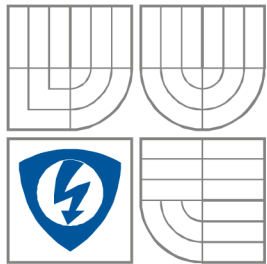


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OBVODY ZAJIŠŤUJÍCÍ SPRÁVNÉ NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ AKUMULÁTORŮ LIFEP04

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE
SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR SEJKORA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID KUBÁNEK, Ph.D.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá BMS systémy pro ochranu, správu a dohled nad bateriovými sestavami sériové kombinace více článků. Další část práce se zabývá návrhem zařízení pro základní ochranu jednotlivých článků před přebíjením a podvybíjením. Návrh bere v potaz jednoduchost, nízkou klidovou spotřebu, zabezpečení funkce, modifikovatelnost pro aplikaci s jinými prahovými napětími a nízkou cenu návrhu. Funkce je ověřena simulací činnosti a měřením.

KLÍČOVÁ SLOVA

System správy baterií, ochrana baterie, LiFePO₄, BMS

ABSTRACT

This thesis is about BMS systems for the protection, management and supervision of battery-assemblies serial combination of multiple cells. Next part of the thesis is about facilities for an elementary protection of individual cells before overcharging and undervoltage. Draft shall take into consideration the simplicity, low idle power, security function, modifiability for use with other threshold voltages and low cost design. Function is verified by simulating the operation and measuring.

KEYWORDS

Battery Management System, Battery protection, LiFePO₄, BMS

SEJKORA, P. *Obvody zajišťující správné nabíjení a vybíjení akumulátorů LiFePO₄*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 18 s. Vedoucí semestrální práce Ing. David Kubánek, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Obvody zajišťující správné nabíjení a vybíjení akumulátorů LiFePO4" 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

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

V Brně dne

.....

podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků.....	vii
1. Úvod.....	8
2. Rozbor problematiky.....	9
2.1. Akumulátory.....	9
2.1.1. LiFePO ₄	9
2.1.2. Nabíjení.....	10
2.2. Představení a možnosti BMS.....	10
2.2.1. Ochrana před přebitím.....	10
2.2.2. Ochrana před podvybitím.....	11
2.2.3. Ochrana před přetížením a zkratem.....	11
2.2.4. Ochrana před přehřátím.....	12
2.2.5. Ochrana před dlouhým a opakovaným nabíjením.....	12
2.2.6. Indikace a logování kapacity nabití.....	12
2.2.7. Sledování a indikace kapacity a stavu akumulátorů.....	13
3. Návrh řešení.....	14
3.1. Cíl návrhu.....	14
3.2. Schéma a popis funkce.....	15
3.2.1. Ochrana před podvybitím.....	15
3.2.2. Ochrana před přebitím.....	16
3.2.3. Odpojení zátěže a omezení proudu.....	17
3.3. Výpočty.....	17
3.4. Simulace funkce.....	21
3.4.1. Odpojení zátěže.....	21
3.4.2. Balancování.....	22
3.5. Realizace.....	25
3.5.1. Kontaktní pole.....	25
3.5.2. DPS.....	25
3.5.3. Omezení.....	25
3.6. Měření.....	26
3.6.1. Odpojení zátěže.....	26

3.6.2.	Průběh nabíjení více článků	26
3.6.3.	Spotřeba a strmost.....	28
4.	Závěr.....	29
5.	Rejstříky a seznamy	30
5.1.	Seznam použité literatury	30
5.2.	Přílohy.....	31
A.	Obsah CD.....	31
B.	DPS	31
C.	Osazovací plán.....	32
D.	Fotografie z realizace.....	33

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Blokové schéma funkce BMS.....	10
Obr. 3.1: Schéma zapojení hlavního modulu.....	16
Obr. 3.2: Schéma zapojení doplňkového modulu.....	17
Obr. 3.3 Výsledek simulace obvodu.....	21
Obr. 3.4: Simulace samočinného odpojení zátěže.....	22
Obr. 3.5: Simulace nabíjení ideálních článků.....	22
Obr. 3.6: Simulace průběhu balancování článků.....	23
Obr. 3.7: Simulace balancování bez omezení proudu.....	23
Obr. 3.8: Simulace ztrátového výkonu na tranzistorech během balancování.....	24
Obr. 3.9: Porovnání simulace ztrátového výkonu tranzistorů s a bez omezení proudu.....	24
Obr. 3.10: Vybíjení článků LiFePO4 s odpojením zátěže.....	26
Obr. 3.11: Průběh nabíjení článků LiFePO4.....	27
Obr. 3.12: Detail balancování článků LiFePO4.....	28
Obr. 3.13: Spotřeba všech modulů.....	28
Obr. 5.1: DPS hlavního obvodu.....	31
Obr. 5.2: DPS doplňkového obvodu.....	31
Obr. 5.3: Osazovací plán hlavního obvodu.....	32
Obr. 5.4: Osazovací plán doplňkového obvodu.....	32
Obr. 5.5: Měření na nepájivém poli.....	33
Obr. 5.6: Vyrobené moduly.....	33
Obr. 5.7: Měření na automatizovaném měřícím stanovišti.....	34

1. ÚVOD

V dnešní době nejsou možnosti skladování energie a napájení zařízení nikterak široké. Máme sice baterie, které pojmu poměrně velké množství energie, ale za posledních pár let žádná velká evoluce neproběhla vzhledem k raketovému vývoji v některých jiných odvětvích zařízení, které využívají baterie a jejich stoupající spotřebě. Pro většinu aplikací od mobilního telefonu po např. elektromobily jsou vhodné Li-Ion, Li-Pol případně LiFePO₄ články pro svoji kapacitu, schopnost dodávat vysoké proudy a malé samovybíjení. Mají ale pro některé aplikace příliš malé napětí a proto se spojují do sériových a paralelních kombinací, aby se dosáhlo optimálních parametrů. Se sériovou kombinací dvou a více článků však nastává problém s jejich provozováním. Lithiové akumulátory jsou citlivé na rozsah napětí a v sériové kombinaci může dojít k "rozjetí" parametrů (napětí, kapacity) jednotlivých článků. Pro co nejdelší životnost potřebujeme tyto vlastnosti hlídat na každém článku a udržovat je stejné. K tomu slouží BMS.

Battery Management System (BMS) je zařízení které sleduje parametry na každém jednom článku v sériové kombinaci (může být i více paralelních). Jeho úkolem je indikace stavu a schopnost zasáhnout, když dojde k narušení rovnováhy mezi články.

Cílem práce je zjistit možné vlastnosti a schopnosti BMS systémů a následně navrhnout, sestavit a otestovat řešení základní ochrany před přebíjením (balancování) a podvybíjením (odpojování) článků LiFePO₄. Prahová napětí budou snadno nastavitelná pro běžné rozsahy LiFePO₄ i Li-Ion baterií.

2. ROZBOR PROBLEMATIKY

2.1. AKUMULÁTORY

První experimenty s lithiovými akumulátory prováděl už v roce 1912 G.N.Lewis. Primární lithiové články byly ale vynalezeny až v polovině šedesátých let minulého století. Již od začátku se vyznačovaly vysokou měrnou energií a kapacitou, velice nízkým samovybíjením a četnými dalšími příznivými vlastnostmi. Hlavně se brzy ukázalo, že se dají vyrobit i v dobíjecí verzi.

V polovině sedmdesátých let začaly pokusy, kde kladnou elektrodou byly sulfidy kovů a zápornou elektrodou kovové lithium. Výsledky však nebyly uspokojivé. Velký pokrok nastal v roce 1990, kdy zástupci firmy Sony představili novou technologii, která využívala jako aktivní materiál pro zápornou elektrodu směs grafitu (uhlíku) obohaceného lithiem a polyolefinů. V lednu roku 1991 se již objevuje první komerční aplikace s Li-Ion technologií - mobilní telefon Sony "Handyphone HP-211", který přinesl okamžitý úspěch. [1]

2.1.1. LiFePO₄

Akumulátory LiFePO₄ nebo také LFP (Lithium FerroPhosphate) vychází z Lithium-Iontových baterií. Jde o jejich poddruh s odlišným provedením katody. Na tu je zde použit lithium-železo-fosfát (LiFePO₄). V porovnání s nejrozšířenějšími Li-Ion bateriemi mají několik výhod. Jako hlavní bych jmenoval stabilitu a bezpečnost vycházející z jejich chemického složení. Bezpečnost LiFePO₄ akumulátorů vyplývá z vlastností tohoto materiálu. Katoda je u klasických Li-Ion článků tvořena z LiCoO₂. Vazba Fe-P-O je daleko silnější než Co-O, takže při špatném použití (zkratování článku, vystavení vysoké teplotě) je daleko těžší uvolnit atomy kyslíku. Pouze za výjimečných teplotních podmínek, obecně přes 800°C, se tato vazba poruší a nastane extrémní tepelný únik (exploze), ke kterému jsou právě klasické Li-Ion akumulátory tolik náchylné za daleko nižších teplot. [2] Dále se vyznačují vysokou životností 1000-3000 cyklů, malým rozsahem pracovního napětí 3,0-3,3V a malou vnitřní impedancí v řádu jednotek až desítek mΩ. Maximální nabíjecí napětí se udává 3,65V, minimální vybíjecí napětí 2,8V (někdy až 2V), maximální trvalá zátěž 1C (špičkově až 10C, optimálně 0,5C) a maximální trvalý nabíjecí proud 1C (optimálně 0,5C). Parametry se mohou napříč výrobci a modely lišit a je třeba zjistit si parametry konkrétního modelu v dokumentaci výrobce. Obvyklé parametry jsou shrnuty v tabulce.

Jmenovité napětí	3,2V
Rozsah pracovního napětí	3,0-3,3V
Maximální nabíjecí napětí	3,6V
Relaxační napětí	3,4V
Minimální vybíjecí napětí	2,8V
Životnost (do 80% kapacity)	1000-3000 cyklů

Tab 2.1: Vlastnosti LiFePO₄

2.1.2. NABÍJENÍ

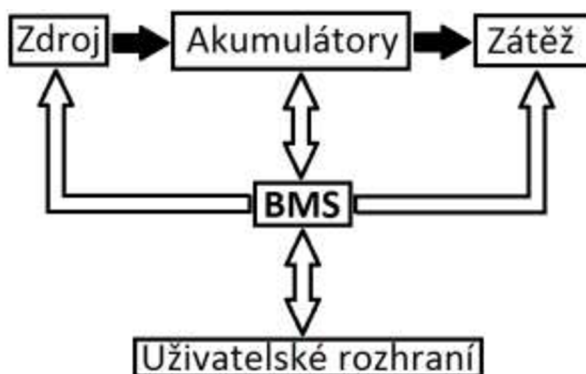
Nabíjení akumulátorů probíhá v první fázi v režimu konstantního proudu. Nabíječ dodává maximální nastavený proud a napětí na sériové kombinaci akumulátorů postupně stoupá. V tomto režimu je dobíjení nejrychlejší a probíhá do 80-90% kapacity baterie.

Druhá fáze nastává, když napětí na soupravě akumulátorů vystoupá do limitu nabíječe daného nabíjecím napětím jednoho článku a jejich počtem. Napětí se již nezvyšuje a klesá proud odebíraný akumulátory.

Třetí fáze – ukončení nabíjení – nastává, když proud odebíraný akumulátory klesne na 1/24 své maximální hodnoty. V této chvíli by měl nabíječ ukončit činnost úplně nebo se přepnout na relaxační dobíjení. Tzn., že sníží maximální napětí na násobek daný počtem článků a požadovaným relaxačním napětím.

2.2. PŘEDSTAVENÍ A MOŽNOSTI BMS

BMS je v základní podobě elektronika, ochraňující akumulátor pouze před překračováním mezních parametrů daných výrobcem a následným poškozením (přebíjení, podvybíjení). Může však i zajišťovat celý management kolem baterií. Nad moduly jednotlivých článků může bdít a shromažďovat různorodé údaje i mikrokontrolér nebo počítač. Funkce mohou být od pouhého řízení nabíjení a vybíjení také sledování a logování napětí, proudu, kapacity, teploty, stavu, predikce výdrže a životnosti, varování a mnoho dalšího. Všechny údaje a nastavení může zprostředkovávat dále v uživatelském rozhraní v podobě sběrnice nebo terminálu. Jde jen o to, co obsluhu nebo správce zajímá.



Obr. 2.1: Blokové schéma funkce BMS

2.2.1. OCHRANA PŘED PŘEBITÍM

Jedná se o velmi důležitou a kritickou ochranu. Její význam je hlavně ve druhé fázi nabíjení. LiFePO4 články lze nabíjet do napětí 3,6V. Pouhý nabíječ však nemůže sledovat napětí jednotlivých článků, ale sleduje celkové napětí soustavy akumulátorů. Nastává toto riziko:

Nabíječ udržuje konstantní napětí celé kombinace akumulátorů a probíhá nabíjení. Některý článek má ale jiné parametry než ostatní – nejčastěji nedosahuje kvality ostatních článků a má nižší kapacitu. Protéká jím však stejný proud jako všemi ostatními a proto dojde dříve k zvýšení jeho napětí na hranici maximálního dobíjecího. Že nastala tato situace nemá nabíječ šanci zjistit. Je tedy nutný zásah ochrany před přebitím a omezení proudu protékajícího článkem. Pokud se tak nestane, bude článkem dále protékat stejný proud a

napětí na něm se bude dále zvyšovat. Následkem překročení napětí bude další poškození článku a jeho velmi rychlá degradace.

Ochranu můžeme realizovat pasivně přeměnou části proudu na teplo nebo aktivně přečerpáváním energie do ostatních článků. Aktivní ochrana se však moc nevyužívá, protože je poměrně složitá.

2.2.2. OCHRANA PŘED PODVYBITÍM

Pokles napětí pod výrobcem stanovenou mez je další z faktorů, které velmi výrazně zkracují životnost akumulátorů. U LiFePO₄ je touto hranicí 2,8V. Při tomto napětí je v akumulátorech už jen zlomek energie a další pokles napětí už je velmi strmý. Pokud přesto vybíjení pokračuje, dochází k poškození článku a ztrátě kapacity. Opětovné nabití od jisté hranice navíc není možné standardně, ale jen velmi malým proudem, dokud nedojde opět ke zvýšení napětí do pracovní meze – nad 3V. Ochranu je možné realizovat několika způsoby.

Indikace obsluze

BMS indikuje opticky, akusticky nebo jinak pokles napětí a obsluha musí zařídit nápravu tohoto stavu (přestat odebírat energii, změnit zdroj, omezit spotřebu, dobít baterie). Tato možnost však vyžaduje aktivní obsluhu a v mnoha aplikacích prakticky nepřipadá v úvahu.

Signalizace zátěži

Může proběhnout např. jako signál do řídicího vstupu regulátoru zátěže, aby omezil příkon nebo ukončil činnost a nezatěžoval tak baterii. Tato možnost má výhodu v tom, že může být plně automatická a neklade požadavky na odpojovač zátěže. Ne vždy se však může použít, kvůli absenci přerušovacího vstupu zátěže.

Odpojení zátěže

BMS integruje modul odpojovače a aktivuje jej, jakmile je to potřeba. Pokud je však zátěž kvůli něčemu důležitá může dojít k újmě z nenadálého odstavení a je vhodnější využít jinou možnost nebo přidat včasné varování před odpojením, aby došlo k zabezpečení, uložení dat nebo podobné preventivní činnosti.

2.2.3. OCHRANA PŘED PŘETÍŽENÍM A ZKRATEM

Při přetížení dochází vlivem vnitřního odporu akumulátorů k vyšším ztrátám uvnitř jeho struktury, než je možné a dochází k jeho zahřívání. Krátkodobé přetížení většina výrobců baterií povoluje a specifikuje jeho parametry (např. 10C po dobu 5s, 1x za minutu). Dlouhodobé však může mít následek v podobě přehřívání a degradace vlastností článků, záleží na intenzitě. Zkrat je v podstatě také přetížení, jen velmi intenzivní. Můžeme tedy obě ochrany realizovat jedním obvodem. Při zkratu dochází k přeměně velkého množství energie uvnitř článku na teplo a silnému zahřívání. Během velmi krátké doby může teplota vystoupat až na hranici poškození vnitřní struktury, dokonce může dojít k uvolnění atomů kyslíku a výbuchu.

Pro realizaci ochrany je třeba sledovat proud protékající články. Měření můžeme provádět nepřímo například měřením magnetického pole kolem přírodního vodiče (hodí se pro vysoké proudy) nebo přímo sériovým zařazením rezistoru nízké hodnoty do obvodu a

měřením úbytku napětí na něm. Výhodou je, že v sériové kombinaci článků protéká všemi stejný proud, takže jej stačí měřit a vyhodnocovat pouze v jednom bodě. Při vyhodnocení nutnosti zásahu můžeme s výhodou použít výstupy ochrany před podvybitím, popsané v kapitole 2.2.2 a není třeba vnášet další prvky do obvodu.

2.2.4. OCHRANA PŘED PŘEHŘÁTÍM

Lithiové akumulátory nemají rády moc nízké nebo vysoké teploty a jejich vystavováním dochází k zrychlení jejich stárnutí. Teplota při nabíjení nebo vysoké zátěži se může zvýšit, ale neměla by se dostat mimo 0 – 45°C při nabíjení a -10 – 60°C při vybíjení. Pro měření můžeme použít např. termistor a v případě překročení mezí můžeme vyvolat chlazení/ohřev baterií, případně omezení protékajícího proudu využitím zásahů popsanych v kapitole 2.3.2 nebo omezením nabíjecího proudu zdroje.

2.2.5. OCHRANA PŘED DLOUHÝM A OPAKOVANÝM NABÍJENÍM

Někteří uživatelé se mylně domnívají, že když několikrát za sebou spustí nabíjení již nabitých článků, budou mít jistotu, že budou opravdu plně nabité. Plně nabité však byli již při prvním vypnutí nabíjení a během dalších pokusů dochází k jejich přebíjení. Znalý uživatel tuto činnost neprovádí, protože jistotu nabití střídá jistota snížení životnosti akumulátorů. Neznalý uživatel však akumulátory také potřebuje a bude využívat. Proto je dobré mu v několikanásobném dobíjení zabránit.

Tuto ochranu je nutné řešit spíše na úrovni zdroje než jednotlivých článků – i když do jisté míry tuto činnost provádí na úrovni článků ochrana před přebitím (nedovolí překročit maximální napětí). Možností je opět několik.

Neumožnit nabíjení po krátké době od ukončení předchozího

Asi nejjednodušší možnost, kterou lze řešit bez nutnosti měření. Další nabíjení se nespustí, dokud neuplyne stanovená doba nastavená např. čítačem. Je to ale poněkud komplikovaná možnost vzhledem k faktu, že když akumulátor nebude použit, tak by tato doba musela být velmi dlouhá, zatím co když bude rychle vybit, tak nebude možné jej znovu nabít.

Neumožnit nabíjení dokud nedojde k poklesu napětí

Tato možnost také není ideální, protože může k poklesu dojít krátkým zatížením, které nespoteřebuje tolik energie, kolik baterie opět přijme, než bude rozpoznáno, že je nabitá. Může však už posloužit poměrně efektivně a je snadné ji realizovat jen na úrovni libovolného nabíječe stanovením, že napětí musí být nižší o nějakou hodnotu než konečné nabíjecí napětí.

Neumožnit nabíjení, dokud nedojde k poklesu náboje pod určitou mez

Tato možnost je nejlepší z předkládaných a je hojně využívána třeba v noteboocích. Dokud neklesne kapacita nabití např. pod 95%, není možné znovu začít nabíjet. Je však nejsložitější, protože vyžaduje sledování kapacity baterie a aktuálního stavu popsanych v bodě 2.2.6 a 2.2.7.

2.2.6. INDIKACE A LOGOVÁNÍ KAPACITY NABITÍ

Toto už nejsou zcela triviální funkce a vyžadují vyšší míru sledování baterií a shromažďování údajů s využitím např. mikrokontroleru. Možností monitorování je několik.

Sledování aktuálního napětí

Jde o velmi nepřesnou nelineární metodu silně závislou na aktuální zátěži. Měříme aktuální napětí a vycházíme z rozsahu maximálního a minimálního napětí. Dále je rozdíl, jestli jde o napětí při nabíjení nebo vybíjení. Tato možnost je silně orientační.

Sledování kapacity z elektrolytu

Tuto možnost považuji za nejpřesnější, ale nejhůře realizovatelnou. Lithiové články jsou totiž hermeticky uzavřené a není tedy možné elektrolyt snadno změřit, jako například u olovených akumulátorů.

Sledování náboje dodaného z/do baterie

Tato možnost je dobře realizovatelná a celkem přesná. Chybu do ní zanáší parazitní vlastnosti akumulátorů (vnitřní odpor). Při nabíjení a vybíjení se část energie přemění v teplo a nedojde k jejímu efektivnímu využití. Účinnost akumulátorů však lze stanovit a kompenzovat podle ní naměřené výsledky, takže je lze považovat za přesné.

2.2.7. SLEDOVÁNÍ A INDIKACE KAPACITY A STAVU AKUMULÁTORŮ

Zde můžeme využívat a shromažďovat data získaná v bodě 2.2.6 a v podstatě statisticky s nimi pracovat. Stav akumulátorů získáváme v předchozím bodě a ukládáme si jen vybrané hodnoty. Zajímá nás dosažená kapacita nabití.

Aktuální hodnota je momentální kapacita zbývajících v baterii a jde o využitelnou energii, se kterou můžeme počítat.

Maximální možná kapacita při nabití je kapacita nabité baterie, kterou jsme dosáhli. Tuto hodnotu buď zadáme ručně, nebo uložíme nejvyšší hodnotu kapacity, jaká byla kdy naměřena. Je to pro nás referenční hodnota ze které vycházíme v dalších výpočtech.

Maximální nabitá kapacita je velikost energie pojatá baterií, kterou je akumulátor schopen pojmout. S časem a stárnutím se tato velikost snižuje. Podělením maximální možné kapacity a této hodnoty získáme velikost opotřebení (stav) baterie.

Procento nabití získáme podělením maximální naposledy dosažené kapacity při plném nabití a aktuální kapacity akumulátoru. Výsledek vynásobíme stem a máme kýženou hodnotu.

3. NÁVRH ŘEŠENÍ

3.1. CÍL NÁVRHU

Cílem bakalářské práce je návrh obvodu pro zajištění ochrany akumulátorů před přebitím (neboli balancování) a podvybitím. K tomuto účelu bude navržen obvod, který zajistí tuto funkci pro každý článek zvlášť a bude pracovat samostatně. Návrh počítá s nasazením na jakékoliv články i trvale, takže se bude snažit o udržení co nejnižší spotřeby, aby nedocházelo k zbytečnému samovolnému vybíjení článků. Vzhledem k lišícím se mezním hodnotám jednotlivých výrobců, potažmo sérií baterií, budu volit i možnost snadného doladění prahových napětí. Nebude pak problém upravit obvod pro nasazení i na běžné Li-Ion články pouhou úpravou hodnot děliče napětí – víceotáčkový trimr.

Obvod bude dimenzován, po domluvě s vedoucím práce, pro použití s články typu SmallCell od firmy GWL Power. Ty se vyrábí do kapacity 10Ah s nabíjecím a vybíjecím proudem 1C. Můj návrh bude tedy možné použít k nabíjení a vybíjení proudem do 10A (dáno použitými tranzistory).

V době, kdy bude docházet k balancování článků (na konci první fáze nabíjecího cyklu) už bude rozdíl napětí mezi články malý a nabíječ bude pracovat blízko režimu konstantního napětí. Pokud nedojde k poruše nebo destrukci článku, měl by už být proud nutný na balancování malý – ne plný nabíjecí. Omezení proudu také není skoková záležitost, ale při dosažení maximálního napětí se postupně mění poměr mezi proudem tekoucím do nabíjející se baterie a proudem měnícím se v teplo vyzařované do okolí. Pokud by však vadný článek byl, poteče tranzistorem plný proud a úbytek na něm bude značný. Částečnou ochranu proti této situaci a další snížení proudu bude zajišťovat doplňkový modul.

Doplňkový modul bude zajišťovat také odpojení zátěže připojené na sadu článků.

Hlavní modul

Pro každý článek bude jeden hlavní modul, takže bude modulů třeba stejné množství, jako článků v sérii. Škálovatelnost nebude problém a bude prakticky neomezená. Hlavní modul bude napájen přímo z jednotlivých článků. Bude obsahovat obvod ochrany před přebitím a podvybitím se signalizací LED diodami a dvoukanálový optočlen pro signalizaci doplňkovému modulu. Bude však schopen pracovat i samostatně. Skládá se ze dvou celků. Oba jsou navrženy na základě typického zapojení uvedeného v katalogovém listu použitých napětových referencí TC54 a TL431.

První celek zajišťuje signalizaci příliš nízkého napětí na článku a nutnost odlehčení zátěže, aby nedošlo k jeho poškození podvybitím. Schéma je upravené pro tuto konkrétní aplikaci a vychází z katalogového listu TC54, typická zapojení, figure-4.1 [3]. Odpojení obvodu bude indikováno vizuálně červenou LED diodou na každém modulu, aby bylo patrné, na kterém článku došlo k problému a zajišťováno bude užitím doplňkového modulu, který znemožní další vybíjení.

Druhý celek omezuje napětí na člancích (balancuje články), aby nedošlo k překročení napětí na některém z nich. Schéma je upravené pro tuto konkrétní aplikaci a vychází z katalogového listu obvodu TL431, typická zapojení, Figure 24 [4]. Balancování probíhá rozsvícením žluté signalizační LED diody a otevřením tranzistoru, na kterém je plné napětí

článku. Tuto topologii volím pro jednoduchost řízení a odvodu tepla jediným prvkem, který nebude velký problém chladit. Přebytečná energie, kterou nebude žádoucí dodávat do akumulátoru, bude tedy přeměněna na teplo vyzářené do okolí. Doplnkový modul (pokud bude nasazen) při dosažení prahového napětí omezí proud obvodem, a sníží tím náročnost na chlazení.

Doplňkový modul

Bude vřazen pouze jeden do série se všemi bateriemi a bude zajišťovat snížení proudu od nabíječe při dosažení maximálního nabíjecího napětí a odpojení zátěže při poklesu napětí pod minimální hodnotu. Tento modul však nebude provádět žádná měření a bude reagovat pouze na signalizaci od hlavního modulu na kterémkoli z článků. Jeho funkce bude tedy podřízena hlavním modulům a řízen bude přes paralelně spojené optočleny jednotlivých článků. Napájen bude z bateriové kombinace.

Snížení proudu bude probíhat vřazením výkonového rezistoru nízké hodnoty do obvodu mezi nabíječ a nabíjené články. Na rezistoru se vytvoří úbytek napětí, o který se zvýší napětí na nabíječi. Nabíječ tím dosáhne svého maximálního napětí a proud klesne.

Odpojení zátěže bude probíhat uzavřením výkonového tranzistoru HEXFET a přerušením záporné polaroty do zátěže. Přerušení však bude pouze jednostranné díky diodě ve struktuře použitého tranzistoru. Pokud tedy bude jako zátěž použit například motor s rekuperací, tak dobíjení článků bude moci probíhat bez narušení, ale nebude možné články zatěžovat.

3.2. SCHÉMA A POPIS FUNKCE

3.2.1. OCHRANA PŘED PODVYBITÍM

Tuto činnost zastává levá část obvodu zobrazeného ve schématu níže (Obr 3.1) po optočlen OK1B. Integrovaný obvod VR2 je napěťová reference TC54VN s prahovým napětím 2,1V mezi VI a VSS. Typická spotřeba je 1uA. Pokud je napětí vyšší než 2,1V, je VO ve stavu vysoké impedance. Když klesne, dojde ke skokovému otevření integrovaného výstupního CMOS tranzistoru v jeho vnitřní struktuře a spojení VO na VSS, tedy uzemnění.

VR2 tedy sleduje nastavené prahové napětí 2,8V přes odporový dělič R5, R10 a R6, který snižuje napětí na 2,1V detekované referencí. Pokud je vše v pořádku, je toto napětí vyšší a dioda D2 nesvítí. Pokud dojde ke snížení napětí na tuto hranici nebo níže, obvod se vybaví.

Reference VR2 zareaguje na pokles pod 2,8V uzemněním VO a tím přes rezistor R9 dojde i k uzemnění báze PNP tranzistoru T4. T4 se otevře a mezi kolektorem a emitorem začne protékat proud do diody D2 a druhého kanálu optočlenu OK1B. Tím je dáno znamení obsluze o poklesu napětí a doplňkovému obvodu je dán povel k odpojení. Když dojde opět ke zvýšení nad 2,8V, VR2 přepne VO do režimu vysoké impedance a báze tranzistoru T3 se převahou R8 připojí na kladnou polaritu. T3 se uzavře a přestane přes něho protékat proud.

Při odpojení zátěže dojde opět ke zvýšení napětí na člancích, zejména na tom, který odpojení vyvolal. Reference VR2 má hysterezi typicky 100mV. Jeho hysterezi můžeme ještě zvětšit, aby nedošlo k rozkmitání obvodu opětovným připojováním a odpojováním zátěže v rychlém sledu. Proto je obvod doplněn rezistorem R17. V normálním stavu (VR2 ve vysoké impedanci) tvoří R17 s rezistory R8 a R9 sériovou kombinaci, která je paralelně připojená k rezistorům R5 a R10. Tím nepatrně snižuje odpor této větve děliče napětí. Na tento posun ve

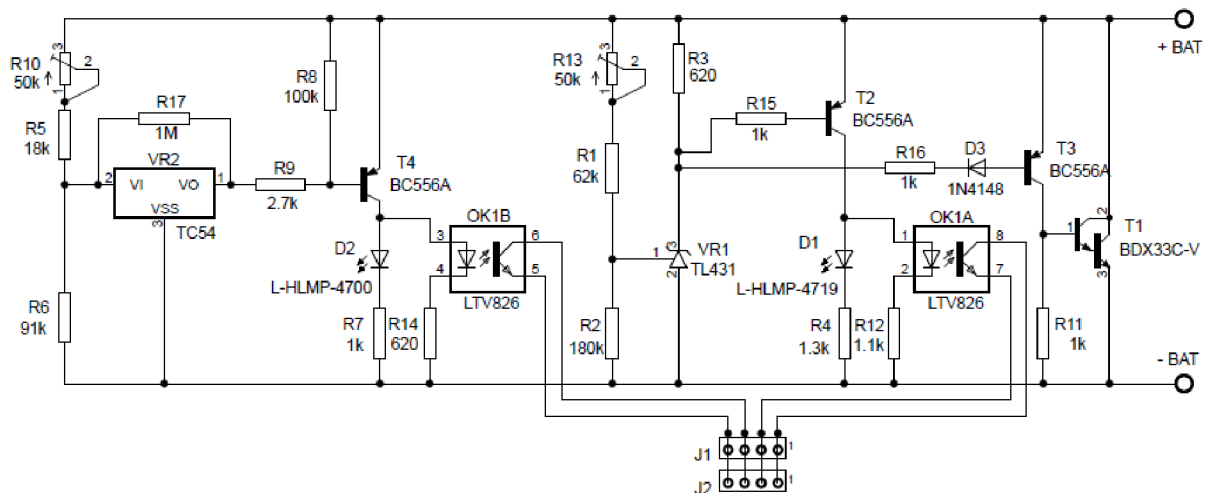
však dělič nastaven pro normální funkci a nedochází tak k žádnému narušení. Při vybavení VR2 se R17 uzemní přes VSS reference a tím se paralelně připojí k R6. Dojde k posunutí napětí reference na odporovém děliči směrem dolů. Efekt je takový, že už nestačí zvýšení napětí nad 2,8V, ale musí se zvýšit až na 3V, aby došlo ke zrušení chybového stavu. Dosažená hystereze je tedy 200mV při osazení R17 hodnotou 1MΩ. Rezistor R8 zajišťuje převahu kladného napětí na tranzistoru T4 a v klidovém stavu jej drží uzavřený – přes rezistory R9 a R17 by se jinak mohl vytvořit úbytek napětí, který by stačil k jeho otevření.

3.2.2. OCHRANA PŘED PŘEBITÍM

Tuto činnost zastává pravá část obvodu na schématu od napěťového děliče R1, R2 a R13. VR1 je zenerova dioda s externím vstupem detekce prahového napětí. Její referenční napětí je 2,5V a typická spotřeba 3uA. Pokud dojde k překročení referenčního napětí mezi anodou a referenčním vstupem, dojde k jejímu otevření a mezi anodou a katodou začne protékat proud.

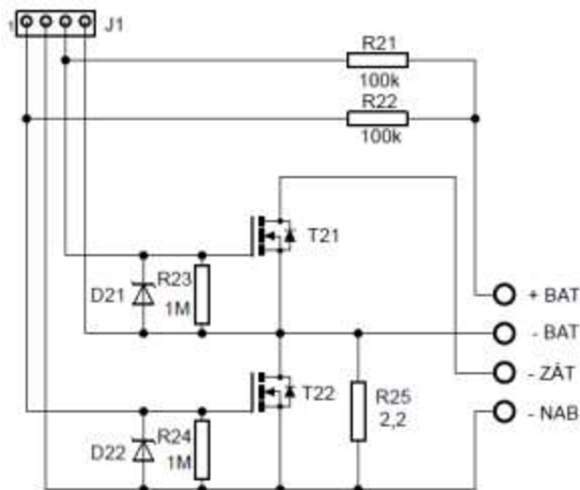
Referenční napětí tedy nastavíme poměrem R1, R2 a R13 na 3,6V. Pokud dojde k překročení tohoto napětí, VR1 se začne otevírat a vytvářet rozdíl napětí mezi bází a emitorem T2 a T3. T2 se otevírá a začne skrz něho protékat proud do LED diody D1 a prvního kanálu optočlenu OK1A. LED dioda svítí a v závislosti na vybuzení báze se T3 a T1 otevírá a protéká skrz ně proud. Takto se dle potřeby odklání pouze část až všechny proud, který by jinak tekla do článku a obvod nenechá zvýšit napětí nad nastavenou mez. Dioda D3 je zapojena v propustném směru, abychom zajistili úbytek napětí mezi bází T2 a T3. Tím se otevře T2 dříve než T3. Bez tohoto opatření se otevírají oba tranzistory stejně a LED dioda se nerozsvítí. Rezistor R11 zajišťuje uzavření tranzistoru T1.

Takto je zajištěno, že se napětí nebude dále zvyšovat a napětí všech článků se vyrovnají (vybalancují). Veškerý proud, který nebude žádoucí dodávat do článku, se však bude na tranzistoru T1 přeměňovat na teplo vyzařené do okolí.



Obr. 3.1: Schéma zapojení hlavního modulu

3.2.3. ODPOJENÍ ZÁTĚŽE A OMEZENÍ PROUDU



Obr. 3.2: Schéma zapojení doplňkového modulu

Výstupy obou optočlenů hlavního modulu jsou připojeny na čtyřpinové konektory J, které se paralelně pospojují mezi všemi moduly. Přes ně je řízen doplňkový modul, jehož schéma je na Obr 3.2. V klidovém stavu jsou Gate obou tranzistorů přes R₂₁ a R₂₂ připojeny na kladné napětí a tranzistory jsou otevřené. Při vybavení ochrany proti přepětí některého článku dojde k otevření tranzistoru jeho optočlenu. Ty jsou všechny paralelně připojeny na D₂₂ a R₂₄ a dojde tím k uzemnění Gate tranzistoru T₂₂. T₂₂ se uzavře a proud od nabíječe začne procházet přes R₂₅. Na R₂₅ se vytvoří úbytek napětí a napětí na nabíječi vzroste až do maximálního nabíjecího – proud tedy poklesne a poklesne i výkon, který je pak potřebné vyzářit tranzistorem hlavního modulu. Nejsou pak kladeny takové nároky na chlazení, viz obr. 3.9. Diody D₂₁ a D₂₂ jsou zenerovy diody paralelně připojené k tranzistorům v optočlenech a do gate unipolárních tranzistorů. Jejich funkce je zajistit, že na gate nebude napětí vyšší než 15V. Odpojování záporné polaroty zátěže a včleňování rezistoru R₂₅ do záporné větve nabíječe bylo zvoleno proto, že bude možné použít napájení doplňkového modulu ze sériové kombinace článků a nebude třeba závislosti na zdroji s galvanickým oddělením od článků.

3.3. VÝPOČTY

Výpočty hodnot součástek budeme provádět podle parametrů udávaných v katalogových listech daných součástek. Začneme děliči napětí, jakožto klíčovou součástí, kterou se budou řídit napěťové reference. Zároveň s nimi budou i trvalými spotřebiči energie.

Napěťová reference TL431 má dle katalogového listu [4] typickou spotřebu proudu do referenčního vstupu 2-4uA. Při návrhu rozsahu děliče tento parametr musíme zohlednit. Vezmeme průměrnou hodnotu 3uA a užitím Ohmova zákona vypočteme ekvivalentní odpor:

$$R_{VR1} = \frac{U_{ref}}{I_{ref}} = \frac{2,5}{3 \times 10^{-6}} = 833,3k\Omega$$

Tento odpor bude paralelní k rezistoru R₂. Víceotáčkový rezistor R₁₃ je dostupný v omezené řadě hodnot a z nabídky byla vybrána hodnota 50kΩ s ohledem na široký rozsah a nízkou proudovou zátěž článků. Cílem byl rozsah napětí pokrývající běžné články LiFePO₄ i Li-Pol, tj. 3,6 - 4,35V. Hodnoty byly voleny empiricky v řadě E24 s ohledem na spotřebu obvodu a

rozsah napětí. R_1 byl vybrán velikosti $62k\Omega$ a R_2 $180k\Omega$. Výsledný rozsah byl ověřen výpočtem:

$$R_{2,VR1} = \frac{R_2 \times R_{VR1}}{R_2 + R_{VR1}} = \frac{180 \times 10^3 \times 833,3 \times 10^3}{180 \times 10^3 + 833,3 \times 10^3} = 148k\Omega$$

$$U_{Del1MIN} = U_{REF} \div \frac{R_{2,VR1}}{R_1 + R_{2,VR1}} = 2,5 \div \frac{148 \times 10^3}{62 \times 10^3 + 148 \times 10^3} = 3,547V$$

$$U_{Del1MAX} = U_{REF} \div \frac{R_{2,VR1}}{R_1 + R_{13} + R_{2,VR1}} = 2,5 \div \frac{148 \times 10^3}{62 \times 10^3 + 50 \times 10^3 + 148 \times 10^3} = 4,392V$$

Vypočtený rozsah odpovídá cílovému. Vypočítáme ještě proudovou spotřebu:

$$I_{Del1} = \frac{U_{MAX}}{R_1 + R_{2,VR1}} = 17\mu A$$

Totožným postupem vypočteme i dělič pro napěťovou referenci VR2. Její typická spotřeba je $1\mu A$ [3]. Užitím Ohmova zákona jako výše vypočteme ekvivalentní odpor R_{VR2} :

$$R_{VR2} = \frac{U_{ref}}{I_{ref}} = \frac{2,1}{1 \times 10^{-6}} = 2,1M\Omega$$

Minimální napětí, při kterém se má zátěž odpojit se může lišit dle aktuální zátěže a nastavení by tedy mělo být dle aplikace. Počítejme tedy, že pod zátěží může mít akumulátor nižší napětí než $2,8V$ aniž by byl úplně vybit a reakce může být žádoucí až při nižším napětí. Navrhne tedy dělič s rozsahem napětí $2,6 - 3,6V$. R_5 byl vybrán velikosti $18k\Omega$ a R_6 $91k\Omega$. Výsledný rozsah vypočteme jako v předchozím případě užitím Ohmova zákona:

$$R_{6,VR2} = \frac{R_6 \times R_{VR2}}{R_6 + R_{VR2}} = \frac{91 \times 10^3 \times 2,1 \times 10^6}{91 \times 10^3 + 2,1 \times 10^6} = 87,22k\Omega$$

Vrchní větev děliče je v klidovém stavu tvořena trochu početnější kombinací rezistorů R_5 a R_{10} v sérii a k nim paralelní kombinací další série rezistorů R_8 , R_9 a R_{17} . Výsledný odpor vypočteme:

$$R_{V \min-max} = \frac{(R_5 + R_{10}) \times (R_8 + R_9 + R_{17})}{(R_5 + R_{10}) + (R_8 + R_9 + R_{17})} = 17,71 - 64,05k\Omega$$

$$U_{Del2MIN} = U_{REF} \div \frac{R_{6,VR2}}{R_{V \min} + R_{6,VR2}} = 2,1 \div \frac{87,22 \times 10^3}{17,71 \times 10^3 + 87,22 \times 10^3} = 2,526V$$

$$U_{Del2MAX} = U_{REF} \div \frac{R_{6,VR2}}{R_{V \max} + R_{6,VR2}} = 2,1 \div \frac{87,22 \times 10^3}{64,05 \times 10^3 + 87,22 \times 10^3} = 3,642V$$

$$I_{Del2} = \frac{U_{MAX}}{R_{V \max} + R_{2,VR1}} = 24\mu A$$

Výsledný rozsah pokrývá vytyčený rozsah a lze jej tedy použít. Daní za tak široký rozsah je však trochu vyšší spotřeba, kterou bude obvod trvale zatěžovat článek. Pro snížení by se musel snížit i rozsah, použít trimr s větším odporem nebo použít referenci s nižším prahovým napětím ($1,4V$). Ta však nebyla v době návrhu a výroby nikde v nabídce a nepodařilo se ji sehnat.

Rezistor pro LED diodu a optočlen vypočteme známým vztahem:

$$R_D = \frac{U_Z - U_D}{I_D}$$

Vycházet budeme z údajů v katalogovém listu použitých LED diod [5], optočlenů [6] a rozsahů napětí vypočítaných výše. U LED diod vypočítáme nejnižší hodnotu rezistorů, aby mohli pracovat v navrženém rozsahu napětí.

$$R_7 = \frac{U_{Del2MAX} - U_{D2}}{I_{D2}} = \frac{3,642 - 1,7}{0,002} = 971 = 1k\Omega$$

$$R_4 = \frac{U_{Del1MAX} - U_{D1}}{I_{D1}} = \frac{4,392 - 1,8}{0,002} = 1296 = 1,3k\Omega$$

U optočlenu musíme nejprve zjistit, jaký proud bude potřeba sepnout na výstupu a jaké zesílení v této oblasti bude mít. Poté vypočítáme minimální proud, který bude potřeba na jeho vybudění. Směrodatné bude maximální napětí, na kterém bude pracovat doplňkový modul. To bude omezeno maximálním napětím, které jsou schopny odpojit tranzistory. U použitých modelů to bude 55V. Optočlen bude uzemňovat rezistor R_{21} , na kterém se tak objeví maximální napájecí napětí. Výpočtem dále zjistíme, že protékající proud bude maximálně 550uA. Optočlenu by měl podle převodní charakteristiky stačit proud 1mA. Pro bezpečnost volíme raději minimální proud 2mA, ale je zde po ověření funkce prostor pro úsporu energie. V případě optočlenu tedy vypočteme maximální možnou velikost rezistoru pro dosažení stanoveného proudu.

$$R_{14} = \frac{U_{Del2MIN} - U_{OK1}}{I_{OK1}} = \frac{2,526 - 1,2}{0,002} = 663 = 620\Omega$$

$$R_{12} = \frac{U_{Del1MIN} - U_{OK1}}{I_{OK1}} = \frac{3,547 - 1,2}{0,002} = 1173,5 = 1,1k\Omega$$

Hodnota rezistoru R_3 byla volena tak, aby byl bezpečně zajištěn proud při regulaci tekoucí do katody VR1 minimální velikosti 1mA, viz [4]. Stejně tak rezistory R_9 , R_{15} , R_{16} , R_{11} byli voleny tak, aby tranzistory tekly proud alespoň 1mA. R_8 je volen empiricky.

Použité unipolární tranzistory na doplňkovém modulu mají dle katalogového listu proud potřebný k otevření přechodu DS pouhých 100nA. Rezistory R_{21} a R_{22} tedy mohou být velmi vysoké hodnoty, aniž by byla ohrožena funkce. Z dostupných rezistorů byly zvoleny hodnoty 100k Ω , aby byla jejich hodnota řádově nižší než u R_{23} a R_{24} . Proud protékající obvodem při sepnutí optočlenu bude při maximálním napětí 550uA. Rezistory R_{23} a R_{24} jsou zvoleny maximální dostupné velikosti 1M Ω . Poměr rezistorů 1:10 je volen proto, aby i při nejnižším pracovním napětí byl úbytek napětí na R_{21} a R_{22} minimální a celé napájecí napětí se soustředilo na Gate tranzistorů.

Pouzdro TO220 použitého tranzistoru T_1 by mělo mít tepelný odpor $R_{JA}=62,5K/W$. Bez chladiče je tedy tranzistor schopen vyzářit na hranici svých provozních vlastností (150°C při teplotě okolí 25°C) přesně 2W (tj. 0,55A). Pro plnou zátěž (10A při maximálním napětí 4,4V) bude nutné jej chladit chladičem. Pro zachování mezních parametrů, tj. maximální teplota 150°C a teplota okolí 25°C musíme zachovat maximální tepelný odpor:

$$R_{th} = \frac{T_j - T_a}{P} = \frac{150 - 25}{4,4 \times 10} = 2,84K/W$$

Teplotní odpor pouzdra TO-220 tranzistoru T_1 je dle katalogového listu [7] $R_{JC}=1,78K/W$. Pro chlazení by bylo výhodné použít jeden chladič pro více modulů. V takovém případě je

třeba tranzistory podložit izolační podložkou. Teplovodivá silikonová podložka má tepelný odpor $R_{tHS}=0,3K/W$. Chladič musí mít tedy maximální teplotní odpor:

$$R_{tHR} = R_{th} - R_{tJC} - R_{tHS} = 2,84 - 1,78 - 0,3 = 0,76K/W$$

Takto výkonný chladič bude poměrně rozměrný a drahý. Omezení proudu doplňkovým modulem může v takovém případě mít zásadní vliv. Na druhou stranu je velmi málo pravděpodobné, že k takové situaci dojde a ještě méně, že k ní dojde na více člancích současně na sdíleném chladiči. Při realizaci byly použity pouze malé chladiče o teplotním odporu $22K/W$. Tyto chladiče jsou tedy schopny uchládit ztrátový výkon tranzistoru:

$$P = \frac{150 - 25}{1,78 + 0,4 + 22} = 5,16W$$

3.4. SIMULACE FUNKCE

Jako teoretické ověření funkce byla provedena simulace v prostředí PSpice programu OrCAD Capture. Jedná se o program pro návrh a testování elektronických obvodů. PSpice je jedna z jeho součástí, ve které lze analyzovat chování obvodu. Prvotní návrh a testování probíhalo právě v tomto programu. Simulovaný obvod je ekvivalentní realizovanému, ale nejsou totožné pro nedostupnost některých součástí v knihovnách PSpice ani na internetu. Stejná zůstává jen napěťová reference TL431. K simulaci není dostupný ani zdroj s omezením napětí i proudu nebo baterie, která by se mohla nabíjet. Zdroj napětí se chová jako nekonečně tvrdý a omezení proudu je tedy realizováno do série zapojeným rezistorem. Zdroj proto ze začátku nabíjení nedrží konstantní proud, jak by vypadala reálná situace, ale proud ihned klesá. Není dostupná ani napěťová reference TC54, která je nahrazena zapojením s dvěma operačními zesilovači. Na místo akumulátorů jsou použity kondenzátory kapacity několika Faradů. Pro ukázkou zásahů obvodu má ve většině scénářů každý jinou kapacitu a tím dochází k nerovnoměrnému nabíjení a vybíjení.

Ukázka výsledku simulace funkce obvodu z prostředí PSpice je na obrázku 3.3. Ostatní průběhy budou zpracovány v tabulkovém editoru.

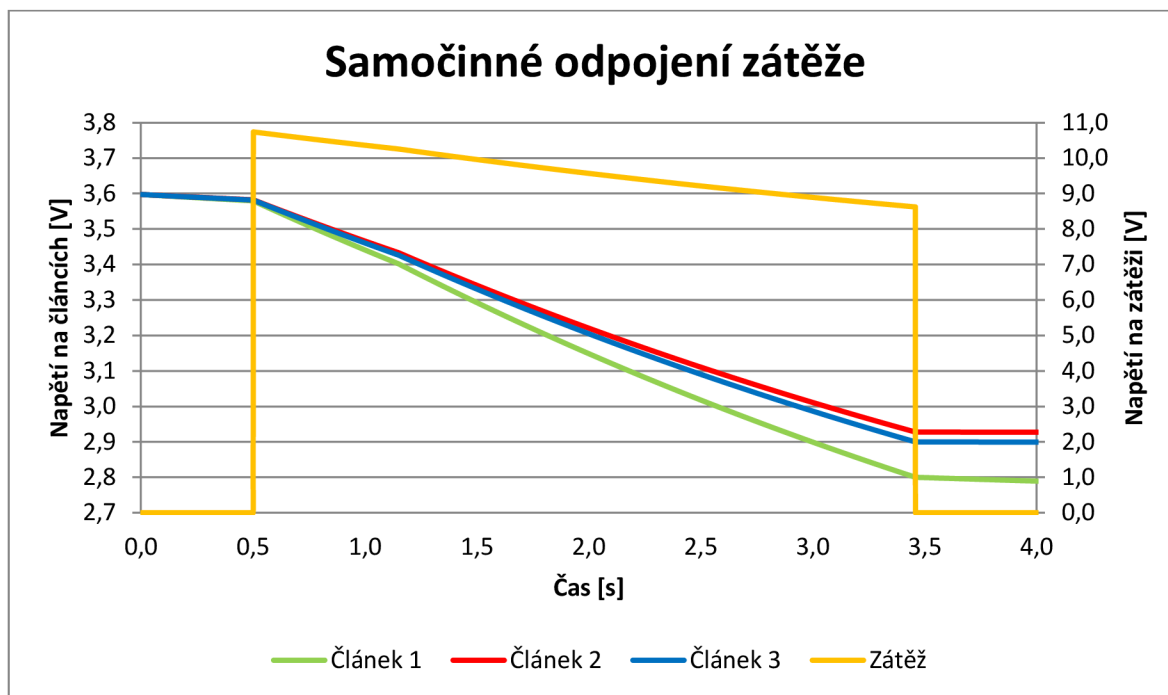
Počáteční napětí všech článků je 2V. V čase 1s začne probíhat nabíjení proudem 10A (oranžový průběh) a napětí na člancích začne stoupat. Když v čase 1,4s napětí na všech člancích dosáhne 2,8V, připojí se zátěž a začne skrze ni protékat proud (šedivý průběh). Napětí dále stoupá až první článek (zelený průběh) dosáhne 3,6V. Dochází k zásahu balančního obvodu, proud poklesne vřazením rezistoru R_5 a napětí na článku se už dále nezvyšuje. Napětí na ostatních člancích se postupně zvyšuje do cílových 3,6V. V čase 4s dojde k odpojení nabíječe a články se vybíjí. Při poklesu jednoho z nich pod 2,8V se odpojuje zátěž a přestává skrze ni procházet proud.



Obr. 3.3 Výsledek simulace obvodu

3.4.1. ODPOJENÍ ZÁTĚŽE

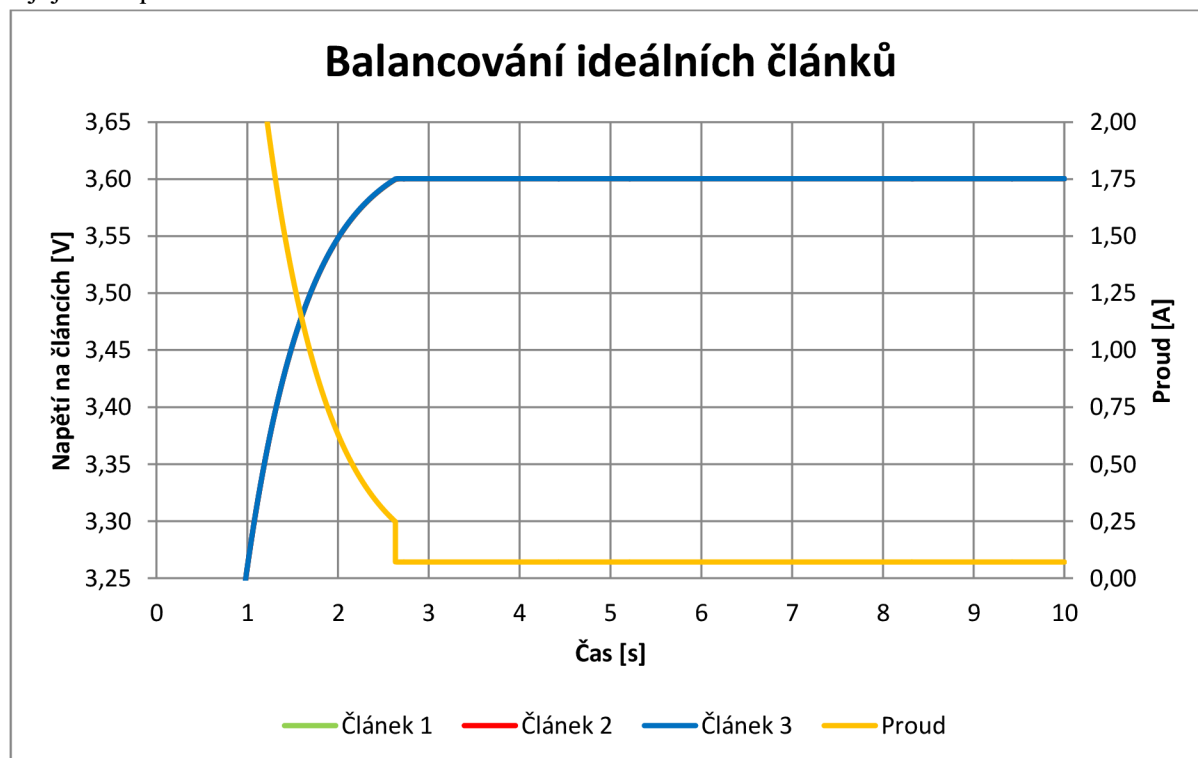
Výsledek simulace samočinnného odpojení zátěže je znázorněna na obrázku 3.4. Všechny články mají v čase 0s maximální napětí 3,6V. V čase 0,5s dojde k připojení zátěže a začne vybíjení, které trvá až do času 3,5s kdy napětí na prvním článku klesne pod 2,8V a dojde k odpojení zátěže – napětí na zátěži klesá na 0V a články se dále nevybíjí.



Obr. 3.4: Simulace samočinného odpojení zátěže

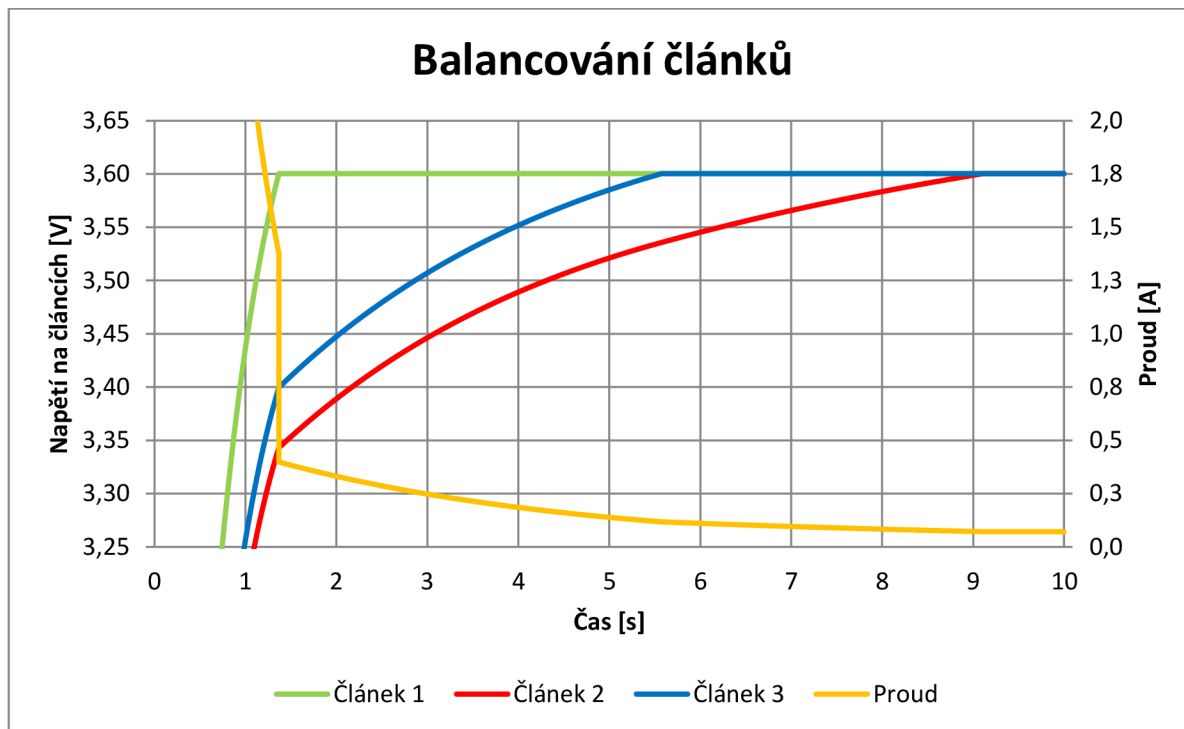
3.4.2. BALANCOVÁNÍ

Balancování napětí by u ideálně stejných článků nebylo třeba, jak ukazuje průběh na obrázku 3.5. Ideální články mají naprosto totožnou kapacitu a rovnoměrně se nabíjí a vybíjí. V takovém případě se zásah obvodu neprojeví. Na tomto snímku pouze došlo k poklesu klidového proudu vřazením R_5 , protože napětí zdroje bylo vyšší, než je násobek počtu článků a jejich napětí.

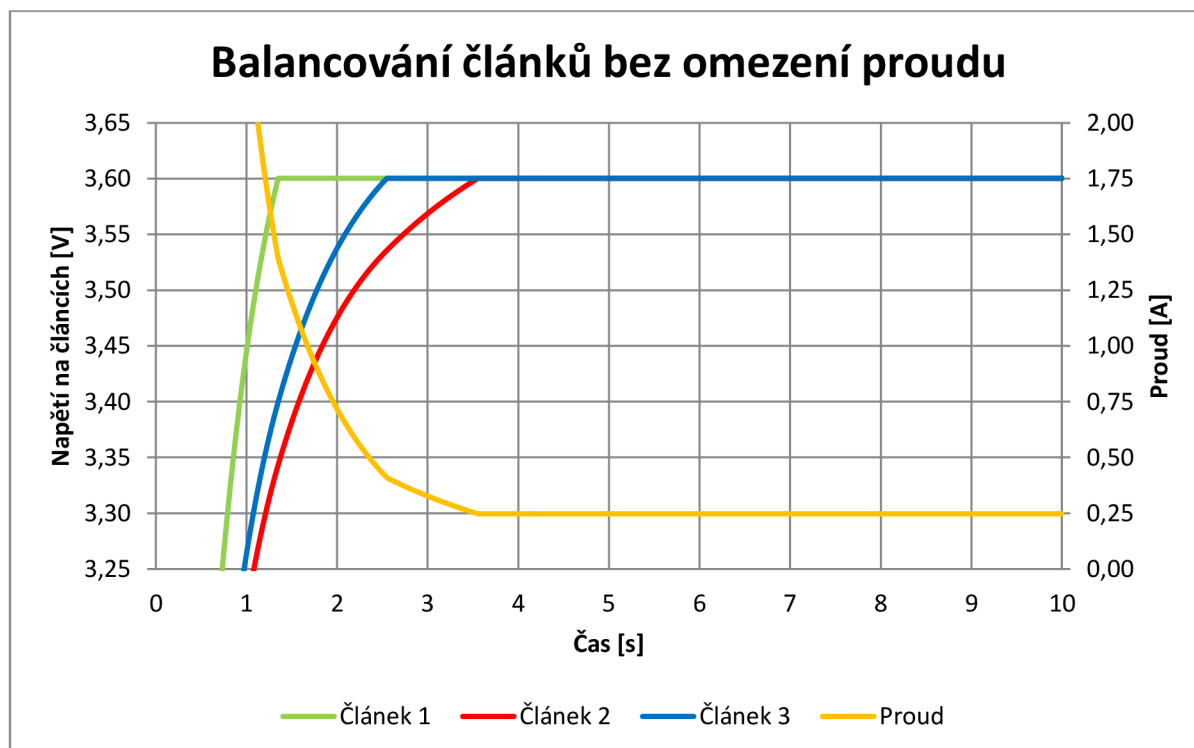


Obr. 3.5: Simulace nabíjení ideálních článků

Další charakteristika na obr. 3.6 ukazuje reálné nasazení během druhé fáze nabíjení (mezi 1.-9. sekundou). Napětí nejslabšího článku dosahuje 3,6V. Hlavní modul na něm omezí napětí a vyvolá snížení proudu obvodem. Výhoda omezení proudu spočívá ve snížení nároků na chlazení (obr. 3.9), ale má za následek i prodloužení času potřebného na vybalancování a konečné dobití článků. Rozdíl průběhu vidíme porovnáním s následujícím obrázkem 3.7.

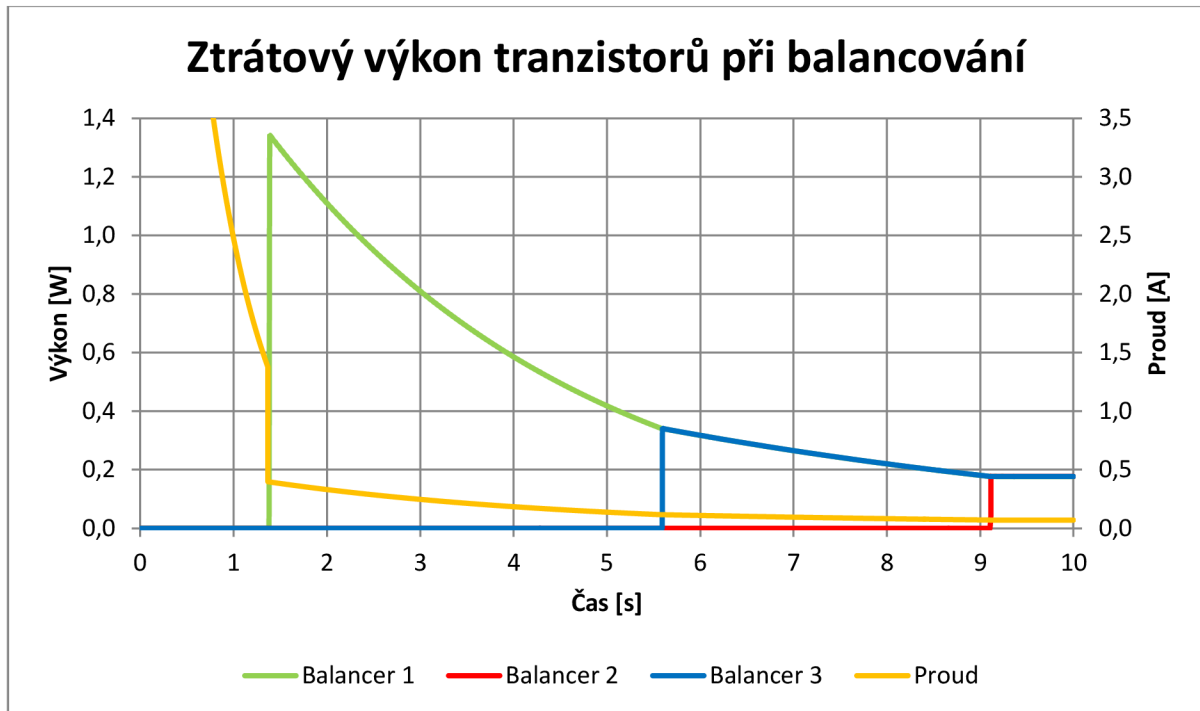


Obr. 3.6: Simulace průběhu balancování článků

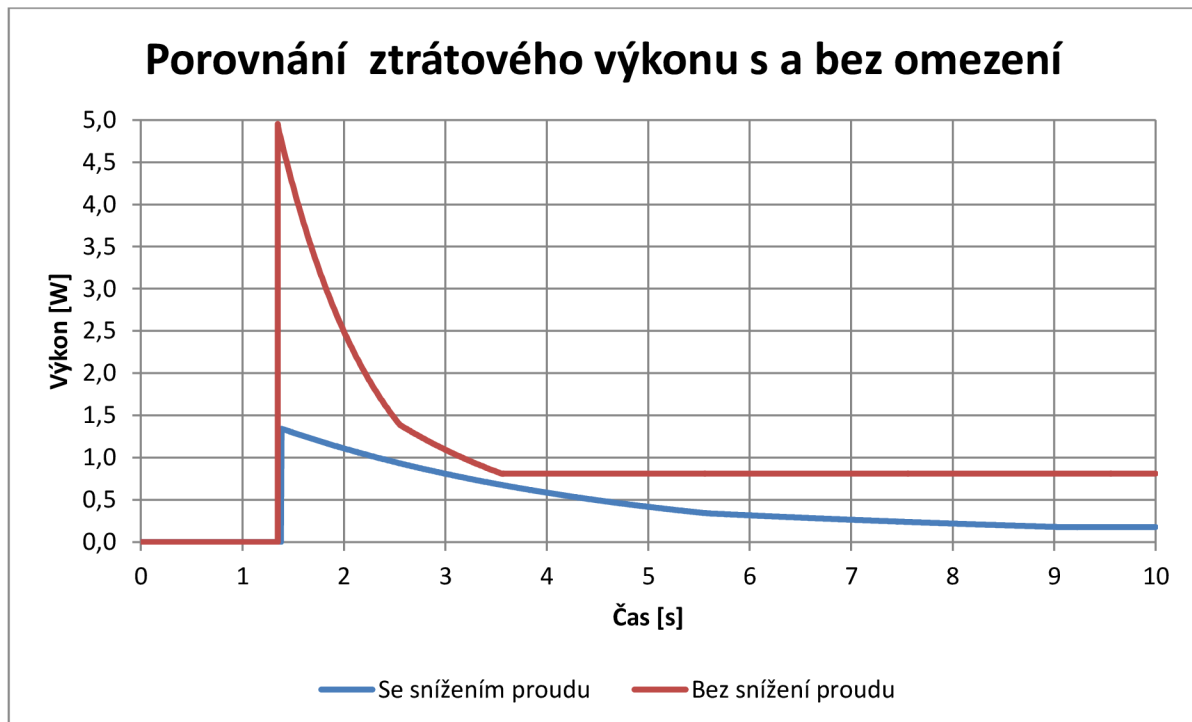


Obr. 3.7: Simulace balancování bez omezení proudu

Ztrátový výkon tranzistorů při balancování vidíme na následujícím obrázku 3.8. Proud je omezen vřazeným rezistorem R5. Náběh balancování je na tomto obrázku strmý z důvodu nabíjení kondenzátorů a ne akumulátorů. Reálný nástup bude pozvolný, ne skokový a začne zase klesat, jak se budou články vyrovnávat. Vliv omezení proudu na ztrátový výkon vidíme na další simulaci (obr. 3.9). Vřazením i malého odporu do série může být rozdíl vyzařovaného výkonu značný.



Obr. 3.8: Simulace ztrátového výkonu na tranzistorech během balancování



Obr. 3.9: Porovnání simulace ztrátového výkonu tranzistorů s a bez omezení proudu

3.5. REALIZACE

3.5.1. KONTAKTNÍ POLE

První realizace probíhala v nepájivém kontaktním poli. Byl sestaven obvod a s pouhým laboratorním zdrojem byla ověřována funkce a prováděno oživení a nastavení. Během této činnosti bylo zjištěno několik reálných nedostatků, které se během simulace neprojeví. Bylo třeba upravit hodnoty některých součástek, protože byly zvoleny moc vysoké hodnoty rezistorů. Prvotní problém byl v rezistoru R11, který byl moc vysoké hodnoty. Tranzistor T1 se z počátku neotevíral a následně se skokově otevřel, ale už se neuzavřel. Dále bylo nutné přidat do obvodu diodu D3, protože při součinném otevírání T2 a T3 začalo docházet k okamžitému omezování napětí a dioda D1 se plně nerozsvítila. Toto řešení má však daň ve snížení strmosti reakce obvodu na zvýšení napětí.

3.5.2. DPS

Deska plošných spojů byla navržena v programu Eagle v6.5.0. Zvoleno bylo řešení s vývodovými součástkami pro možnost ladění v kontaktním poli a snazší manipulaci i bez speciálního vybavení. Při návrhu nebyla ambice co nejmenšího plošného spoje a i finální návrh by se dal zmenšit v případě potřeby nebo přepracovat pro SMD součástky. Při návrhu byla snaha dodržet nepsaná pravidla návrhu, tj. usadit konektory a výkonové prvky na okraj desky a snažit se o co nejkratší cestu, kterou budou protékat proudy.

DPS hlavního modulu má rozměry 40x67mm a je vyhotovena ve třech kusech. Doplňkový modul má rozměry 32x58mm.

Osazení součástkami proběhlo standardním postupem od nejmenších po největší. Výkonové cestičky je možné ještě zesílit nanesením vrstvy pájky po celé délce. Po skončení byly desky ošetřeny ochranným sprejem před korozi.

Obvody byly nejprve ožívovány laboratorním zdrojem a byla testována jejich funkčnost. Na jedné desce byl nalezen drobný problém v podobě odleptané spojky mezi cestičkami, kterou stačilo překrýt pájkou. Ostatní moduly fungovaly napoprvé.

Kalibrace byla provedena na laboratorním zdroji nastavením cílového prahového napětí, pospojováním všech hlavních modulů paralelně a nastavením trimrů tak, aby obvody reagovali současně.

3.5.3. OMEZENÍ

Omezení vycházejí z parametrů použitých součástek. Maximální proud hlavním modulem je omezen možnostmi tranzistoru T₁ na maximálně 10A. Maximální napětí bude limitováno maximálním napětím napěťové reference VR1 na 37V pro jeden článek. S takto vysokým napětím ale není počítáno a museli by se nejprve zvýšit hodnoty rezistorů pro LED diody, optočleny a děliče napětí. Napětí tedy zůstává omezeno návrhem na 4,4V, ale po úpravě zmíněných rezistorů může být i vyšší. Minimální napětí je omezeno funkčností optočlenu, aby dokázal vyvolat odpojení. Jeho propustné napětí je 1,2V a od tohoto napětí už by měl být schopen odpojit zátěž.

Doplňkový modul musí mít minimální napájecí napětí 4V, aby se byli schopny otevřít tranzistory. Maximální napájecí napětí je dáno maximálním napětím U_{DS} použitých tranzistorů, tedy 55V a maximální trvalý proud 110A. V takovém případě by bylo potřeba zesílit cesty plošného spoje a použít jiné kabelové konektory. Ty použité v realizaci jsou

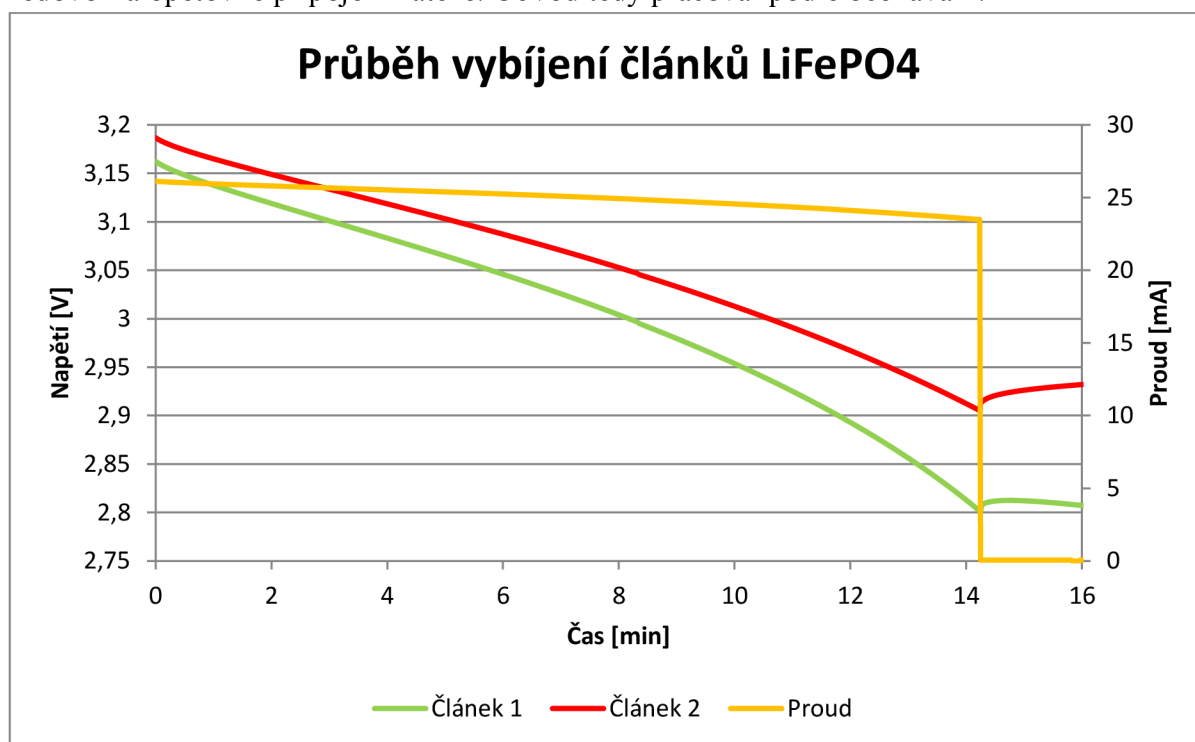
dimenzovány jen na 17,5A. Při trvalém zatěžování tímto proudem bude potřeba chladit tranzistor T_{21} , protože se na něm vytvoří ztrátový výkon 2,45W.

3.6. MĚŘENÍ

Měření probíhalo převážně na automatizovaném měřicím pracovišti multimetry Agilent řízenými počítačem. Naměřené hodnoty byly logovány do souboru a následně zpracovány. Výsledkem jsou průběhy napětí a proudu zobrazené níže.

3.6.1. ODPOJENÍ ZÁTĚŽE

Měření odpojení zátěže probíhalo se dvěma články LiFePO4 zapojenými v sérii. Zátěží byl rezistor velikosti 250Ω připojený na kladnou polaritu baterie a výstup zátěže z doplňkového modulu. Na každém článku byl jeden hlavní modul, který hlídal jeho napětí. Napětí kleslo na 2,8V jako první na prvním článku a došlo k vybavení modulu. Rozsvítila se červená LED dioda a otevřel se optočlen. Na ten zareagoval doplňkový modul, uzavřel tranzistor T1 a zátěží přestal protékat proud. Napětí na člancích mírně stoupl, ale hystereze nedovolila opětovné připojení zátěže. Obvod tedy pracoval podle očekávání.

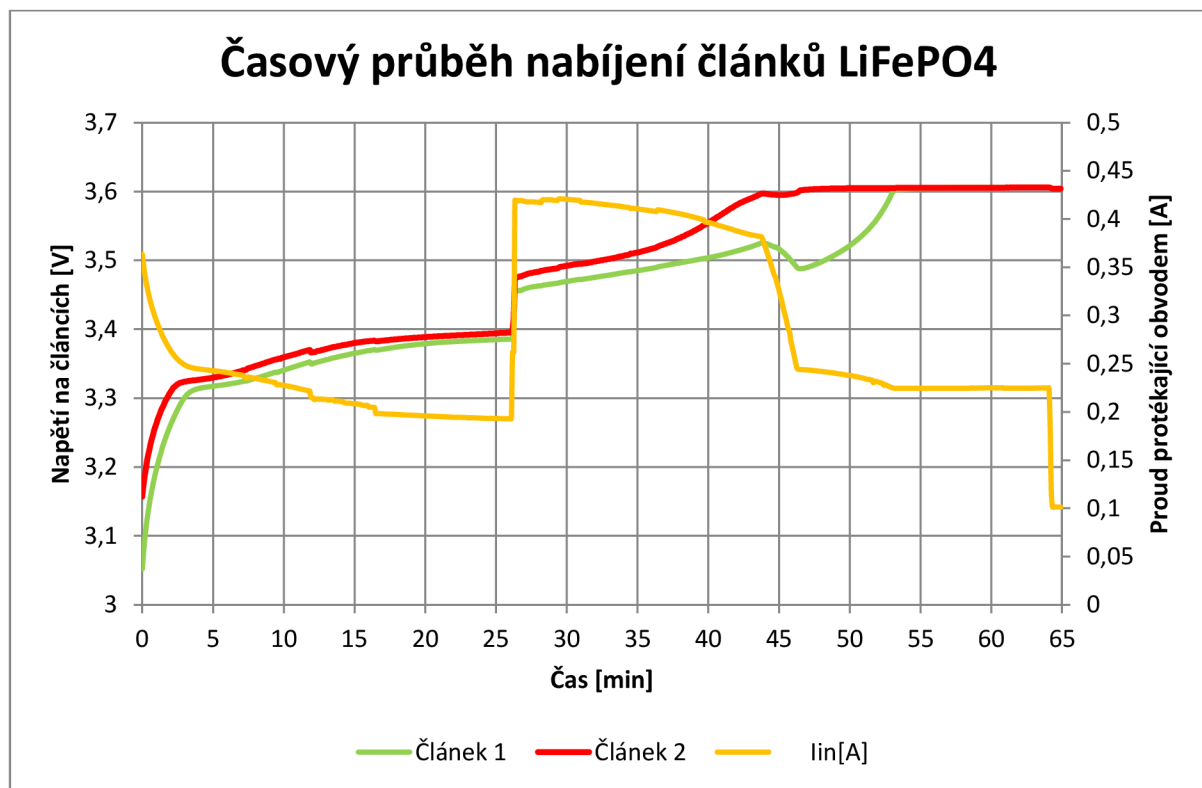


Obr. 3.10: Vybíjení článků LiFePO4 s odpojením zátěže

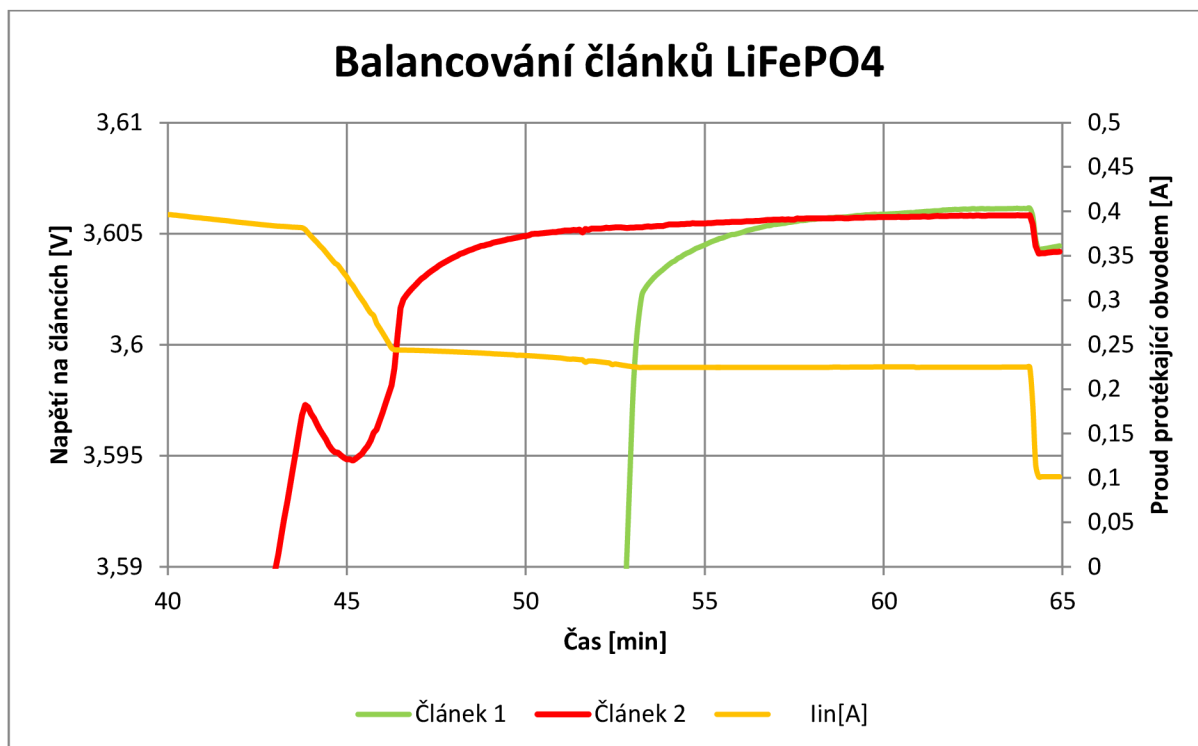
3.6.2. PRŮBĚH NABÍJENÍ VÍCE ČLÁNKŮ

Nabíjeny byly 2 články LiFePO4 zapojené v sérii stejně jako během vybíjení. Zátěž byla odpojena a byl připojen laboratorní zdroj. Charakteristiku se bohužel nepodařilo odměřit tak hezky, aby byl průběh ukázkový hlavně z důvodu opravdu nekvalitních vodičů, kterými tekla proud ze zdroje (při 1A se na páru vytvořil úbytek 1,3V). Proud by mohl být konstantní až do 45-té minuty. Ani na počátku měření nebylo dosaženo nastaveného omezení 500mA. Po 25-té minutě došlo ke zvýšení napětí zdroje a tím i zvýšení proudu tekoucího obvodem. Další zásah už nebyl prováděn. V čase kolem 45-té minuty dosáhl druhý článek napětí 3,6V a došlo k zásahu obvodu. Hlavní modul začal omezovat napětí tohoto článku a vybavil doplňkový

modul, který vřadil do obvodu rezistor R_5 hodnoty $2,2\Omega$. Došlo k postupnému poklesu proudu, který se projevil i na prvním článku poklesem napětí. Na druhém článku napětí nepokleslo, což potvrdilo charakter nabíjení – většinu nabíjecí charakteristiky stoupá napětí na článcích jen mírně, ale ke konci při dosažení napětí v blízkosti nabíjecího začne napětí stoupat rychleji. Při plném uzavření tranzistoru T_2 už všechen proud protéká skrz rezistor R_5 a ustálí se. Klesá zase jen mírně, jak začne stoupat napětí na prvním článku. Po dosažení maximálního napětí na všech článcích by začal proud klesat. Tuto skutečnost však už nevidíme, protože měříme proud celým obvodem a ne přímo článkem. Proud odebíraný články postupně klesá a čím dál více se přeměňuje na teplo na tranzistorech. Kdybychom měli dobré měřicí kabely a mohli jsme nechat maximální napětí jen nepatrně vyšší než je maximální napětí obou článků, od 55-té minuty bychom viděli, jak proud klesá. Detailní průběh balancování je na obr. 3.12.



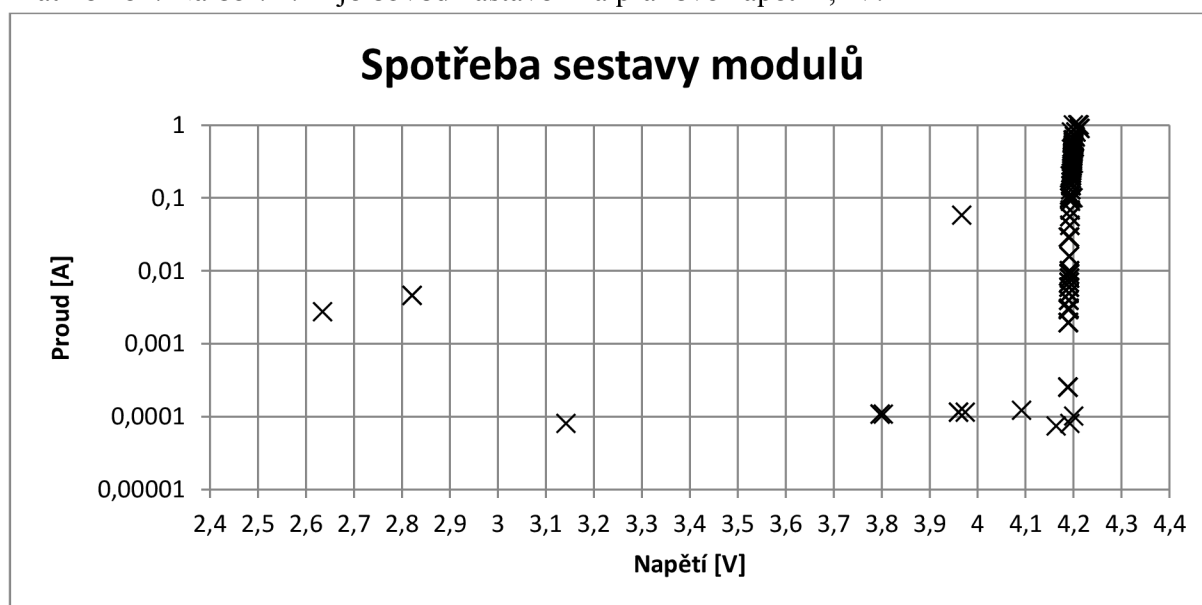
Obr. 3.11: Průběh nabíjení článků LiFePO4



Obr. 3.12: Detail balancování článků LiFePO4

3.6.3. SPOTŘEBA A STRMOST

Spotřeba celého obvodu všech modulů je v oblasti pracovního napětí asi 80uA. Situace se mění, když dojde k vybavení některého členu, ať už přebití nebo podvybití. Při rozsvícení LED diody a optočlenu je spotřeba daného modulu asi 4mA, při dosažení vrchního prahového napětí pak strmě stoupá. Při měření do 1A se napětí změnilo maximálně o 12mV. Tato hodnota se dá však ještě snížit použitím nižší hodnoty rezistoru R16 nebo odstraněním diody D3. Strmost se liší i mezi třemi identickými moduly. Příčinou bude tolerance součástek, která je u použité TL431 2% (tj. $\pm 50\text{mV}$) a u použitých rezistorů 5%. Ty by však moc velkou roli hrát neměli. Na obr. 3.13 je obvod nastaven na prahové napětí 4,2V.



Obr. 3.13: Spotřeba všech modulů

4. ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se snažil zmapovat a nastínit možnosti a základní i částečně rozšířené funkce obvodů, skrývajících se pod pojmem Battery Management System.

V druhé části práce jsem navrhoval základní obvod pro autonomní (nezávislý) dohled nad nabíjením a vybíjením LiFePO₄ článků podle zadání a provedl simulaci funkce, která dopadla podle očekávání. Parametry jsem volil pro obsluhu článků formátu small cells od společnosti GWL power maximální kapacity 10Ah.

Navržený hlavní modul se připojuje paralelně ke každému článku v sériové kombinaci zvlášť (možno i více článků paralelních). Obvody lze tedy volně škálovat na libovolný počet článků (jeden obvod na jeden článek v sérii). Doplňkový modul se připojuje jeden na celou sériovou kombinaci článků a je řízen hlavními moduly na člancích.

Obvod lze nastavit na jiná referenční napětí a má galvanicky oddělenou signalizaci překročení prahových hodnot optočleny pro řízení doplňkového modulu. Obvody byly sestaveny, oživeny, nastaveny a byla na nich provedena měření s uspokojivými výsledky.

5. REJSTŘÍKY A SEZNAMY

5.1. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část). [online]. 15.4.2011 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1cast>

[2] Bezpečné li-ion akumulátory na bázi LiFePO₄. [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.fotonmag.cz/svitilny/baterie/bezpecne-li-ion-akumulatory-na-bazi-lifepo4/>

[3] *Katalogový list TC54* [Dokument PDF]. [cit. 2.1.2014]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/268/21434g-68815.pdf>

[4] *Katalogový list TL431* [Dokument PDF]. [cit. 2.1.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=slvs543n>

[5] *Katalogový list LED HLMP 47xx* [Dokument PDF]. [cit. 10.1.2014]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/img/cache/doc/511/035/l-hlmp-4700-datasheet-1.pdf>

[6] *Katalogový list LTV-826* [Dokument PDF]. [cit. 10.1.2014]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/239/LTV-8x6-201828.pdf>

[7] *Katalogový list BDX33C* [Dokument PDF]. [cit. 10.1.2014]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000901.pdf>

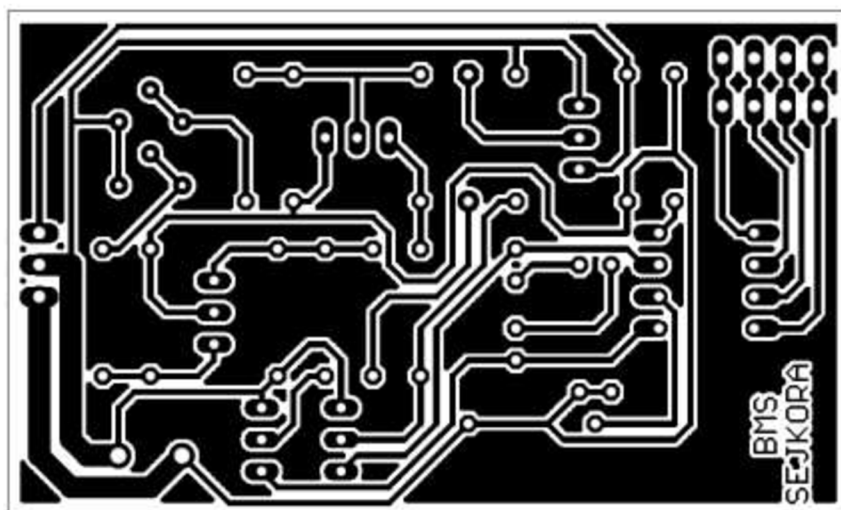
5.2. PŘÍLOHY

A. OBSAH CD

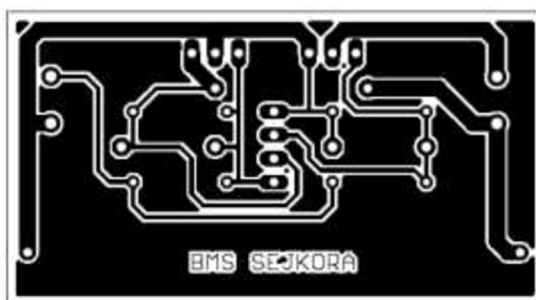
Na CD jsou tyto přílohy:

.../Datasheet/	Využité katalogové listy
.../DPS/	Deska plošných spojů v PDF, PNG
.../Fotografie/	Fotografie z realizace práce
.../Měření/	Data a zpracované výsledky z měření
.../Schéma/	Schéma v PDF, PNG a Eagle
.../Simulace/	Soubor dat simulace pro PSpice a zpracovaná data

B. UKÁZKA DPS

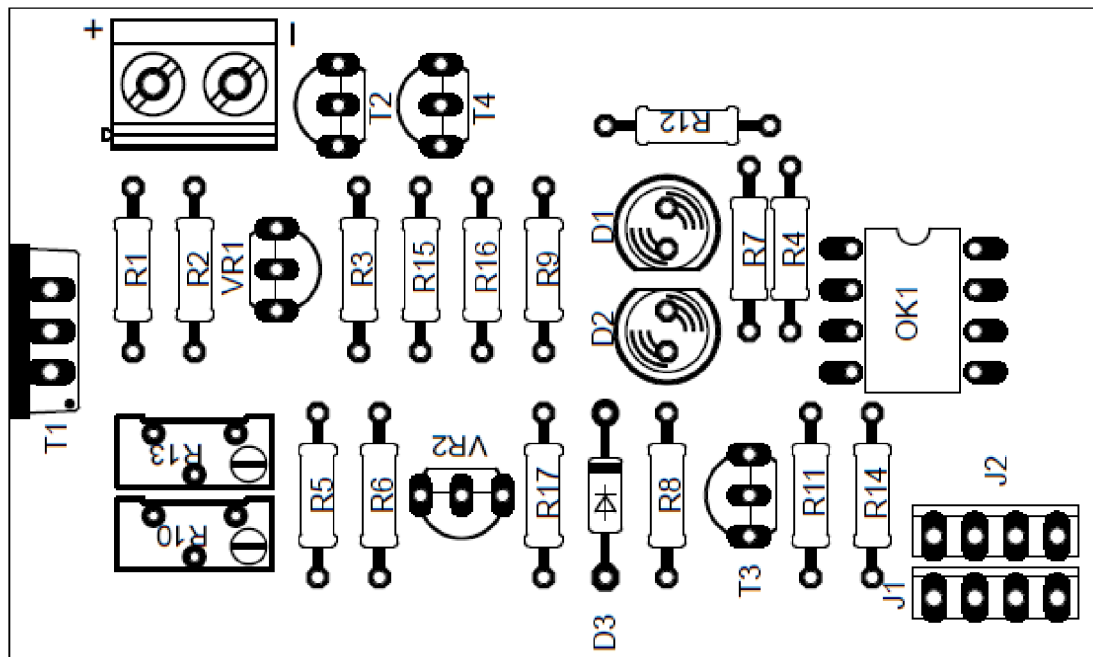


Obr. 5.1: DPS hlavního obvodu

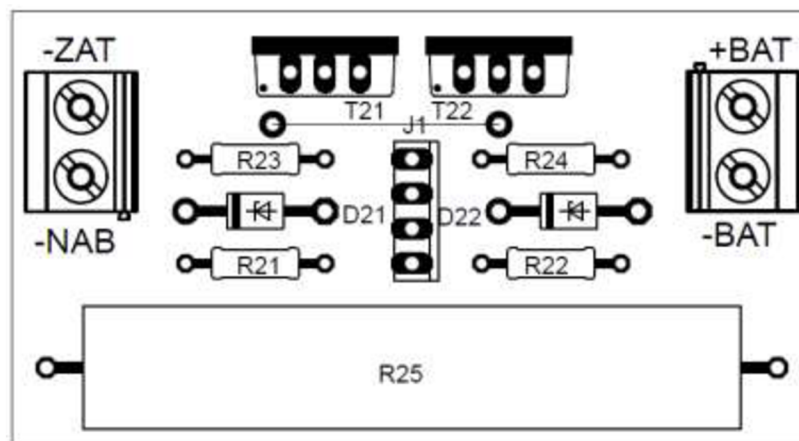


Obr. 5.2: DPS doplňkového obvodu

C. OSAZOVACÍ PLÁN

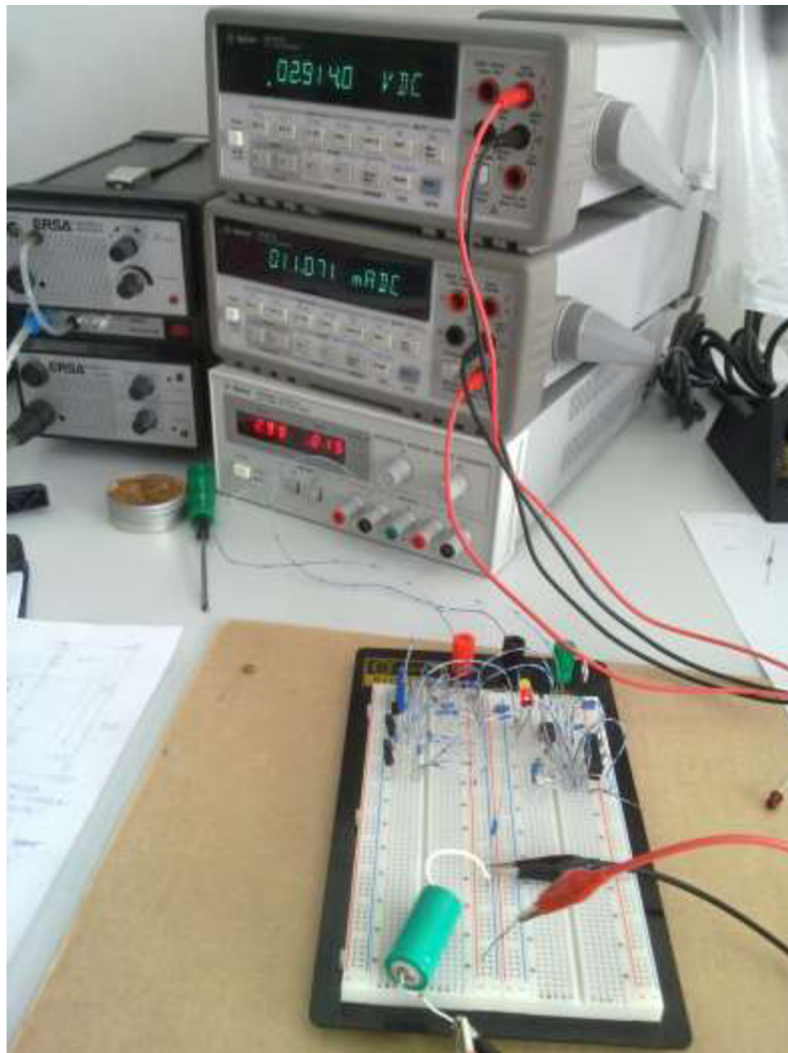


Obr. 5.3: Osazovací plán hlavního obvodu

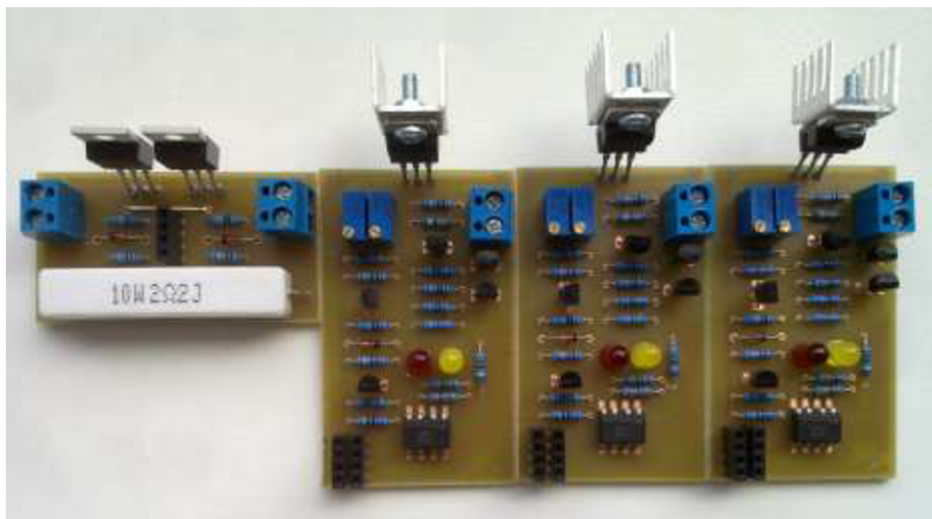


Obr. 5.4: Osazovací plán doplňkového obvodu

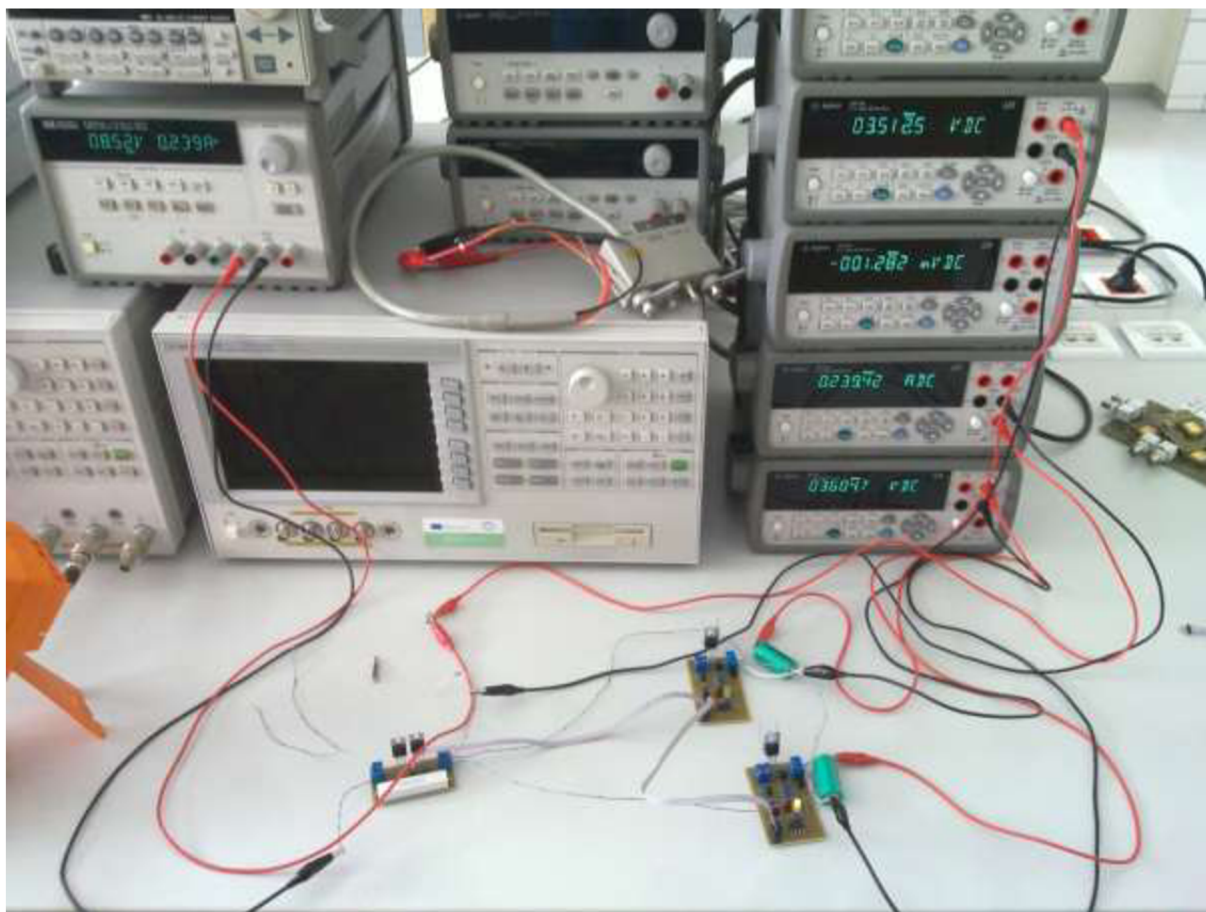
D. FOTOGRAFIE Z REALIZACE



Obr. 5.5: Měření na nepájívém poli



Obr. 5.6: Vyrobené moduly



Obr. 5.7: Měření na automatizovaném měřicím stanovišti