotyku jednotlivých desek. Jako elektrolyt je použitá kyselina sírová naředěná na hustotu 1,285  $g/cm^3$  destilovanou vodou. Napětí na článcích se pohybuje při nezatížené baterii 2 -2,15V. Při maximálním zatížení baterie může napětí na článku klesnout až na 1,4V. Při nezatížené baterii napětí na článcích neklesne pod 2,1V, a to i při úplném vybití. Proto při měření napětí na prázdno nedostaneme údaj o stavu baterie. Nabíjení velkými proudy se akumulátor rychle ničí. Dvanácti voltová olověná baterie se skládá z šesti článků.

### 1.1.1 Nabíjení konstantním napětím

Podle knihy [1] Battery Reference Book nabíjení konstantním napětím by baterie měla být nabíjena maximálně 2,5V/článek. Nabíjecí proud lze měřit a snížit, pokud napětí dosáhne požadované úrovně.

## 1.1.2 Nabíjení konstantním proudem

Podle knihy [1] Battery Reference Book výběrem vhodného konstantního nabíjecího napětí a počátečního nabíjecího proudu se může baterie dobíjet bezpečně, bez ohledu na hloubku vybití v předchozích cyklech. Doporučený počáteční nabíjecí proud pro olověnou baterii se vypočítá jako 1/4 z kapacity baterie.

## 1.1.3 Měkké nabíjení olovo-kyselinových baterií

Bude se používat, když baterie bude mít 5-50% své kapacity. Nabíjecí parametry jsou:

- 1. Konstantní napětí 2,40-2,56V/článek.
- 2. Omezení proudu na 10-15% kapacity baterie.
- 3. Nabíjecí čas: 10-18h. Pokud bude kapacita klesat, musí se doba nabíjení zvýšit na 20-30h.

Je to nejjednodušší metoda, jak nabíjet olověné baterie. Vyžaduje však kontrolu přebíjení a kontrolu teploty baterie. Tím se prodlouží životnost baterie.

# 1.1.4 Chytré nabíjení olovo-kyselinových baterií konstantním napětím

Bude použito, když baterie má 50-100% své kapacity. Nabíjecí podmínky jsou:

- 1. Konstantní napětí 2,45-2,50V/článek.
- 2. Omezení proudu na 20-50% kapacity baterie.
- 3. Nabíjecí čas: 12-20<br/>h. Pokud bude kapacita klesat, musí se doba nabíjení zvýšit na 24-30<br/>h.

# 1.1.5 Udržovací nabíjení olovo-kyselinových baterií konstantním napětím

Je-li baterie neustále nabíjena, musí se dodržet konstantní napětí, které zajistí plné nabití baterie. Nabíjecí podmínky jsou:

- 1. Konstantní napětí 2,28-2,30V/článek.
- 2. Omezení proudu na 1-20% kapacity baterie.
- 3. Nabíjecí čas: nepřetržitý

Všechny olovo-kyselinové baterie budou nejúčinnější při teplotě 15-30°C. Když je udržovací nabíjení prováděno za jiných teplot než 0-40°C, tak se musí zvětšit nabíjecí výkon. Mnoho aplikací vyžaduje provoz při nízkých teplotách a proto musí být v nabíječi zabudovaný kompenzátor 4mV/°C.

# 1.2 Lithiové baterie

Podle knihy [1] Battery Reference Book existuje mnoho typů komerčně vyráběných lithiových baterií. Tyto baterie se používají hlavně tam, kde je potřeba dlouhá životnost, malé rozměry a nízká cena baterie. Lithiová baterie nabízí až 330Wh/kg, což je asi čtyřikrát více, než nabízejí alkalické manganové baterie. Typické napětí jednoho článku je 3,7V. Vysoká hustota energie je způsobena vysokým provozním napětím elektrochemických par. Lithium má největší elektromotorické napětí z kovů. Díky nevodnatému charakteru elektrolytů používaných v lithiových baterií je vodivost při nízkých teplotách mnohem lepší, než u dříve dostupných systémů. Lithiumvanadium peroxidové a lithium-oxid siřičité baterie budou fungovat při teplotách - 55°C s účinností blížící se 50%. Další významná vlastnost lithiových článků je dlouhá životnost. Tím, že má hermeticky uzavřené články, chrání je od nečistot a úniku elektrolytu. Životnost takové baterie je 5-10 let bez zvláštních opatření při skladování.

#### 1.2.1 Nabíjení Lithium polymerové baterie

Podle článku [5] a článku [3] nabíjení lithiových baterií konstantním napětím je podobné jako u olověných baterií. Rozdíl je pouze ve větším napětí na článek a nutností dodržet toto napětí co nejpřesněji. Většina dnes vyráběných lithiových článků by měla být nabíjena 4,20V s tolerancí +/-0,05V/článek. V průmyslových a vojenských lithiových bateriích je nabíjecí napětí okolo 3,90V/článek. Mají však větší rozměry při stejné kapacitě a delší životnost. Při nabíjení je nutné hlídat plné nabití baterie. Plné nabití je, když napětí dosáhne horní hranice, proud klesne a ustálí se kolem 3% nominálního nabíjecího proudu. Vyšší nabíjecí proud nezkrátí nabíjení o mnoho. Horní napětí je sice dosaženo rychleji, ale konečná fáze nabíjení bude naopak trvat déle. Některé nabíječky nabíjejí baterii za hodinu nebo i dříve. Taková nabíječka nabíjí pouze ve dvou fázích. Jakmile napětí dosáhne horního napětí první fáze okolo 4V, tak přejde rovnou do poslední fáze, v tomto případě je baterie na 70% nabita. Tato fáze trvá obvykle dvakrát tak dlouho, než fáze první. Je znázorněno na obrázku 1.1. Baterie se může samovolně vybít za 500 hodin. Měla by se začít nabíjet, klesne-li napětí na 4,05V/článek a přestane se nabíjet, dosáhne-li napětí 4,20V/článek. Lithiové baterie se nesmějí přebíjet. Nabíjí-li se napětím větším než 4,30V/článek, tak se začne anoda pokovovat lithiem, katoda oxiduje a začne se uvolňovat kyslík. Přebíjením se baterie rychle ohřívá. Průmyslově vyráběné lithiové baterie mají ochranný obvod, který odpojí nabíjení při dosažení nebezpečného napětí. Baterie by se měla odpojit od nabíjení také při dosažení teploty větší než 90°C.

Je důležité měřit při nabíjení jednotlivá napětí na článcích baterie a toto napětí mezi nimi vyrovnávat. Většina Li-Pol baterií má na sobě konektor na vyrovnávání napětí na článcích baterie. Takovéto "šetrné" nabíjení výrazně prodlužuje životnost baterie.



Obr. 1.1: Nabíjecí fáze lithiových baterií [5]

# 2 HARDWAROVÝ NÁVRH NABÍJEČE

## 2.1 Blokový návrh

Blokový návrh vychází ze zadání práce, jak je zobrazeno na schématu 2.1. Nabíječ musí být možno připojit k externímu zdroji napětí, které se může měnit. Musí zajistit trvalý provoz zařízení. Při odpojení konektoru zdroje napětí nesmí nabíječ z baterie odebírat žádnou energii. Je nutné měřit napětí na všech článcích baterie a balancovat mezi články.



Obr. 2.1: Blokové schéma nabíječe

# 2.2 Přepínání článků baterie

Na přepínání napětí jednotlivých článků baterie byl použit analogový multiplexer 4067, kterým je možno spínat napětí až 15V za předpokladu, že adresovací sběrnice bude řízena stejným napětím. Jelikož na digitálním výstupu MCU je při logické jedničce 5V, tak bylo toto napětí použito pouze jako řídící napětí pro budič napěťové úrovně, který bude spínat napětí 15V. Navržené schéma zapojení je na obrázku 2.2. Protože multiplexer zvládne přepínat maximálně 15V, tak napětí z článků baterie bude měřeno přes odporový dělič a tím bude umožněno změřit až šesti článkové baterie.



Obr. 2.2: Schéma přepínání článků baterie

#### 2.2.1 Návrh přepínání článků baterie

Nejprve byl navrhnut odporový dělič. Bude potřeba dostat poloviční napětí, takže odpory v děliči budou mít stejnou hodnotu. Byl zvolen proud děličem tak, aby co nejméně zatížil baterii přibližně  $I_d = 500 \mu A$ . Napětí na článku je známé;  $U_{cell} = 3,7V$  proud je zvolen, bude tedy uvažováno, že do obvodu poteče  $500 \mu A$ . Aplikací Ohmova zákona 2.1 plyne podmínka pro odpor  $R_d$ .

$$R_d = \frac{U_{cell}}{I_d} \tag{2.1}$$

$$R_d = \frac{3.7}{500.1^{-6}} = 7400\Omega \tag{2.2}$$

Nejbližší odpor v řadě E24 je 7,5 $k\Omega$ . Odpory  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  a  $R_4$  byly vypočítány tak, že byl určen proud tekoucí driverem i = 1mA, tedy  $R = \frac{15}{1.10^{-3}} = 15k\Omega$ .

# 2.3 Měření napětí článků baterie

#### 2.3.1 Operační zesilovače

Podle skripta [6] a knihy [11] je zapotřebí, aby v návrhu operačního zesilovače byly považovány za ideální, to znamená, že mají nekonečný vstupní odpor, nulový výstupní odpor a nekonečné zesílení.

#### 2.3.2 Diferenční operační zesilovač

Nejprve byly vyjádřeny napětí a proudy ve schématu diferenčního zapojení operačního zesilovače na obrázku 2.3. Výpočet odporů:



Obr. 2.3: Schéma diferenčního zapojení operačního zesilovače

$$U_{AB} = U_A = U_B \tag{2.3}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0 \tag{2.4}$$

$$i_1 = \frac{U_1 - U_A}{R_1} \tag{2.5}$$

$$i_2 = \frac{U_3 - U_A}{R_2} \tag{2.6}$$

$$i_3 = \frac{U_2 - U_B}{R_3} \tag{2.7}$$

$$i_4 = \frac{U_B}{R_4} \tag{2.8}$$

Nyní budeme předpokládat, že  $R_1 = R_3$  a  $R_2 = R_4$ . Rovnice 2.5, 2.6, 2.7 a 2.8 dosadíme do rovnice 2.4.

$$R_2 U_1 + R_1 U_3 + R_2 U_2 = 0 (2.9)$$

$$U_3 = \frac{R_2}{R_1} (U_1 - U_2) \tag{2.10}$$

#### 2.3.3 Návrh operačního zesilovače na úpravu napětí

Pro měření bylo použito operačního zesilovače TLC272CD typu reil-to-reil [13], který lze napájet jednostranně a jeho výstupní napětí se blíží napětí napájecímu. Jelikož je k dispozici operační zesilovač, který má maximální napájecí napětí pouze 18V, musí být vstupní napětí přes odporový dělič vyděleno dvěma, aby mohl měřit do napětí alespoň 30V. Napětí půjde dále do deseti bitového A/D převodníku MCU, tak bude dosaženo rozlišení převodníku  $\frac{4,5-2,5}{1024} = 1,953125.10^{-3}V.$ 

První operační zesilovač je v diferenčním zapojení a má za úkol odečíst potenciál, který je proti zemi. Druhý operační zesilovač je zapojen opět v diferenčním zapojení, které odečítá 1,25V a pětkrát zesiluje.

Vztah pro výstupní napětí  $U_3$  je vyjádřen v rovnici 2.10. Pokud zvolíme  $R_1$  a  $R_2$  jako stejné odpory, tak dostaneme diferenční zesilovač, který má jednotkové zesílení. Pro první diferenční operační zesilovač byly zvoleny odpory  $100k\Omega$  proto, aby byl co nejméně zatížen měřený článek.

Na obrázku 2.4 je nakresleno schéma druhého diferenčního operačního zesilovače.



Obr. 2.4: Schéma diferenčního operačního zesilovače, který odečítá konstantní napětí

Pro návrh odporů se bude vycházet z rovnice 2.10. Na výstupu z diferenčního operačního zesilovače pro nabíjení lithiových akumulátorů je napětí 1,25 až 2,25V, takže musí být odečteno napětí 1,25V a nastaveno zesílení tak, aby napětí na výstupu bylo 0 až 5V. Takový rozsah napětí bude potřeba proto, aby bylo využito plného rozsahu A/D převodníku v MCU. Napětí 1,25V bude vytvořeno napěťovou referencí REF3312, která má výstupní napětí 1,25V s tolerancí ±0,15%. Velikost zesílení je  $Au = \frac{5}{2,25-1,25} = 5$  a je dáno poměrem  $\frac{R_2}{R_1}$ , jak je patrno z rovnice 2.10. Byl zvolen odpor  $R_2 = 100k\Omega$ . Podle rovnice 2.10 lze vypočítat  $R_1$ , když je znám rezistor  $R_2$  a zesílení Au.  $R_1 = \frac{R_2}{Au} = \frac{10.10^3}{5} = 20k\Omega$ .

Simulace zapojení operačních zesilovačů byla provedena v programu Multisim 10 od firmy NATIONAL INSTRUMENT a je zobrazena na obrázku 2.5. Pro simulaci byl místo napěťové reference REF3312 použit zdroj napětí 1,25V.



Obr. 2.5: Simulace úpravy napětí v programu Multisim 10

Na obrázku 2.6 je vykreslen graf vstupního napětí ku výstupnímu napětí naměřených hodnot ze simulace.



Obr. 2.6: Graf simulace úpravy napětí měřených článků baterie

Z grafu je patrné, že výstupní napětí je téměř lineární.

Pro případné nabíjení olověných akumulátorů je na výstupu diferenčního operačního zesilovače napětí 0,5 až 1,5 V, takže musí být odečteno napětí 0,5V, aby napětí na výstupu bylo 0 až 5V. Velikost zesílení je  $Au = \frac{5}{1,5-0,5} = 5$ . Zesílení Auje stejně velké v obou případech a proto bude stačit při měření článků odlišných baterií přepínat pouze napětí, které se odečítá.

## 2.4 Měření výstupního napětí spínaného zdroje

Pro měření výstupního napětí je potřeba pouze odporový dělič, který upravuje rozsah měřeného napětí na 0 až 5V potřebných pro A/D převodník MCU. Maximální výstupní napětí tak může být až 50V. Proud procházející děličem byl zvolen 5mA. Aplikací Ohmova zákona budou snadno dopočítány rezistory.

První rezistor bude:

$$R_1 = \frac{U_{vystupni}}{I_{delicem}} = \frac{5}{0.005} = 1k\Omega$$
(2.11)

Druhý rezistor potom bude:

$$R_2 = \frac{U_{vstupni} - U_{vystupni}}{I_{delicem}} = \frac{50 - 5}{0.005} = 9k\Omega$$
(2.12)

# 2.5 Měření proudu tekoucího induktorem ve spínaném zdroji

Pro měření byl použit operační zesilovač OPA344 typu rail-to-rail [14] zapojený podle schématu 2.7, pomocí kterého bude měřeno napětí na rezistoru o známé (malé) hodnotě. Použitím Ohmova zákona bude poté vypočítán proud tekoucí rezistorem.



Obr. 2.7: Schéma měření proudu pomocí diferenčního operačního zesilovače

Proud bude měřen do 15A (jen ve špičkách), tomu odpovídá výstupní proud ze spínaného zdroje 7, 5A. Měřící rezistor byl zvolen  $0,01\Omega/1W$ . Aplikací Ohmova zákona 2.13 bude vypočteno napětí na zvoleném měřícím rezistoru  $0,01\Omega$ .

$$U_m = R_m I_z \tag{2.13}$$

$$U_m = 0,01.15 = 0,15V \tag{2.14}$$

Poté byl ověřen výkon na měřícím odporu  $R_m$  podle 2.15.

$$P_{R_m} = U_m . I_z \tag{2.15}$$

$$P_{R_m} = 0.15 .\ 15 = 2.25W \tag{2.16}$$

Z výpočtů plyne, že zvolený výkon odporu nebude pro zvolený proud 15A stačit, ale jelikož pracujeme v impulzním režimu, tak tento špičkový výkon rezistor snese. Je zapotřebí napětí na měřeném rezistoru zesílit, aby při proudu 15A bylo na vstupu A/D převodníku MCU zhruba 5V.

Operační zesilovač je zapojen jako neinvertující zesilovač z odporovým děličem na vstupu. Z rovnice pro zesílení neinvertujícího operačního zesilovače 2.17 lze dopočítat rezistory podle požadovaného zesílení.

$$K = 1 + \frac{R_3}{R_4} \tag{2.17}$$

Zesílení K a rezistor  $R_3$  zvolíme:

$$K = 20 \qquad R_3 = 100k\Omega \tag{2.18}$$

Upravením rovnice 2.17 dostaneme:

$$R_4 = \frac{R_3}{K - 1} \tag{2.19}$$

Po dosazení:

$$R_4 = \frac{100.10^3}{22 - 1} = 4761, 9 \cong 4,7k\Omega$$
(2.20)

Zpětně dosadíme hodnoty rezistorů do rovnice 2.17 a vypočítáme přesné zesílení.

$$K = 1 + \frac{100}{4,7} = 22,28 \tag{2.21}$$

Odporový dělič na vstupu  $(R_1 \ a \ R_2)$  vyřešíme pro minimální (0V) a maximální (0,15V) napětí. Pro 0V je proud děličem:

$$I_{delicem} = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{5}{100.10^3 + 1.10^3} = 4,95.10^{-5}A$$
(2.22)

Napětí na vstupu operačního zesilovače:

$$U_{in} = R_1 \cdot I_{delicem} = 1.10^3 \cdot 4,95.10^{-5} = 0,0495V$$
 (2.23)

Napětí na výstupu operačního zesilovače:

$$U_{out} = U_{in} \cdot K = 0,0495 \cdot 22,28 = 1,1029V$$
(2.24)

Pro 0,15V je proud děličem:

$$I_{delicem} = \frac{U_n - U_{vstupni}}{R_1 + R_2} = \frac{5 - 0, 15}{100.10^3 + 1.10^3} = 4,80.10^{-5}A$$
(2.25)

Napětí na vstupu operačního zesilovače:

$$U_{in} = (R_1 \cdot I_{delicem}) + 0.15 = (1.10^3 \cdot 4, 80.10^{-5}) + 0.15 = 0,1980V$$
 (2.26)

Napětí na výstupu operačního zesilovače:

$$U_{out} = U_{in} \cdot K = 0,1980 \cdot 22,28 = 4,4114V$$
 (2.27)

Na obrázku 2.8 je zobrazeno schéma zapojení simulace v programu Multisim 10 od firmy NATIONAL INSTRUMENT.



Obr. 2.8: Schéma simulace měření proudu

Data získané simulací jsou v tabulce 2.1

$I_{MAXcivkou}$	0	2	4	6	8	10	12	14
$U_{R5}$	0	0,02	0,04	0,06	0,08	$^{0,1}$	0,12	$0,\!14$
$U_{out}$	1,10	1,54	1,99	2,43	2,87	3,31	3,75	4,19

Tab. 2.1: Tabulka naměřených dat v simulaci

Z obrázků 2.9 a 2.10 je patrné, že je možné v případě potřeby měřit i záporný proud a že se celý obvod chová lineárně.

Jelikož má tranzistor IRLR3110 přesně definovaný odpor v sepnutém stavu  $R_{DS(on)} = 14m\Omega$ , bylo by možné měřit proud přímo na tomto tranzistoru.



Obr. 2.9: Graf ze simulace zobrazuje závislost vstupního napětí ku výstupnímu napětí při měření proudu



Obr. 2.10: Graf ze simulace zobrazuje závislost měřeného proudu ku výstupnímu napětí při měření proudu

## 2.6 Měření teploty

Teplotu je zapotřebí měřit na jednotlivých článcích baterie, aby bylo nabíjení bezpečnější a šetrnější pro baterii. Většina dnešních Li-Pol baterií již v sobě má pojistku proti přehřátí zabudovanou, a proto se tímto probléme není nutné dále zabývat. V následující práci se tento problém bude řešit měřením teploty baterie a následnou kompenzací v nabíjecím cyklu.

## 2.7 Spínaný zdroj

Jelikož je požadováno, aby vstupní napětí bylo větší nebo menší než je napětí potřebné pro nabíjení, je nutné toto napětí regulovat. Podle knihy [2] a článku [8] se spínaný regulátor napětí chová podobně jako regulátor lineární. Hlavním rozdílem je, že lineární regulátor reguluje neustále tok proudu namísto spínaného regulátoru, který spíná vstupní napětí a ovládá průměrný výstupní proud v určené periodě. Spínaný zdroj se řídí pulzně šířkovou modulací, zkráceně už jen PWM. Jsou dva základní typy spínaných regulátorů Step-down a Step-up.

#### 2.7.1 Step-down spínaný regulátor napětí

Jedná se o regulátor snižující napětí. V některé literatuře se také nazývá jako buck regulátor napětí. Schéma zapojení tohoto regulátoru je na obrázku 2.11. Podle knihy [2] a článku [8] propustný spínaný regulátor tvoří čtyři základní prvky: výkonný spínač spínající PWM signál, diodu, cívku a kondenzátor. Spínač může být výkonový tranzistor (MOSFET), umístěný mezi vstupní napětí a částí pro filtraci. Kondenzátor má za úkol uchovávat a dodávat energii, když je spínač rozepnut. Výkonový spínač slouží pouze k doplnění ztracené energie do kondenzátoru. Výkonný spínač funguje ve dvou částech periody. V první části je spínač sepnutý. Během této periody je proud vycházející ze vstupního zdroje načítán přes cívku a vrací se (přes zem) zpět do zdroje. Během tohoto cyklu je dioda v závěrném směru. Po vypnutí spínače cívka pořád očekává proud, který přes ni tekl. Dioda nyní začne uzavírat proudovou smyčku přes zátěž. Když se spínač ještě jednou sepne, napětí na filtru slouží k uzavření diody. Množství energie dodávané zátěži je řízeno duty cyklem. Obvykle je tento cyklus 5-95%. Vztah mezi vstupním napětím, duty cyklem a výstupním napětím je:

$$V_{out} \cong V_{in}$$
 . duty cyklus (2.28)

Ve skutečnosti tento vztah platí jen pro malé zatížení. Když je duty cyklus jedna (100%), tak se vstupní napětí  $V_{in}$  rovná výstupnímu napětí  $V_{out}$ .



Obr. 2.11: Schéma Step-down regulátoru napětí

Schéma 2.11 je možné rozdělit na dva stavy. Na prvním schématu 2.12 je nakreslen regulátor se sepnutým spínačem a na druhém schématu 2.13 je nakreslen regulátor s rozepnutým spínačem.



Obr. 2.12: Schéma Step-down regulátoru se sepnutým spínačem

Napětí na cívce při rozepnutém spínači:

$$v_L = V_g - v(t) \tag{2.29}$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$
(2.30)



Obr. 2.13: Schéma Step-down regulátoru s rozepnutým spínačem

Napětí na cívce při sepnutém spínači:

$$v_L = -v(t) \tag{2.31}$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$
(2.32)

Průběhy napětí a proudu na cívce jsou zobrazeny na obrázku 2.14



Obr. 2.14: Průběh napětí a proudu na cívce

$$(2\Delta i_L) = \left(\frac{V_g - V}{L}\right)(DT_S) \tag{2.33}$$

$$\Delta i_L = \frac{V_g - V}{2L} DT_S \tag{2.34}$$

$$L = \frac{V_g - V}{2\Delta i_L} DT_S \tag{2.35}$$

#### 2.7.2 Step-up spínaný regulátor napětí

Jedná se o regulátor zvyšující napětí. V některé literatuře se také nazývá jako boost regulátor napětí. Schéma tohoto regulátoru je na obrázku 2.15. Podle knihy [2] a článku [8] Step-down spínaný regulátor má stejné čtyři prvky jako regulátor propustný. Nyní je ale cívka umístěna mezi vstupní zdroj a vypínač, jak je znázorněno na obrázku 2.15. Anoda diody je připojena do uzlu, kde je připojen spínač a cívka. Kondenzátor je umístěn na výstup mezi katodu diody a zem. Regulátor lze rozdělit do dvou částí. První je, když je spínač sepnut, tak proud teče cívkou a energie se do ní ukládá. Potom se spínač rozepne. Vzhledem k tomu, že se proud přes cívku nemůže změnit okamžitě, obrátí se na ní napětí. To způsobí, že cívka začne přelévat energii do kondenzátoru. Toto pokračuje, dokud se všechna energie uložená v induktoru během předchozího cyklu nevyprázdní. Napětí na cívce bude větší, než vstupní napětí a toto napětí se objeví na výstupu kondenzátoru. Toto napětí je větší, než napětí vstupní. Cyklus v základním zapojení Step-up regulátoru lze měnit od 0 do 50%. To je dáno dobou potřebnou pro vyprázdnění cívky do výstupního kondenzátoru. Vztah výstupního napětí na vstupním napětí je obtížné popsat.

$$V_{out} \cong U_{in} + U_{flbk} \cong U_{in} (1 + \frac{T_{on}}{T_{flbk}})$$
(2.36)

Na minimální provozní napětí je duty cyklus 50%.



Obr. 2.15: Schéma Step-up regulátoru napětí

Schéma 2.15 lze rozdělit na dva stavy. Na prvním schématu 2.16 je nakreslen regulátor se sepnutým spínačem a na druhém schématu 2.17 je nakreslen regulátor se spínačem v rozepnutém stavu.



Obr. 2.16: Schéma regulátoru Step-up se spínačem v sepnutém stavu

Napětí na cívce 2.37 a proud kondenzátoru s malou aproximací 2.38 při rozepnutém spínači.

$$u_L = U \tag{2.37}$$

$$i_C = -\frac{U_z}{R_z} \tag{2.38}$$



Obr. 2.17: Schéma regulátoru Step-up se spínačem v rozepnutém stavu

Napětí na cívce 2.39 a proud kondenzátoru s malou aproximací 2.40 při sepnutém spínači.

$$u_L = U - U_R \tag{2.39}$$

$$i_C = i_L - \frac{U_R}{R_z} \tag{2.40}$$

#### Návrh Step-up spínaného regulátoru napětí

Pro výpočet indukčnosti je potřeba znát maximální proud, který bude přes regulátor téct. Jak je vidět z rovnice 2.42, indukčnost cívky je nepřímo úměrná zvlnění proudu. Pokud je zapotřebí zmírnit vlnění, musí se zvětšit indukčnost cívky. V praxi se tedy musí zvolit zvlnění, pro které se bude dát dopočítat rozumná indukčnost.

$$L = \frac{(U_{out} - U_{in} + U_D)(1 - D)}{\min(i_{load})f}$$
(2.41)

Velké zvlnění proudu znamená, že maximální proud cívkou je větší a hrozí tak nasycení cívky a zároveň teče větší proud i přes tranzistor. Takže při výběru cívky je nutné ověřit, že proud nasycení cívky je větší, než maximální proud, který teče cívkou. Pokud toto nebude dodrženo, může dojít k nestabilitě, a proto se volí cívka, která má dvojnásobný proud nasycení, než je maximální proud cívkou.

$$\Delta i = \frac{(U_{out} - U_{in} + U_D)T_{off}}{L} \tag{2.42}$$

#### 2.7.3 Cívka

Indukované napětí působí vždy proti změnám, které je vyvolaly (Lenzův zákon: Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.), což má za následek vznik impedance, u cívky nazývané induktance, tj. odpor cívky proti průchodu střídavého proudu. Induktance závisí přímo úměrně na indukčnosti cívky a frekvenci střídavého proudu.

## 2.7.4 Návrh spínaného regulovaného zdroje pro napájení nabíječe

Pro napájení nabíječe je použita kombinace Step-down a Step-up spínaného regulovaného zdroje zapojeného podle schématu 2.18. Jako spínač byl zvolen tranzistor IRLR3110 [15] a dioda. Tranzistor je typu mosfet a pracuje až do napětí  $V_{DSS} =$ 100V a proudu  $I_D = 63A$ . Jeho odpor v sepnutém stavu je  $R_{DS(ON)} = 14m\Omega$ . Tranzistory budou řízeny MCU a proto budou použity na jejich spínání drivery IR2101. V datasheetu je doporučený rezistor  $R_G = 25\Omega$ . Ve schématu 2.18 jsou to rezistory



Obr. 2.18: Schéma regulovaného zdroje Step-down-up

 $R_4 \ a \ R_5 = 25\Omega$ . Tranzistory budou řízeny PWM signálem z MCU. Pro dosažení požadovaného napětí a proudu budou potřeba dva regulátory, které budou měřit proud procházející cívkou a napětí na výstupu spínaného zdroje. Z žádané hodnoty a naměřených dat budou měnit střídu spínání tranzistorů a tím měnit napětí a proud na výstupu.

## 2.8 Spínací prvky

#### 2.8.1 Spínání napětí pro robota

Na spínání proudu tekoucího do robota bylo zvoleno relé, které se spíná proti výstupnímu napětí. Driver ULN2803 má otevřený kolektor a při sepnutí řídícího vstupu se tedy relé uzemní a sepne.

#### 2.8.2 Spínání napětí pro dobíjení baterie

Pro spínání byl zvolen tranzistor IRF4905 [16], který pracuje až do napětí  $V_{DSS} = -55V$  a proudu  $I_D = -74A$  a má odpor v sepnutém stavu  $R_{DS(ON)} = 20m\Omega$ . Díky takto malému odporu bude v sepnutém stavu minimální úbytek napětí na tranzistoru a proto se tranzistor bude méně zahřívat. Tranzistor je spínán obvodem ULN2803, který má na výstupu otevřený kolektor. Schéma navrženého zapojení je na obrázku 2.19. Při maximálním výstupním napětí nabíječe  $U_{out} = 28V$  a sepnutém



Obr. 2.19: Schéma spínače baterie

spínači ULN2803 lze spočítat proud tekoucí rezistorem  $R_1$ . V rovnici 2.43 je tento proud spočítán.

$$I_{R1} = \frac{U_{out}}{R_1} = \frac{28}{20.10^3} = 1,4mA \tag{2.43}$$

Výpočet výkonové ztráty na rezistoru:

$$P_{R1} = U_{out} \cdot I_{R1} = 28 \cdot 1, 4 \cdot 10^{-3} = 0,0392W$$
(2.44)

Z výpočtu 2.44 vyplývá, že výkonově postačí běžný rezistor. Dále je zapotřebí vypočítat výkonovou ztrátu na tranzistoru v sepnutém stavu. Nejprve ale musí být spočítaný napěťový úbytek na tranzistoru:

$$U_{DS} = I_o ut \cdot R_{DS(ON)} = 7,5 \cdot 20.10^{-3} = 0,15V$$
(2.45)

Výkonová ztráta na tranzistoru:

$$P_{T1} = U_{DS} \cdot I_{out} = 0,15 \cdot 7,5 = 1,125W$$
 (2.46)

Pro simulaci musel být použit jiný tranzistor s větším odporem v sepnutém stavu  $R_{DS(ON)} = 60m\Omega$  (v simulačním softwaru nebyl lepší na výběr). Na ověření funkce nemá zásadní vliv. Jen je větší úbytek napětí na tranzistoru v sepnutém stavu. Pro simulaci baterie byl použit pouze rezistor, proto aby byl jednoduše definovaný maximální proud, který může téci spínačem. Na obrázku 2.20 je schéma spínače v sepnutém stavu. Na místo obvodu ULN2803 je v simulaci použito pouze tlačítko (simulace otevřeného kolektoru). Na obrázku 2.21 je schéma spínače v rozepnutém stavu.



Obr. 2.20: Simulace spínače baterie - sepnutý



Obr. 2.21: Simulace spínače baterie - rozepnutý

## 2.9 Balancer

Díky požadavku na šetrné nabíjení baterie bude potřeba napětí mezi jednotlivými články vyrovnávat. To značně prodlouží životnost baterie. Když bude baterie nabíjena bez balanceru, tak se budou jednotlivé články baterie nabíjet nerovnoměrně a některé články se tak mohou přebíjet. Tím může dojít až k jejich zničení.

Jakmile napětí na článku klesne pod hranici 4,05V, musí začít nabíjení a balancovací tranzistor bude rozepnut. Když napětí vzroste nad 4,20V, přemostí balancovací tranzistor článek baterie a tím se článek přestane nabíjet. Zabrání se tak přebíjení jednotlivých článků. Na schématu 2.22 je nakresleno zapojení balanceru.

Rezistory  $R_1,\ R_2$ a trim<br/>r $R_3$ určují jaké napětí bude na řízené zenerově diodě



Obr. 2.22: Schéma balanceru

VR1. Toto napětí se vypočítá podle vztahu 2.47

$$U_{VR1} = 2, 5.(1 + \frac{R_1}{R_2}) \tag{2.47}$$

Po dosazení hodnot rezistorů do vztahu 2.47 dostaneme minimální a maximální referenční napětí podle polohy trimru  $R_3$ . Minimální napětí je vypočítáno v rovnici 2.48 a maximální napětí je vypočítáno v rovnici 2.49.

$$U_{VR1min} = 2, 5.(1 + \frac{15}{24,7}) = 4,01821V$$
(2.48)

$$U_{VR1max} = 2, 5.(1 + \frac{19,7}{20}) = 4,9625V$$
(2.49)

Před začátkem prvního nabíjení je tedy důležité trimrem  $R_3$  nastavit napětí baterie na 4,20V a to na všech článcích baterie.

Při vypnutí nabíječe bude balancer odebírat proud z každého článku:

$$I_{Bal} = \frac{U_{cell}}{R_1 + R_3 + R_2} = \frac{4,2}{15.10^3 + 4.7.10^3 + 20.10^3} = 106\mu A$$
(2.50)

Při použití baterie o kapacitě 4800mAh je teoretická doba vybití při připojeném balanceru:

$$Cas \ vybiti = \frac{kapacitabaterie}{I_{Bal}} = \frac{4800}{0,106} = 45283 \ hodin$$
(2.51)

Balancer tedy může být trvale k baterii připojený. Jak je popsáno v kapitole 1.2 baterie se může samovolně vybít za 500hodin.

# 3 MIKROKONTROLER

Pro řízení celého nabíječe bude použit MCU ATmega16M1. Microkontroler je založen na architektuře RISC, má 16kbajtu programovatelné flash paměti. Tento microcontroler byl zvolen hlavně proto, že má 64MHz PWM modul. Takt MCU pro prováděné instrukce je sice 16MHz, ale periferie běží na 64MHz kvůli implementované násobičce kmitočtu. Parametry MCU:

- provozní napětí: 2,7 5,5V
- $\bullet\,$  provozní teplota -40 °C až+85 °C
- rychlost jádra až 16MHz
- modul rychlého PWM (32MHz, 64MHz) při taktu procesoru 16MHz
- CAN 2.0A/B sériové rozhraní s certifikací ISO 16845
- UART sériové rozhraní
- jedno master/slave SPI sériové rozhraní
- $\bullet~8$ a 16 bitový čítač/časovač s předděličkou
- $\bullet\,$  10 bitový analogově digitální převodník ADC multiplexovaný do 11 kanálů
- čtyři analogové komparátory
- přerušení a Wake-up při změně hodnoty na pinu
- teplotní senzor implementovaný na čipu MCU

# 3.1 Modul A/D převodníku

V MCU je 10-bitový analogově digitální převodník s postupnou aproximací. Dále už jen A/D převodník. Podle [12] trvá konverze A/D převodníku  $8\mu s - 250\mu s$  a je multiplexován do jedenácti kanálů. Převod může být spuštěn buď manuálně (nastavením speciálního bitu) nebo může být vyvolán automaticky nějakou událostí (přetečení timeru, dokončení analogového komparátoru nebo synchronizováno s PSC modulem).

# 3.2 Modul PWM

Podle datasheetu [12] pulsně šířková modulace (Pulse Width Modulation), neboli PWM signál nabývá pouze dvou stavů, logické nuly a logické jedničky (0V a 5V). Informace je zakódována v poměru mezi dobou, po kterou je signál v logické jedničce a logické nule během jedné periody. Tomuto poměru se říká střída. Jak tento signál vypadá, je ukázáno na obrázku 3.1. PWM modulace se často používá pro řízení tranzistoru, který se při různé střídě otevírá a zavírá. Tranzistor má tak malé teplotní ztráty v režimu, kdy je plně sepnutý nebo rozepnutý a proto se PWM modulace s oblibou používá.



Obr. 3.1: Princip PWM modulace

### 3.3 Sériové sběrnice RS-485

Jedná se o sériovou asynchronní sběrnici. Podle [17] RS-485 je tvořeno jedním párem vodičů, které se obvykle značí A a B nebo alternativně + a -. Maximální délka vodičů této sběrnice by neměla přesáhnout 1200m. V klidovém stavu by na vodiči B mělo být větší napětí než na vodiči A. U spojů řádově do 10m lze dosáhnout přenosové rychlosti až 10Mb/s. Přijímač rozlišuje logický stav 0 a 1 při rozdílu napětí A - B > +200 mV je stav vyhodnocen jako 0 a při rozdílu napětí A - B < -200 mV je vyhodnocen stav 1. Vysílač by měl v klidu (log. 1) generovat na vodiči B -2V a na vodiči B +2V. Při logické 0 by měl generovat na vodiči A +2V a na vodiči B -2V. Jeden rámec pro přenos dat je stejně jako u RS-232 7 nebo 8 bitový se startbitem jedním nebo více stopbity a možností přenášet i paritní bit. Startbit je logická nula, stopbit je logická jednička. Na obrázku 3.2 je ukázka přenosu jednoho rámce.



Obr. 3.2: Jeden rámec přenosu RS-485 [17]

Na obrázku v přílohách B.3 je snímek vyrobeného převodníku USB na RS485.

## 3.4 Modul CAN sériového rozhraní

Podle datasheetu [12] je sběrnice tvořená dvouvodičovým vedením. CAN je zkratka Controller Area Network. Signálové vodiče se často značí CAN\_H a CAN\_L a jsou zakončeny zakončovacími rezistory 120Ω. Ke sběrnici se připojují jednotlivá zařízení. Sběrnicí se přenáší dva logické stavy, aktivní a pasivní. Dominantní (aktivní) stav představuje logickou 0, recesivní (pasivní) stav představuje logickou 1. Sběrnice je v dominantním stavu, je-li alespoň jedno její zařízení v dominantním stavu. V recesivním stavu je sběrnice tehdy, když všechny její zařízení jsou v recesním stavu. V recesivním stavu je rozdíl napětí mezi vodiči CAN\_H a CAN\_L nulový. Dominantní stav je reprezentován nenulovým rozdílem napětí. Spínače signálových vodičů jsou konstruovány tak, aby v dominantním stavu na vodiči CAN\_H bylo napětí v rozsahu 3,5 až 5V, na vodiči CAN\_L napětí v rozsahu 0 až 1,5V. V recesivním stavu je napětí vodičů CAN\_H a CAN\_L stejné. Na obrázku 3.3 jsou znázorněny napěťové úrovně logických stavů na sběrnici CAN.



Obr. 3.3: Obrázek napěťových úrovní sériové sběrnice CAN

Maximální rychlost přenosu je 1Mbit/s při délce sběrnice do 40m. Při délce 130m klesá na 500kbit/s, pro délku 560m na 125kbit/s a při délce 3,3km je její hodnota jen 20kbit/s. Komunikace na sběrnici CAN probíhá tak, že každý uzel může využívat sběrnici pro vysílání zpráv. Zpráva vysílaná po sběrnici obsahuje identifikační číslo vysílajícího uzlu. Identifikátor definuje nejen obsah zprávy, ale i prioritu přístupu na sběrnici. Tímto způsobem je možno zaslat zprávu z jednoho uzlu do jiného uzlu nebo několik jiných uzlů současně. Komunikační síť CAN může pracovat jak v režimu multi-master (více nadřízených uzlů) nebo v režimu masterslave (jeden uzel nadřízený a více podřízených uzlů).

## 3.5 Modul PSC

Podle datasheetu [12] má PSC modul rozlišení až 12bitů a taktovací frekvenci PWM až 64MHz. PSC má 6 výstupů, se kterými je možno ovládat až tři poloviční mosty

pro řízení asynchronních motorů. PSC má také 3 vstupy, které se obvykle používají na rychlé zastavení ovládaných motorů. Tento modul je založen na 12 bitovém čítači, který může čítat ve dvou režimech (Ramp Mode nebo Centered Mode). V režimu Ramp Mode čítač čítá do nejvyšší hodnoty nastavené v registru POCRnRB a poté se čítač restartuje (vynuluje), jak je znázorněné na obrázku 3.4. V režimu Centered Mode čítač čítá také do nejvyšší hodnoty nastavené v registru POCRnRB a následně se nerestartuje, ale začne se odpočítávat zpět do maximální hodnoty, jak je znázorněné na obrázku 3.5. Z toho plyne, že je tento mód pomalejší.



Obr. 3.4: Ukázka jednoho cyklu čítače PSC v Ramp Mode režimu [12]



Obr. 3.5: Ukázka jednoho cyklu čítače PSC v Centered Mode režimu [12]

Přesné průběhy jednotlivých signálu lze nastavit registry (POCRnSA, POCRnRA, POCRnSB, POCR\_RB). V Ramp Mode mohou být všechny hrany výstupních A a B signálů zarovnány, když nastavíme stejnou hodnotu do vyhrazených registrů. Na obrázku 3.6 je vidět jak jsou generovány výstupní signály v Ramp Mode.

Jednotlivé časy zapnutí a vypnutí signálu v Ramp Mode lze vypočítat následovně:

$$On - TimeA = (POCRnRAH/L - POCRnSAH/L) \times 1/Fclkpsc$$
(3.1)

$$On - TimeB = (POCRnRBH/L - POCRnSBH/L) \times 1/Fclkpsc$$
(3.2)

$$Dead - TimeA = (POCRnSAH/L + 1) \times 1/Fclkpsc$$
(3.3)



Obr. 3.6: Generování výstupního signálu A a B v Ramp Mode režimu [12]

$$Dead - TimeB = (POCRnSBH/L - POCRnRAH/L) \times 1/Fclkpsc \qquad (3.4)$$

V Center Mode režimu je všech 6 výstupů zarovnáno do středu jednoho cyklu. V tomto režimu je frekvence PWM dvakrát menší, než u Ramp Mode. Na obrázku 3.7 je vidět jak jsou generovány výstupní signály v Center Mode.

Jednotlivé časy zapnutí a vypnutí signálu v Center Mode lze vypočítat následovně:

$$On - Time0 = 2 \times POCRnSAH/L \times 1/Fclkpsc$$

$$(3.5)$$

 $On - Time 1 = 2 \times (POCRnRBH/L - POCRnSBH/L + 1) \times 1/Fclkpsc \quad (3.6)$ 

$$Dead - Time = (POCRnSBH/L - POCRnSAH/L) \times 1/Fclkpsc$$
(3.7)

$$PSC \ Cycle = 2 \times (POCRnRBH/L + 1) \times 1/Fclkpsc$$
(3.8)



Obr. 3.7: Generování výstupního signálu A a B v Center Mode režimu [12]

# 4 MĚŘENÍ PROUDU

Proud měříme podle schématu 2.7 a podrobný popis zapojení a výpočtů je v kapitole 2.5. Výpočet maximálního proudu cívkou je v MCU proveden pomocí makra, kde vstupní parametr (num) je hodnota A/D převodníku a návratová hodnota je proud v mA.

#define ntoi(num) (((((num\*5)/1.024)-1029)/22.28)/0.01)

## 4.1 Určení doby startu měření proudu

Pro určení doby startu měření proudu byl změřen proud cívkou na vyrobené demo desce (snímky B.1 a B.2 v příloze). Pomocí osciloskopu Agilent 54622D s pracovní frekvencí do 100MHz s.n. MY40007131, první měřící sondy Agilent N2862A 10:1  $10M\Omega$  15pF a druhé měřící sondy Agilent 10074C 10:110 $M\Omega$  15pF byl změřený průběh proudu, jak je vidět na obrázku 4.1. Následující měření, obrázek 4.2, zobrazuje také proud induktorem a průběh signálu PSC, tak aby bylo vidět, že cívka se nabíjí pouze po dobu sepnutí tranzistoru.



Obr. 4.1: Snímek z osciloskopu - měření proudu

Pohle datasheeatu [12] bude převod AD převodníku s nastavením ADPS = 3, to je předdělička frekvence A/D převodníku s dělícím poměrem 8. ADHSM = 1je nastavení vysokorychlostního režimu A/D převodníku vyšší než 200kHz. Doba převodu je 20µs. Na obrázku 4.1 je horní křivka proud induktorem a spodní začátek převodu A/D převodníku. Kurzory jsou nastavené tak, aby ukazovaly, že A/D převod začíná 20µs před maximálním proudem A/D převodníku tak, aby byl změřen co nejpřesněji maximální proud induktorem.



Obr. 4.2: Snímek z osciloskopu - proud cívkou a PSC signál

# 4.2 Výpočet výstupního proudu

Jelikož pracujeme v Center Modu, podrobný popis v kapitole 3.5, bude se proud počítat z časů PSC a z maximálního proudu induktoru podle rovnic 3.5, 3.6, 3.7 a rovnice 3.8 určíme všechy potřebné časy PSC. Pomocí těchto rovnic se dá spočítat doba, po kterou byl PSC výstup v logické jedničce. Dostaneme údaj o délce nabíjení induktoru a maximálním proudu tekoucím přes induktor a z tohoto jde následně vypočítat obsah trojúhelníku a tím i energii, která se přenese z induktoru do výstupního kondenzátoru. Při výpočtu výstupního proudu musí být brán úvahu také poměr vstupního a výstupního napětí.

$$S_{I_C} = I_{out} \cdot PSC \ Cycle \tag{4.1}$$

$$S_{I_L} = \frac{ON - TIME \cdot I_{p-p}}{2} \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}}$$

$$\tag{4.2}$$

Obě plochy se musejí rovnat:

$$I_{out} \cdot PSC \ Cycle = \frac{ON - TIME \cdot I_{p-p}}{2} \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}}$$
(4.3)

Vyjádříme maximální proud cívkou:

$$I_{p-p} = \frac{2 \cdot I_{out} \cdot PSC \ Cycle}{ON - TIME} \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}}$$
(4.4)

Perioda PSC je vypočtena podle rovnice 3.8:

$$PSC \ Cycle = 2 \ . \ (4096 \ + \ 1) \ . \ \frac{1}{64.10^6} = 128.03\mu s \tag{4.5}$$

Čas, po který je tranzistor sepnutý, vypočítáme podle rovnice 3.6, kde value je hodnota nastavna v PSC:

$$ON - TIME = 2 \cdot (4096 - 4096 + value - 64 + 1) \cdot \frac{1}{64.10^6}$$
 (4.6)

#### 4.2.1 Přepočet proudu cívkou na výstupní proud v MCU

Při výpočtu výstupního proudu se bude muset v MCU počítat pouze s čísly typu int (rychlejší výpočet), protože s float nebo s double by nebylo možné přepočítávat potřebnou rychlostí, musí se upravit samotný výpočet. Po úpravě nebude výpočet úplně přesný, ale to nám při nabíjení nebude tolik vadit. Celý výpočet se provede v unsigned int (hodnoty 0-65536) a výsledek je přetypován zpátky na int (hodnoty  $\pm 32768$ ). Dosazením do rovnice 4.4 dostaneme:

$$I_{p-p} = \frac{2 \cdot I_{out} \cdot 2 \cdot (4096 + 1) \cdot \frac{1}{64 \cdot 10^6} \cdot U_{in}}{2 \cdot (4096 - POCR0SB + 1) \cdot \frac{1}{64 \cdot 10^6} \cdot U_{out}}$$
(4.7)

Po vykrácení, zaokrouhlení a rozměrových úpravách čísel tak, aby se při výpočtech vždy vešly do rozsahu čísel unsigned int, bude výsledná rovnice:

$$I_{p-p} = \frac{8 \cdot I_{out} \cdot U_{in}}{4 \cdot U_{out} - \frac{(POCR0SB/10)(U_{out}/10)}{10}}$$
(4.8)

Výstupní proud  $I_{out}$  je zadáván ve stovkách mA pokud chceme zadat výstupní proud 200mA za  $I_{out}$  dosadíme hodnotu 2. Program pro MCU bude vypadat následovně:

```
int iouttoipp(unsigned int iout)
{
    unsigned int vysledek,c1,c2;
    c1=8*iout*(unsigned int)ad_u_in;
    c2=((4*(unsigned int)ad_u_out)-(((unsigned int)POCR0SB/10)*
        ((unsigned int)ad_u_out/10)/10));
    vysledek=c1/c2;
    if(vysledek>=32767)vysledek=32767;
    return (int)vysledek*100;
}
```

# 5 NÁVRH REGULÁTORŮ SPÍNANÉHO ZDROJE

Blokový obrázek zpětnovazební regulace 5.1. Soustava Fs je navrhovaný spínaný zdroj. Regulátory Fr se musejí navrhnout pro regulaci napětí a regulaci proudu. Podrobný návrh v kapitolách 5.1 a 5.2. Zpětná vazba regulátoru napětí je měřené napětí na výstupu. Pro regulaci proudu je výstupní proud vypočítaný z maximálního proudu tekoucího cívkou a poměru vstupního a výstupního napětí.



Obr. 5.1: Blokový obrázek zpětnovazební regulace

## 5.1 Regulátor napětí

Pro návrh regulátoru napětí bylo nejdříve potřeba identifikovat soustavu, která se bude regulovat. Proto byl napsán program, který v definovaném čase na vstup soustavy pustil jednotkový skok a přesně každých 64ms změřil hodnotu na výstupu. Měření proběhlo osmsetkrát a na obrázku 5.2 je vidět graf jednotkového skoku (zelená křivka) a naměřených dat (červená křivka).

Dále bylo potřebné naměřenou křivku aproximovat. Aproximace byla provedena pomocí soustavy prvního řádu rovnice 5.1. Z grafu 5.2 lze odečíst, že  $\Delta y = 0,795 \ a \ \Delta u = 1.$ 

$$F_s = \frac{K_0}{Tp+1} \tag{5.1}$$

Dále je potřeba vypočítat zesílení  $K_0$ .

$$K_0 = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{0.795}{1} = 0.795 \tag{5.2}$$

Časovou konstantu vypočítáme jako 0,632 $\Delta y = 0,632 \cdot 0,795 = 0,50244$  a pro tuto hodnotu odečteme z grafu 5.2 hodnotu času, tato hodnota vychází 4,032ms. Výsledný přenos soustavy je tedy:

$$F_s = \frac{K_0}{Tp+1} = \frac{0,795}{4,032p+1} \tag{5.3}$$

Přenos soustavy 5.3 byl dále odsimulován v programu Matlab a hodnoty byly vykresleny do grafu 5.2 (modrá křivka). Aproximace není úplně ideální, lepších výsledků by



Obr. 5.2: Graf přechodové charakteristiky regulátoru napětí

se dalo dosáhnout aproximací funkcí vyššího řádu, ale pro návrh regulátoru napětí bude dostačující.

Protože při použití P regulátoru nebyla ustálená odchylka nulová, bylo zapotřebí do regulátoru přidat I složku, která vyreguluje ustálenou odchylku na nulu. Bylo tedy potřeba navrhnout PI regulátor. Pro návrh PI regulátoru napětí byla použita metoda frekvenčních charakteristik. Nejprve bylo potřeba vypočítat  $|F_s|_{dB}$  pro nakreslení frekvenční charakteristiky:

$$|F_s|_{dB} = 20\log(0,795) - 20\log(\omega) - 20\log\sqrt{4,032^2\omega^2 + 1}$$
(5.4)

Výpočty pro sestrojení frekvenční charakteristiky pro $\omega=0,01$ je:

$$|F_s|_{dB} = 20\log(0,795) - 20\log(0,01) - 20\log\sqrt{4,032^20,01^2 + 1} = -1,9997dB$$
(5.5)

pro  $\omega = 0, 1$  je:

$$|F_s|_{dB} = 20\log(0,795) - 20\log(0,1) - 20\log\sqrt{4,032^20,1^2 + 1} = -2,6dB \quad (5.6)$$

pro $\omega=0,248$ je:

$$|F_s|_{dB} = 20\log(0,795) - 20\log(0,248) - 20\log\sqrt{4,032^20,248^2 + 1} = -5dB \quad (5.7)$$

pro  $\omega = 1$  je:

$$|F_s|_{dB} = 20\log(0,795) - 20\log(1) - 20\log\sqrt{4,032^21^2 + 1} = -14,4dB$$
(5.8)

pro  $\omega = 10$  je:

$$|F_s|_{dB} = 20\log(0,795) - 20\log(10) - 20\log\sqrt{4,032^210^2 + 1} = -34,1dB \quad (5.9)$$

Asymptotická frekvenční charakteristika je na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Asymptotická frekvenční charakteristika soustavy

Dále je potřeba přidat k soustavě jeden pól v nule, který způsobí sklon -20dB/dek.

$$F_s = \frac{0,795}{p(4,032p+1)} \tag{5.10}$$

Asymptotická frekvenční charakteristika je na obrázku 5.4. Obecný přenos PI regulátoru je:

$$F_r = K \frac{T_I p + 1}{p} \tag{5.11}$$

Nula regulátoru, která způsobí srovnání frekvenční charakteristiky o +20dB/dek, byla zvolena  $T_I = 0, 5$ . Asimptotická frekvenční charakteristika otevřené smyčky  $F_0$ je vykreslena na obrázku 5.5 a přenos je v rovnici 5.12.

$$F_0 = K \frac{0,3975p + 0,795}{p(4,032p + 1)}$$
(5.12)

Zesílení K musí posunout frekvenční charakteristiku tak, aby na  $\omega_{rezu}$  byl sklon -20dB/dek alespoň po jednu dekádu. Spočítáme  $|F_s|_{dB}$  pro  $\omega = 0,248$  a pro  $\omega = 2$ :

$$|F_s|_{dB} = 20\log(\sqrt{0,3975^2\omega^2 + 0,795}) - 20\log(\omega) - 20\log\sqrt{4,032^2\omega^2 + 1}$$
(5.13)

Pro  $\omega = 0,248$  vyjde  $|F_s|_{dB} = 8,16dB$  a pro  $\omega = 2$  vyjde  $|F_s|_{dB} = -22,67dB$ . Protože je potřeba, aby regulátor měl malý překmit a nebude vadit, že je pomalý,



Obr. 5.4: Asymptotická frekvenční charakteristika soustavy s přidanou nulou



Obr. 5.5: Asymptotická frekvenční charakteristika soustavy s PI regu<br/>átorem se zesílením 1

budeme volit $\omega_{rezu}$ doleva od pólu soustavy. Zesílením bude charakteristika posunuta tak, aby byla  $\omega_{rezu}$  o8dBv levo od nuly soustavy.

$$PosunvdB = -(8, 16 + 8) = -16, 16 \tag{5.14}$$

Potom zesílení bude:

$$K = 10^{-\frac{16,16}{20}} = 0,156 \tag{5.15}$$

Výsledný PI regulátor je tedy:

$$F_r = 0,156 \frac{0,5p+1}{p} \tag{5.16}$$

Odezva na jednotkový skok a na poruchu je na obrázku 5.6. Z přechodové charak-



Obr. 5.6: Přechodová charakteristika - Matlab

teristiky je vidět, že se soustava ustálí za 40s a má překmit necelých 5%. Pokud by bylo  $\omega_{rezu}$  o 8dB v pravo od pólu regulatoru, zesílení by tak vyšlo K=34,17 a soustava by se ustálila do 4s, ale překmit by byl 60%. Takový překmit není pro nabíjení vhodný.

#### 5.1.1 Program PI regulátoru

Vstupní parametr do funkce PI regulátoru je int w (žádaná hodnota). Regulátor musí být volán v přesných časových úsecích. Přesnou dobu zajistíme přerušením od časovače. Podle [7] lze nejjednodušeji získat tvar PS regulátou nahrazením integrační složky numerickou integrací (sumací). Při výpočtu integrace počítáme plochu pod regulační odchylkou jako součet obdélníků, musíme sumaci násobit vzorkovací periodou. Rovnice PS regulátoru má tvar:

$$u(k) = K\left(e(k) + \frac{T_S}{T_I} \sum_{i=1}^k e(k)\right)$$
(5.17)

Diskrétní přenosová funkce PS regulátoru:

$$F_R(z) = K\left(1 + \frac{T_S}{T_I} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}\right)$$
(5.18)

V PS regulátoru musí být omezený akční zásah a sumační složka, jinak by mohlo dojít k přetečení proměnné a tedy ke špatnému výpočtu kroku regulace.

float $k = 0.16$ , Ti = 0.5;	//nastavení zesílení a časové
	konstanty regulátoru
E=w-zp_vaz;	//odchylka je žádaná hodnota mínus
	změřené napětí na výstupu
U=k*E+sum;	//hodnota výstupu (PSC) je zesílení
	regulátoru krát odchylka plus
	integrační složka regulátoru
$\operatorname{sum}=\operatorname{sum}+k*(\operatorname{Ts}/\operatorname{Ti})*E;$	//integrační (sumační) část
	regulátoru
${\rm if}({\rm U}>~1000){\rm U}=~1000;$	//omezení maximální hodnoty výstupu
	výstupu
${\rm i}f(U<0)\   U=0;$	//omezení minimální hodnoty
	výstupu
if(sum > 1000) sum = 100	00;//omezení maximální hodnoty
	integrační složky
$\mathrm{i}\mathrm{f}(\mathrm{sum}\ <\ -1000)\ \mathrm{sum}\ =\ -$	1000;//omezení minimální hodnoty
	integrační složky
$psc\_set(U);$	$//{\rm nastaven}$ í hodnoty PSC modulu
$ad_read(ADC6);$	//měření výstupního napětí
return zp_vaz;	

Na obrázku 5.7 je blokové schéma regulátoru PI. Toto schéma je upravené schéma PID regulátoru ze skript [7].



Obr. 5.7: Blokové schéma regulátoru PI

# 5.2 Regulátor proudu

Pro regulaci proudu je zvolen I regulátor s omezením integrační složky a hysterézí.

### 5.2.1 Program I regulátoru

Hodnotu proudu, který chceme nastavit, zadáme do proměnné max\_curr\_pp.

- $if(proud>max_curr_pp+2)$ psc\_set(value\_pok--);
- $if(proud{<}max\_curr\_pp{-}2)$ 
  - $psc\_set(value\_pok++);$

Jestliže je hodnota proudu vyšší než nastavená plus (hysteréze) dvě, je hodnota PSC snížena o jedničku a pokud je hodnota proudu menší než nastavená mínus (histeréze) dvě, je hodnota PSC zvíšena o jedničku.

# 6 POSTUP NABÍJENÍ BATERIE

# 6.1 Olovo-kyselinová baterie pbq 5,2-12U - vlastnosti

Program pro nabíjení je navržen pro nabíjení baterie Sealed Lead 12V 5,4*A*h. Jedná se o bezúdržbovou gelovou baterii. Snímek baterie je na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Snímek baterie pbq 5,2-12U

Parametry baterie:

- napětí 12V
- kapacita 5,2Ah
- vnitřní odpor při plném nabití je  $21m\Omega$

Při nabíjení konstantním napětím je počáteční nabíjecí proud menší než 1,56A.

# 6.2 Li-pol baterie KOKAM - vlastnosti

Parametry baterie ve stavu nabití:

- kapacita 4800mAh
- maximální proud 9,6A
- napětí na článek  $4, 2V \pm 0, 03V$

Parametry baterie ve stavu vybití:



Obr. 6.2: Baterie Kokam 4800mAh - cell



Obr. 6.3: Baterie Kokam 4800 $mA{\rm h}$  - pack

- stejnosměrný proud 96,0A
- špičkový proud 192,0A
- napětí při zkratu 2,7V

Pracovní teplota:

- při nabíjení 0-40°C
- při vybíjení -20-60°C

# 6.3 Popis vlastního nabíjení

Podrobný popis vlastního nabíjení je popsán v kapitole 1.1 a v kapitole 1.2. Podle [9] baterie bude nabíjena ve dvou fázích, jak je zobrazeno na obrázku 6.4. V první fázi se bude baterie nabíjet konstantním proudem o maximální velikosti 1*C* (kapacita baterie, nebo maximální povolený dobíjecí proud doporučený výrobcem), až do dosažení napětí 4,20*V*/článek  $\pm 0,05V$ /článek. Napětí by mělo být měřeno přímo na svorkách baterie (větší přesnost měření). Jakmile je dosaženo toto napětí, může nabíjení přejít do druhé fáze. V této fázi se musí udržovat konstantní napětí a tím jak se bude baterie nabíjet, bude nabíjecí proud exponenciálně klesat.



Obr. 6.4: Nabíjení lithiových baterií [9]

Vývojový diagram programu pro nabíjení Li-Pol baterie je na obrázku 6.5.



Obr. 6.5: Vývojový diagram pro nabíjení Li-Pol baterie

# 7 PROGRAM

Na obrázku 7.1 je vývojový diagram programu pro MCU.



Obr. 7.1: Vývojový diagram hlavní části programu

Po startu programu budou nastaveny všechny potřebné registry pro používání UART modulu, PSC modulu, A/D převodníku a časovače včetně jejich přerušení. Hlavní částí bude přesné přerušení od timeru po 0.5s, ve kterých se bude volat regulátor. Jednou za 5s se střídavě naměří a pošlou hodnoty napětí jednotlivých článků baterie.

# 8 MODULÁRNOST

Jelikož je potřeba aby byl v budoucnu nabíječ použitelný i na větší baterie (více článkové), bude navržen tak, aby byl modulární. Hardwarově se určí jeden modul, který bude master a ostatní se budou chovat jako slave. Master bude řídit celé nabíjení a slavey budou pouze posílat naměřená data a řídit nabíjení podle instrukcí masteru. Blokové schéma je na obrázku 8.1.



Obr. 8.1: Blokové schéma modulů nabíječe

Jednotlivé moduly by mezi sebou měly komunikovat pomocí sériového rozhraní CAN, které bude implementováno do MCU a bude galvanicky odděleno přes optočleny.

# 9 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout nabíječ pro baterie. Nejprve jsem navrhl blokové schéma celého nabíječe. Následně jsem vybral microprocesor podle požadavku na rychlý PWM modul, sériovou sběrnici CAN, minimálně 10bitové A/D převodníky a potřebný počet analogových I/O vstupů. Potom jsem začal postupně navrhovat a počítat jednotlivé bloky nabíječe. Podařilo se mi navrhnout přepínání a následné měření jednotlivých článků baterie. Poté jsem navrhl obvody pro úpravu napětí vhodného pro MCU. Funkci jednotlivých obvodů jsem postupně zkoušel na nepájivém poli a v simulačním softwaru Multisim. Dále jsem navrhl spínaný zdroj a jednotlivé spínací prvky použité v nabíječi. Následně jsem zkonstruoval demo desku, snímek je v příloze B.1 a B.2. Na této demo desce jsem odladil regulátory napětí a proudu. Funkci regulátoru jsem si nejprve ověřil v programu Matlab a následně na demo desce. Nakonec jsem navrhl doporučený plošný spoj. Podklady k jeho výrobě jsou v příloze A.2, A.3, A.4 a A.5.

Nabíječ může být použit v mobilním, ale i stacionárním robotu napájeným z olověných, popřípadě i lithiových článků. Umožní provoz z externího zdroje, při kterém se bude šetrně dobíjet baterie robota a tím se prodlouží její životnost. V této fázi je nabíječ navržen hardwarově a částečně i softwarově.

Později se budu věnovat hlavně realizaci softwaru. Hadware bude rozšířen jen o potřebné měření teploty, galvanické oddělení sériové sběrnice CAN kvůli modulárnosti a switchem pro přepínání mezi řídícím a řízeným modulem.

Lze říci, že byly splněny všechny body zadání, nabíječ může být trvale připojen do robota a je nezávislý na vstupním napětí. Při odpojení vstupu odebírá zanedbatelný proud z baterie, měří a posílá hodnoty napětí jednotlivých článků baterie po sériové lince.

## LITERATURA

- CROMPTON, T. R. Battery Reference Book (3rd ed.), 2000, 774 stran, ISBN 07506 4625 X
- [2] BROWN, M. Practical Switching Power Supply Design(1990),
- [3] Lithium polymerová baterie (Lipo) průvodce [online]. Dostupné z URL: <a href="http://prototalk.net/forums/showthread.php?t=22>">http://prototalk.net/forums/showthread.php?t=22></a>.
- [4] CECH J. *Olověné akumulátory*, 2004, [online]. Dostupné z URL: <a href="http://fabia.joy.sweb.cz/strana\_4.html">http://fabia.joy.sweb.cz/strana\_4.html</a>
- [5] BUCHMANN *Lithium-iontová polymerová baterie* [online]. Dostupné z URL: <a href="http://www.buchmann.ca/Chap4-page8.asp">http://www.buchmann.ca/Chap4-page8.asp</a>
- [6] PATOČKA M., VOREL P. Řídící elektroinka aktivni obvody, Skriptum, Brno 2004, 154 stran
- [7] VELEBA V. Číslocová řídící technika počítačová cvičení, Skriptum, Brno 2005, 77 stran
- [8] Daycounter, 2004 Boost Switching Converter Design Equations [online]. Dostupné z URL: <http://www.daycounter.com/LabBook/BoostConverter/Boost-Converter-Equations.phtml>
- [9] SIMPSON, CH. Battery charging. National Semiconductor. 1998. [online]. Dostupné z URL: <a href="http://www.national.com/appinfo/power/files/f7.pdf">http://www.national.com/appinfo/power/files/f7.pdf</a>
- [10] wiki *Lithium-iontová polymerová baterie* [online]. Dostupné z URL: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\_polymer\_battery"></a>
- [11] Horowitz P., Hill W. The art of electronics, 1994, 1025 stran, ISBN 0-521 -37095-7
- [12] Atmel Corporation, 2010 *ATmegaAutomotive* [online]. Dostupné z URL: <a href="http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\_documents/doc7647.pdf">http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\_documents/doc7647.pdf</a>
- [13] Texas instruments *Datasheeat TLC272CD* [online]. Dostupné z URL: <a href="http://www.ges.cz/sheets/t/tlc272.pdf">http://www.ges.cz/sheets/t/tlc272.pdf</a>>
- [14] Burr-Brown Datasheeat OPA344UA [online]. Dostupné z URL: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/56765/BURR-BROWN/OPA344UA.html >

- [15] International Rectiffler Datasheeat IRLR3110 [online]. Dostupné z URL: <a href="http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlr3110zpbf.pdf">http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlr3110zpbf.pdf</a>>
- [16] International Rectiffler Datasheeat IRF4905 [online]. Dostupné z URL: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf4905s.pdf >
- [17] wiki RS-485 [online]. Dostupné z URL: <br/> <br/> <br/> <br/> <br/> <br/> kipedia.org/wiki/RS-485>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- M mega
- k kilo
- m mili
- $\mu$  micro
- p piko
- s sekunda
- V volt
- A ampér
- F farad
- Hz herc
- Wh/kg watt hodina na kilogram
- °C stupeň celsia
- Ah ampér hodina
- W watt
- h hodina
- $g/cm^3\,$ gram na centimetr krychlový
- $\Omega$  ohm
- dB decibel
- MCU microcontroller
- PWM pulzně šířková modulace
- PSC Power Stage Controller
- b bit
- UART universal asynchronous receiver/transmitter
- RISC Reduced Instruction Set Computer
- CAN Controller Area Network

# SEZNAM PŘÍLOH

$\mathbf{A}$	Schémata							
	A.1	Celkové schéma nabíječe	62					
	A.2	Motiv plošného spoje - spodní strana	63					
	A.3	Motiv plošného spoje - horní strana	63					
	A.4	Osazení plošného spoje - spodní strana	64					
	A.5	Osazení plošného spoje - horní strana	64					
Б	ID- 41		05					
В	3 Fotky demo desky							

# A SCHÉMATA

# A.1 Celkové schéma nabíječe



Obr. A.1: Celkové schéma nabíječe

# A.2 Motiv plošného spoje - spodní strana



Obr. A.2: Motiv plošného spoje - spodní strana

# A.3 Motiv plošného spoje - horní strana



Obr. A.3: Motiv plošného spoje - horní strana

# A.4 Osazení plošného spoje - spodní strana



Obr. A.4: Osazení plošného spoje - spodní strana

# A.5 Osazení plošného spoje - horní strana



Obr. A.5: Osazení plošného spoje - horní strana

# **B** FOTKY DEMO DESKY



Obr. B.1: Fotka demo desky - horní strana



Obr. B.2: Fotka demo desky - spodní strana



Obr. B.3: Fotka převodníku USB na $\operatorname{RS485}$