

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

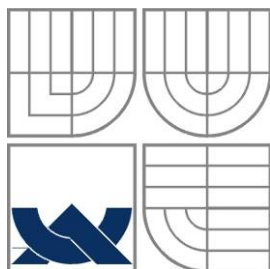
TRAKČNÍ AKUMULÁTOR LI-ION 28V/40AH S VESTAVĚNÝMI OCHRANNÝMI A OVLÁDACÍMI PRVKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Robert Kovář

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

TRAKČNÍ AKUMULÁTOR LI-ION 28V/40Ah S VESTAVĚNÝMI OCHRANNÝMI A OVLÁDACÍMI PRVKY

**TRACTION LI-ION ACCUMULATOR 28V/40AH WITH INTERNAL PROTECTING AND CONTROL
CIRCUITS**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

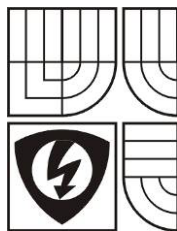
Robert Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Robert Kovář

ID: 78518

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Trakční akumulátor Li-ion 28V/40Ah s vestavěnými ochrannými a ovládacími prvky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se u vedoucího práce s vyvinutým zapojením ochranných a ovládacích prvků pro trakční akumulátor 28V/40Ah.
2. Podle pokynů vedoucího projektu navrhnete a realizujete konstrukční uspořádání článků akumulátoru a všech elektronických obvodů.
3. Oživte elektronické obvody a uveďte akumulátor do praktického provozu..

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 27.05.2010

Vedoucí projektu: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO
uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Robert Kovář

Bytem: Javořinská 2101 Uherský Brod

Narozen/a (datum a místo): 17.03.1977, Uherské Hradiště,

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá
elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako *Semestrální projekt 1*
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:

Trakční akumulátor Li-ion 28V/40Ah s vestavěnými
ochrannými a ovládacími prvky

Vedoucí/ školitel VŠKP:

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Ústav:

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

tištěné formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

elektronické formě – počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užit, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29.5.2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tato práce je návrhem a konstrukčním řešením soustavy akumulátoru Li-Ion + inteligentní nabíječka. Soustava zahrnuje akumulátor sestavený z jednotlivých článků (v sério-paralelním řazení), ochranné a monitorovací elektronické obvody a nabíječku s regulačními obvody. Tyto regulační obvody nabíječky spolupracují s uvedenými monitorovacími obvody akumulátoru. Základem nabíječky je spínaný zdroj (jednočinný propustný měnič s transformátorem). Nabíječka umožňuje při zachování malých rozměrů dodat do zátěže (akumulátoru) poměrně vysoký výkon (až 20A při 28V tj. cca 560W).

Použití DC/DC měniče jako základ nabíječky přináší i další výhody, jedná se zejména o vysokou účinnost a snadnou regulaci výstupního proudu.

Abstract

This work is a design and construction solution for an intelligent charger of Li-Ion battery system. The system consists of an accumulator, built out of individual cells (serial-parallel sequence), protective and monitoring circuits and charger with control circuits. These control circuits of this charger collaborate with monitoring circuits. The base of this charger is a switching source (singlemode buck converter with transformer). The charger allows to supply relatively high power while sustaining small dimensions. (20A with 28V that's 560W) Use of DC/DC converter is a base of charger and also delivers other benefits, such as high efficiency and easy control of output current.

Klíčová slova

Li-ion akumulátor; nabíječka; jednočinný propustný měnič, spínaný zdroj, impulzní transformátor; ochrana proti přepětí, ochrana proti podpětí

Keywords

Li-Ion akumulátor, charger, buck converter, switching source, pulse transformer, over-voltage protection, under-voltage protection

Bibliografická citace

Bibliografická citace - Kovář, R. Trakční akumulátor Li-ion 28V/40Ah s vestavěnými ochrannými a ovládacími prvky, Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 46 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Trakční akumulátor Li-ion s vestavěnými ochrannými a ovládacími prvky 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 § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

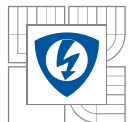
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

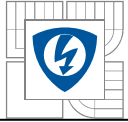
V Brně dne

Podpis autora



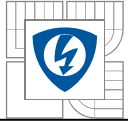
OBSAH

1. ÚVOD	13
2. LI-ION AKUMULÁTORY	14
2.1 HISTORIE	14
2.2 KONSTRUKCE AKUMULÁTORŮ	14
2.3 NABÍJENÍ	16
3. NABÍJEČKA	18
3.1 PRIMÁRNÍ ČÁST NABÍJEČKY	19
3.2 PROPUSTNÝ MĚNIČ- SEKUNDÁRNÍ ČÁST	22
3.3 BUDICÍ OBVODY SPÍNACÍCH TRANZISTORŮ	26
3.4 SNÍMÁNÍ PROUDU	27
3.5 OBVOD UC3845	28
3.6 NADŘAZENÁ NAPĚTOVÁ REGULACE	30
3.7 PARAMETRY NABÍJEČKY	30
4. DIMENZOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ	31
4.1 VYSOKOFREKVENČNÍ IMPUSNÍ TRANSFORMÁTOR	31
4.2 DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK	35
4.2.1 DIODA D7	35
4.2.2 DIODA D8:	36
4.2.3 DEMAGNETIZAČNÍ DIODY	36
4.2.4 SPÍNACÍ TRANZISTORY	36
5. TRAKČNÍ LI-ION AKUMULÁTOR	38
5.1 ÚVOD	38
5.2 ELEKTRICKÉ PARAMETRY	38
5.3 MECHANICKÉ USPOŘÁDÁNÍ	38
5.4 OCHRANNÉ OBVODY AKUMULÁTORU	40
5.5 PROVOZNÍ REŽIM, ŽIVOTNOST	42
6. ZÁVĚR	42
7. LITERATURA	43
8. OBRAZOVÁ PŘÍLOHA	44



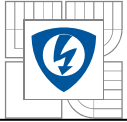
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.2.1: Průběh napětí a proudu při nabíjení akumulátoru Li-Ion.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3.1.1: Celkové schéma nabíječky.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3.1.2: Schéma zapojení primární části nabíječky.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3.1.3: Vliv parazitní kapacity tranzistorů na celkovou maximální střihu měniče.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3.1.4: Průběh napětí U_{GE} při maximálním proudu zátěží.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.1.5: Průběh napětí U_{CE} při zatížení, minimální střida.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.2.1: Schéma zapojení sekundární části měniče.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3.2.2: Průběh napětí na nulové diodě D8 při maximálním proudu.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.2.3: Výkonový impulsní transformátor společný s výstupní tlumivkou TL2.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.2.3: Zjednodušený model rozptylu transformátoru.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.2.4: Znázornění vlivu rozptylové indukčnosti.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.3.1: Schéma zapojení budicího obvodu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.4.1: Detekce přepětí a nadproudu.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3.4.2: Signál potřebný pro funkci komparátoru řídicího obvodu.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.5.1: Blokové schéma řídicího obvodu UC3845.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.5.2: Regulační obvod s UC3845.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3.5.3: Průběh signálu regulujícího proud.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3.6.1: Schéma zapojení přídavného plošného spoje regulace.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4.1.1: Hysterezní smyčka magneticky měkkého materiálu (feritu).....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4.1.2: Pomocná indukčnost paralelně k primárnímu vinutí.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4.2.4.1: Průběh proudu tranzistorem (D-S).....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.3.1: Akumulátor v cyklistické brašně.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5.4.1: Schéma zapojení ochranných obvodů.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5.4.2: Schéma zapojení obvodu komparátorů.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 8.1: Sestavená nabíječka.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 8.2: Modul regulace.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 8.3: Deska plošných spojů nabíječe.....</i>	<i>45</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tab.1: Parametry Li-Ion podle materiálu anody</i>	<i>16</i>
<i>Tab.2: Parametry nabíječky</i>	<i>30</i>
<i>Tab.3: Elektrické parametry akumulátoru</i>	<i>33</i>
<i>Tab.4: Parametry tlumivky.....</i>	<i>38</i>



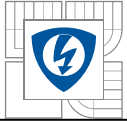
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol

A_L	Součinitel indukčnosti	$H.zav^{-2}$
$I_{\mu_{max}}$	Maximální magnetizační proud	A

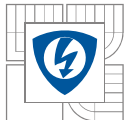
Zkratka

GND	uzel slučující funkci ochranného vodiče a záporného pólu
I_z	svorka ovládací desky- řízení nabíjecího proudu
U_{ref}	referenční napětí řídicího obvodu
SMD	součástky pro povrchovou montáž (Surface Mount Device)
S_{max}	maximální střída



1. ÚVOD

Nabíječka byla původně navržena pro nabíjení olověných akumulátorů. Je řešena jako jednočinný propustný měnič DC/DC s transformátorem. Regulační obvody zajišťují paralelní regulaci napětí všech sedmi sériových bloků akumulátoru s podřízenou proudovou smyčkou s přepínatelným proudovým omezením 5A (pomalé nabíjení) a 20A (rychlé nabíjení). Ty jsou použity pro pohon elektrického kola, které bylo vyvinuto na Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky. Samotná akumulátorová baterie je tvořena sérioparalelním spojením celkem 147ks Li-Ion článků a její součástí jsou ochranné a ovládací prvky.



2. LI-ION AKUMULÁTORY

2.1 Historie

První experimenty prováděl americký chemik G.N. Lewis již v roce 1912. Návrh proběhl roku 1960, poté byla baterie vyvíjena hlavně v Bellových laboratořích. První lithiové články, tehdy ještě nenabíjecí, byly komerčně dostupné až v roce 1970. V osmdesátých letech následoval vývoj nabíjitelných článků, byl však neúspěšný, neboť články byly nebezpečné a snadno při nabíjení explodovaly. Obrat ve vývoji nastal teprve tehdy, když bylo chemicky velmi nestabilní kovové lithium nahrazeno kyslíčnickem lithia a kobaltu (LiCoO_2). První akumulátory Li-Ion začala prodávat firma Sony až v roce 1991. Ostatní výrobci ji následovali.

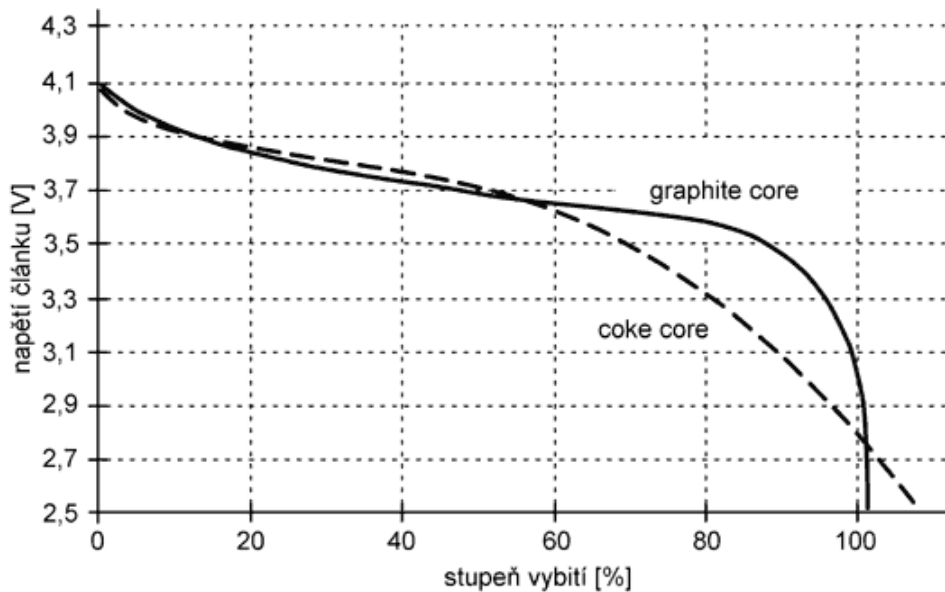
2.2 Konstrukce akumulátorů

Lithium je chemický prvek patřící do I. skupiny tabulky prvků, jedná se o nejlehčí alkalický kov se standardním elektrolytickým potenciálem 3,045V. Má tedy při velmi nízké hmotnosti největší elektrolytický potenciál. Hlavní myšlenkou lithiových baterií je použití takové záporné elektrody, která poskytne největší náboj i energii. Velikost náboje je určena poměrnou atomovou hmotností. Platí tedy, že 7g lithia odevzdá stejný náboj jako 103,5g olova. K celkové energii lithiových baterií přispívá skutečnost, že lithium je ve svých elektrolytech (ze všech existujících látek) nejvíce negativní. Proto lithiové baterie představují chemické zdroje proudu s největší možnou měrnou energií.

Anoda je vyrobena z uhlíku (coke či graphite), katoda je oxid kovu (směs kyslíčnicků lithia s dalším kovem) a elektrolyt je lithiová sůl v organickém rozpouštědle (směs esterů - každý výrobce si chrání své složení).

V praxi se lze setkat se dvěma typy Li-Ion akumulátorů které se liší provedením záporné elektrody- anody. V obou případech je to uhlík:

- 1.Coke- mikrokrystalická forma uhlíku dříve označovaná jako amorfní uhlík. Je shodná s grafitem, ale na rozdíl od něj má jen nepatrné a neorientované krystaly.
- 2.Grafit- liší se tvarem vybíjecí křivky, nabíjecím napětím a napětím, při kterém je třeba ukončit vybíjení.



Obr.2.1.1 Typická vybíjecí charakteristika akumulátoru Li-Ion

Typ	Maximální nabíjecí napětí [V]	Konečné vybíjecí napětí [V]
coke	4,2	2,5
graphite	4,1	3,0

Tab.1 Parametry Li-Ion akumulátorů podle materiálu anody

Název „lithiový“ ale není jednoznačný, existuje mnoho různých modifikací, které se liší především provedením záporné elektrody (tuhá či tekutá) i jinými materiály. Lithium lze tedy kombinovat s různými sloučeninami a tak získávat velmi zajímavé vlastnosti. Současná nabídka těchto výrobků je velice bohatá a zahrnuje několik světových výrobců (Sanyo, Panasonic, Sony).

Hustota energie je obvykle dvakrát větší než u standartních NiCd. Zátěžové vlastnosti jsou poměrně dobré a Li-Ion akumulátory se chovají podobně jako NiCd, pokud jde o časy vybíjení. Li-Ion je bezúdržbový systém, neexistuje zde paměťový efekt a pravidelné cyklování prodlužuje životnost baterie. Kromě toho samovybíjení je méně než poloviční ve srovnání s NiCd.

Podle materiálů použitých v Li-Ion akumulátorech je napětí článků mezi 3V a 4V. Běžně dosažitelná měrná energie těchto baterií je v současné době kolem 120 až 130 W.h/ l, jejich životnost bývá až 1 000 cyklů, maximální měrný výkon větší než 150W/kg a samovybíjení (ztráta výchozí kapacity) po měsíci skladování 5 až 8%.

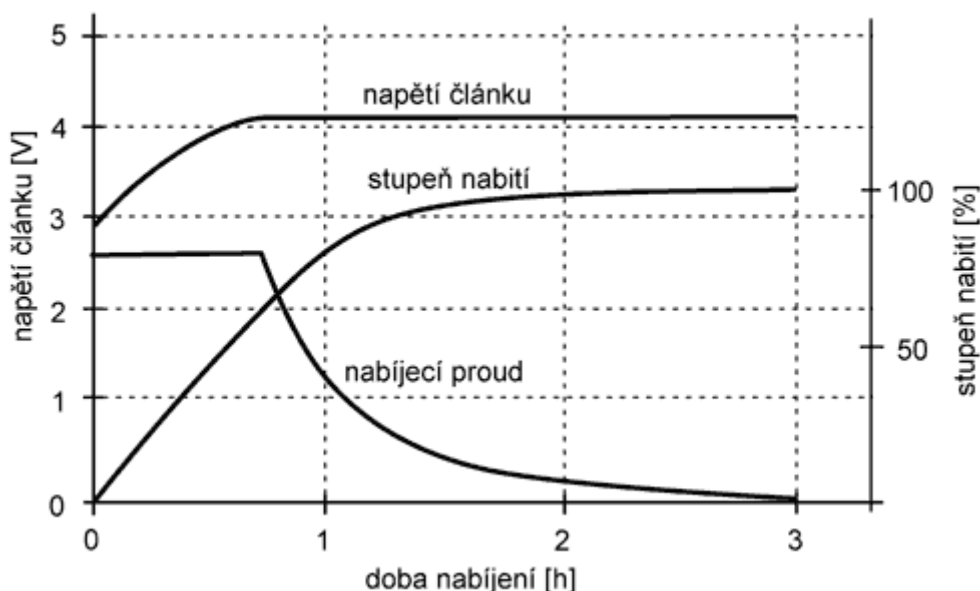
Navzdory mnoha výhodám má Li-Ion i své nevýhody. Je křehký a pro bezpečný provoz vyžaduje použití ochranných obvodů.

Dnes už se vyrábí a používají Lithium-polymerové akumulátory (Li-Pol), jejich funkčnost je, co se týče velikosti nabíjecích a vybíjecích napětí, provozních teplot, množství cyklů, obdobná jako u akumulátorů Li-Ion.

2.3 Nabíjení

Akumulátory Li-ion se nabíjejí standardně ze zdroje napětí s omezením nabíjecího proudu, podobným způsobem jako bezúdržbové olověné akumulátory (SLA) a alkalické akumulátory (RAM). Při nabíjení Li-ion je třeba velmi přesně dodržet konečné nabíjecí napětí. Uvádí se, že již malé překročení nabíjecího napětí podstatně zkrátí dobu života článku, při napětí menším se článek nenabije na plnou kapacitu. Konečné nabíjecí napětí je podle typu článku 4,1 nebo 4,2 V, a je třeba je dodržet s přesností $\pm 1\%$.

Naopak nabíjecí proud není třeba přesně dodržet, bude-li menší, bude nabíjení jen trvat déle. Maximální nabíjecí proud uvádějí výrobci od 0,1 do 2 C. Jednotkou C se myslí jmenovitá kapacita článku. Bude-li mít článek kapacitu např. 900 mAh a povolený nabíjecí proud 0,5 C, můžeme jej nabíjet proudem až 450 mA.



Obr.2.2.1 Průběh napětí a proudu při nabíjení akumulátoru Li-Ion

Typický průběh nabíjení článku Li-ion je na obr. 2.2.1 a platí pro nabíjení proudem 1 C. Z obrázku je patrné, že článek se nabíjí velmi rychle. V první fázi se článek nabíjí proudem tak dlouho, dokud napětí na článku nedosáhne konečného nabíjecího napětí. Nabíjecí proud ani nemusí být konstantní, stačí když nepřekročí



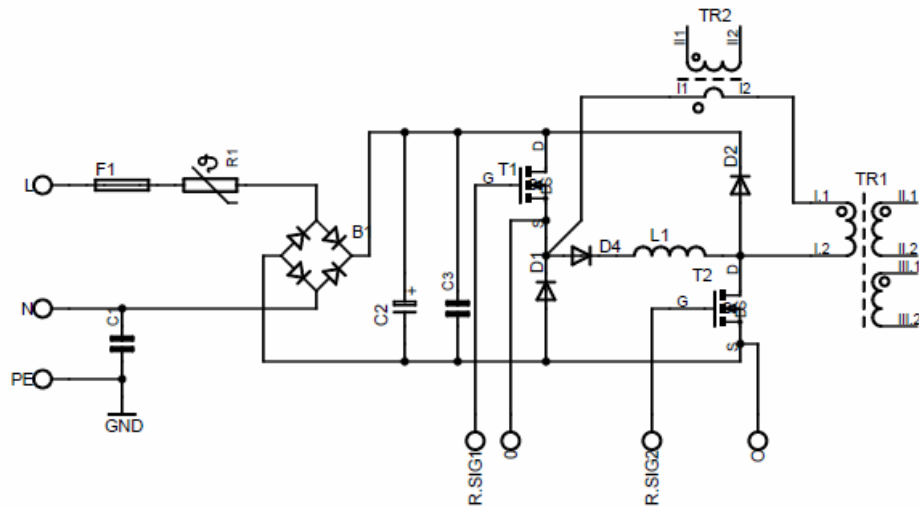
maximální nabíjecí proud. V okamžiku, kdy napětí článku dosáhne konečného nabíjecího napětí, je článek nabit přibližně na 70 %, pokud byl předtím téměř vybit.

Byl-li článek vybit jen částečně, je v tomto okamžiku jeho náboj větší. Rovněž při nabíjení menším proudem bude v okamžiku dosažení konečného napětí náboj článku větší, nabíjení však trvá pochopitelně déle.

V druhé fázi se článek nabíjí konstantním napětím a nabíjecí proud se postupně zmenšuje. Článek považujeme za nabitý, pokud nabíjecí proud poklesne na zlomek původního nabíjecího proudu, většinou asi 0,05 C. Nabíjecí proud se postupně zmenší až k nule. To je výhoda, neboť nehrozí přebití článku. Dobu nabíjení nemusíme hlídat a článek může být v nabíječce libovolně dlouho. Nabíječka může rovněž bez jakéhokoli nastavování nabíjet články s různou kapacitou, stačí zajistit, aby ani u článku s nejmenší kapacitou nebyl překročen maximální nabíjecí proud. Články s větší kapacitou se budou nabíjet déle.

Nabíjení nových a hluboce vybitých článků je třeba nabíjet velmi pomalu proudem řádu jednotek miliampér tak dlouho, dokud jejich napětí nedosáhne 2,7 až 3 V. Takové formování článku trvá velmi dlouho, řádově hodiny. Články nelze rovnou nabíjet velkým proudem, mohly by se vážně poškodit. V praxi se proto dodávají nové články už částečně nabitě (výrobci uvádějí 40-50 %).

3.1 Primární část nabíječky



3.1.2 Schéma zapojení primární části nabíječky

Střídavé síťové napětí je přivedeno přes pojistku F1 a termistor R1 na Graetzův můstek, který ho dvoucestně usměrňuje. O filtraci se stará C2, svitkový kondenzátor C3 slouží pro eliminaci parazitní indukčnosti ss meziobvodu (omezení překmitů napětí U_{CE} tranzistorů T1 a T2 při jejich vypínání). Pro bezpečnou práci při měření a ožívování byl paralelně k C2 přidán ještě vybíjecí odpor. Při síťovém napětí $U_{ef} = 230V$, usměrnění a filtraci je tedy (při zátěži) na kondenzátorech přibližně 300V. Kondenzátor C1 je odrušovací.

Termistor R1 (NTC) zde plní funkci ochrany před proudovým nárazem. Po připojení na síť je termistor studený a má velký odpor. Přes něj se začne postupně nabíjet kondenzátor C2 a tím dojde k omezení nabíjecího proudu. Toto jednak zabrání výpadku běžného 10A jističe a vede i k prodloužení životnosti kondenzátoru. Jakmile je nabíječka v chodu začne odpor termistoru (vlivem procházejícího proudu a tím pádem ohřevu) klesat a vyřadí se tak z funkce.

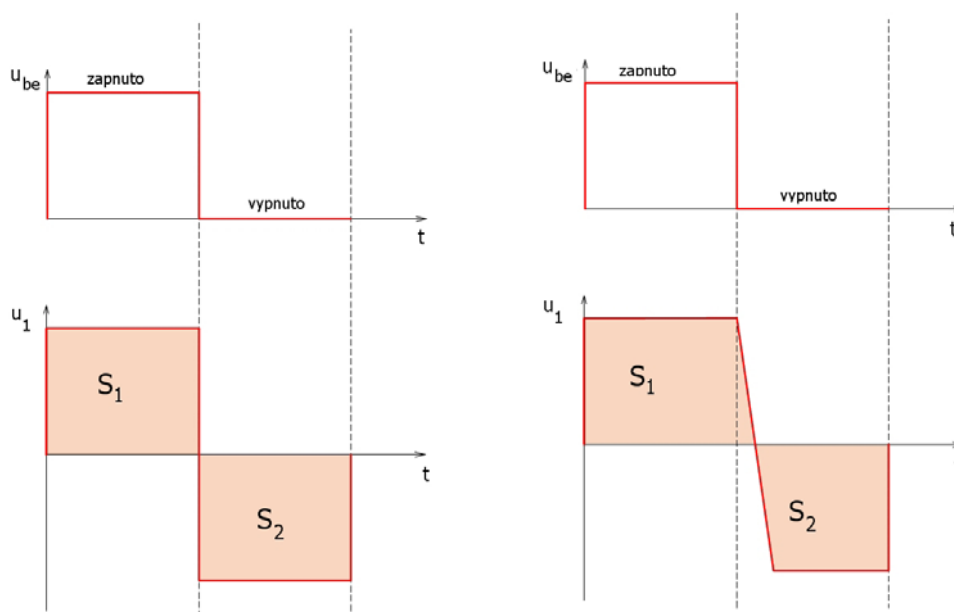
Dále následují unipolární tranzistory MOSFET T1,T2 a demagnetizační diody D1,D2. Tyto součástky tvoří spolu s usměrňovací, nulovou diodou a tlumivkou na sekundární části stěžejní část měniče. Frekvence spínání tranzistorů je poměrně vysoká - 200kHz.

V sérii s transformátorem TR1 je připojen proudový měřicí transformátor TR2, který snímá hodnotu primárního proudu a slouží tak jako zpětná vazba regulačních obvodů. Funkce je podrobněji rozebrána v kapitole 3.3.

K primárnímu vinutí je paralelně připojena tlumivka L1, jejíž funkce zde je poměrně důležitá. Pokud spojíme dvě cívky paralelně, poklesne výsledná indukčnost. Tím pak dojde k nárůstu špičkové hodnoty magnetizačního proudu I_{μ} (na konci doby zapnutí). Větší magnetizační proud pak po vypnutí rychleji nabíjí parazitní kapacity kolektor-emitor (při chodu naprázdno jsou tyto kapacity nabíjeny skutečně pouze tímto proudem, při zátěži pak i primárním transformovaným proudem - po omezenou dobu - vliv rozptylu). S větším magnetizačním proudem je tedy zajištěna i při chodu

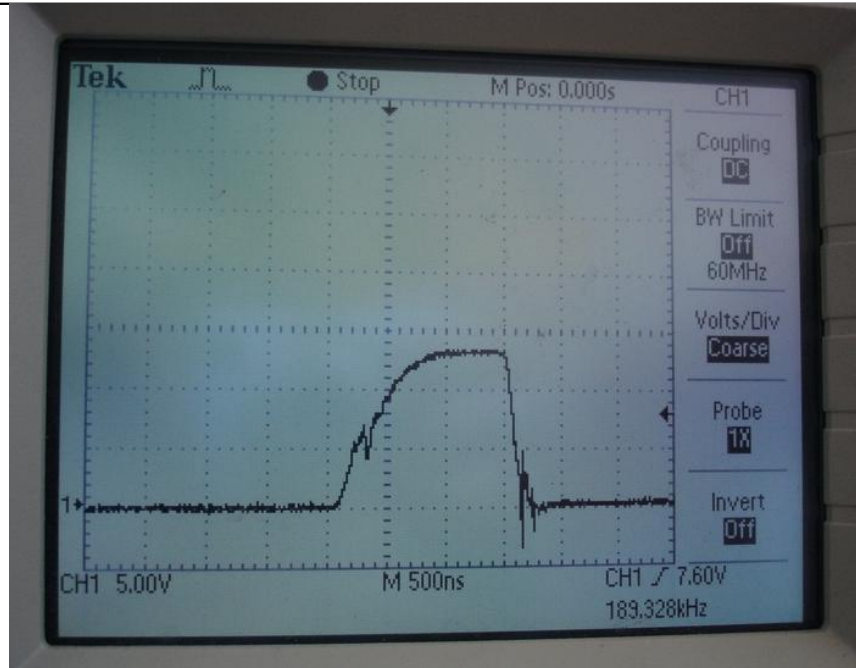
naprázdno včasná demagnetizace, aniž by bylo nutné snižovat příliš maximální střidu spínání.

Na výstupu měniče může být teoreticky maximálně poloviční napětí oproti vstupu (je-li převod transformátoru $p=1$), a v případě střídá 0,5. Tedy doba zapnutí a vypnutí spínacích tranzistorů je shodná. Toho však v praxi z výše popsaných důvodů nelze dosáhnout, střída je vždy menší než 0,5, v našem případě asi 0,43. Tranzistory MOSFET mají totiž poměrně vysoké kapacity mezi kolektorem a emitorem (která je přímo úměrná velikosti čipu a jeho geometrii- přesnou hodnotu udává katalogový list). Čím vyšší bude magnetizační proud, tím rychleji se parazitní kapacita nabije a tím vyšší může být střída.



Obr. 3.1.3: Vliv parazitní kapacity tranzistorů na celkovou maximální střidu měniče

Na obrázku 3.1.3. je znázorněn vliv parazitní kapacity, dochází ke zpomalení demagnetizace, což vede k nutnosti snížení celkové střídá a tedy i maximálního dosažitelného napětí na výstupu měniče. Plochy S_1 a S_2 musí být totožné, je-li demagnetizace zajištěna. Pokud by se tranzistory sepnuly dříve ($S_1 \neq S_2$), magnetizační proud by nestačil klesnout až na nulu a s každým dalším cyklem by postupně narůstal až k destrukci obvodu.



Obr. 3.1.4: Průběh napětí U_{GE} při maximálním proudu zátěži

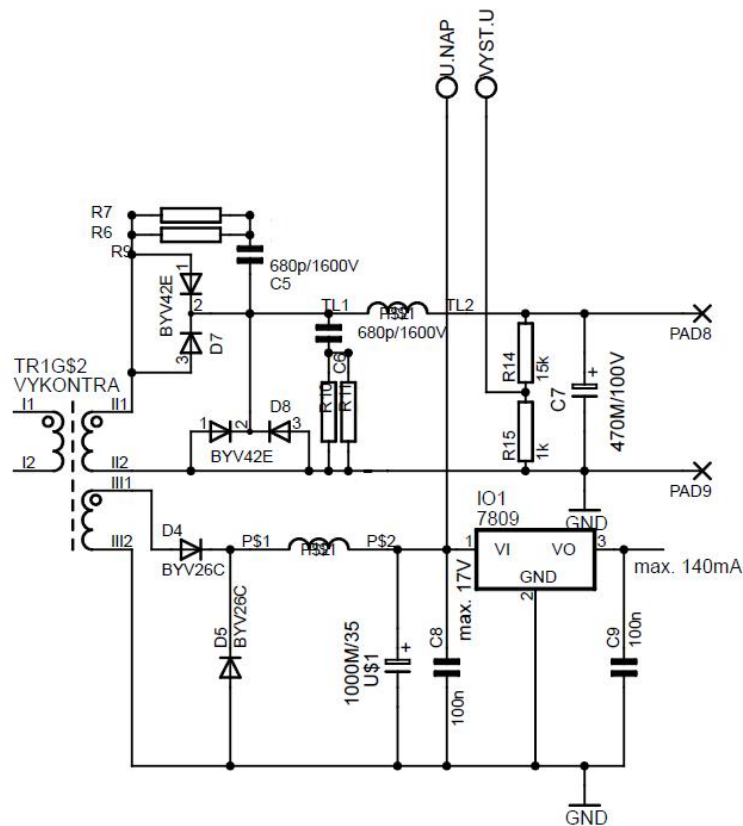
Na Obr. 3.1.4 je průběh spínacího napětí gate-emitor primárních tranzistorů. Náběh zapínání je záměrně pozvolný, je tak zabráněno poškození čipu tranzistoru vlivem tzv. rozšiřovacího efektu. Vznik enormních zapínacích ztrát přitom nenastává, protože zapínání je odlehčeno zvýšeným rozptylem transformátoru.



Obr. 3.1.5: Průběh napětí U_{CE} při zatížení, minimální střída

Na Obr. 3.1.5 je vidět překmit napětí způsobený zánikem kolektorového proudu (di/dt) na parazitní indukčnosti. Za překmitem následuje patrná oblast demagnetizace. Vzhledem k malé aktuální střídě na obrázku je doba demagnetizace cca pouhou třetinou celé doby vypnutí.

3.2 Propustný měnič- sekundární část



Obr. 3.2.1: Schéma zapojení sekundární části měniče

Sekundární část sestává ze dvou měničů. Silový, který slouží pro samotné nabíjení akumulátoru je tvořen usměrňovací diodou D7, nulovou diodou D8, tlumivkou TL2 a výstupním vyhlazovacím kondenzátorem C7. Následuje odporový dělič, tvořený odpory R15 a R14, který snímání hodnotu výstupního napětí. Pokud jsou tranzistory sepnuty, dioda D7 je polarizována v propustném směru a protéká jí proud, který teče přes výstupní tlumivku TL2 do akumulátorů. V tlumivce se akumuluje energie ve formě magnetického pole. Jakmile dojde k vypnutí tranzistorů, dioda D7 je polarizována závěrně a proud proteče přes tlumivku TL2 a nulovou diodu D8, která je nyní v propustném směru.

Obvod obsahuje i dva RC členy které jsou připojeny paralelně k diodám D7,D8. Dojde-li k vypnutí tranzistorů, proud diodou skokově zaniká a na parazitních indukčnostech se indukuje nežádoucí napětí. Toto napětí se přičítá k závěrnému napětí (-U1) diod a zbytečně je tak napětově zatěžuje. K utlumení tohoto překmitu slouží experimentálně naladěný RC člen. V našem případě byla optimální hodnota 22 Ohm a 1000pF. Aby se překmit dobře utlumil musí mít obě součástky malou vlastní indukčnost.

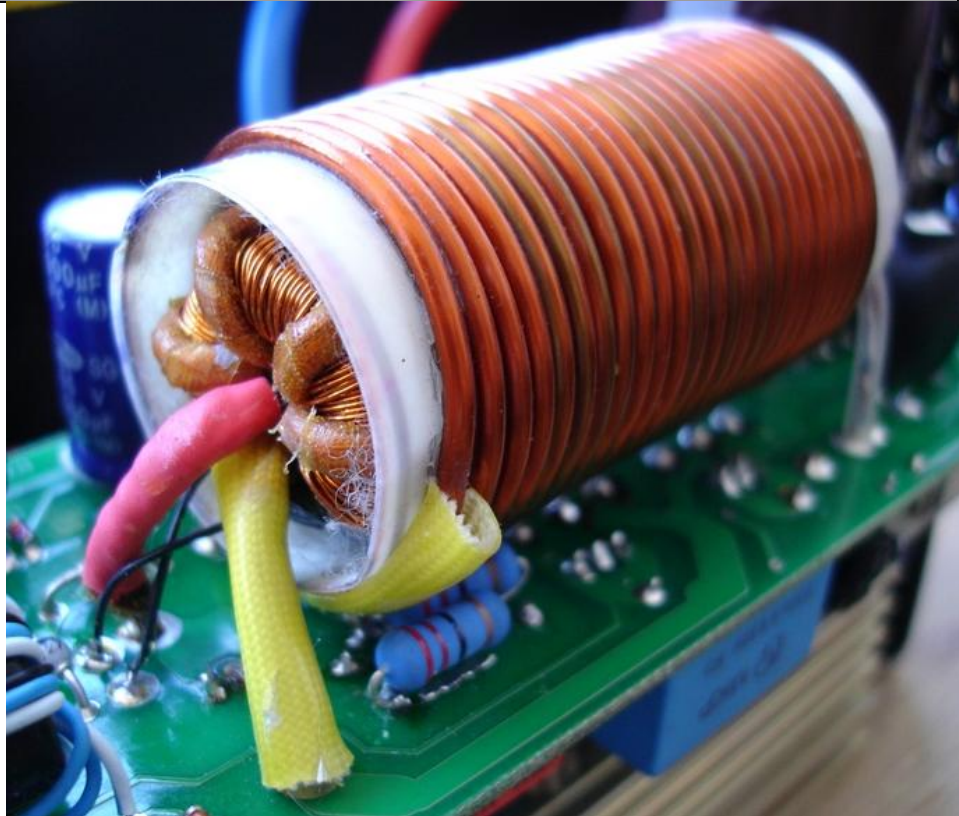


Obr. 3.2.2: Průběh napětí na nulové diodě D8 při maximálním proudu

Obr. 3.2.2 znázorňuje překmit na náběžné hraně částečně utlumený R-C členem.

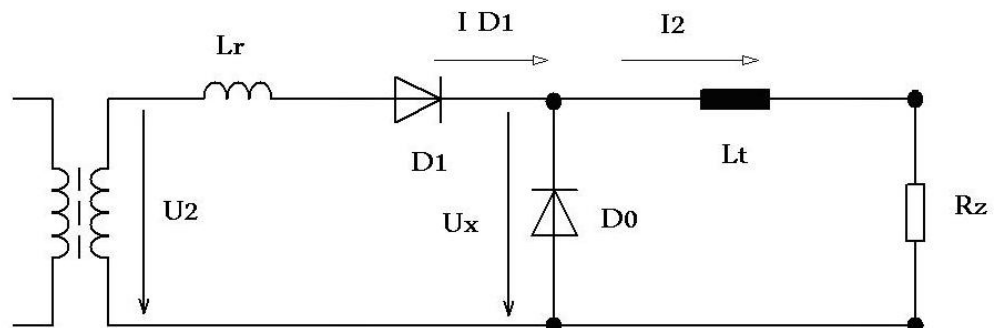
Druhý měnič slouží pro napájení řídicích obvodů. Je zde použit klasický napěťový stabilizátor 7809 (IO1). Tlumící RC členy již nejsou potřeba, obvodem protéká pouze malý proud a k napěťovému namáhání nedochází. Na vstup stabilizátoru je přiváděno pomocné napětí z miniaturního transformátoru TR5 s dvoucestným usměrňovačem D9, který je připojen přímo k elektrické síti. Tímto se zabezpečí spolehlivé napájení řídicích obvodů do doby než je měnič spolehlivě funkční.

Jádro výstupní tlumivky TL2 je poněkud neobvyklé, je totiž shodné s jádrem výkonového impulsního transformátoru. Toto řešení přináší úsporu místa na plošném spoji a zároveň zvětšuje výslednou indukčnost tlumivky. Magnetické toky transformátoru a tlumivky jsou na sebe navzájem kolmá a vzájemně se tedy neovlivňují.

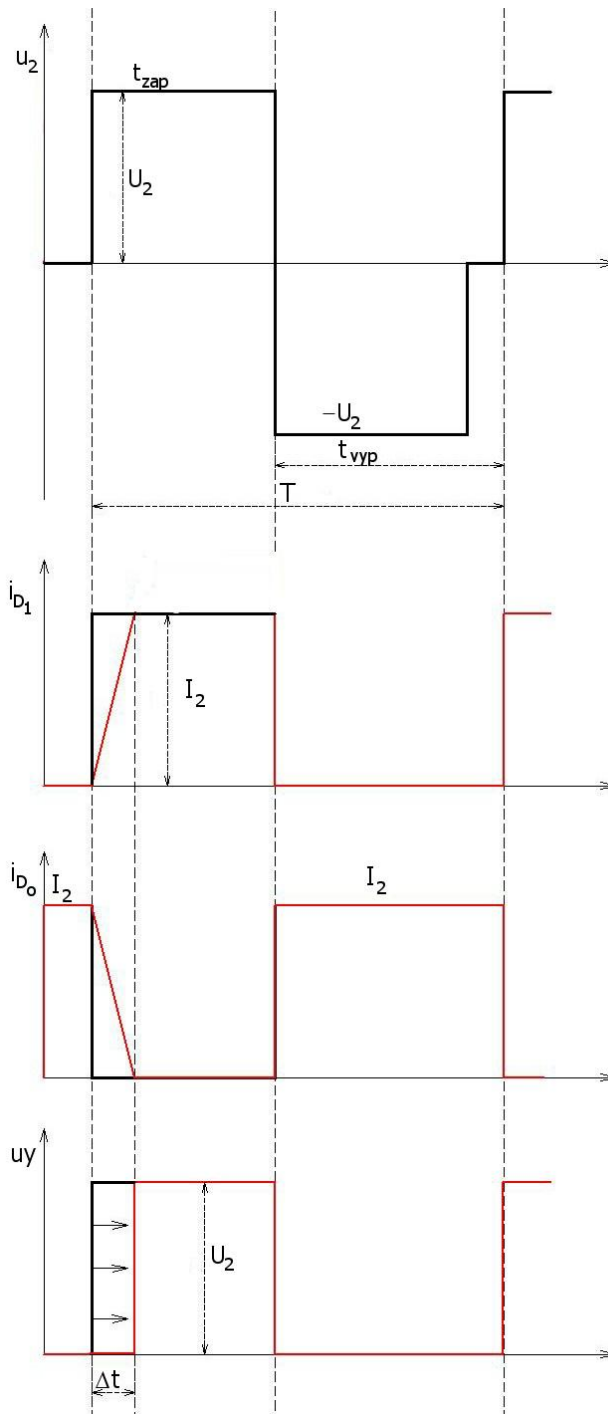


Obr. 3.2.3: Výkonový impulsní transformátor společný s výstupní tlumivkou TL2

V kapitole 3.1 je popsáno jak ovlivňuje parazitní kapacita střidu a tím maximální dosažitelné výstupní napětí. Parazitní kapacita tranzistorů však není jediný faktor ovlivňující velikost výstupního napětí. Transformátor totiž není ideální, ale má jako každý jiný reálný transformátor určitý rozptylový tok. Tento tok je svázán s tzv. rozptylovými indukčnostmi (primární a sekundární). Reálný transformátor si lze představit jako bezrozptylový s připojenými indukčnostmi do serie s primárním a sekundárním vinutím. Lze to dále zjednodušit a uvažovat jen jedinou rozptylovou indukčnost, přepočtenou například na sekundární stranu $-L_R$. Na této indukčnosti vzniká úbytek napětí, transformátor je tedy „měkký“.



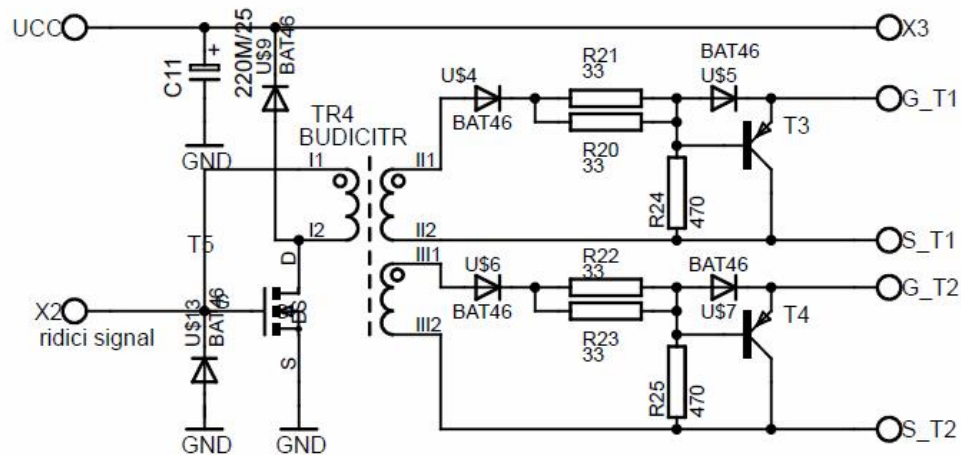
Obr. 3.2.3: Zjednodušený model rozptylu transformátoru



Obr. 3.2.4: Znázornění vlivu rozptylové indukčnosti

V okamžiku kdy sepnou tranzistory bude dioda D1 polarizována propustně a začne jí protékat proud. Ten se ale díky rozptylové indukčnosti nezvětší skokově, nýbrž bude narůstat postupně, až do okamžiku kdy dosáhne maximální hodnoty. Zároveň však klesá proud diodou D0. Rozptylová indukčnost nám tedy snižuje využitelnou střídu. Výstupní proud I_2 je konstantní, podle I.K.Z platí : $I_2 = I_{D1} + I_{D0}$

3.3 Budicí obvody spínacích tranzistorů



Obr. 3.3.1: Schéma zapojení budicího obvodu

V okamžiku příchodu kladného řídicího signálu na tranzistor T5 se tento otevře a primárním vinutím oddělovacího transformátoru začne protékat proud přímo z výstupu řídicího obvodu UC3845. Jádru transformátoru se magnetizuje. Během trvání této doby zapnutí narůstá lineárně magnetizační proud primárním vinutím (jelikož je integrálem konstantního přiloženého napětí). V okamžiku kdy změní řídicí signál polaritu, se tranzistor T5 uzavře. Magnetizační proud nemůže zaniknout, a proto na sobě primární cívka vytvoří takové protinapětí, které způsobí otevření diod US9 a US13. Magnetizační proud nyní teče zpět přes tyto diody do zdroje. Napětí je opět konstantní, avšak má opačnou polaritu a tak dochází k lineárnímu poklesu magnetizačního proudu zpět k nule (a k demagnetizaci jádra transformátoru).

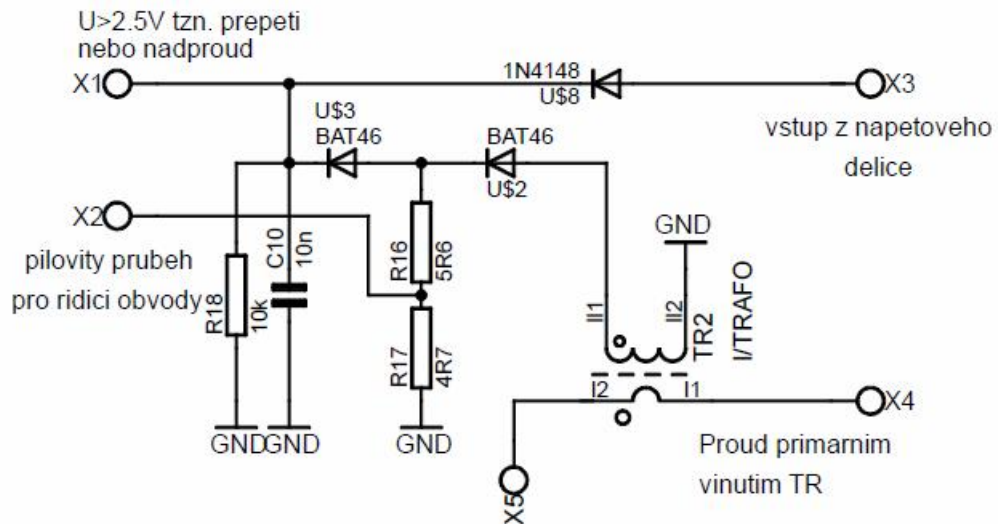
Následující popis budiče se týká spínání výkonového tranzistoru T1, část pro T2 je totožná. V případě příchodu kladného řídicího signálu se objeví na sekundární straně oddělovacího transformátoru napětí 15V. Proud teče přes diody US4 a US5, které jsou nyní polarizovány propustně, přes odpory R20, R21 přímo k hradlu výkonového tranzistoru T1. Přechod D-S (Drain-Source) se tak otevře a tranzistor je v sepnutém stavu.

V okamžiku příchodu řídicího signálu opačné polarity jsou diody US4 a US5 polarizovány závěrně a proud jimi už neprochází. K vypnutí tranzistoru však nemůže dojít skokově, přechod G-S (Gate-Source) má určitou parazitní kapacitu, která je řádově vyšší než mezi přechodem D-S. Je udávána v katalogovém listu.

Je tedy třeba parazitní kapacitu co nejrychleji vybit. Toto zabezpečuje tranzistor T3 spolu s odporem R24. V první fázi (kdy je na sekundární straně oddělovacího transformátoru kladné napětí) se parazitní kapacita postupně nabíjí přes integrační člen tvořený odpory R20, R21 a parazitní kapacitu C_{GS} . Toto trvá asi 1-2 μ s.

V druhé fázi (kdy je napětí na sekundární straně transformátoru opačné) jsou diody US4 a US5 polarizovány závěrně a nabitá parazitní kapacita je připojena přímo na přechod emitor-kolektor tranzistoru PNP. Dojde k průchodu proudu do báze, tranzistor T3 se otevře a kapacitu tím vybijí.

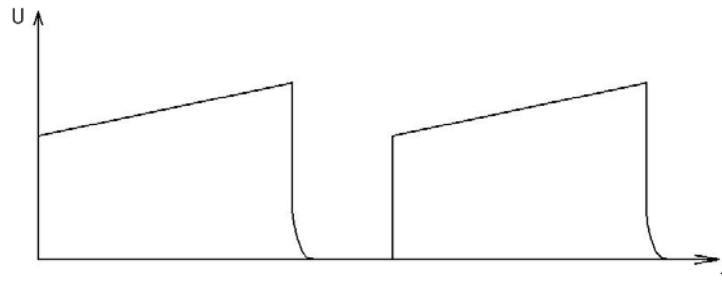
3.4 Snímání proudu



Obr. 3.4.1: Detekce přepětí a nadproudu

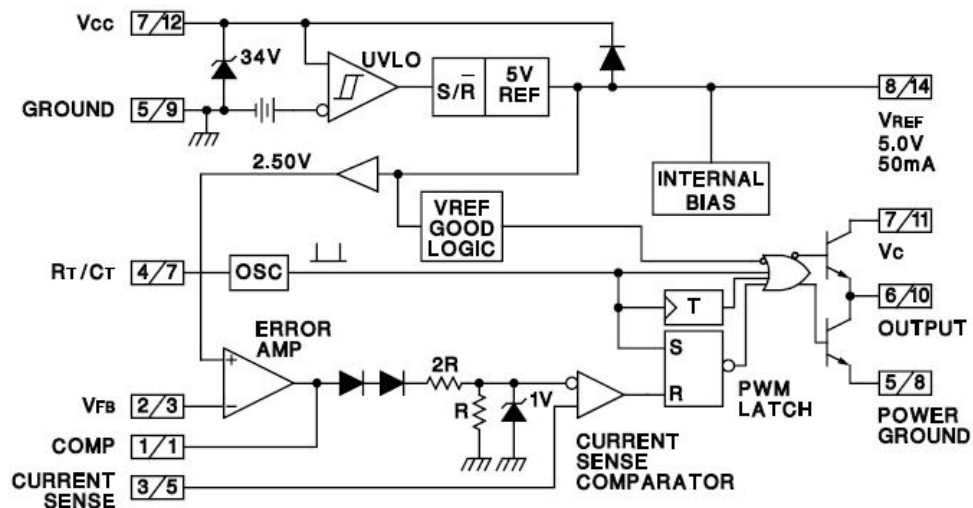
Měřicí transformátor proudu TR2 se stará o snímání skutečného proudu který protéká primárním vinutím výkonového transformátoru. Na sekundární straně proudového transformátoru vzniká v době zapnutí primárních tranzistorů konstantní proud. Ten teče přes diodu US2 do napětového děliče který tvoří odpory R16,R17 a způsobí na něm úbytek napětí přibližně 2,5V. Maximální hodnota tohoto napětí je dále vyhodnocena špičkovým usměrňovačem US3, C10, R18. Tento signál slouží jako informace o nadproudu. Objeví-li se na kondenzátoru C10 napětí větší než 2,5V, ochrana zareaguje a řídicí obvod sníží hodnotu střídavy na nulu. Reakce na přepětí je vyřešena analogicky. Při přepětí se signál přivádí z napětového děliče na výstupu nabíječky (odpory R14,R15), přes diodu US8 na kondenzátor C10. Časová konstanta obvodu je dána odporem R18 a kondenzátorem C10.

Aby komparátor řídicího obvodu správně fungoval, je třeba děličem (R16,R17) upravit 2,5V na 1V. Signál má pilovitý průběh se stejnosměrnou složkou a jeho okamžitá hodnota odpovídá skutečné hodnotě primárního proudu. komparací tohoto průběhu se ss napětím odpovídajícím žádané hodnotě proudu dochází díky pilovitému zvlnění skutečného proudu ke tvorbě PWM signálu.



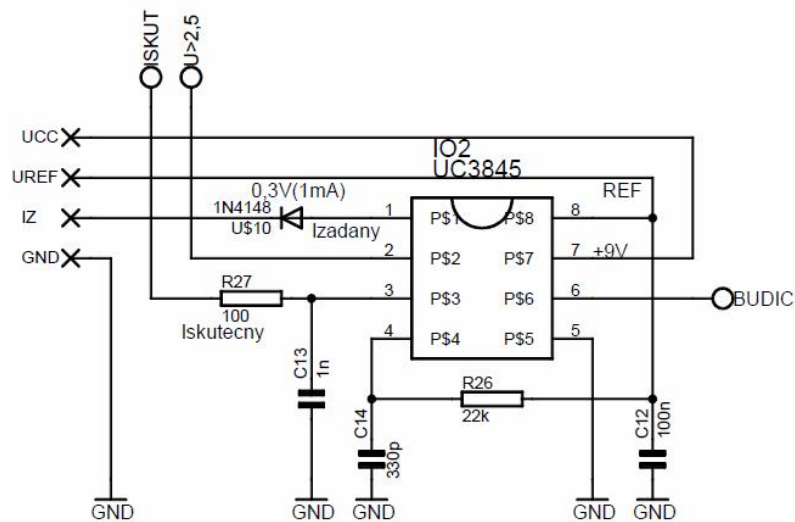
Obr. 3.4.2: Signál potřebný pro funkci komparátoru řídicího obvodu

3.5 Obvod UC3845



Obr. 3.5.1: Blokové schéma řídicího obvodu UC3845 [6]

Řídicí obvod UC3845 má vlastní oscilátor (OSC), jehož kmitočet se řídí připojením vnějších součástek na vývod RT/CT. V našem případě bylo třeba mírnou úpravou C14 nastavit střídu na asi 0,43. Jak již bylo řečeno výše - při větší střídě např. 0,47 by magnetizační proud nestihl klesnout až k nule, s každým dalším cyklem by rostl, došlo by k přesycení magnetického obvodu a ke zničení demagnetizačních diod a spínacích tranzistorů.

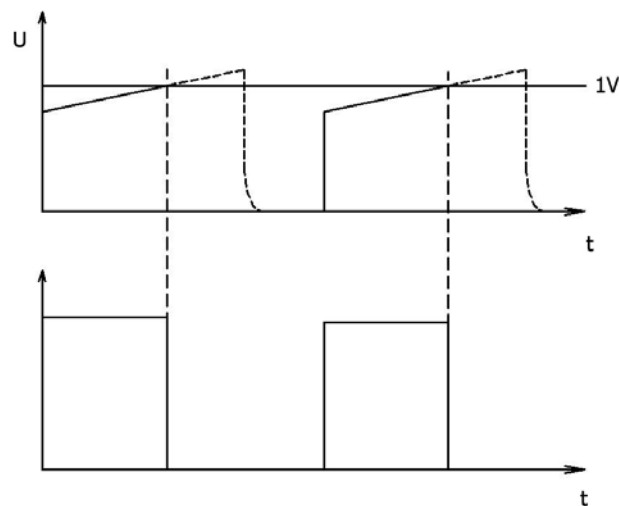


Obr. 3.5.2: Regulační obvod s UC3845

Obvod dále obsahuje zdroj referenčního napětí 2,5V, který je připojen na neinvertující vstup komparátoru K(error). Aby regulační obvod s UC3845 správně fungoval je třeba přivést napětí pilovitého průběhu na vstup 3 . Toto napětí odpovídá skutečné hodnotě proudu a tvoří ho napěťový dělič s R16,R17 (1V).

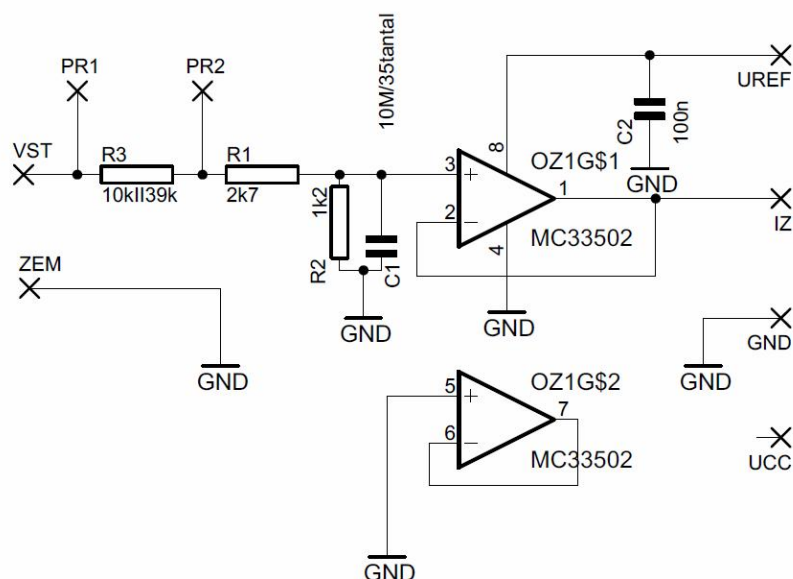
Na vstup 2 (invertující vstup komparátoru) je přivedeno napětí z kondenzátoru C10. Překročí-li hodnotu 2,5V, znamená to že došlo buď k nadproudu (zkrat na výstupu) nebo k přepětí (chod naprázdno). Pak výstup komparátoru přepoklopí na spodní saturační napětí a komparátor K (sense) porovnává pilovitý signál ze vstupu 3 (invertující vstup komparátoru) s minimálním saturačním napětím komparátoru K(error). Výstup RS klopného obvodu je tedy stále na úrovni log.0 a střída je pak nulová.

Komparátor K(sense) se stará o pulsně šířkovou modulaci (PWM) a regulaci proudu. Porovnává skutečnou hodnotu proudu která je přiváděna na vstup 3 s žádanou hodnotou proudu přivedenou na vstup 1.



Obr. 3.5.3: Průběh signálu regulujícího proud

3.6 Nadřazená napětová regulace



Obr. 3.6.1: Schéma zapojení přidavného plošného spoje regulace

Principiálně jde o dvoustavový regulátor - paralelní regulaci napětí všech bloků akumulátoru s podřízenou proudovou smyčkou. Je použito přepínatelné proudové omezení 5A (pomalé nabíjení) a 20A (rychlé nabíjení). Přepínač je umístěn mezi svorkami PR1 a PR2.

Pokud napětí na kterémkoli z článků odpovídá plnému nabití, ohlásí ochranné obvody tuto informaci jednobitovým logickým signálem do nabíječky. Objeví-li se na kterémkoli bloku akumulátoru napětí větší než 4,1V, pak signál „přepětí“ nabude úrovně logické 0. Pomocí RC setrvačného článku je ze zmíněného dvoustavového logického signálu filtrována střední hodnota, jež je považována za žádanou hodnotu proudu pro podřízenou proudovou regulaci.

V ochranných obvodech je nastavena hraniční mez přepětí na článek 4,1V (místo dovolených 4,2V), což zvyšuje životnost akumulátorů.

3.7 Parametry nabíječky

Napájení	230V/50Hz
Výkon	600W
Maximální výstupní proud	20A
Pracovní kmitočet PWM	200kHz
Rozměry	60x120x170
Hmotnost	1,6kg

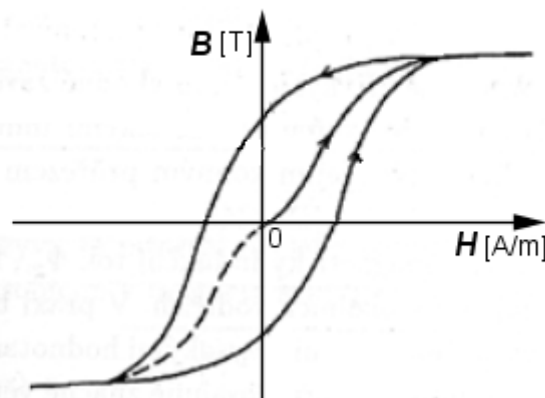
Tab.2 Parametry nabíječky

4. DIMENZOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ

4.1 Vysokofrekvenční impulsní transformátor

Pro transformátor pracující na takto vysoké frekvenci (200kHz) je třeba použít jádro z magneticky měkkého materiálu, s co nejužší hysterézní smyčkou a s co nejmenší remanencí Br.

Jsou použita toroidní feritová jádra LjT2010/CF128, pro zvětšení průřezu 6 jader paralelně. Ferit má velký měrný odpor ($R_v=1010 \Omega \cdot m$) a ztráty vířivými proudy jsou tedy malé. Nevýhodou je však malá hodnota maximálního sycení, která se bývá kolem 0,3T (magneticky měkká ocel má až 1,5T). Přitom ale víme, že sycení jádra nezávisí na velikosti zatěžovacího proudu ani na velikosti přenášeného výkonu. K přesycení magnetického obvodu nesmí dojít, protože již malá změna magnetické indukce B by znamenala velkou změnu intenzity H (což plyne i z hysterezní křivky materiálu).



Obr. 4.1.1: Hysterezní smyčka magneticky měkkého materiálu (feritu)

To by znamenalo pokles permeability materiálu :

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (H \cdot m^{-1}; T, H) \quad (4.1.1)$$

a tedy i pokles relativní permeability :

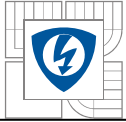
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (-; H \cdot m^{-1}, H \cdot m^{-1}) \quad (4.1.2)$$

to by znamenalo pokles magnetické vodivosti:

$$\Lambda = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{S}{l} \quad (H/zav.^2; H \cdot m^{-1}, H \cdot m^{-1}, m^2, m) \quad (4.1.3)$$

a indukčnost primárního vinutí by se tedy zmenšila:

$$L_1 = N_1^2 \cdot \Lambda \quad (H; -, H/zav.^2) \quad (4.1.4)$$



Víme že platí :

$$N_1 \cdot \phi_\mu(t) = L_1 \cdot i_\mu(t) \quad (4.1.5)$$

Prudké zmenšení L_1 by znamenalo velký nárustu $i_\mu(t)$, aby byla zachována rovnost. Velký nárůst magnetizačního proudu by vedl ke zničení polovodičových součástek. S průřezem jádra (S) transformátoru souvisí počet závitů primárního vinutí (N_1). Větší průřez totiž vede k menšímu počtu závitů primárního vinutí oproti jádru s menším průřezem. Lze použít vodiče s větším průřezem a tak přenášet větší výkony. Přitom je ale nutno ověřit zda se drát do okénka feritu fyzicky vejde.

Celkový průřez šesti jader:

$$S = 6 \cdot S_1 = 288 \text{ mm}^2$$

Magnetická vodivost použitého materiálu LjT2010/CF128:

$$A_L \rightarrow \Lambda = 2900 \text{ nH/zav.}^2$$

Počet závitů sekundárního vinutí:

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot S_{\max}}{B_{\max} \cdot 6 \cdot S_1 \cdot f} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230 \cdot 0,43}{0,2 \cdot 6 \cdot 0,48 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 10^4} = 12,2z \approx 12z \quad (4.1.6)$$

Volíme syčení $B=0,2\text{T}$

$$\text{střídání } s=0,43$$

Počet závitů sekundárního vinutí:

$$N_2 = \frac{U_{\text{výst max}} \cdot N_1}{U_1 \cdot S_{\max}} = \frac{58 \cdot 12}{\sqrt{2} \cdot 230 \cdot 0,43} = 4,97z \approx 5z \quad (4.1.7)$$

Napětí na primárním vinutí naprázdno:

$$U_{01} = 350\text{V}$$

Napětí na primárním vinutí při zátěži:

$$U_1 = 300\text{V}$$

Frekvence spínání transformátoru je:

$$f = 200\text{kHz}$$

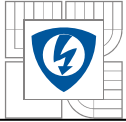
Výstupní napětí nabíječky uvažujeme :

$$U_{\text{výst}} = 35\text{V při } I_2 = 20\text{A}$$

Výstupní napětí měniče je střední hodnota napětí U_x , pokud se zanedbá stejnosměrný úbytek na odporu tlumivky. Pro přesnost výpočtu lze do něj zahrnout i tento úbytek.

Výstupní napětí nabíječky tedy bude:

$$U_{\text{výst}} = U_{\text{xstř}} - U_{\text{tl}} \quad (\text{V}; \text{V}, \text{V}) \quad (4.1.8)$$



Parametry tlumivky :	
Průměr jádra	d = 33mm
Průměr měděného drátu:	d ₁ = 2mm
Rezistivita mědi	ρ = 0,0178 Ω·mm ² /m
Počet závitů	n = 22

Tab.4 Parametry tlumivky

Odpor tlumivky je:

$$R_{tl} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (\Omega; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}) \quad (4.1.9)$$

Průřez vodiče tlumivky:

$$S = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4 \text{ mm}^2}{4} = 3,14 \text{ mm}^2 \quad (4.1.10)$$

délka jednoho závitu:

$$l_1 = \pi \cdot d = \pi \cdot 0,033 \text{ m} = 0,104 \text{ m} = 104 \text{ mm} \quad (4.1.11)$$

délka vodiče tlumivky

$$l = N \cdot l_1 = 22 \cdot 104 \text{ mm} = 2288 \text{ mm} = 2,288 \text{ m} \quad (4.1.12)$$

odpor tlumivky:

$$R_{tl} = 0,0178 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \cdot \frac{2,288 \text{ m}}{3,14 \text{ mm}^2} = 0,013 \Omega = 13,3 \text{ m}\Omega \quad (4.1.13)$$

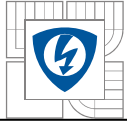
Úbytek napětí na tlumivce je tedy:

$$U_{tl} = R_{tl} \cdot I_2 = 13,3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot 20 \text{ A} = 0,26 \text{ V} \quad (4.1.14)$$

$$U_{xstř.} = U_{výst.} + U_{tl} = 35 \text{ V} + 0,26 \text{ V} = 35,26 \text{ V} \quad (4.1.15)$$

Lze si všimnout určitých nepřesností. Střední hodnota napětí U_x je 35,26 V. Přitom:

$$U_{xstř.} = U_{x\text{max.}} \cdot S_{\text{max}} \quad (\text{V}; \text{V}, -) \quad (4.1.16)$$



$$U_{x\max} = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} - U_D \quad (\text{V}; \text{V}, -, \text{V}) \quad (4.1.17)$$

$$U_{x\max} = 300 \text{V} \cdot \frac{5}{12} - 0,6 \text{V} = 124,4 \text{V}$$

Tedy po dosazení:

$$U_{xstř} = 124,4 \text{V} \cdot 0,43 = 53,5 \text{V}$$

Neboli rozdíl je 18,2V. Tento výpočet však platí pro případ ideálního transformátoru, reálný transformátor má určitý rozptylový tok. Vypočtené napětí je tedy 53,5V, ale naměřeno bylo 35,3V.

Snížení maximální možné střidy tedy :

$$s'_{\max} = \frac{U_{xstř}}{U_{x\max}} = \frac{35,3 \text{V}}{124,4 \text{V}} = 0,284 \quad (4.1.18)$$

Rozptyl transformátoru zmenšil střidu z původní maximální hodnoty 0,43 na 0,284.

Indukčnost primárního vinutí L_1 :

$$L_1 = N_1^2 \cdot \Lambda = 12^2 \cdot 2900 \text{nH} / záv.^2 = 418 \mu\text{H} \quad (4.1.19)$$

Maximální hodnota magnetizačního proudu:

$$I_{\mu\max} = \frac{U_{01} \cdot t_1}{L_1} \quad (\text{A}; \text{V}, \text{s}, \text{H}) \quad (4.1.20)$$

$$I_{\mu\max} = \frac{350 \text{V} \cdot 2,15 \cdot 10^{-6} \text{s}}{418 \cdot 10^{-6} \text{H}} = 1,8 \text{A}$$

Platí:

$$N_1 \cdot \phi_{\mu}(t) = L_1 \cdot i_{\mu}(t) \quad (4.1.21)$$

Odvozením získáme vztah:

$$I_{\mu\max} = \frac{N_1 \cdot B_{\max} \cdot S}{L_1} \quad (\text{A}; -, \text{T}, \text{m}^2, \text{H}) \quad (4.1.22)$$

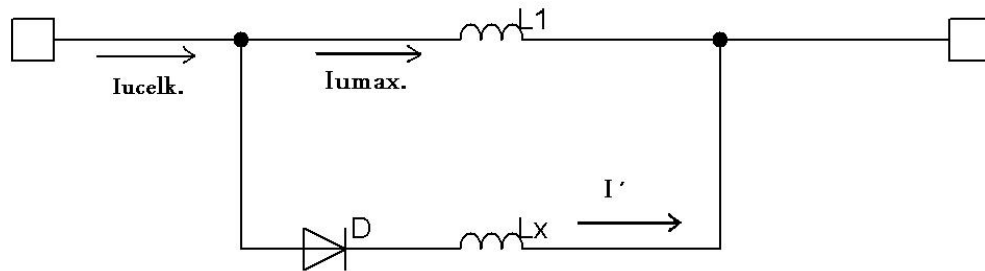
$$I_{\mu\max} = \frac{12 \cdot 0,218 \text{T} \cdot 288 \cdot 10^{-6} \text{m}^2}{418 \cdot 10^{-6} \text{H}} = 1,8 \text{A}$$

Maximální magnetizační proud cívku tedy bude 1,8A. Paralelním připojením pomocné cívky zvýšíme magnetizační proud.

Cívka bude mít takovou indukčnost, aby celkový magnetizační proud byl trojnásobný:

$$I_{\mu CELK} = 3 \cdot I_{\mu max} = 3 \cdot 1,8 \text{ A} = 5,2 \text{ A} \quad (4.1.23)$$

Výpočet indukčnosti cívky L_x :



Obr. 4.1.2: Pomocná indukčnost paralelně k primárnímu vinutí

Proud cívkou L_x bude:

$$I' = I_{\mu CELK} - I_{\mu max} = 5,2 \text{ A} - 1,8 \text{ A} = 3,4 \text{ A} \quad (4.1.24)$$

Indukčnost cívky L_x tedy:

$$L_x = \frac{U_{01} \cdot t_1}{I'} = \frac{350 \text{ V} \cdot 2,15 \cdot 10^{-6}}{3,4 \text{ A}} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ H} = 220 \mu\text{H} \quad (4.1.25)$$

4.2 Dimenzování polovodičových součástek

4.2.1 Dioda D7

Diody se dimenzují na střední hodnotu proudu který jí protéká. Ve výpočtu respektujeme maximální možnou střidu. Dle katalogu je tato hodnota označena I_{FAV} :

$$I_{FAV} = I_{výst} \cdot s'_{max} = 20 \text{ A} \cdot 0,284 = 5,68 \text{ A} \quad (4.2.1)$$

Důležitá je i max. dovolená hodnota napětí v závěrném směru, označovaná jako U_{RRM} . Po překročení by mohlo dojít k průrazu diody.

$$U_{RRM} = U_{2max} = 146 \text{ V} \quad (4.2.2)$$

Mezi další požadavky na všechny použité diody patří vysoká rychlost, neboli doba závěrného zotavení diody. V katalogu je tato hodnota označována t_{tr} . Je to doba za kterou dioda obnoví svou blokovací schopnost. U zapojení s kmitočtem 200kHz je tedy třeba použít velmi rychlou diodu s dobou $t_{tr} \div 50\text{ns}$.



4.2.2 Dioda D8:

Dioda se dimenzujeme podobně jako D_1 na proud I_{FAV} a napětí U_{RRM} , nyní však uvažujeme min. střidu ($s \rightarrow 0$):

$$I_{FAV} = I_{výst} \cdot (1 - s'_{\min}) = 20 \text{ A} \quad (4.2.3)$$

Max. napětí v závěrném směru :

$$U_{RRM} = U_{2\max} = 146 \text{ V} \quad (4.2.4)$$

Ztráta na diodě:

$$P = I_{FAV} \cdot U_F = 20 \text{ A} \cdot 0,8 \text{ V} = 16 \text{ W} \quad (4.2.5)$$

4.2.3 Demagnetizační diody

Diody se dimenzují na proud I_{FAV} a napětí U_{RRM} . Teče jimi magnetizační proud který se vrací zpět do zdroje a má max. hodnotu $I_{\mu \text{ celk}}$.

Střední proud diodou:

$$I_{FAV} = I_{\mu \text{ celk}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{t_{demag}}{T} = 5,2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{2,15 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-6}} = 1,12 \text{ A} \quad (4.2.6)$$

max. napětí v závěrném směru:

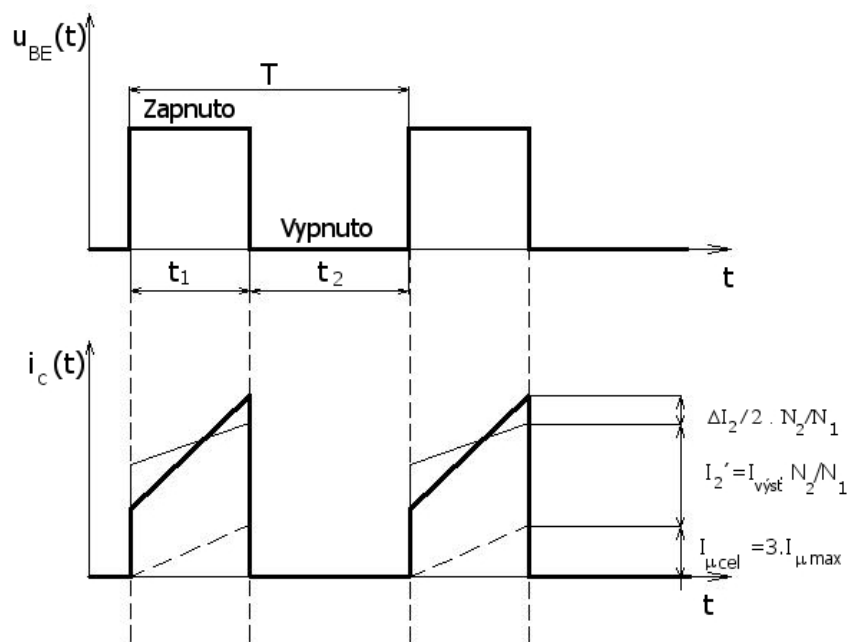
$$U_{RRM} = U_{01} = 350 \text{ V} \quad (4.2.7)$$

Ztráta na diodě:

$$P = I_{FAV} \cdot U_F = 1,12 \text{ A} \cdot 0,8 \text{ V} = 0,9 \text{ W} \quad (4.2.8)$$

4.2.4 Spínací tranzistory

Tranzistory je třeba dimenzovat na maximální proud ($I_{c\max}$) a napětí ($U_{CE\max}$) na přechodu kolektor-emitor. Velikost proudu protékajícího přechodem D-S (Drain-Source) znázorňuje obrázek 4.2.4.1



Obr 4.2.4.1 Průběh proudu tranzistorem (D-S)

Pokud chceme vypočítat maximální proud přechodem D-S je třeba znát zvlnění proudu $\Delta I_{výst}$.

Zvlnění je dáno:

$$\Delta I_{výst} = \frac{U_L}{L_{tlum.}} \cdot t_{zap} \quad (\text{A; V, H, s}) \quad (4.2.9)$$

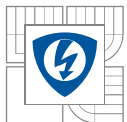
$$\Delta I_{výst} = \frac{U_{x\max} - U_2}{L_{tlum.}} \cdot t_{zap} = \frac{124,4 - 35}{20 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,15 \cdot 10^{-6} = 9,61 \text{ A} \quad (4.2.10)$$

Maximální možný proud tranzistorem je:

$$I_{C\max} = I_2 \frac{N_2}{N_1} + \frac{\Delta I_2}{2} \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_{\mu C} = 20 \text{ A} \cdot \frac{5}{12} + \frac{9,61 \text{ A}}{2} \cdot \frac{5}{12} + 5,2 \text{ A} = 15,5 \text{ A} \quad (4.2.11)$$

Tedy proud by neměl překročit 15,5A, jinak by mohlo dojít k průrazu. Maximální možné napětí které se může na tranzistoru objevit je dáno napětím naprázdno : $U_{CE\max} = U_{0I} = 350 \text{ V}$

Podle katalogu se však zvolí tranzistor s rezervou maximálního napětí $U_{CE\max}$ minimálně 500V.



5. TRAKČNÍ LI-ION AKUMULÁTOR

5.1 Úvod

Jak již bylo zmíněno v úvodu, Li-Ion akumulátory jsou velmi rozšířené a běžně dostupné na trhu. Nejpoužívanějším a nejúspornějším typem Li-Ion baterie, pokud jde o náklady na energetický poměr, je válcový článek 18650 (18 je průměr, 650 délka v mm). Používá se pro mobilní výpočetní techniku a je použita i v naší trakční baterii. Ta je sérioparalelním spojením článků Panasonic CGR18650C s jmenovitým napětím 3,6V a jmenovitou kapacitou 2,15Ah.

5.2 Elektrické parametry

Jedná se o sériové spojení 7 bloků, přičemž každý blok obsahuje 21 článků paralelně (tedy 147ks celkem).

Parametry sestaveného akumulátoru:

Jmenovité napětí (3,6V na článek)	25,2V
Minimální napětí (3,1V na článek)	21,7V
Maximální napětí (4,1V na článek)	28,7V
Maximální trvalý vybíjecí proud (2A na článek)	42A
Maximální nabíjecí proud (1,4A na článek)	29,4A
Vnitřní odpor (120mΩ na článek)	40mΩ
Využitelná kapacita (1,9Ah na článek)	40Ah

Tab.3 Elektrické parametry akumulátoru

V případě sériového provozu sedmi bloků akumulátorů je nutno použít sedm ochranných obvodů pro zajištění kontroly napětí každého článku. Paralelní spojení článků v každém bloku přispívá k tomu, že se bloky chovají navenek stejně - je zajištěna stejná hodnota napětí a kapacity v každém z bloků.

5.3 Mechanické uspořádání

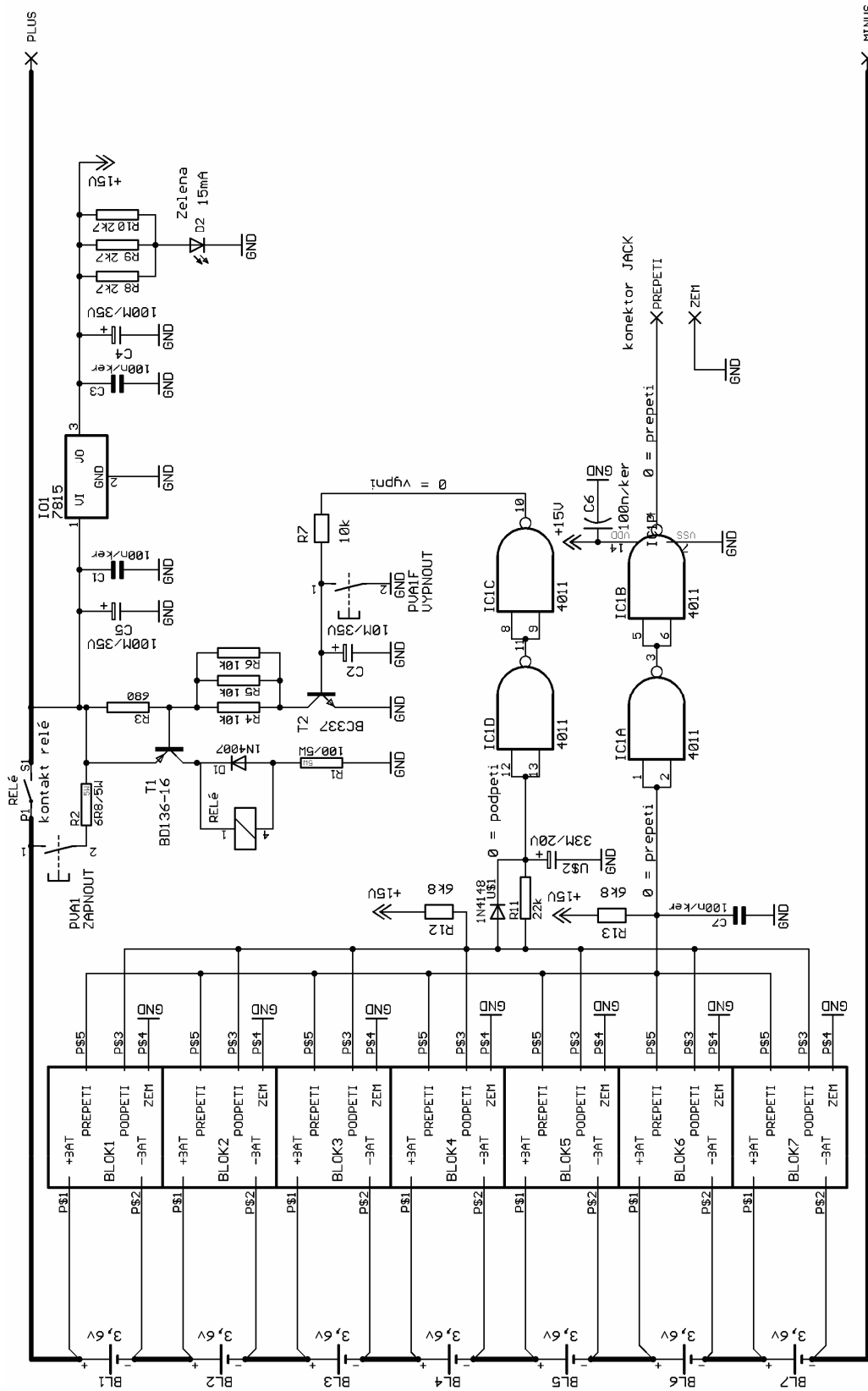
Každý blok tvoří 21 článků paralelně. Jsou propojeny pomocí cuprexitových desek (tloušťka mědi 70um) trojúhelníkového tvaru. Toto zabezpečuje stejné napětí všech článků i při plném zatížení. Články jsou slepeny silikonovým tmelem a každý blok je ovinut izolační páskou a tvoří tak trojboký hranol. Bloky jsou vzájemně propojeny měděným páskem 15x0,5mm. O snímání napětí každého bloku se starají samostatné vodiče – napěťové svorky, které spojují bloky s ochrannými obvody.

Tak se zamezí nežádoucím úbytkům napětí při průchodu trakčního proudu přes spojovací vodiče bloků. Všech 7 bloků je umístěno v ohýbaném rámu z termoplastu. Jeho součástí je i plošný spoj ochranných obvodů, relé pro odpojení výstupních svorek, konektor pro výstupní signál monitorující přepětí a zapínací a vypínací tlačítko. Akumulátor je umístěn do velké cyklistické brašny, viz Obr. 4.2.1. Váha akumulátoru je asi 7kg.



Obr. 5.3.1: Akumulátor v cyklistické brašně

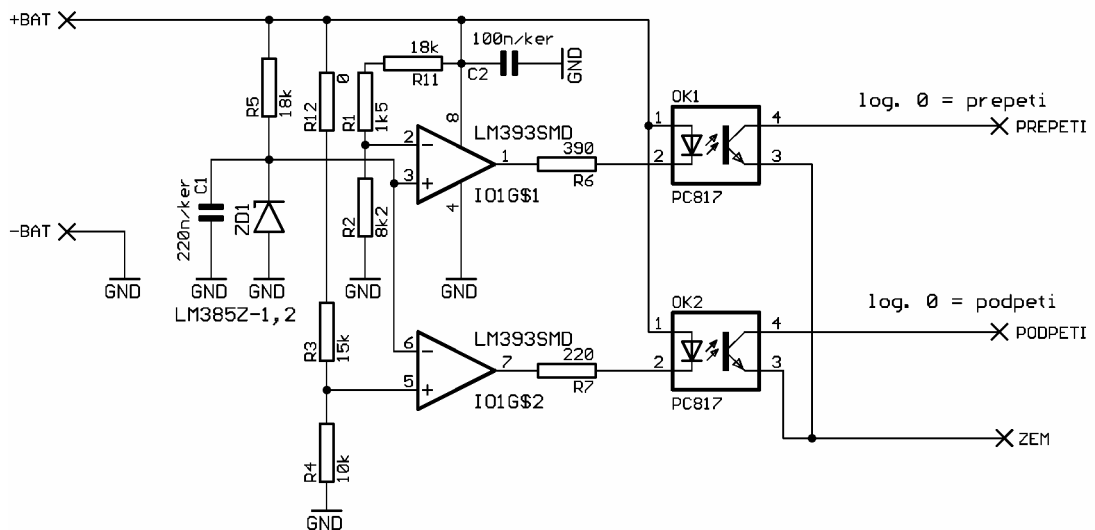
5.4 Ochranné obvody akumulátoru



Obr. 5.4.1: Schéma zapojení ochranných obvodů

Protože každý blok může mít trochu jiné parametry (stárnutí apod.) nestačí monitorovat celkové napětí akumulátoru, je třeba kontrolovat napětí na každém ze sedmi sériových bloků. Podstatou obvodů jsou komparátory které vyhodnocují podpětí nebo přepětí. Na Obr.4.3.1 jsou označeny jako BLOK1 až BLOK7.

Schéma jednoho modulu komparátorů je na Obr.5.4.2. Obvod trvale napájí příslušný blok akumulátoru. Spotřeba modulu je velmi malá - nižší než vlastní samovybití celého bloku 21 článků paralelně. Výstupem modulu jsou dva logické signály - informace o podpětí a přepětí.

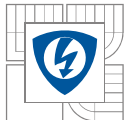


Obr. 5.4.2: Schéma zapojení obvodu komparátorů

Signály jsou od monitorovaného bloku akumulátoru galvanicky odděleny. Použití logiky signálů a řešení výstupních optočlenů s otevřeným kolektorem dovolí paralelní spojení příslušných signálů od všech sedmi modulů.

Poklesne-li na kterémkoli z bloků napětí pod 3,1V, signál podpětí nabude úroveň logické 0. Díky tomu se přeruší proud cívkou relé, jeho kontakt odpadne a tím se odpojí kladná výstupní svorka akumulátoru. Zároveň dojde k přerušení přívodu kladného napájecího napětí pro celé ochranné obvody, a tak v tomto režimu není akumulátor nijak více vybiten (pouze velmi malým napájecím proudem modulů komparátorů). Stejně tak lze akumulátor vypnout i ručně pomocí vypínacího tlačítka - viz Obr.5.4.1. Opětovné zapnutí lze provést pomocí zapínacího tlačítka. Jeho stiskem se přemostí kontakt relé a přivede se napájecí napětí pro ochranné obvody. Pokud není na žádném bloku podpětí a není-li současně stisknuto vypínací tlačítko, relé sepne a trvale zapne akumulátor. Aby bylo zařízení necitlivé na krátkodobé impulsy logické nuly některého modulu komparátorů (vliv rušení, impulsního odběru apod.) je v zapojení použit RCD člen, viz Obr.5.4.1.

Pokud se objeví na kterémkoli bloku akumulátoru napětí větší než 4,1V, pak signál přepětí nabude úroveň logické 0. Tento signál neodpojuje výstupní svorku akumulátoru. V případě přebíjení při rekuperačním brzdění by odpojením akumulátoru totiž mohlo dojít k havárii trakčního měniče (prudký nárůst napětí na meziobvodu).



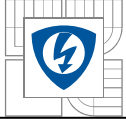
Tento signál se při nabíjení akumulátoru vede do nabíječky, kde slouží jako zpětná vazba pro regulátor napětí akumulátoru. Jde o paralelní regulaci napětí všech bloků akumulátoru. Pokud dojde k poruše - zkratu nebo přerušení, spojovacího signálového kabelu k nabíječce, objeví se na nabíječce logická 0, nabíječka tuto situaci vyhodnotí jako trvalé přepětí a přestane nabíjet. Nemůže tedy dojít k přebití s následkem zničení akumulátoru.

5.5 Provozní režim, životnost

V katalogovém listu Li-ion článků výrobce doporučuje maximální napětí článku 4,2V a minimální napětí asi 3V. Pak je garantována jmenovitá kapacita článku. Jak plyne z předchozího popisu ochranných obvodů, v akumulátoru se používají hraniční meze napětí na článek 3,1V až 4,1V, tedy přísnější limity na minimum i maximum. Dochází tak sice k mírnému snížení využitelné kapacity (na asi 90%), toto však přispívá k delší životnosti akumulátoru. Ze stejného důvodu je akumulátor nabíjen po skončení každé jízdy, i když je vybitý jen částečně. Praxe potvrdila že toto výrazně zvyšuje životnost.

6. ZÁVĚR

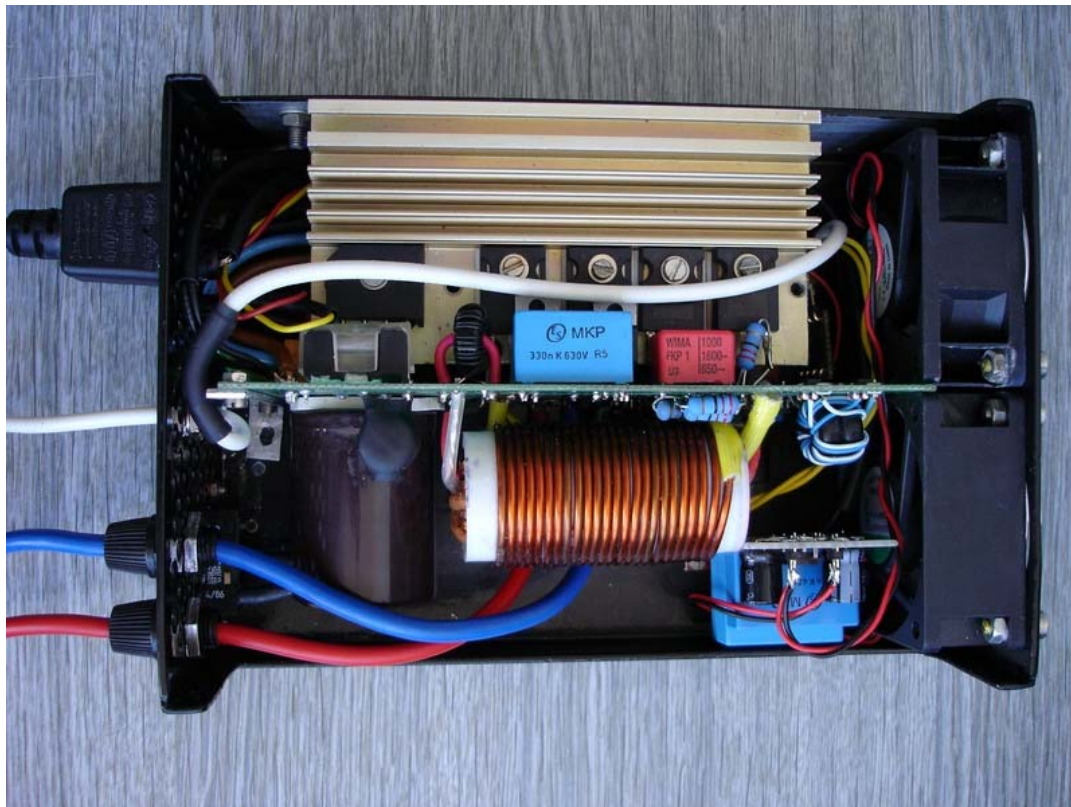
Práce představuje konstrukci nabíječky moderní koncepce pracující na poměrně vysokém kmitočtu. Je snadno modifikovatelná na nabíjení olověných akumulátorů. Postavil jsem modul regulátoru a společně s vedoucím práce jsme zapojení zprovoznili a odzkoušeli v provozu. Vážnější problémy nebyly, pouze se zkontrolovala hodnota střídny a upravily hodnoty rezistorů v RC členů ve výstupní části.



7. LITERATURA

- [1] NOVOTNÝ V., VOREL P., PATOČKA M.: Napájení elektronických zařízení
- [2] HAMMERBAUER J., Elektronické napájecí zdroje a akumulátory, Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5
- [3] PRACHAŘ T. Nabíječka olověných akumulátorů s velkým výstupním proudem. Brno: VUT 2006
- [4] KREJČIŘÍK A., Napájecí zdroje 2. ISBN 9788086056036
- [5] Praktická Elektronika A Radio 11/2008 str.1,2
- [6] Katalogový list obvodu UC3845

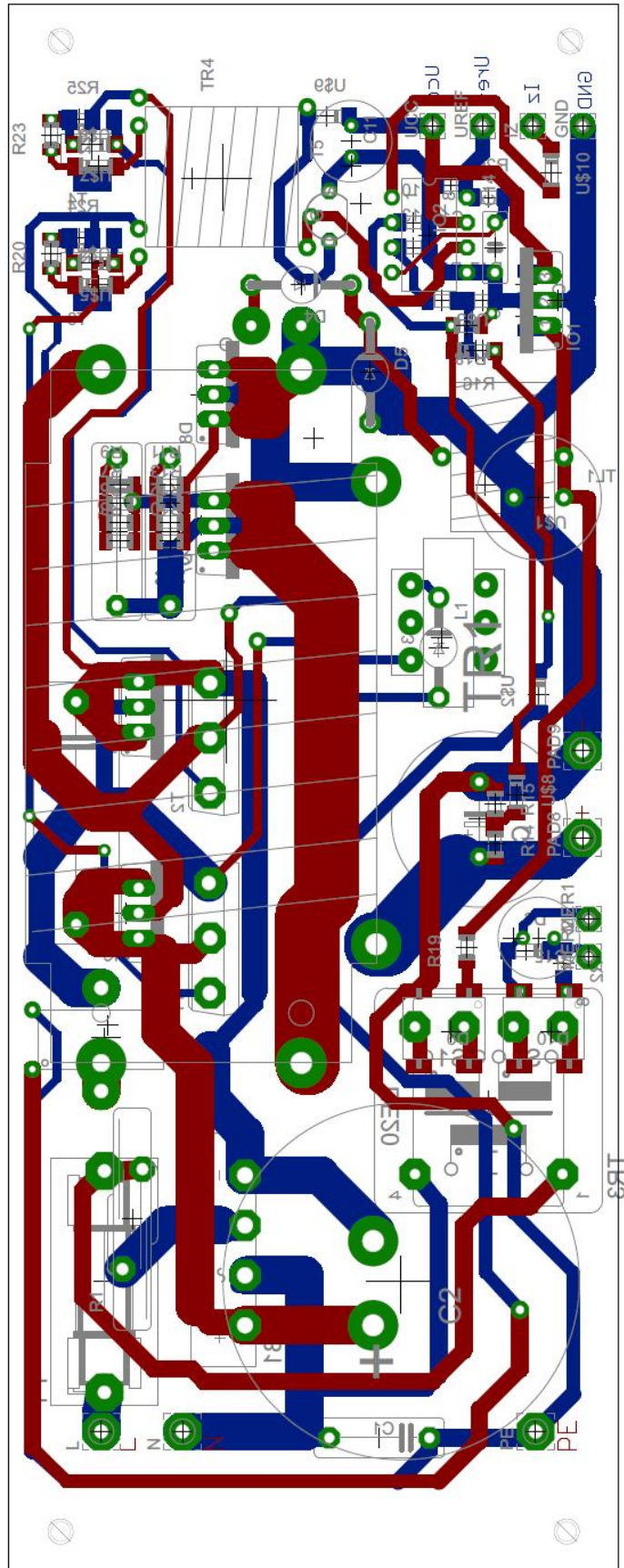
8. OBRAZOVÁ PŘÍLOHA



Obr.8.1: Sestavená nabíječka



Obr.8.2: Modul regulace



Obr.8.3: Deska plošných spojů nabiječe