

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

LIFEPO4 AKUMULÁTOR A BMS OBVODY PRO AKUMULÁTOROVOU VRTAČKU

LIFEPO4 BATTERY WITH BMS CIRCUITS FOR A BATTERY DRILL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Fiala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Václav Fiala

ID: 186421

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

LiFePO₄ akumulátor a BMS obvody pro akumulátorovou vrtačku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Ověřte činnost a případně doladte zapojení BMS obvodů navržených v semestrálním projektu.
2. Navrhněte desku plošných spojů pro BMS obvody.
3. Zdokumentujte mechanické uspořádání celého akumulátorového paku (sestava článků a BMS), zakreslete také propojovací plán (silové spoje i signální spoje pro BMS).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Vorel, P., Patočka M.: Průmyslová elektronika. Skriptum FEKT VUT. 2007
- [2] Erickson, R.W., Maksimovic, D.: Fundamentals of Power Electronics. 2004
- [3] Bacha, S., Munteanu, I., Bratcu, A.I.: Power Electronic Converters Modeling and Control. 2014

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 29.5.2020

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

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou lithiových akumulátorů. Jsou zde uvedeny jejich typické vlastnosti a praktické využití. Také je tu kapitola o lithium-ion-železo-fosfátových akumulátorech, které budou součástí této práce. Dále se zbývá ochranným obvodem, který je schopný hlídat napětí lithiových baterií v přípustných mezích. V praktické části byly navrženy nové akumulátory, konkrétně již zmiňované LiFePO₄, které budou sloužit v akumulátorové vrtačce. Pro tyto zvolené akumulátory byl navržen ochranný obvod, který bude hlídat jejich napětí, aby nedošlo k jejich zničení. Obvod byl také otestován.

Klíčová slova

Akumulátory, LiFePO₄, BMS, vybíjecí charakteristiky, TLV431, přepěťová ochrana, podpěťová ochrana

Abstract

This bachelor thesis deals with problematics of lithium accumulators. There are listed properties and practical use of lithium accumulators. There is also the chapter of lithium-ion-iron-phosphate accumulators, which will be a practical part of this thesis. Next part of the thesis solves a safety electrical circuit system for new lithium batteries which will be able to protect batteries against overcharging or undercharging. In the practical part of the thesis new LiFePO₄ batteries for the cordless drill were designed. Also, the mentioned safety electrical circuit was designed and tested.

Keywords

Batteries, LiFePO₄, BMS, discharging characteristics, TLV431, overvoltage protection, undervoltage protection

Bibliografická citace:

FIALA, Václav. *LiFePO₄ akumulátor a BMS obvody pro akumulátorovou vrtačku* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125817>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Pavel Vorel.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma LiFePO₄ akumulátor a BMS obvody pro akumulátorovou vrtačku 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **10. června 2020**

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: **10. června 2020**

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	12
2.	Lithiové akumulátory.....	13
2.1.1	Princip lithiových akumulátorů	13
2.1.2	Základní charakteristiky lithiových akumulátorů	13
2.1.3	Skladování lithiových akumulátorů	15
2.1.4	Používání lithiových akumulátorů v praxi.....	15
2.2	Akumulátory LiFe.....	16
3.	Systém správy akumulátoru.....	18
3.1	Ochrana proti přepětí.....	18
3.2	Ochrana proti podpětí.....	18
3.3	Ochrana proti přetížení a zkratu	18
3.4	Hlídání teploty článku	18
3.5	Balancování článků	19
3.5.1	Aktivní balancování	20
3.5.2	Pasivní balancování	21
4.	Původní akumulátor	23
5.	Volba nových bateriových článků	24
5.1	Ověření vlastností bateriového článku	25
6.	Zástavba článků do původního pouzdra	28
7.	Návrh BMS obvodů	30
7.1	Návrh podpět'ové ochrany.....	30
7.2	Návrh přepět'ové ochrany.....	31
8.	Ověření činnosti jednotlivých ochran	34
8.1	Ověření přepět'ové ochrany.....	34
8.2	Ověření podpět'ové ochrany	35
8.2.1	Nový návrh podpět'ové ochrany	35
9.	Návrh zapojení bms obvodu desky plošných spojů.....	37
9.1	Zapojení BMS obvodu	37
9.2	Deska plošných spojů BMS obvodu	38
10.	Závěr	42

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

BMS	...	Battery Management Systems
NiCd	...	Niklkadmium
NiMH	...	Niklmetalhydrid
Li	...	Lithium
Li-Ion	...	Lithiumiont
Li-Pol	...	Lithiumpolymer
LiFePO4	...	Lithiumželezofosfát

Symboly:

β	...	Proudový zesilovací činitel tranzistoru	[-]
C	...	Kapacita baterie	[mAh]
C_{cl}	...	Jmenovitá kapacita baterie	[mAh]
d	...	Průměr článku	[mm]
h	...	Výška článku	[mm]
I_C	...	Kolektorový proud	[A]
I_B	...	Bázový proud	[A]
I_X	...	Proud tekoucí odporem R11	[A]
I_t	...	Jmenovitý proud	[A]
$I_{ch,cl}$...	Doporučený nabíjecí proud	[A]
I_{ch}	...	Maximální nabíjecí proud	[A]
m	...	Hmotnost článku	[g]
n	...	Počet nabíjecích cyklů	[-]
R	...	Odpor	[Ω]
R_i	...	Vnitřní odpor	[Ω]
$U_{bat,max}$...	Maximální napětí baterie	[V]
$U_{bat,min}$...	Minimální napětí baterie	[V]

U_{ref}	...	Referenční napětí	[V]
U_{BE}	...	Napětí mezi bází a emitorem	[V]
U_{AK}	...	Napětí mezi anodou a katodou	[V]
U_{max}	...	Maximální napětí	[V]

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Vybíjecí charakteristiky Li-Ionového akumulátoru SAFT MP 174865 v závislosti na vybíjecím proudu[5].....	14
Obr. 2-2 Napěťové rozsahy Li-Ion akumulátoru a jeho příslušenství [5].....	16
Obr. 2-3 Vybíjecí charakteristika článku A123 systems 3,3 V a 2,3 Ah [6]	17
Obr. 3-1 Zapojení článků k balanceru BQ77PL900 [10].....	20
Obr. 3-2 Schéma zapojení aktivního balancování [11].....	21
Obr. 3-3 Schéma zapojení pasivního balancování[11]	22
Obr. 4-1 Článek SC1500mAH firmy HIGHSTAR.....	23
Obr. 5-1 LiFePO4 článek firmy A123 Systems.....	24
Obr. 5-2 Závislost napětí článku na čase při nabíjení metodou cc/cv z laboratorního zdroje	25
Obr. 5-3 Měřený průběh vybíjení lithiového článku ANR26650m1	26
Obr. 6-1 Zástavba původních NiCd článků v pouzdře	28
Obr. 6-2 Zástavba nových LiFePO4 článků v pouzdře.....	29
Obr. 7-1 Schéma zapojení navržené podpěťové ochrany	30
Obr. 7-2 Schéma zapojení navržené přepěťové ochrany	32
Obr. 8-1 Zkušební zapojení předpěťové a podpěťové ochrany připravené k testovacímu měření	34
Obr. 8-2 Schéma zapojení nově navržené podpěťové ochrany	35
Obr. 8-3 Schéma zapojení ochran jednotlivého článku	36
Obr. 9-1 Kompletní schéma zapojení celého BMS obvodu	37
Obr. 9-2 Deska plošných spojů BMS obvodu	38
Obr. 9-3 3D osazení desky plošných spojů.....	40
Obr. 9-4 3D zapojení lithiovým článků k desce plošných spojů	40
Obr. 9-5 Usazení desky plošných spojů v akumulátorovém pouzdře s lithiovými články.....	41

Seznam tabulek

Tabulka 4-1 Parametry článku Ni-Cd SC1500mAh HIGHSTAR [8]	23
Tabulka 5-1 Parametry nového článku ANR26650m1 [9]	24
Tabulka 5-2 Tabulka naměřených hodnot vybíjecího průběhu článku A123 Systems	26
Tabulka 9-1 Soupis potřebných součástek na osazení desky plošných spojů	39

1. ÚVOD

Tato práce vznikla na základě opotřebování původních akumulátorových článků v akumulátorové vrtačce používané v laboratoři SA3.10 na Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky. Jednalo se o niklkadmiové články firmy HIGHSTAR, které poskytovaly celkové napětí 12 V a kapacitu 1.5 Ah. Bylo tedy zapotřebí zvolit nové vhodné bateriové články.

Práce navazuje na předchozí semestrální práci, která měla za cíl návrh vhodných baterií do akumulátorové vrtačky a jejich zástavbu do původního pouzdra vrtačky. Jelikož byly zvoleny baterie LiFePO₄, bylo také potřeba navrhnout BMS obvod, který bude zvolené baterie chránit před poškozením. Obvod musí hlídat články před jejich hraničním vybíjením při zátěži a také před jejich přebíjením při nabíjení.

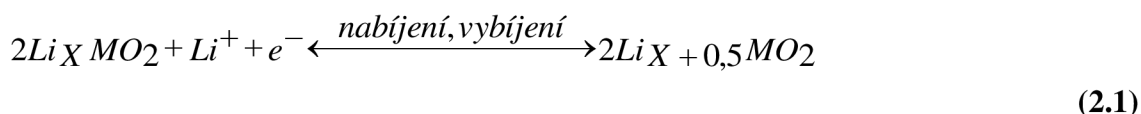
Cílem této práce je ověření funkčnosti jednotlivých ochranných obvodů nového akumulátoru a případně doladění jejich funkčnosti. Pro navržené ochrany bude navržena deska plošných spojů a následně bude zdokumentováno uspořádání celého akumulátorového packu.

2. LITHIOVÉ AKUMULÁTORY

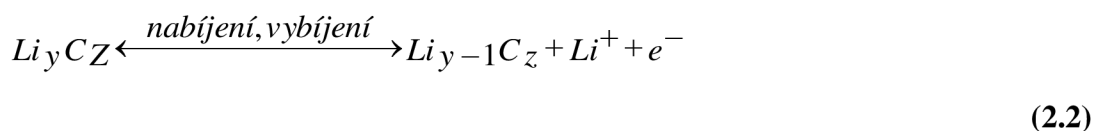
První lithiové akumulátory byly vynalezeny v druhé polovině 60. let 20. století. Od počátku nabízely vysokou měrnou energii a kapacitu a nízké samovybití. Jejich vývoj dosáhl fáze, kdy lithiové články začaly být nabíjitelé. V dalších výzkumech se objevily pokusy, kde kladnou elektrodou byly sulfidy kovů a zápornou elektrodou bylo kovové lithium. Tyto pokusy ale nebyly příznivé, protože docházelo ke korozi elektrod a jejich pasivaci. Další nepříznivý vliv se projevoval při nabíjení malým proudem, kdy lithium začalo tvořit jehličky, které zvlhčovaly separátor a následně tak docházelo k vnitřním zkratům nebo se začala utvářet houbovitá hmota o velkém povrchu, která způsobovala nepředvídatelné teplotní pochody. V 80. letech začaly pokusy se zápornou elektrodou, jejíž sloučeniny byly LiWO_2 , $\text{Li}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ nebo Li_9MoSe_6 a kladnou elektrodou byly sloučeniny titanu, wolframu, niobu, vanadia nebo molybdenu. Tyto pokusy rovněž nebyly příznivé, jelikož články měly nízké napětí, kapacitu a byly náročné na výrobu. Velkou změnou byla nová technologie od firmy SONY v roce 1990, kdy využívali pro zápornou elektrodu aktivní materiál směsi grafitu obohaceného lithiem a polyolefinů. Takhle konstrukčně sestavený článek dostal označení Li-Ion. Tento článek je schopný dát vysoké napětí s možností nabíjení a vybití a dlouhou životností a zároveň si zachová vysokou kapacitu. Lithiové akumulátory bývají v normách také označovány jako lithiový akumulátor, akumulátor Li, akumulátor Li-Ion nebo akumulátor Li-Pol. [1]

2.1.1 Princip lithiových akumulátorů

Dnes, jako běžně používané materiály aktivní hmoty kladné elektrody jsou LiCoO_2 , $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, LiNiO_2 , LiV_2O_5 , popřípadě další. Jako elektrolyt je většinou používán LiPF_6 rozpuštěný v nepolárním rozpouštědle. Probíhající elektrochemické procesy na kladné elektrodě lze zjednodušeně vyjádřit následující rovnicí: [2]



Děje na záporné elektrodě lze opět vyjádřit následující zjednodušenou rovnicí: [4]

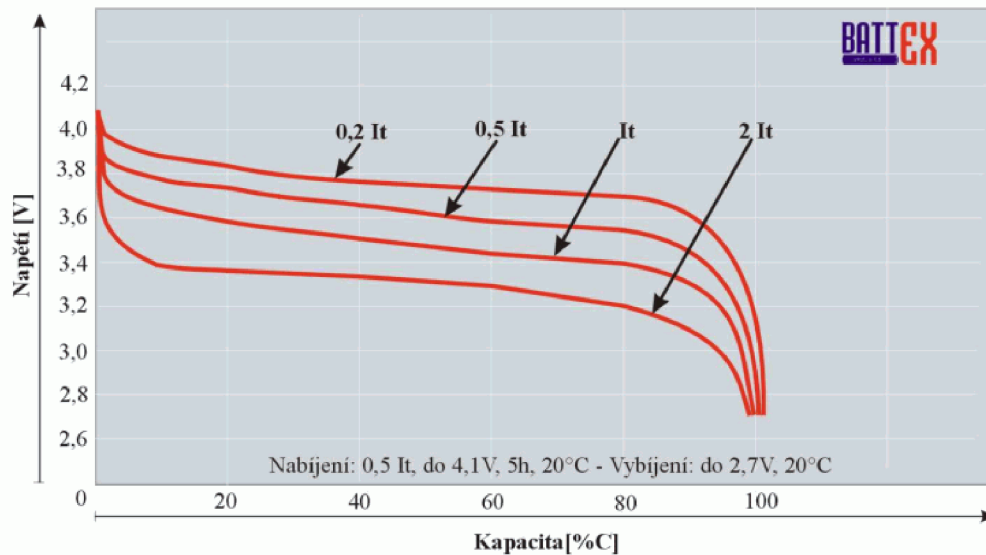


2.1.2 Základní charakteristiky lithiových akumulátorů

Výhody Li akumulátorů: [3]

- Vysoké napětí (3,6 V oproti NiCd nebo NiMH akumulátorům, které mají 1,2 V)

- Vysoká energie oproti konkurenci (NiCd 4/3AF – 2 400 mWh (2000 mAh/1,2 V); NiMH 4/3AF – 5 400 mWh (4500 mAh/1,2 V); Li-Ion 4/3AF – až 12 330 mWh (3425 mAh/3,6 V))
- Nízká hmotnost oproti konkurenci (NiCd 4/3AF – 45 g; NiMH 4/3AF – 60 g; Li-Ion 4/3AF – 40 g)
- Dlouhá životnost (při řádném zacházení lze dosáhnout 500 až 1500 nabíjecích cyklů)
- Nízké samovybíjení cca 8 % za měsíc při teplotě +20 °C (u NiCd nebo NiMH je to až 25 %)
- Změna napětí v průběhu vybíjení je větší oproti NiCd nebo NiMH akumulátorům, z čehož plyne možnost lepší indikace zbytkové kapacity



Obr. 2-1 Vybíjecí charakteristiky Li-Ionového akumulátoru SAFT MP 174865 v závislosti na vybíjecím proudu[5]

Nevýhody Li akumulátorů: [3]

- Nabíjecí proud je ve většině případů omezen na 1.5 It (nabíjí se konstantním napětím, což trvá 2 až 3 hodiny do úplného nabití oproti NiCd akumulátoru, který lze dobít i během 15 minut)
- U běžných typů je vybíjecí proud omezen do 2 It (u NiCd je to až 20 It)
- Napěťový úbytek v průběhu vybíjení není ideální pro zařízení, které potřebují stálý příkon
- Běžné typy mají vysoký vnitřní odpor (až 10krát větší než u NiCd nebo NiMH)

- Pracovní teplota je do -20 °C až do -30 °C maximálně (u NiCd je to až do -40 °C)
- Jsou náchylné na přebíjení a podbíjení, proto musí obsahovat elektronické obvody, které baterie při přebití nebo podbití odpojí. Při podbití pod povolenou mez dojde k trvalému zničení akumulátoru
- Nabíječe nejsou zaměnitelné s nabíječi pro NiCd a NiMH akumulátory s výjimkou akumulátorů, které obsahují elektronický obvod, který hlídá přebíjení baterie
- Články jsou citlivé na poškození (při poškození obalu hrozí výbuch článku)
- Obsahují nebezpečné látky škodlivé životnímu prostředí

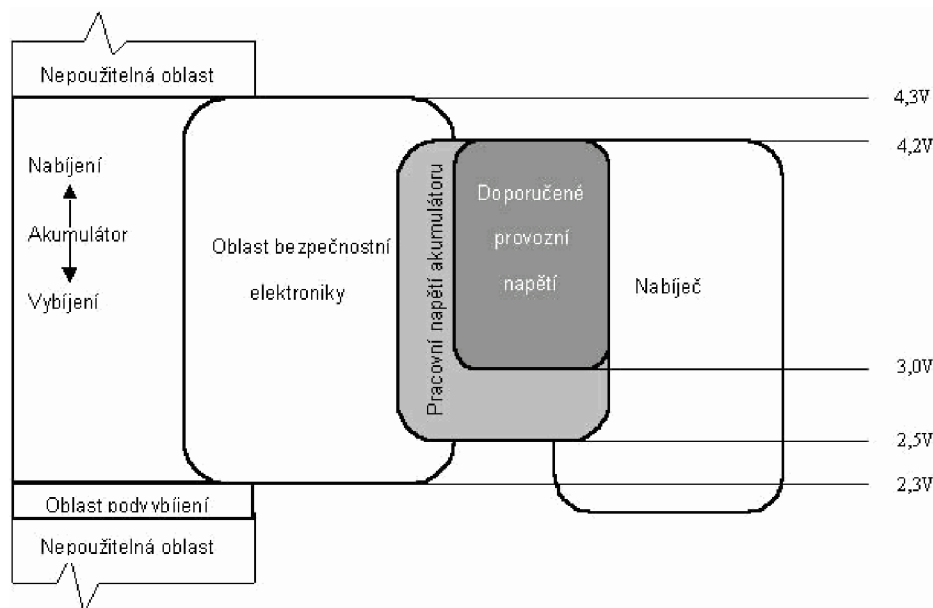
2.1.3 Skladování lithiových akumulátorů

Optimální podmínky skladování jsou opět velice podobné v porovnání s NiCd a NiMH akumulátory. Optimální teplota je od 0 °C do +25 °C a relativní vlhkost vzduchu $65 \pm 20 \%$. Li akumulátory by se měly vždy skladovat ve stavu zhruba 50 % až 70 % jejich kapacity. Před jejich použitím by se měl akumulátor dobít na 100 % své kapacity. Také tyto baterie je doporučováno kontrolovat a popřípadě dobíjet každých 6 měsíců. Je to kvůli elektronice, která chrání akumulátor před podbitím a přebitím, neboť i ta odebírá velmi malé proudy. Při vybití baterie hrozí nejen její zničení, ale i smazání paměti elektroniky, pokud má takovou elektroniku baterie přidělenou. Akumulátor by se měl tedy v ideálním případě po vybití ihned dát nabít, aby nedošlo ke snížení životnosti akumulátoru či jeho zničení. [4]

2.1.4 Používání lithiových akumulátorů v praxi

Při výběru nových akumulátorů je nutné dbát na to, že každý výrobce používá jiné druhy elektrod, separátorů a elektrolytů a pracovní napětí je tak různé. Konečné nabíjecí napětí se pohybuje od 4 V do 4.3 V. Mohou se ovšem objevit i akumulátory, které mají hodnotu konečného napětí až 4.5 V. Podobně je to i s hodnotou napětí konečného vybití, která se pohybuje v rozmezí od 2.5 V do 3 V. Z těchto důvodů je nutné prohlížet si katalogové hodnoty různých lithiových akumulátorů před jejich výběrem. Překročení těchto hodnot o desetiny, ale i setiny, vede k rozpadu elektrod, a tak následnému znehodnocení akumulátoru. Na trzích se sice objevily testery lithiových akumulátorů, ale mají většinou přednastaveny hodnoty nabíjecího napětí na 4.2 V a vybíjecího napětí na 2.5 V, což může baterii ještě poškodit. Tyhle testery jsou totiž nastaveny na hodnoty akumulátorů s kobaltovou kladnou elektrodou. Ve všech užitích lithiového akumulátoru by tak vždy měl akumulátor mít i svoji bezpečnostní elektroniku, která bude hlídat jeho

úplné nabití a jeho přípustnou hodnotu vybití, při které nedojde ke zničení akumulátoru. Rozdíl je také v pracovním napětí a doporučeném provozním napětím, kdy akumulátor pracující v rozmezí doporučeného provozního napětí, dosahuje mnohem vyšší životnosti. Pokud tedy akumulátor pracuje v rozmezí pracovního napětí, je schopen dát přibližně 500 nabíjecích cyklů. Pokud ale pracuje v rozmezí doporučeného provozního napětí, kdy je vybití ukončeno přibližně ve 3 V, je akumulátor schopen dát až 1500 nabíjecích cyklů. Pokud ale bude využito jen 10 % kapacity akumulátoru, je schopen dát až 10 000 nabíjecích cyklů. [5]

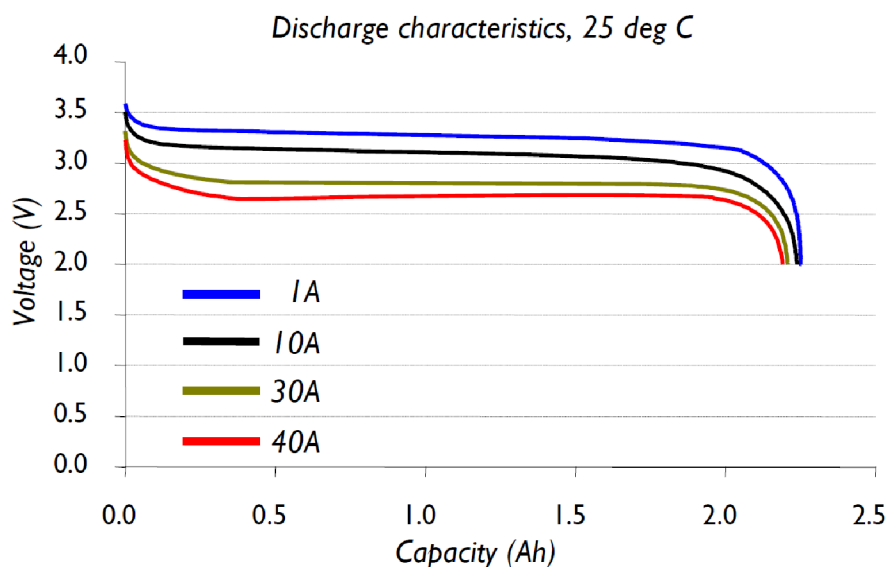


Obr. 2-2 Napěťové rozsahy Li-Ion akumulátoru a jeho příslušenství [5]

2.2 Akumulátory LiFe

Akumulátory LiFe bývají označovány jako LiFePo₄, což znamená Lithium-Ion-Železo-Fosfátové. Oproti základním Li-Ion akumulátorům mají menší velikost částic aktivních hmot, což znamená nižší vnitřní odpor, zvýšení povoleného nabíjecího a vybíjecího proudu a zvýšení životnosti. Jejich udávaná kapacita bývá o něco vyšší než jmenovitá. Články bývají zapouzdřené ve válcovém obalu z hliníkové slitiny, což jim dává skvělou mechanickou odolnost vůči poškození. Pouzdra jsou vybavena tlakovými pojistkami, což znamená, že při extrémním přebíjení, či snad zkratu, články neexplodují. Akumulátory LiFe se mohou výhodně nabíjet ze zdroje konstantního napětí s podřízenou proudovou smyčkou neboli s kaskádní regulační strukturou, která realizuje proudové omezení, dokud napětí nedosahuje konečné hodnoty. Jedná se tedy o metodu zdroje konstantního nabíjecího napětí s proudovým omezením. Až napětí článku dosáhne téměř konečného napětí, nabíjecí proud se zmenší a limitně zaniká. I když už se jedná o dobíjení jen několika desetin voltů, trvá tato fáze nabíjení skoro stejně

dlouho, jako první fáze nabíjení s udržovaným nabíjecím proudem. Články dovolují nabíjecí proud 4 až 5násobek vlastní kapacity. U větších článků se tedy můžeme dostat na hodnotu nabíjecího proudu 10 A. Tak jako u základních článků Li lze článek dobít do jeho 90 % kapacity již během 15 minut. Plné nabití vyžaduje ovšem zhruba dvojnásobek času. Články jsou schopné extrémně rychlého nabíjení, kdy nabíjecí proud lze zvýšit na 12násobek kapacity článku, což u velkých článků znamená hodnotu nabíjecího proudu až 27 A. Při této hodnotě nabíjecího proudu, je článek schopný se dobít za méně než 5 minut. I u těchto článků jako u článků Li je potřeba elektroniky pro hlídání přebíjení, podbíjení a balancování článků. Maximální vybíjecí proud při vybíjení článku rozměrově většího, zhruba 6 x 2 cm, bývá zhruba kolem 70 A. Může být také využit pulsní vybíjecí proud po dobu 10 sekund, který je přibližně 1.7krát vyšší než maximální proudová zatížitelnost. Například článek ANR26650m1 firmy A123 Systems o kapacitě 2.3 Ah a rozměrech 6.5 x 2.5 cm snese již zmiňovaných 70 A maximálního vybíjecího proudu a pulsní vybíjecí proud 120 A. Vybíjecí charakteristika článků je téměř ideální. Na počátku vybíjení má jen malou oblast zvýšeného napětí a pak po celou dobu vybíjení má téměř konstantní napětí. Pod textem je vyobrazena vybíjecí charakteristika výše zmiňovaného článku firmy A123 systems. [6]



Obr. 2-3 Vybíjecí charakteristika článku A123 systems 3,3 V a 2,3 Ah [6]

3. SYSTÉM SPRÁVY AKUMULÁTORU

System správy akumulátoru neboli Battery Management System (BMS) je elektronický systém, který zajišťuje bezpečný provoz akumulátoru. Udržuje napětí článků v jejich stanovených mezích. Vyspělejší BMS systémy chrání akumulátor i proti přetížení, zkratovému proud nebo příliš vysoké teplotě. U jednoduchých úloh se využívá pouze již zmíněného hlídání napětí na článku. Pokročilejší BMS systémy umí na základě zaznamenávání průběhů nabíjení a vybíjení či na základě poklesu kapacity predikovat životnost a výdrž akumulátoru. Těchto ochranných systémů se využívá při použití lithiových akumulátorů, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4.4. [7]

3.1 Ochrana proti přepětí

Ochrana proti přepětí se využívá při nabíjení článků. Ochrana má nastavenou mezní hodnotu maximálního napětí, do kterého může článek nabíjet. V momentě, kdy napětí na článku dosáhne předem nastavené mezní hodnoty maximálního napětí, ochrana nabíjení článku přeruší. [7]

3.2 Ochrana proti podpětí

Podobně jako ochrana proti přepětí funguje i ochrana proti podpětí. Ochrana má opět nastavenou mezní hodnotu článku ovšem takovou, při které by se měl použitý článek při zatížení odpojit. Ve chvíli, kdy se článek vybije na mezní nastavenou mezní hodnotu nastavenou v ochraně, ochrana článek odpojí. [7]

3.3 Ochrana proti přetížení a zkratu

Akumulátory mají předem od výrobce stanovený maximální odebíraný proud. Při dlouhodobém odebírání takového proudu dochází k zahřívání článku a jeho snižování vlastností. V tenhle okamžik ochrana proti přetížení dá pokyn připojenému zařízení o snížení proudu. Pokud tak zařízení neučiní, ochrana toto zařízení odpojí. V případě zkratu ochrana odpojuje ihned. [7]

3.4 Hlídání teploty článku

Každý akumulátor má svůj rozsah pracovních teplot, ve kterých se může pohybovat. Při překračování těchto teplot akumulátor ztrácí svoje vlastnosti, resp. zkracuje se životnost a klesá kapacita. BMS systém měří teplotu článku pomocí teplotních čidel. Pokud teplota překročí maximální povolenou pracovní teplotu, ochrana zapne chlazení článku. Pokud naopak teplota klesne pod minimální pracovní teplotu, ochrana zapne ohřev článku. [7]

3.5 Balancování článků

Každý akumulátor skládající se z článků, popřípadě skupiny článků, zapojených do série, je ovlivněn problematikou neidentických parametrů článků. Každý vyrobený článek stejného typu od stejného výrobce nemá přesně stejné parametry. Tyto rozdíly způsobují větší namáhání slabších článků, a tudíž i jejich rychlejší opotřebení oproti silnějším článkům. Také články, které jsou uloženy uprostřed ostatních článků, podléhají většímu tepelnému namáhání, a tak dochází k zhoršování jejich parametrů.

Při sériovém spojení článků odebírá akumulátor stejný náboj ze všech článků. Celková kapacita akumulátoru je pak definována právě kapacitou článku, který má oproti ostatním článkům nejnižší kapacitu. Jedná se o nesymetrii kapacity sériových článků.

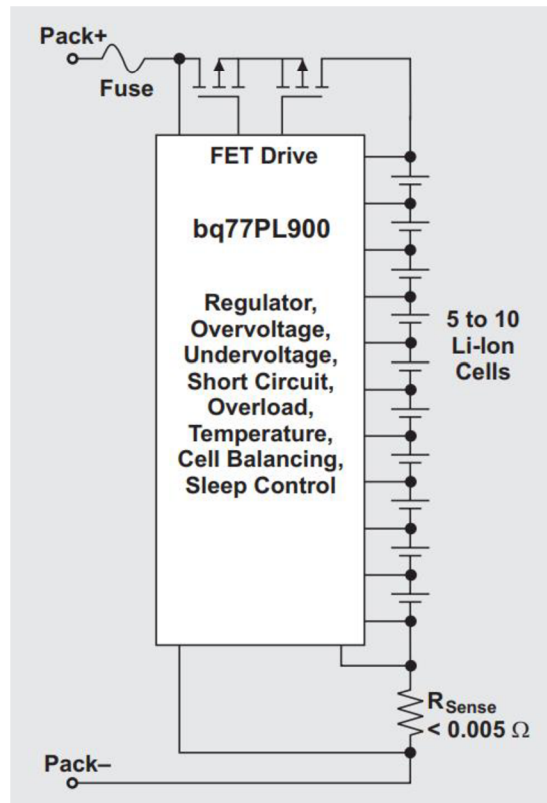
Při zátěži a následném vybití akumulátoru nastává situace, kdy napětí na nejslabším článku poklesne pod referenční vypínací hodnotu a akumulátor je odpojen od zátěže, přičemž ostatní články jsou ještě schopné poskytnout svoji kapacitu. Je to způsobeno vlivem nesymetrie samovybití sériových článků. Jejich svodový proud samovybití je různý a pak dochází k této nesymetrii.

Při nabíjení článků je situace obdobná. Tedy při dosažení plné kapacity nejsilnějšího článku se akumulátor odpojí od nabíječky, přičemž slabší články zůstanou neúplně dobity. Tato situace nastává vlivem rozdílného vnitřního odporu článků. Vlivem této nesymetrie dochází k pomalejšímu nabíjení postiženého článku.

Z výše uvedené problematiky je tedy nutno zajistit přelévání náboje ze silnějších článků do kapacitně slabších článků. Tohle je úkolem balancování článků. Z principiálního hlediska se v praxi setkáváme s dvěma typy balancování a to:

- aktivní
- pasivní

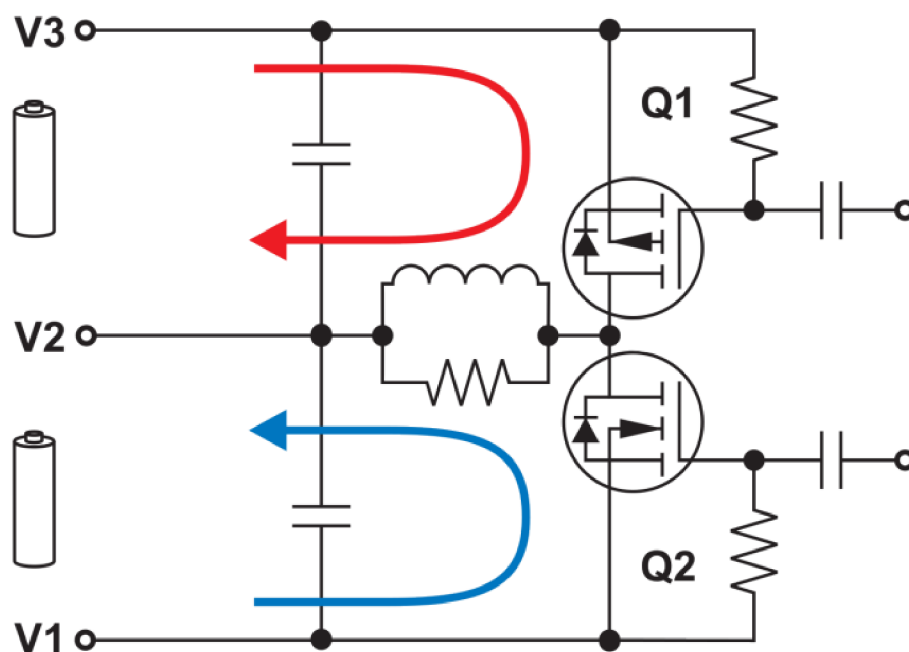
Na obrázku 3-1 pod textem na další straně je uvedeno schématické zapojení článků k balanceru BQ77PL900 od firmy Texas Instruments. [10], [11]



Obr. 3-1 Zapojení článků k balanceru BQ77PL900 [10]

3.5.1 Aktivní balancování

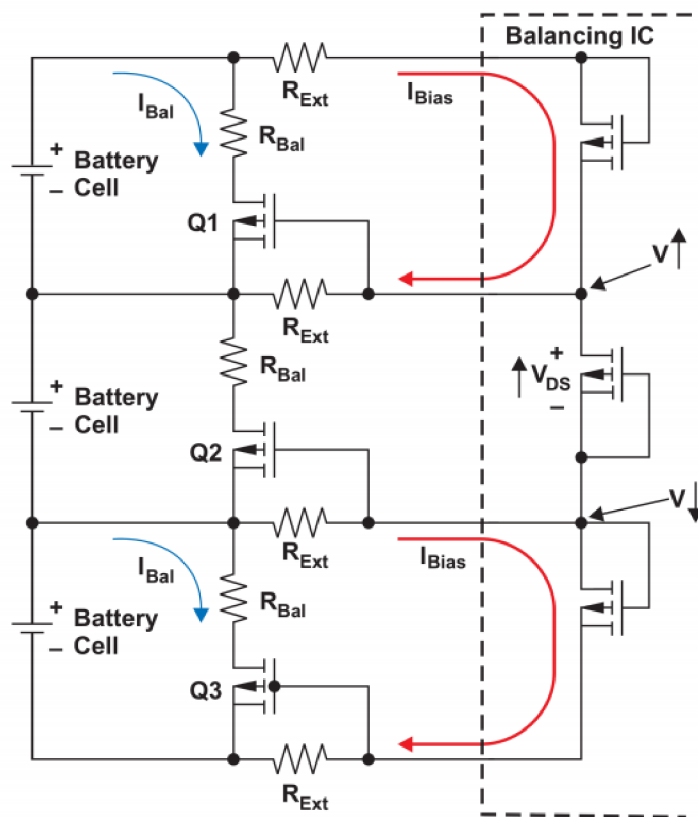
Aktivní balancování pomocí DC-DC měničů přesouvá náboj mezi články. Podle napětí na jednotlivých člancích je dáno, mezi kterými články se bude náboj přelévát. Principiálně se bude přelévát náboj z článku s vyšším napětím do článku s nižším napětím. Přesouváním energie do méně nabitých článků tak nedochází ke zbytečné přeměně energie v teplo. Pomocí aktivního balancování je možné částečně zvýšit kapacitu celého akumulátoru. Musí být tedy schopno rychlých přesunů energie během vybíjecích procesů. Takové balancování musí být schopno zajistit velké pracovní proudy a výkony během vybíjení. U silných článků, kde by bylo potřeba dimenzovat aktivní balancování na velké proudy a výkony by ovšem zařízení dosahovalo příliš drahých cen, proto u akumulátorů se silnými články bude ekonomičtější slabý článek vyměnit za nový. Pomocí aktivního balancování lze eliminovat i nesymetrii nabíjení článků. Lze docílit i lepší účinnosti nabíjecího procesu. Nesymetrie je tak napravována nepřetržitě. Níže pod textem na obrázku 3-2 na další straně je uveden příklad zapojení aktivního balancování.[10], [11]



Obr. 3-2 Schéma zapojení aktivního balancování [11]

3.5.2 Pasivní balancování

U pasivního balancování je využito připojení rezistoru k článku s nejvyšším nábojem po dobu potřebnou k nabití slabších článků. Zde neznáme náboj článku. Balancování probíhá na základě měření napětí na článcích. V momentě, kdy článek dosáhne plného napětí, je přes spínací prvek připojen balanční rezistor k článku. Článek se tak začne lehce vybíjet, a tak je dalším slabším článkům umožněno jejich nabití. Výhodou této metody je schématická jednoduchost. Nevýhodou je ovšem přeměna energie na teplo z rezistorů odebírající energii z více nabitých článků. Tato metoda je ovšem plně dostačující k potlačení vlivu nesymetrie samovybití článků. Při každém nabíjení je tak tato nerovnost napravována. Na obrázku 3-3 pod textem na další straně je uveden příklad zapojení pasivního balancování, kdy je jako spínací prvek použit tranzistor MOSFET.[10], [11]



Obr. 3-3 Schéma zapojení pasivního balancování [11]

4. PŮVODNÍ AKUMULÁTOR

Původní akumulátor byl tvořen deseti niklkadmiovými články firmy HIGHSTAR, jež nesou označení 1.2 V SC1500mAh. Specifické parametry článku jsou uvedeny v tabulce 4-1. Samotný článek je potom na obrázku 4-1 hned pod tabulkou 4-1.

Parametr	Značka	Hodnota	Jednotka
počet nabíjecích cyklů	n	500	-
váha článku	m	38	g
průměr	d	23	mm
výška	h	34	mm
jmenovitá kapacita	C_{cl}	1200	mAh
napětí při plném nabití	$U_{cl,max}$	1,3	V
vnitřní odpor	R_i	<10	mΩ
doporučený nabíjecí proud	$I_{ch,cl}$	240	mA
maximální vybíjecí proud	I_{ch}	12	A

Tabulka 4-1 Parametry článku Ni-Cd SC1500mAh HIGHSTAR [8]



Obr. 4-1 Článek SC1500mAh firmy HIGHSTAR

5. VOLBA NOVÝCH BATERIOVÝCH ČLÁNKŮ

Akumulátor bude používán v akumulátorové vrtačce, proto by měl mít dostatečnou kapacitu a dodávaný výkon. Pro tuto práci by bylo také vhodné zvolit NiMH články, nicméně v názvu práce stojí pack LiFePO₄, tudíž byly zvoleny články LiFePO₄. Co se týče parametrů lithiových článků, tak jsou oproti NiMH článkům lehčí, což je u mechanického nářadí žádané a také jejich kapacita je taktéž oproti NiMH článkům při stejných či podobných rozměrech větší. Proto tedy byly vybrány lithiové články od firmy A123 Systems s označením ANR26650m1. Jejich parametry jsou opět uvedeny v následující tabulce pod textem. Pod touto tabulkou je také vyobrazen nový LiFePO₄ článek.

Parametr	Značka	Hodnota	Jednotka
počet nabíjecích cyklů	n	<1000	-
hmotnost článku	m	70	g
průměr	d	26	mm
výška	h	65	mm
jmenovitá kapacita	C_{cl}	2300	mAh
napětí při plném nabití	$U_{cl,max}$	3.6	V
vnitřní odpor	R_i	10	mΩ
doporučený nabíjecí proud	$I_{ch,cl}$	3000	mA
maximální vybíjecí proud	I_{ch}	70	A

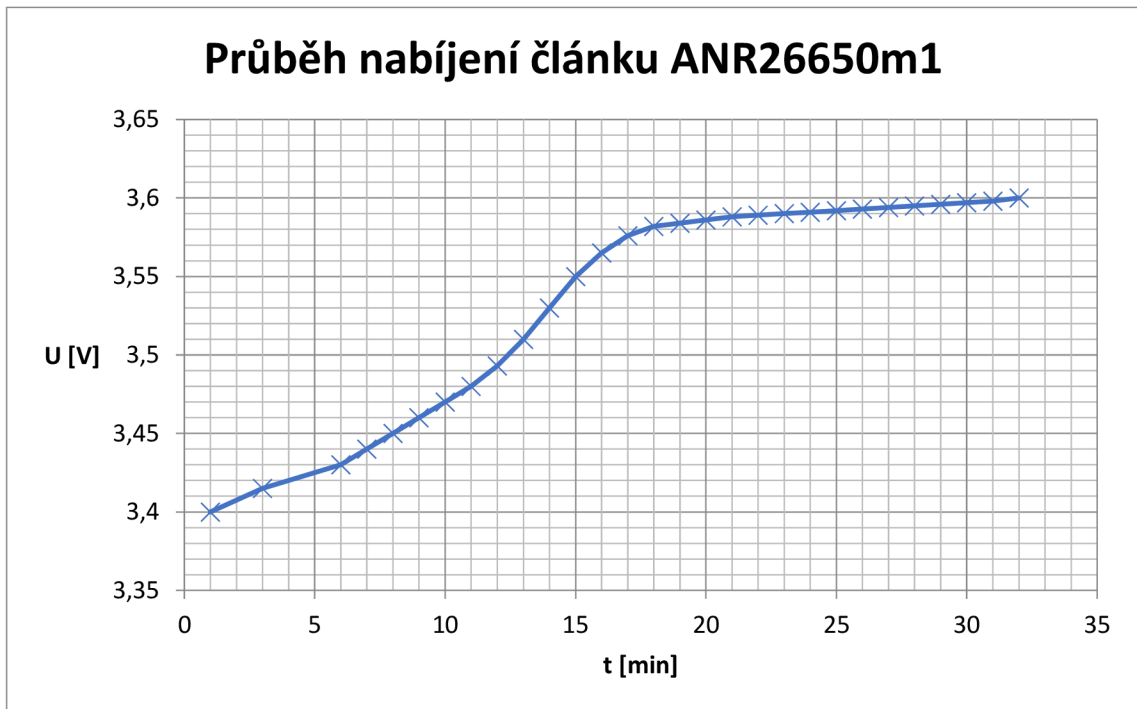
Tabulka 5-1 Parametry nového článku ANR26650m1 [9]



Obr. 5-1 LiFePO₄ článek firmy A123 Systems

5.1 Ověření vlastností bateriového článku

Vybrané články nebyly dlouhou dobu používány, proto bylo nutné ověřit jejich vlastnosti. Toho bylo docíleno nabitím jednoho z článků pomocí regulovatelného stejnosměrného zdroje konstantním napětím o velikosti maximálního napětí článku čili 3,6 V. Článek před nabíjením vykazoval hodnotu napětí 3,4 V, což svědčilo o tom, že článek není zničený a je v dobrém stavu. Průběh o nabíjení článku byl zaznamenán níže v grafu. Hodnoty grafu jsou uvedeny v tabulce v příloze.



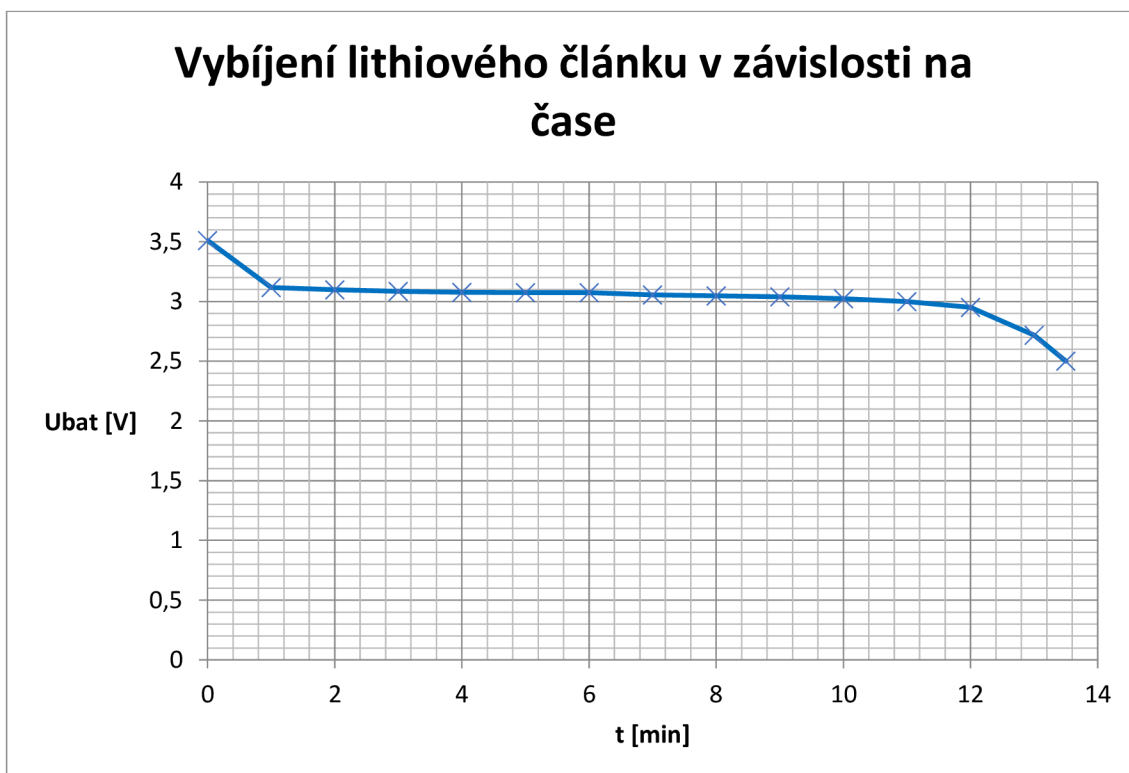
Obr. 5-2 Závislost napětí článku na čase při nabíjení metodou cc/cv z laboratorního zdroje

Dle změřeného průběhu nabíjení článku byla doba nabíjení 32 minut. Článek se prvních 15 minut nabíjel relativně rychle. Poté ale dosáhl kolena nabíjecí charakteristiky a trvalo mu tak dalších 15 minut, než se nabil úplně, a to z hodnoty 3,55 V na hodnotu 3,6 V.

Nyní bude nabíjený lithiový článek vybitý. Je tedy zapotřebí článek vybit k maximální povolené hodnotě napětí udané výrobcem, což je hodnota 2,5 V. Proud vybitým článkem bude udržován konstantně na hodnotě 9 A. Graf s vybití charakteristikou je opět uveden níže spolu s tabulkou naměřených hodnot během vybití.

t [min]	U_{bat} [V]	I [A]
0	3,511	9,5
1	3,117	9,2
2	3,099	9
3	3,084	8,8
4	3,076	8,8
5	3,074	8,5
6	3,073	8,5
7	3,056	9
8	3,048	8,98
9	3,038	9
10	3,023	9
11	2,998	9
12	2,95	9
13	2,719	7,5
13,5	2,5	8

Tabulka 5-2 Tabulka naměřených hodnot vybíjecího průběhu článku A123 Systems



Obr. 5-3 Měřený průběh vybíjení lithiového článku ANR26650m1

Z obrázku 5-3 je vidět, že naměřená charakteristika téměř odpovídá teoretickému průběhu vybíjení. Dále pro ověření, z naměřeného průběhu vybíjení byla určena

současná hodnota kapacity článku a jeho vnitřní odpor. Výpočet je proveden z následujících vztahů:

$$C = I_{vyb} \cdot t_{vyb} = 9 \cdot \frac{13,5}{60} = 2,025Ah \quad (5.1)$$

$$R_i = \frac{U_{start} - U_{ust}}{I_{start} - I_{ust}} = \frac{3,6 - 3,578}{9,5 - 8} = 0,015\Omega \quad (5.2)$$

Současná kapacita článku je 2,025 Ah a jeho vnitřní odpor je 0,015 Ω dle zaznamenaných hodnot z vybíjecího průběhu článku. V porovnání s tabulkovými hodnoty ztratil článek zhruba 300 mAh a jeho vnitřní odpor se zvýšil o 5 m Ω , což je sice patrné, ale pro naše účely použití dostačující. Tyto napěťové články je tedy možné použít k sestavení akumulátorového packu, a tak i jeho napájení akumulátorové vrtačky.

6. ZÁSTAVBA ČLÁNKŮ DO PŮVODNÍHO POUZDRA

Původní akumulátor byl umístěn v plastovém pouzdře o rozměrech 7 x 10 x 8,5 cm. Jeho zástavba v pouzdře je vyobrazena na obrázku 6-1 pod textem. V pouzdře se celkem nacházelo 10 článků přičemž 9 z nich bylo umístěno svisle vedle sebe a poslední článek ležel na zbývajících člancích umístěn vodorovně.



Obr. 6-1 Zástavba původních NiCd článků v pouzdře

Nové články budou uloženy opět do původního pouzdra s tím rozdílem, že všechny budou ve vodorovném uložení. Je to z toho důvodu, že články máme celkem 4 a oproti původním článkům jsou větší. Jejich návrh uspořádání v pouzdře je vyobrazen na obrázku 6-2 pod textem. Obrázky 6-1 a 6-2 byly vytvořeny ve vizualizačním softwaru Autodesk Inventor Professional.



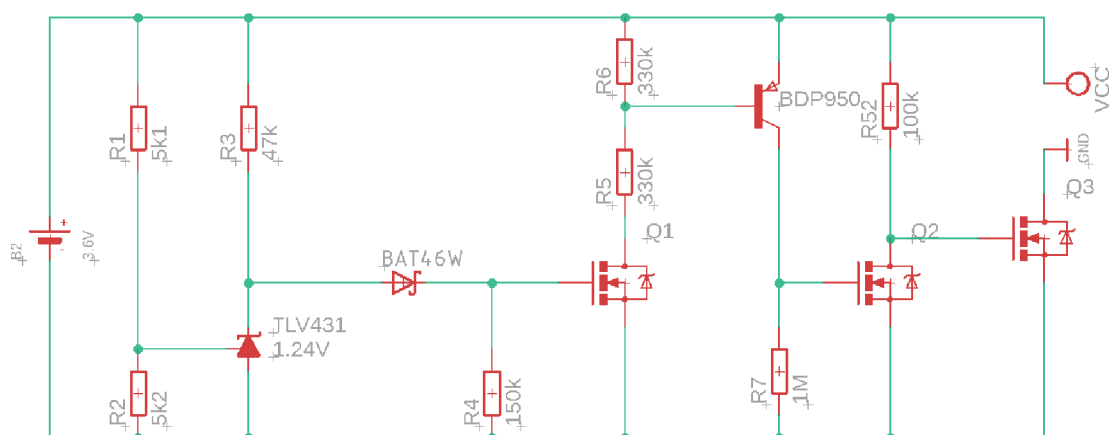
Obr. 6-2 Zástavba nových LiFePO₄ článků v pouzdře

7. NÁVRH BMS OBVODŮ

Jak již bylo řečeno, součástí práce je i pomocná elektronika pro baterie, jež bude hlídat přípustné rozmezí jejich pracovních hodnot. Z teorie je známo, že tyto obvody hlídají přebíjení, podbíjení, teplotu, nadproudy a zkratové proudy baterie. Naše řešení však bude obsahovat pouze ochranné obvody proti přebíjení a proti podbíjení baterie. Je to z důvodu lepšího porozumění a seznámení se s danou problematikou práce.

7.1 Návrh podpět'ové ochrany

Podpět'ová ochrana má na starost hlídat napětí jednotlivých bateriových článků umístěných sériově k sobě. Pokud ochrana zaznamená nastavenou hodnotu minimálního napětí na kterémkoliv článku, odpojí článek od zátěže a články jsou připraveny opět k nabíjení. Na obrázku pod textem je uvedeno schéma podpět'ové ochrany pro jednotlivý článek.



Obr. 7-1 Schéma zapojení navržené podpět'ové ochrany

Princip funkce této ochrany závisí na napět'ové referenci TLV431, která funguje jako komparátor. Pokud se mezi její referencí a anodou objeví referenční napětí, v našem případě 1.24 V, napět'ová reference začne vést proud a bude na ní jen minimální napětí. V tenhle okamžik dojde k připojení baterie B2 k zátěži. To znamená, že tranzistor MOSFET N Q1 je tedy zavřený a neteče přes něj žádný proud. Výkonový tranzistor BDP950 typu PNP, který je nad tranzistorem Q1, nemůže být taktéž otevřen, protože pro jeho otevření je nutné, aby zde tekl bázový proud směrem ven. Pokud je i tento tranzistor v zavřeném stavu, tak opět tranzistor Q2 je také v zavřeném stavu, neboť na odporu R7 se nemůže objevit žádný úbytek napětí. A když je tranzistor Q2 v uzavřeném stavu, znamená to, že mezi jeho drainem a sourcem je napětí, což dává pokyn tranzistoru Q3, aby byl v otevřeném stavu. Jelikož za tranzistorem Q3 je zátěž, znamená to, že baterie B2 dodává výkon do zátěže.

V obrácené situaci, kdy na napěťové referenci, mezi její referencí a anodou, bude napětí menší než referenční napětí, bude na referenci napětí dané napěťovým děličem, složeného z odporu R3 a odporu R4 a z úbytku napětí na diodě D1. To znamená přesně pravý opak, jako v předchozí situaci. Sériově umístěné diody zajistí, aby nedošlo k příliš brzkému otevření tranzistoru Q1 před zapůsobením napěťové reference. Pokud je otevřen tranzistor Q1, protéká jím proud. Tento proud je součtem proudu, protékajícím odporem R6 a proudem, který teče z báze tranzistoru BDP950, což tedy znamená, že tranzistor BDP950 je také v otevřeném stavu. Proud, který jím protéká, vyvolá napěťový úbytek na odporu R7 a ten tak zajistí sepnutí tranzistoru Q2. Pokud tranzistorem Q2 teče proud, znamená to tedy, že mezi jeho drainem a sourcem je zanedbatelný úbytek napětí, což zabraňuje tranzistoru Q3, aby se otevřel. A pokud je tedy tranzistor Q3 v zavřeném stavu, obvod je přerušen a baterie je od zátěže odpojena.

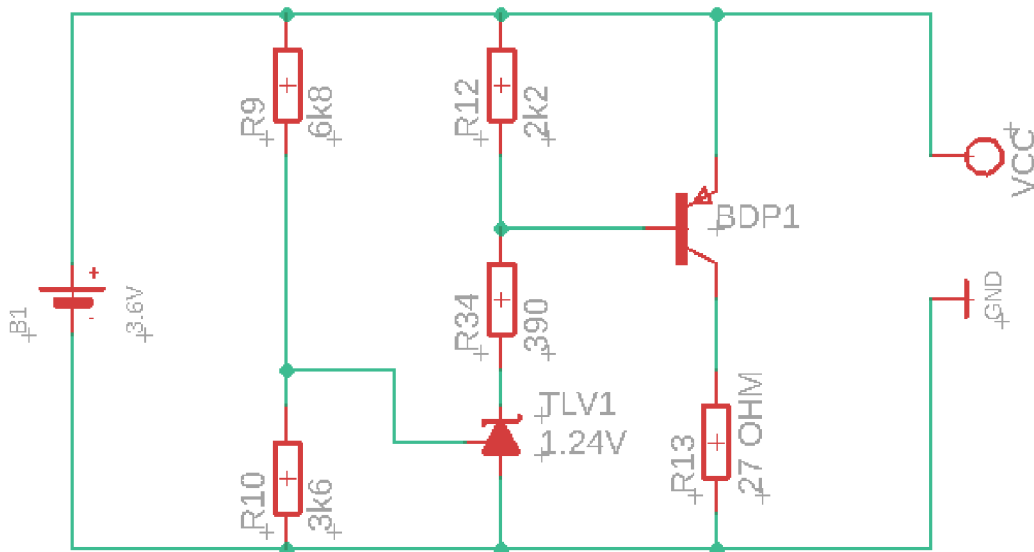
Hodnotu odporu R1 si zvolíme a podle požadované hodnoty referenčního napětí na napěťové referenci dopočítáme hodnotu R2, přičemž součet odporů R1 a R2 podle výrobce napěťové reference by měl být přibližně 10 kΩ. Odpor R1 si tedy zvolíme jako 5100 Ω. Diody jsou v sérii 3, aby bylo zajištěno řádné otevírání tranzistoru Q1.

$$R2 = R1 \cdot \frac{U_{ref}}{U_{bat,min} - U_{ref}} = 5100 \cdot \frac{1.24}{2.5 - 1.24} = 5019\Omega \quad (7.1)$$

Z rovnice 7.1 tedy volíme odpor R2 stejný jako je R1 a to 5100 Ω.

7.2 Návrh přepěťové ochrany

Oproti ochraně podpěťové, je tato ochrana konstrukčně jednodušší. Jak již bylo řečeno, ochrana má za úkol odpojit článek při jeho nabíjení, když dosáhne maximální udávané hodnoty nabíjecího napětí. Znamená to tedy, že tato ochrana by měla fungovat pouze tehdy, kdy je bateriový pack nabíjen. Na obrázku níže je uvedeno schématické zapojení přepěťové ochrany.



Obr. 7-2 Schéma zapojení navržené přepět'ové ochrany

Princip této přepět'ové ochrany opět závisí na napět'ové referenci TLV431. V okamžiku, kdy začneme nabíjet bateriový článek B1, začne na něm vzrůstat napětí. Toto napětí se rozdělí podle napět'ového děliče mezi odpory R9 a R10. Když napětí na článku dosáhne maximální hodnoty 3.6 V, napět'ová reference začne vést proud, který zapříčiní sepnutí výkonového tranzistoru BDP1. V tento moment teče přes tranzistor nabíjecí proud. Aby se článek dále nenabíjel, nabíjecí proud je sveden do výkonového odporu R13.

Hodnotu odporu R10 počítáme obdobně jako u přepět'ové ochrany, podle napět'ového děliče. Opět si volíme hodnotu R11 tak, aby nám výsledný odpor R11 dal součet s odporem R10 zhruba 10 000 Ω . R11 tedy volíme 6800 Ω a R10 dopočítáme podle následující rovnice:

$$R10 = R9 \cdot \frac{U_{ref}}{U_{bat,max} - U_{ref}} = 6800 \cdot \frac{1.24}{3.6 - 1.24} = 3572\Omega \quad (7.2)$$

Odpor R13 určíme na základě výkonu tranzistoru a napětí, které se na odporu R13 objeví po sepnutí tranzistoru, což je 3.6 V. Tranzistor má výkon 0.5 W. Z těchto hodnot si vypočítáme proud, který poteče přes tranzistor, a z něho pak následně určíme hodnotu odporu R13 podle následujících rovnic:

$$I_c = \frac{P}{U_{max}} = \frac{0.5}{3.6} = 140mA \quad (7.3)$$

$$R13 = \frac{U_{\max}}{I_c} = \frac{3.6}{0.140} = 27\Omega$$

(7.4)

Protože nechceme, aby se R13 příliš zahříval, je nutné zvolit rezistor na vyšší výkon, než kterým bude zatěžovaný. Volí se tedy dvojnásobná hodnota původního výkonu, a to tedy 1 W.

Odporem R11 taky poteče vyšší proud, tudíž je opět žádoucí jej dimenzovat. Nejprve vypočítáme hodnotu bázevého proudu I_b . Poté dopočítáme proud tekoucí odporem R11 a následně vypočítáme i odpor R11. Budeme postupovat podle následujících rovnic:

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{140}{100} = 1.4mA$$

(7.5)

I_b volíme 3 - krát vyšší tzn. že I_b bude přibližně 5 mA.

$$I_x = I_b + \frac{U_{BE}}{R12} = 0.005 + \frac{0.6}{2200} = 5.3mA$$

(7.6)

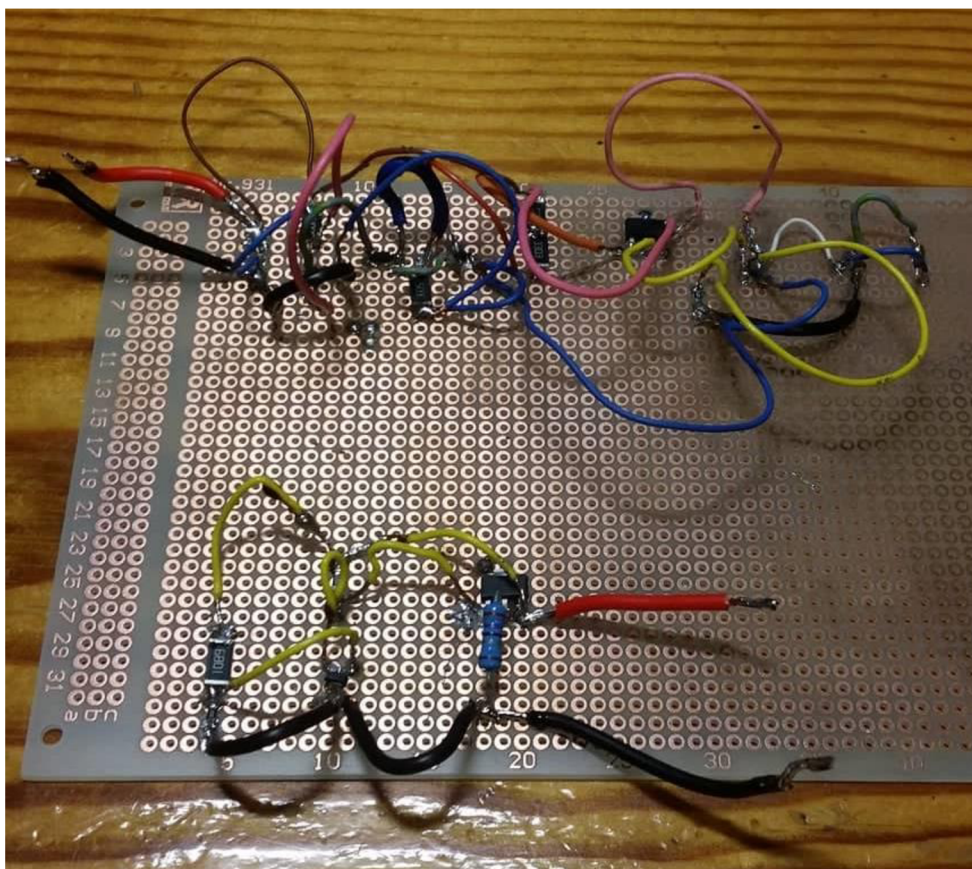
$$R11 = \frac{U_{bat,\max} - U_{BE} - U_{AK}}{I_x} = \frac{3.6 - 0.6 - 1}{0.0053} = 377\Omega$$

(7.7)

Odpor R11 podle výsledku z rovnice 8.8 zvolíme tedy 390 Ω .

8. OVĚŘENÍ ČINNOSTI JEDNOTLIVÝCH OCHRAN

Protože se teorie s praxí dokáže někdy lišit, je nutné provést kontrolní měření, které zaručí funkčnost jednotlivých ochran. Kvůli ověření funkčnosti jednotlivých ochran nebylo nutné sestavovat celé schéma, obsahující všechny ochrany, ale naopak byla sestavena pouze jedna přepět'ová a jedna podpět'ová ochrana. K sestavení ochran byl použit univerzální pájivý plošný spoj. Zhotovené ochrany připravené k testovacímu měření můžeme vidět na obrázku uvedeném pod tímto textem.



Obr. 8-1 Zkušební zapojení předpět'ové a podpět'ové ochrany připravené k testovacímu měření

8.1 Ověření přepět'ové ochrany

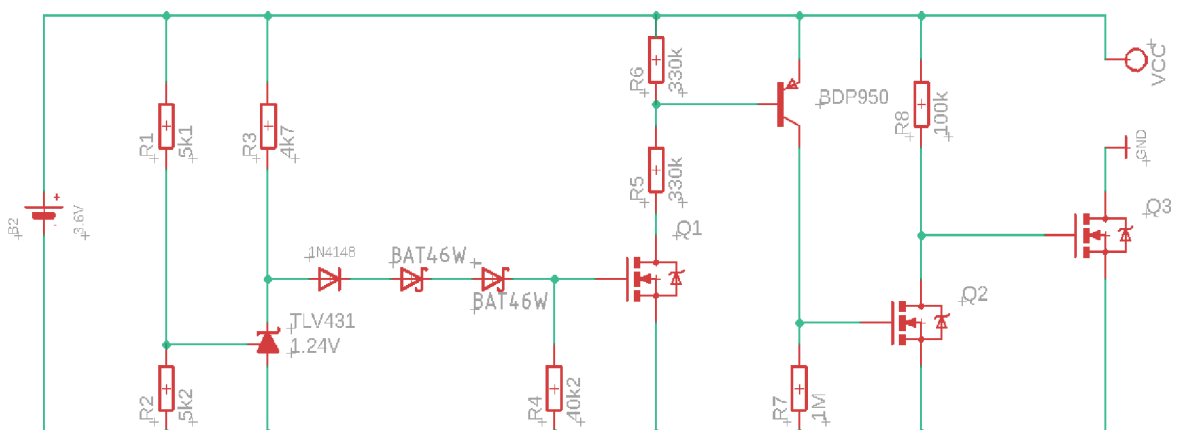
Z výsledků testovacího měření bylo zjištěno, že předpět'ová ochrana funguje bezchybně, a tak zde není třeba nic dodělávat nebo vyměňovat. Ochrana tedy po následném nabití baterie na hodnotu napětí 3.6 V bezchybně odpojila baterii od zátěže.

8.2 Ověření podpět'ové ochrany

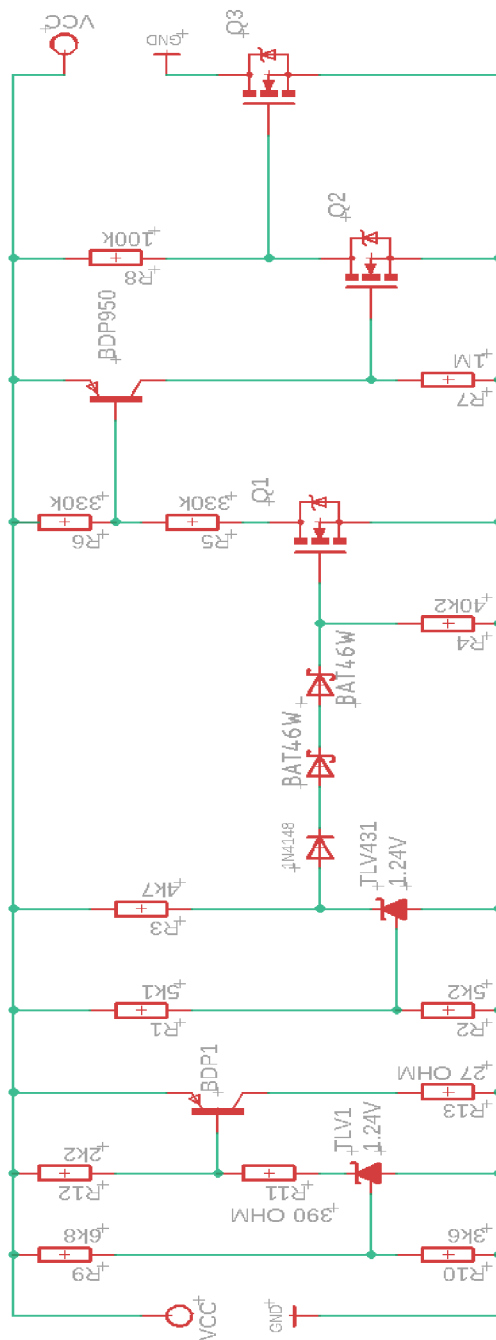
Podpět'ová ochrana ovšem už tak dobře nefungovala. Jako první problém byl odpor R3. Jeho hodnota byla příliš vysoká. Důvodem bylo zabránění vyšší spotřebě napětí přes diodu D1 a odpor R3 a R4. I přesto měla reference TLV431 takovou vlastní spotřebu, že i při vypnutém stavu vznikala na odporu R3 velký napět'ový úbytek a tranzistor Q1 se nemohl spínat. Tímto krokem byl odpor R3 snížen na desetinu své původní hodnoty, a to 4700 Ω . Bylo také nutno zvolit menší odpor R4 paralelně k napět'ové referenci, a to z hodnoty 150 000 Ω na hodnotu 40 200 Ω z důvodu menšího úbytku napětí kvůli tranzistoru Q1. Ochrana ale stále nepracovala, jak by měla. Ochrana sice odpojila baterii na hodnotě 2.5 V, ale po zvyšování napětí na zátěži ochrana opět odpojila baterii už někdy na hodnotě 2.8 V. V původním schématu byla totiž jen jedna dioda mezi napět'ovou referencí a odporem R4, a tudíž bylo překročeno prahové napětí tranzistoru Q1 příliš brzy. Řešením bylo vhodné zvolení kombinace tří diod, a to jedna dioda 1N4148 a dvě diody BAT46W, což mělo za následek snížení úbytku napětí na odporu R4 při stejné hodnotě napětí na referenci TLV431, a tranzistor Q1 tak začal spínat na hodnotě baterie 3.6 V, kdy mělo dojít k vybavení. Po těchto úpravách začíná konečně podpět'ová ochrana fungovat tak jak má, a i když to není nutné, je obvod schopný dát bez problému do zátěže 5V.

8.2.1 Nový návrh podpět'ové ochrany

Jak bylo zmíněno výše v textu, bylo potřeba upravit schéma podpět'ové ochrany. Byly přidány 2 diody, BAT46W a 1N4148, sériově k diodě BAT46W. Také byly sníženy hodnoty odporů R3 ze 47 000 Ω na 4 700 Ω a R4 z 150 000 Ω na 40 200 Ω . Na obrázku 8-2 je uvedeno zapojení nově navržené a funkční podpět'ové ochrany. Pod tímto obrázkem je na obrázku 8-3 uvedeno výsledné schéma zapojení ochranného obvodu pro jeden samotný článek.



Obr. 8-2 Schéma zapojení nově navržené podpět'ové ochrany

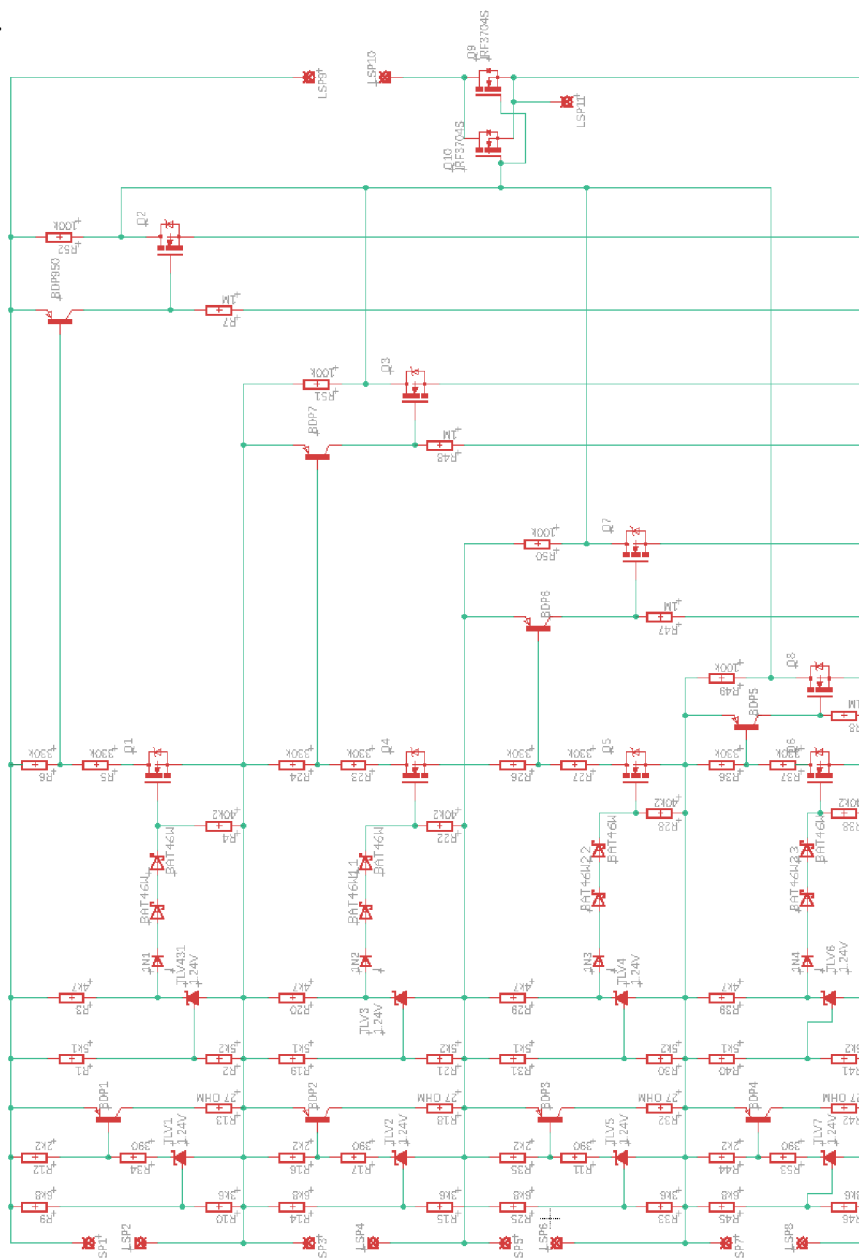


Obr. 8-3 Schéma zapojení ochran jednotlivého článku

9. NÁVRH ZAPOJENÍ BMS OBVODU DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

9.1 Zapojení BMS obvodu

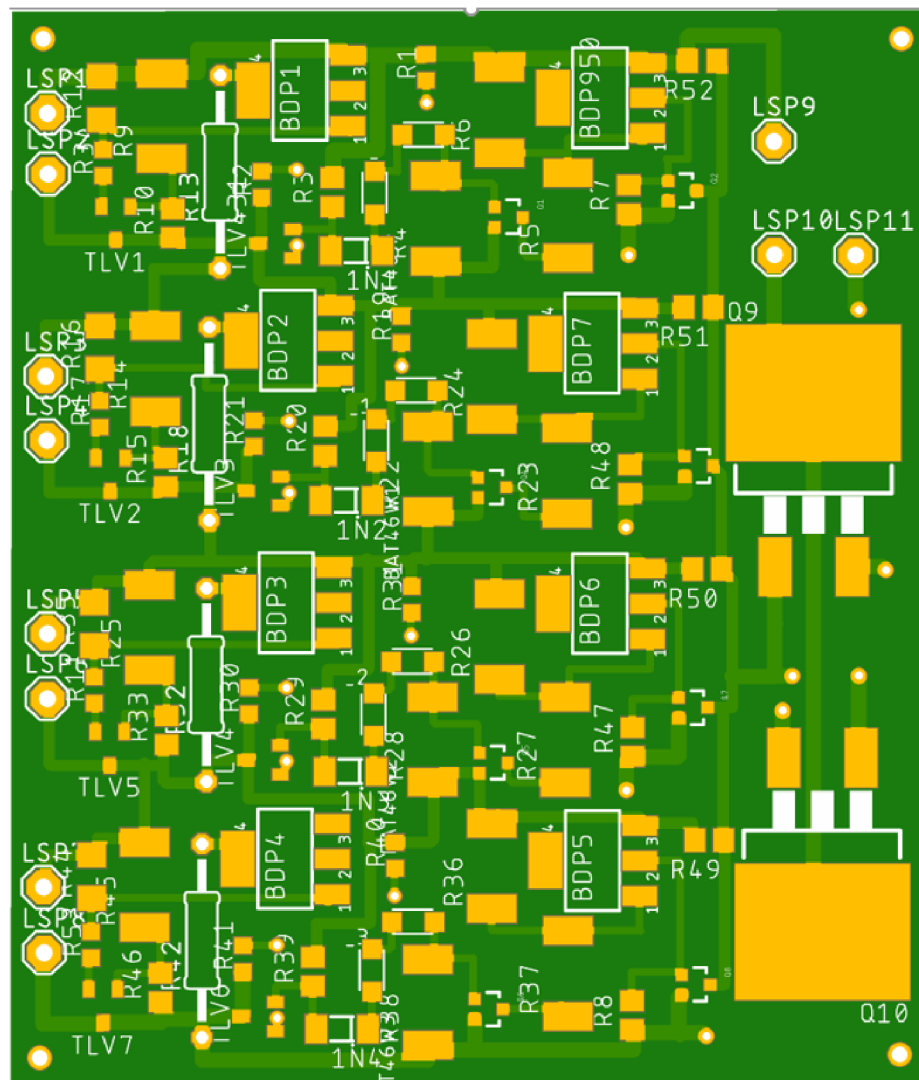
Poté, co byla ověřena funkčnost podpět'ové a přepět'ové ochrany, bylo nutno navrhnout desku plošných spojů pro navržené BMS ochrany. Náš akumulátorový pack se skládá ze čtyř článků, tudíž každý článek bude mít svoji přepět'ovou a podpět'ovou ochranu. Ochrany jednotlivých článků budou spojeny sériově. Ve výsledném schématu budou tedy čtyři samostatné přepět'ové a podpět'ové ochrany jednotlivých článků, jejichž výstupem budou dva paralelně zapojené výkonové tranzistory N-MOSFET s propojenými emitory. Na obrázku 9-1 je uvedeno kompletní schéma zapojení BMS obvodu.



Obr. 9-1 Kompletní schéma zapojení celého BMS obvodu

9.2 Deska plošných spojů BMS obvodu

Po dokončení návrhu schématu zapojení bylo třeba provést návrh desky plošných spojů. Součástky byly rozmístěny v co největší přípustné těsnosti tak, aby byla deska co nejmenší, kvůli omezené velikosti akumulátorového pouzdra. Vrchní a spodní větev je propojena spojem o tloušťce 1 mm, aby nedocházelo ke zbytečnému přehřívání obvodu nebo k jeho poškození. Stejně tak i propojení a vývod dvou výkonových tranzistorů je propojen spojem o tloušťce 1 mm. Jejich vývod bude spojen silovým kabelem s posledním spodním bateriovým článkem. Zbytek propojení je proveden spojem 0.5 mm. U silových částí ochrany je spoj o tloušťce 0.75 mm. Tranzistory Q7 a Q10 nejsou propojeny spojem. Ve skutečném zapojení budou propojeny propojkou. Výsledný rozměr desky bude přibližně 7 x 6 cm. Na obrázku 9-2 je zakreslena deska plošných spojů připravena na osazení součástkami.



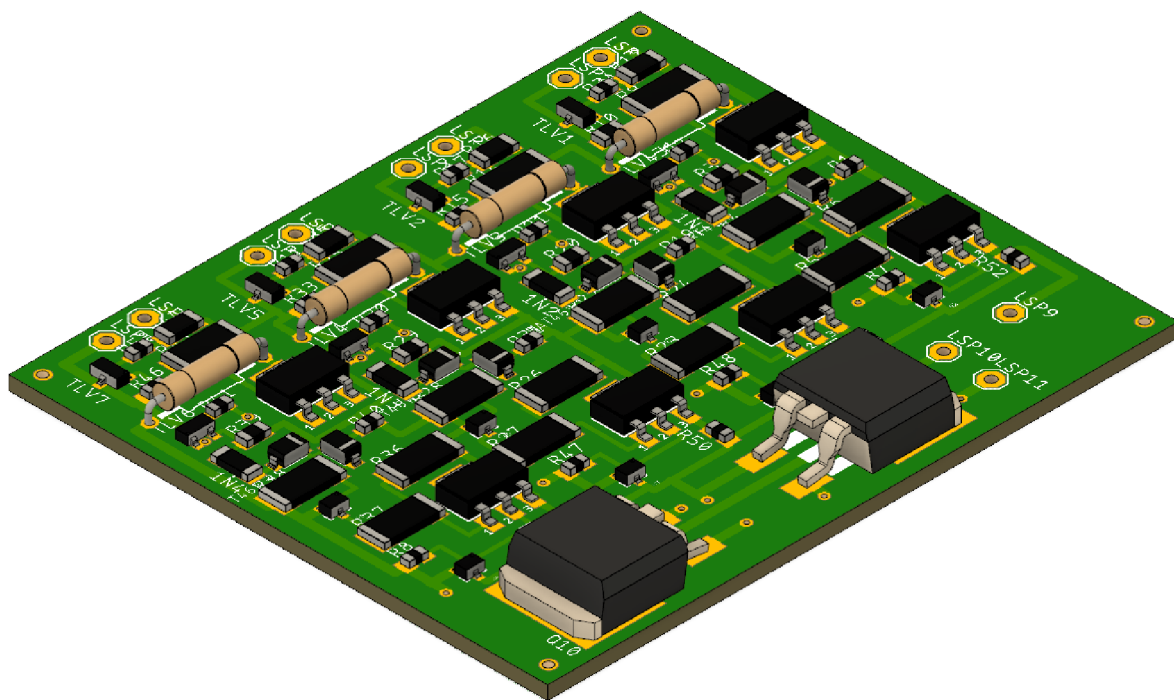
Obr. 9-2 Deska plošných spojů BMS obvodu

Navržená deska plošných spojů je sice rozměrově menší, ale dohromady se na ni musí vejít 86 součástek. V tabulce 9-1 pod textem je uveden soupis součástek, kterými je třeba desku plošných spojů osadit. Cena níže uvedených součástek byla vypočítána na 554 Kč.

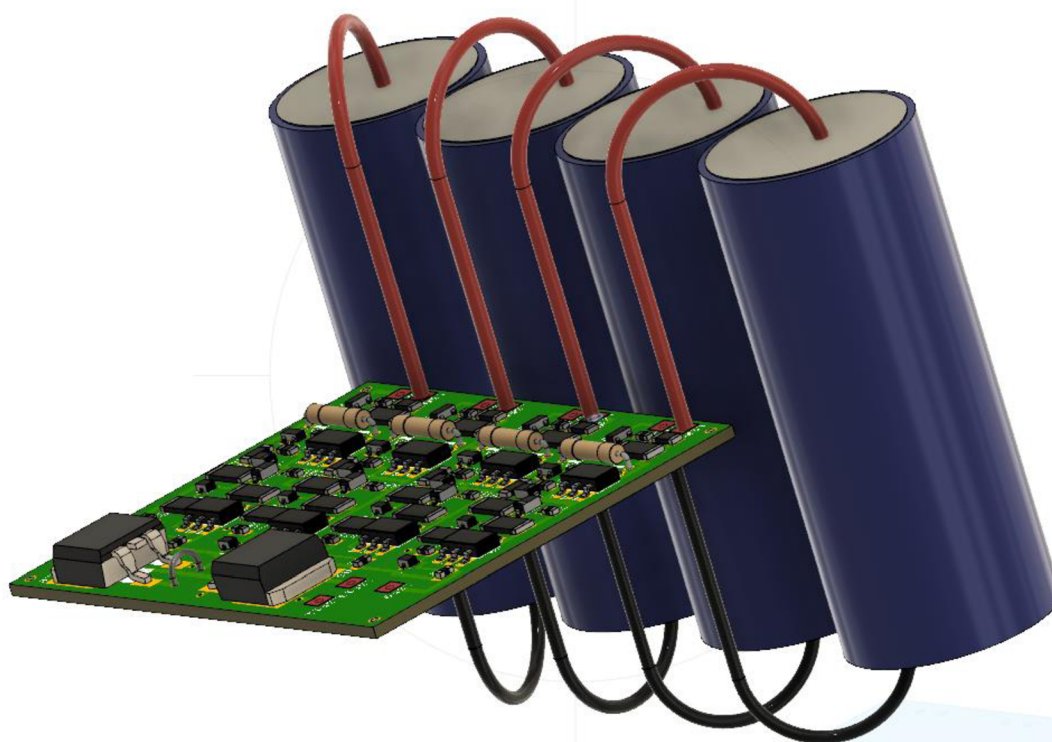
Použité součástky	Hodnota/označení	Počet kusů
Rezistor	27	4
Rezistor	390	4
Rezistor	3k6	4
Rezistor	4k7	4
Rezistor	5k1	4
Rezistor	5k2	4
Rezistor	6k8	4
Rezistor	40k2	4
Rezistor	100k	4
Rezistor	330k	8
Rezistor	1M	4
Napěťová reference	TLV431	8
Výkonový tranzistor	CSD18510KTTT	2
Výkonový tranzistor	BDP950	8
Tranzistor	BSS138	8
Dioda	1N4148	4
Dioda	BAT46W	8
Celkový počet použitých součástek:		86

Tabulka 9-1 Soupis potřebných součástek na osazení desky plošných spojů

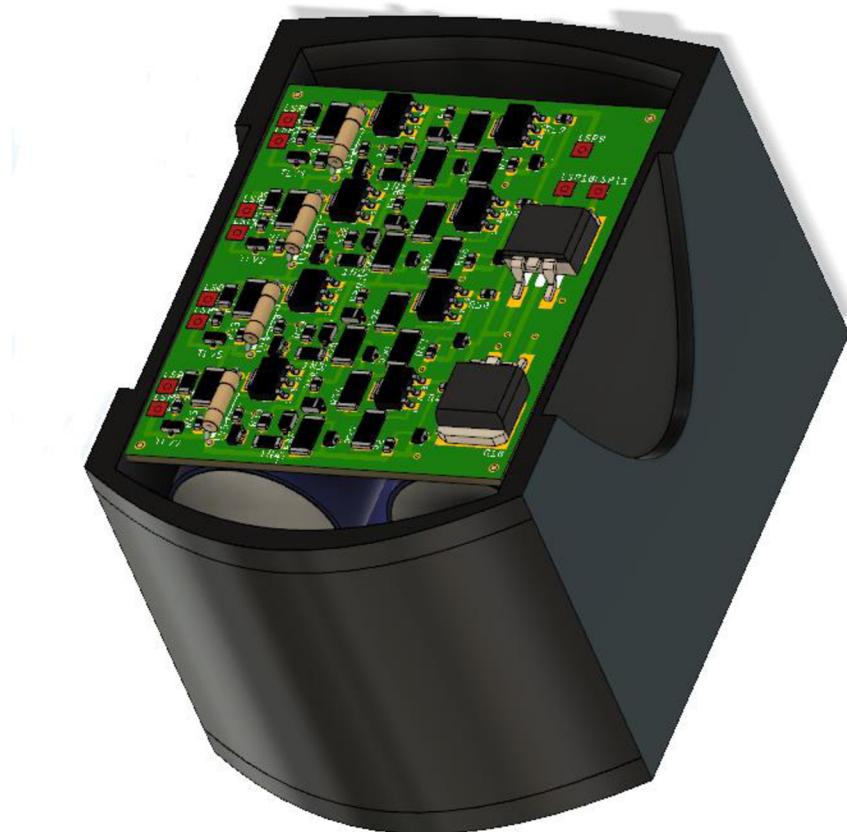
Byl proveden také 3D náčrtek výsledného osazení desky plošných spojů. Výsledný plošný spoj byl také zakreslen v pozici usazení v pouzdře akumulátoru i s lithiovými články. Na dalším náčrtu je vyobrazeno detailnější zapojení plošného spoje s lithiovými články. Obrázky s výše uvedeným zakreslením jsou uvedeny pod textem. Tyto obrázky byly vytvořeny ve vizualizačním softwaru Autodesk Fusion 360. Tento program byl zvolen z důvodu lepšího grafického zpracování plošného spoje oproti vizualizačnímu programu Autodesk Inventor Professional.



Obr. 9-3 3D osazení desky plošných spojů



Obr. 9-4 3D zapojení lithiovým článků k desce plošných spojů



Obr. 9-5 Usazení desky plošných spojů v akumulátorovém pouzdře s lithiovými články

10. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo ověření činnosti navržených jednotlivých ochranných článků, které byly navrženy v semestrální práci. Po jejich testování bylo za úkol navrhnut deskou plošných spojů pro výsledný akumulátorový pack a následně zdokumentovat akumulátorový pack.

Úvod práce se zabývá teorií lithiových akumulátorů. Zde byly popsány základní charakteristiky, metody skladování a jejich použití v praxi. Dále bylo provedeno obeznámení se s podskupinou lithiových akumulátorů LiFePO₄, které byly použity v této práci.

V teorii práce je uvedena problematika systému správy akumulátorů a její obeznámení. Systém správy akumulátorů je rozdělen na jednotlivé ochrany, které jsou zde popsány. Je zde podrobněji popsáno balancování článků, a to metodou pasivního a aktivního balancování

Následuje praktická část, kde proběhlo seznámení s parametry původního akumulátoru akumulátorové vrtačky. Původní akumulátor byl složen z 10 nikl-kadmiových článků firmy HIGHSTAR, jejichž pracovní napětí bylo 1.2 V a jmenovitá kapacita 1500 mAh.

Byly tedy zvoleny nové bateriové články a to LiFePO₄. Tyto články jsou oproti původním článkům sice o něco větší, ale za to disponují lepšími vlastnostmi jako je schopnost dodání většího výkonu a také možnost rychlejšího nabití. Tyto články mají totiž oproti původním NiCd článkům nižší vnitřní odpor při větší velikosti článku a také vyšší doporučený nabíjecí proud. Uložení původního i nového akumulátoru bylo zdokumentováno ve vizualizačním softwaru Autodesk Inventor Professional

Dále byly otestovány již navržené ochranné obvody článku, které mají za úkol hlídat přebíjení a podbíjení článku.

Ochrana proti podbíjení článku má za úkol odpojit článek od zátěže, jestliže dojde k poklesu napětí pod nastavenou hodnotu 2.5 V. Zkušební obvod tuto funkci nakonec splnil. Bylo zde však mnoho problémů. Napěťová reference nebyla schopna správně fungovat při jejím sériově navrženém odporu, což bylo 40 700 Ω. Tato hodnota odporu byla následně snížena na hodnotu 4 700 Ω a reference začala spolehlivě fungovat. Další problém byl při brzkém otevření tranzistoru MOSFET typu N. Řešením tohoto typu problému bylo vhodné zvolení diody v tomto případě diody 1N4148 a dvou diod BAT46W v sériové kombinaci, které se postaraly o vhodné otevření tranzistoru. Po těchto problémech začala ochrana proti přebíjení fungovat bezchybně.

Ochrana proti přebíjení je nastavena na odpojení baterie od nabíječky při hodnotě napětí na baterii 3.6 V. S tímto ochranným obvodem nebyly při zkoušení žádné potíže a obvod fungoval prakticky ihned po zapojení.

V poslední řadě byla navržena deska plošných spojů kompletních ochranných v programu Eagle zajišťující bezpečnost nového akumulátoru. Její provedení je zdokumentováno ve vizualizačním softwaru Autodesk Fusion 360, stejně jako její propojení s akumulátorem a jejího uložení v akumulátorovém pouzdře vrtačky.

Literatura

- [1] Historie. *BATTEX* [online]. Česká republika: BATTEX, 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/historie>
- [2] Princip. *BATTEX* [online]. Česká republika: BATTEX, 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/princip>
- [3] Základní charakteristiky. *BATTEX* [online]. Česká republika: BATTEX, 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/zakladni-charakteristiky>
- [4] Skladování lithiových akumulátorů. *BATTEX* [online]. Česká republika: BATTEX, 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/skladovani-lithiovych-akumulatoru>
- [5] Používání Li-Ion akumulátorů v praxi. *BATTEX* [online]. Česká republika: BATTEX, 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/pouzivani-li-ion-akumulatoru-v-praxi>
- [6] Akumulátory LiFe. *Robodoupě* [online]. Česká republika: Robodoupě, 2014, 14.4.2014 [cit. 2019-12-31]. Dostupné z: https://profimodel.cz/cs/life/41456-a123-33v-2500-mah-8595241358055.html?gclid=EAIaIQobChMIIOKHqaLg5gIVA7TtCh1LuQfjEAQYASABEgLgjFD_BwE#41456k
- [7] Battery Management Systems (BMS). *Battery and Energy Technologies* [online]. Chester, CH4 7AU: Woodbank Communications, 2015 [cit. 2020-1-2]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- [8] Ni-cd sc1500mah rechargeable battery. *Huanyubattery* [online]. ECPlaza Network: Huanyu Power Source Co., 2019 [cit. 2020-1-2]. Dostupné z: https://huanyubattery.en.ecplaza.net/products/ni-cd-sc1500mah-rechargeable-battery_2868738
- [9] ANR26650M1.2500+LFZ - Batterie LiFePO4 3.3 V 2.5 Ah, A123 Systems. *DISTRELEC* [online]. Switzerland: Daetwyler Switzerland, 2015 [cit.

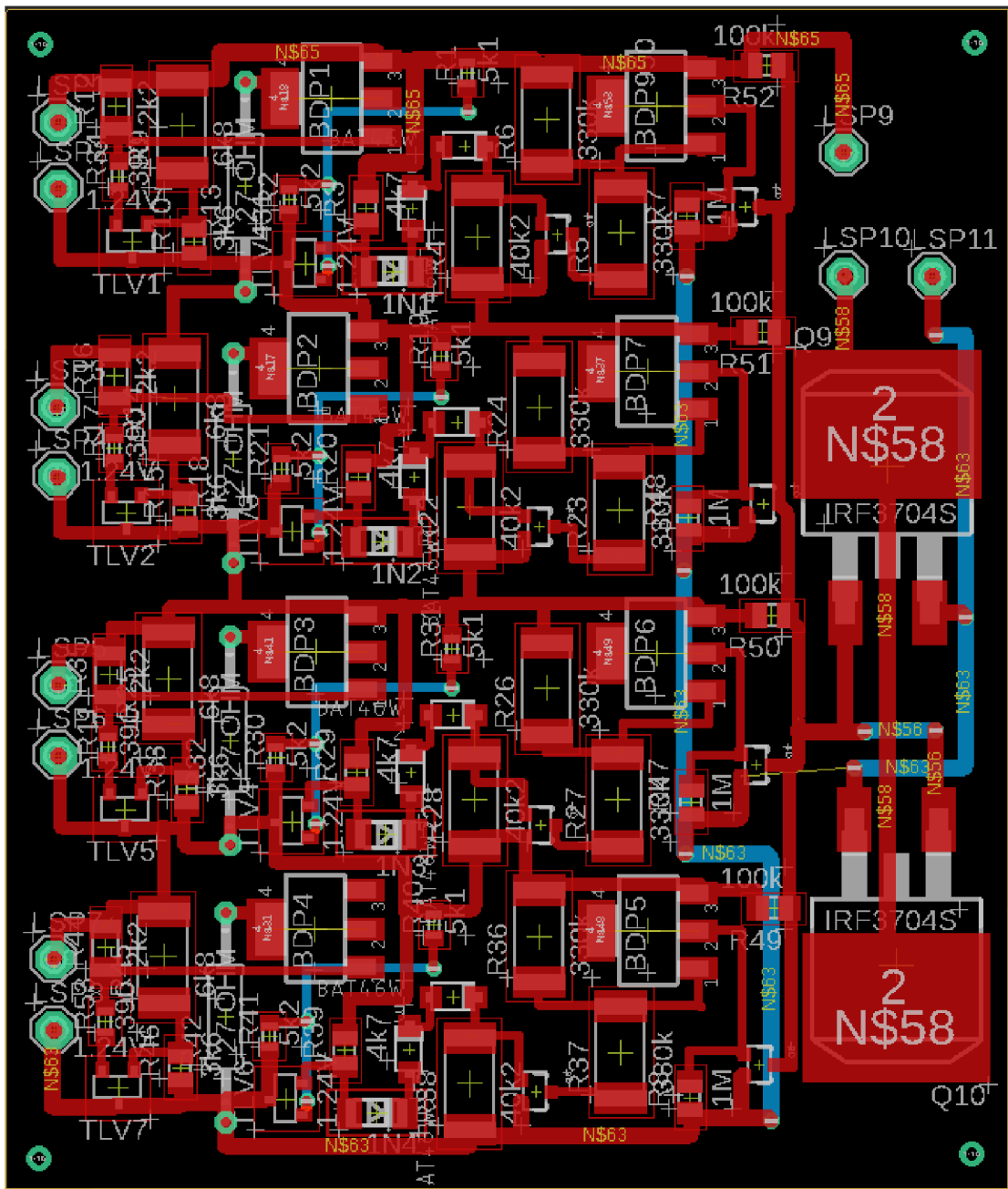
2020-1-2]. Dostupné z: https://www.distrelec.cz/cs/baterie-lifepo4-ah-a123-systems-anr26650m1-2500-lfz/p/30074807?channel=b2c&price_gs=22.956&source=googleps&ext_cid=shgo_oaqczcs-na&kw=%7Bkeyword%7D&gclid=EAJalQobChMIzqaI46zm5gIVSON3Ch0o8ASHEAYYASABEgJfFvD_BwE

- [10] Cell balancing buys extra run time and battery life. *Analog Applications Journal* [online]. 2009, **2009**, 14 - 18 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf>
- [11] Bc. Jan. *MONITOROVACÍ A OCHRANNÝ SYSTÉM BATERIÍ*. Brno, 2018. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

Seznam příloh

Příloha 1 - Schéma návrhu desky plošných spojů	46
Příloha 2 - Tabulka naměřených hodnot pro nabíjení baterie LiFePO ₄ metodou konstantního napětí 3.6 V	47

Příloha 1 - Schéma návrhu desky plošných spojů



Příloha 2 - Tabulka naměřených hodnot pro nabíjení baterie LiFePO4 metodou konstantního napětí 3.6 V

t [min]	U [V]	I [A]
1	3,4	5
3	3,415	5
6	3,43	4,9
7	3,44	4,8
8	3,45	4,7
9	3,46	4,6
10	3,47	4,4
11	3,48	4,2
12	3,493	4
13	3,51	3,7
14	3,53	3,2
15	3,55	2,5
16	3,565	1,6
17	3,576	0,9
18	3,582	0,7
19	3,584	0,5
20	3,586	0,3
21	3,588	0,3
22	3,589	0,2
23	3,59	0,2
24	3,591	0,1
25	3,592	0,1
26	3,593	0,1
27	3,594	0,1
28	3,595	0,1
29	3,596	0,1
30	3,597	0,1
31	3,598	0,1
32	3,6	0