



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

LI-ION TRAKČNÍ AKUMULÁTOR

28V/40AH PRO ELEKTROKOLO

LI-ION TRACTION BATTERY 28V/40AH FOR AN ELECTRIC BIKE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Bartošek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Martin Bartošek

ID: 155138

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Li-ion trakční akumulátor 28V/40Ah pro elektrokolo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Dokončete kompletaci akumulátoru realizovaného v semestrálním projektu.
2. Provedte kontrolní cyklus rychlonabíjení proudem 20A a vybití proudem 20A. Ověřte kapacitu, funkčnost komunikace BMS obvodů s nabíječem a s obvody odpojovače svorek při podpětí.
3. Provedte montáž akumulátoru na elektrokolo, ověřte jízdní vlastnosti s novým akumulátorem.
4. Zpracujte přehledově problematiku balancingu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] P. Vorel, P. Procházka: Řídicí členy v elektrických pohonech (skriptum VUT Brno)

[2] M. Patočka: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

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

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce pojednává o konstrukci, ochranných obvodech a životnosti lithium iontové baterie pro pohon elektrokola.

Celý akumulátor je sestavený z Li-ion článku s označením 18650 od firmy Sanyo, které jsou serio-paralelně pospojovány.

Vzhledem k sériovému zapojení článku, je potřeba přidat k jednotlivým článkům také ochranný obvod, aby nedošlo k jejich přebití nebo naopak k hlubokému vybití, na které jsou Li-ion články velmi citlivé. V případě absence těchto obvodů by mohlo dojít k nenávratnému poškození celého akumulátoru.

Na životnost Li-ion článku má vliv mnoho aspektů. Tyto aspekty mají vliv na provoz samotného elektrokola. Mají vliv na jeho dojezd a také na počet cyklů nabití a vybití vůči nemalé ceně akumulátoru.

Abstract

This is deals with the construction, protective circuits and lifetime of lithium ion batteries intended for powering electric bicycles.

The entire battery is composed of Li-ion cells with the designation 18650 from Sanyo company, which are connected via series-parallel combination.

Because of the series connection of the cells, it is necessary to add protective circuit to each cell to prevent overcharging or deep discharging, on which Li-ion cells are very sensitive. Absence of these circuits could cause irreversible damage to the entire battery pack.

Life of Li-ion cells depends on many aspects. These aspects have an influence on the electric bicycle itself. They have an impact on the range and the number of charging and discharging cycles against the considerably high price of the battery.

Klíčová slova

Akumulátor Li-ion; životnost; ochranný obvod; nabíjení; vybíjení

Keywords

Li-ion battery; service life; protective circuit; charging; discharging

Bibliografická citace

BARTOŠEK, M. *Li-ion trakční akumulátor 28V/40Ah pro elektrokolo* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma akumulátor Li-ion trakční akumulátor 28V/40Ah pro elektrokolo jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

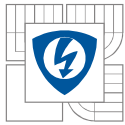
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

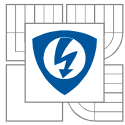
Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Vorlovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne Podpis autora



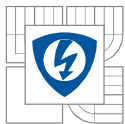
Obsah

1 ÚVOD	9
2 ELEKTROKOLO	10
2.1 ROZDĚLENÍ ELEKTROKOL	10
3 LI-ION ČLÁNKY	12
3.1 ROZDĚLENÍ LI-ION ČLÁNKŮ	12
3.2 VÝHODY A NEVÝHODY LI-ION ČLÁNKŮ	12
3.3 JEDNOTLIVÉ TYPY AKUMULÁTORŮ A JEJICH POUŽITÍ V PRAXI	13
4 KONSTRUKCE AKUMULÁTORU	15
5 OCHRANNÝ OBVOD (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM)	16
5.1 POUŽITÍ NAPĚŤOVÉHO BALANCINGU	16
5.1.1 PASIVNÍ BALANCING JAKO SOUČÁST BMS	17
5.1.2 PASIVNÍ BALANCING JAKO SOUČÁST NABÍJEČKY	19
5.1.3 POUŽITÍ BALANCINGU	20
5.2 REALIZACE OCHRANNÉHO OBVODU	20
5.2.1 MĚŘICÍ OBVOD.....	21
5.2.2 ZÁKLADNÍ DESKA	21
6 NABÍJEČKA	24
7 ŽIVOTNOST LI-ION ČLÁNKŮ	26
7.1 NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ S OHLEDEM NA ŽIVOTNOST	26
7.2 VLASTNOSTI ČLÁNKŮ PŘI RŮZNÝCH TEPLOTÁCH OKOLÍ	26
7.3 POUŽÍVÁNÍ ČLÁNKŮ S OHLEDEM NA ŽIVOTNOST	27
8 MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ AKUMULÁTORU	28
8.1 DOKONČENÍ MECHANICKÉHO ZPRACOVÁNÍ	29
8.2 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI BMS A KAPACITY AKUMULÁTORU	31
9 MĚŘENÍ AKUMULÁTORŮ	33
9.1 MĚŘENÍ AKUMULÁTORU OBSAHUJÍCÍ ČLÁNKY SANYO 2,3AH	33
9.1.1 MĚŘENÍ KAPACITY A PRŮBĚHU NAPĚTÍ AKUMULÁTORU	33
9.1.2 MĚŘENÍ PRŮBĚHU NAPĚTÍ JEDNOTLIVÝCH ČLÁNKŮ AKUMULÁTORU	34
9.2 MĚŘENÍ AKUMULÁTORU OBSAHUJÍCÍ ČLÁNKY PANASONIC 2,15AH	36
10 MONTÁŽ AKUMULÁTORU A OVĚŘENÍ JÍZDNÍCH VLASTNOSTÍ	38
10.1 OVĚŘENÍ JÍZDNÍCH VLASTNOSTÍ	38
10.2 ZHODNOCENÍ TESTU A POHLED NA ELEKTROKOLO ZE STRANY AUTORA	42
11 ZÁVĚR	43
LITERATURA	44



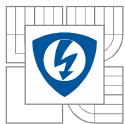
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Zapojení balancingu jako součást BMS</i>	18
<i>Obrázek 2: Blokové schéma obvodu HY2213 [4]</i>	18
<i>Obrázek 3: Zapojení balancingu jako součásti nabíječky</i>	19
<i>Obrázek 4: Zapojení modulu komparátorů (BLOK1 až BLOK7 v Obrázek 2) [2]</i>	21
<i>Obrázek 5: Zapojení ochranných obvodů [2]</i>	22
<i>Obrázek 6: Blokové schéma řízení nabíječky</i>	24
<i>Obrázek 7: Zapojení primární části nabíječky [5]</i>	25
<i>Obrázek 8: Vybíjecí charakteristiky při různých teplotách článku Sanyo UR18650F [1]</i>	27
<i>Obrázek 9: Akumulátor před zapojením BMS obvodu</i>	28
<i>Obrázek 10: Připojení sériových článků k ochrannému obvodu</i>	29
<i>Obrázek 11: Připojení relé a zásuvky jack 3,5</i>	30
<i>Obrázek 12: Obložení akumulátoru mikroporézní pryží</i>	30
<i>Obrázek 13: Akumulátor vložený v brašně</i>	31
<i>Obrázek 14: Nabíjení akumulátoru (u červeného tlačítka pro odpojení akumulátoru můžeme vidět vodič s koncovkou 3,5 jack, který se stará o zpětnou vazbu od BMS k nabíječce)</i>	32
<i>Obrázek 15: Vybíjecí sada a oba měřené akumulátory (jeden v brašně na kole a druhý na stole)</i>	32
<i>Obrázek 16: Průběh napětí při vybití li-ion akumulátoru konstantním proudem 20A, články Sanyo 2,3Ah</i>	33
<i>Obrázek 17: Průběhy napětí jednotlivých článků při vybití konstantním proudem 20A, články Sanyo 2,3Ah</i>	34
<i>Obrázek 18: Vybíjecí charakteristiky článku Sanyo 2,3Ah pro různé zatěžovací proudy [1]</i>	34
<i>Obrázek 19: Průběh napětí při vybití li-ion akumulátoru konstantním proudem 20A, články Panasonic 2,15Ah</i>	36
<i>Obrázek 20: Graf závislosti úbytku kapacity na počtu nabíjecích cyklů</i>	37
<i>Obrázek 21: Elektrokolo s novým akumulátorem</i>	38
<i>Obrázek 22: Graf akcelerace elektrokola s články Panasonic 2,15Ah</i>	39
<i>Obrázek 23 : Graf akcelerace elektrokola s články Sanyo 2,3Ah</i>	39
<i>Obrázek 24: Graf akcelerace elektrokola s články Panasonic 2,15Ah</i>	40
<i>Obrázek 25: Graf akcelerace elektrokola s články Sanyo 2,3Ah</i>	40



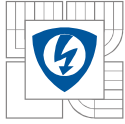
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Specifické hodnoty pro článek Lithium oxid kobaltu (LiCoO₂) [3]</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 2: Specifické hodnoty pro článek Lithium oxid manganu (LiMn₂O₄) [3]</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 3: Specifické hodnoty pro článek Lithium nikl mangan oxid kobaltu (LiNiMnCoO₂) [3]</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 4: Specifické hodnoty pro článek Lithium železo fosfát (LiFePO₄) [3].....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 5: Specifické hodnoty pro článek Lithium nikl kobalt oxid hlinitý (LiNiCoAlO₂) [3]</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 6: Specifické hodnoty pro článek Lithium titan (Li₄Ti₅O₁₂) [3]</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 7: Parametry li-ion článku 18650 Sanyo</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 8: Parametry li-ion akumulátoru</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 9: Parametry nabíječky</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 10: Změřené a vypočtené hodnoty akumulátoru</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 11: Naměřené a vypočítané hodnoty akumulátoru v průběhu jeho používání.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 12: Parametry akumulátorů při jízdě.....</i>	<i>41</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

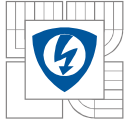
Symbol	Popis	Jednotka
U	elektrické napětí	[V]
I	elektrický proud	[A]
R	elektrický odpor	[Ω]
Aku – dolní index	parametr akumulátoru	[-]
Cívka – dolní index	parametr cívky	[-]
Q	kapacita	[Ah]
t	čas	[s]



1 ÚVOD

Konstrukce akumulátorů neboli packů z lithium-iontových článků záleží vždy na aplikaci, do které chceme akumulátor použít. Tvar akumulátoru tedy závisí jen na tom, jaký typ a kolik článků použijeme.

Dalším parametrem souvisejícím právě s počtem článků v packu je požadované napětí a proud, který bude aplikace odebírat jak špičkově, tak dlouhodobě. Dlouhodobá hodnota proudu je ta, kterou jsou schopny články dodávat konstantně po celou dobu svého vybíjecího cyklu. Špičková hodnota je pak taková, kterou jsou schopny články dodávat jen v řádu jednotek až desítek sekund. V datasheetech se tyto hodnoty uvádí jako násobky kapacity například 4C. Znamená to, že článek o hodnotě 2Ah můžeme zatížit buď špičkově, nebo konstantně (podle toho jak je uvedeno) 8A. Paralelní kombinací článků zvyšujeme celkovou kapacitu packu a tím i proud, který je schopen dodat do aplikace. Sériová kombinace pak určuje konečné napětí akumulátoru.



2 ELEKTROKOLO

Elektrokolo je v dnešní době nejen velmi oblíbeným dopravním prostředkem, tréninkovou pomůckou, ale i zdravotní pomůckou. Jejich vývoj jde velmi rychle kupředu a tak stále přicházejí nové inovace v technologii pohonu.

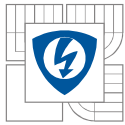
2.1 Rozdělení elektrokol

1. Podle typu motoru

- 1.1. Stejnoseměrný s permanentními magnety – V dnešní době se již skoro nevyužívá. Vzhledem k jeho konstrukci je nutné provádět údržbu (výměna kartáčů, které se vlivem vysokých proudů rychle opalují).
- 1.2. Asynchronní – V komerčně prodávaných kolech se nepoužívá. Nevýhodou je, že ho nelze jednoduše vestavět na jakékoli kolo. K asynchronnímu motoru je také velmi těžké sehnat řídicí jednotku. Výhodou je pak samotný motor, který je bezúdržbový a také levný.
- 1.3. BLDC – Tento typ motoru je používán prakticky u všech komerčních elektrokol. Oba typy motorů tedy středový i v náboji lze jednoduše namontovat do jakéhokoli kola. Také řízení těchto motorů, hlavně kvůli jejich rozšíření, je dobře dostupné. Motor je také bezúdržbový, nicméně jeho cena je oproti asynchronnímu motoru vyšší, protože obsahuje permanentní magnety.

2. Podle pohonu (BLDC)

- 2.1. Středový pohon – U nejnovějších kol se převážně využívá tento typ pohonu. Má řadu výhod. Motor je umístěn u středového složení a pohání převodové tácy. Tím dostává velkou výhodu a tou je použití přehazovačky. Motor tak může stále pracovat v optimálních otáčkách. Další výhodou je samotné uložení uprostřed kola, které přispívá k dobrému rozložení váhy a tím i dobré ovladatelnosti elektrokola. Tyto motory se montují do přímo uzpůsobeného rámu pro tento pohon. Nejvýznamnějšími výrobci jsou Yamaha a Bosh. Vybrané typy jsou ovšem k dostání i jako přestavbový set na obyčejné kolo.
- 2.2. V náboji - Motor v náboji může být samozřejmě uložen jak v předním tak v zadním kole. Obecná nevýhoda pak spočívá ve velké neodpružené váze, kterou motor disponuje.
 - 2.2.1. Převodovka – Motory v náboji s integrovanou převodovkou jsou častější u komerčně prodávaných elektrokol, protože jejich výkon dosahuje ve většině případů maximálně 250W. Výhodou i nevýhodou těchto motorů je právě převodovka, která sice zajišťuje optimální otáčky pro motor, na druhou stranu je vyrobená ze silonu a při nedodržení celkem častých intervalů mazání se rychle opotřebuje.
 - 2.2.2. Přímý – Přímé motory žádnou převodovku nemají, tím pádem jsou jejich otáčky stejné jako otáčky kola, což není optimální zvláště při pomalé jízdě v terénu. Tento motor je zcela bezúdržbový. Některé motory se vyrábí i s integrovaným regulátorem.

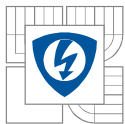


3. Podle typu pohonu a příslušenství

- 3.1. Legální – Tyto elektrokola jsou běžně dostupná a splňují vyhlášku o tom, jak by mělo elektrokolo vypadat. Prvním omezujícím parametrem je výkon. Ten může mít maximální hodnotu 250W. Druhým omezením je pak výhradně použití pedal asistentu (PAS). Jedná se o funkci řídicí jednotky, která snímá šlapání jezdce a motor pracuje jen tehdy, když jezdec otáčí pedály. Snímání otáčené může být provedeno dvěma způsoby. Prvním je hallova sonda, která snímá magnetické pole permanentních magnetů umístěných u středového složení. Druhým způsobem je použití speciálního středového složení, které využívá torzního snímače síly šlapání. Otočný plyn (twistgrip) na legálních kolech není povolený. Posledním omezujícím faktorem je odpojení asistence po dosažení rychlosti 25km/h. Po překročení této rychlosti se pohon úplně odpojí.
- 3.2. Nelegální – Tyto elektrokola podle zákona nelze používat na pozemních komunikacích. Používají většinou otočný plyn a větší výkony motoru. Samozřejmostí je také neomezená rychlost. Mezi těmito elektrokoly se vyskytují i opravdové cyklistické extrémní, kdy špičkový výkon motoru dosahuje hodnot 14000W a rychlosti blíží se 100km/h.

4. Podle typu použitých baterií

- 4.1. Li-ion (například lithium nikl mangan oxid kobalt) – Tyto články se nejčastěji používají v legálních elektrokolech. Jsou to nevýkonové články. Typické hodnoty napětí akumulátoru sestaveného z těchto článků jsou 36V(10S) nebo 48V(13S) a kapacita se pohybuje kolem 10Ah. Akumulátor takových parametrů dodá legálnímu kolu energii až na 80km.
- 4.2. Lipo (lithium polymerové) – Jsou to výkonové články, které dokáží běžně dodat několik desítek i stovek ampér. Používají se u výkonnějších kol, kde je třeba pokrýt vysoké proudové špičky. Napětí akumulátorů pak záleží na uživateli. Většinou se jeho hodnota pohybuje od 48V(13S) do 108V(30S).
- 4.3. LiFePO_4 (lithium železo fosfát) – Jejich využití není tak rozsáhlé hlavně kvůli malé měrné energii, která dosahuje hodnot 90 – 120Wh/kg. Z toho plyne, že akumulátor požadovaného napětí a kapacity bude mít skoro dvojnásobně větší hmotnost, než mají první popsané články.



3 LI-ION ČLÁNKY

Primární lithium iontové články byly zkonstruovány v polovině šedesátých let minulého století. Od začátku své produkce se vyznačovaly vynikajícími vlastnostmi a to především vysokou měrnou kapacitou a velmi malým samovybíjením. První nabíjecí li-ion akumulátory vznikly až na začátku devadesátých let, kdy první li-ion akumulátory začala prodávat firma Sony.

3.1 Rozdělení li-ion článků

Lithium iontové články můžeme dělit různými způsoby. Základní rozdělení je pak určité podle tvaru článků. Takto můžeme články rozdělit na:

- Válcové
- Hranolové
- Knoflíkové

Dělit lithiové články můžeme i podle složení kladné elektrody, kde je převládající materiál:

- Nikl
- Mangan
- Kobalt
- Titan
- Niob
- Železo-fosfát

Dalším možným dělením je podle typu použitého elektrolytu:

- Kapalné
- Gelové
- Polymerové

3.2 Výhody a nevýhody li-ion článků

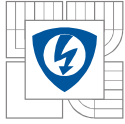
Li-ion články jsou porovnávány s NiMh a NiCd akumulátory.

Výhody:

- Vysoké jmenovité napětí 3,6V
- Vysoká energie, která dosahuje i u některých kvalitních článků hodnot 240Wh/kg
- Dlouhá životnost, která dosahuje při správném používání 500-1500 cyklů
- Velmi malé samovybíjení

Nevýhody:

- Vyšší prodejní cena
- Nabíječka není zaměnitelná pro výše uvedené typy akumulátoru
- Velká závislost průběhu napětí a tím i dodávaného výkonu na teplotě okolí
- Nízké nabíjecí proudy standartních nevýkonových článků
- Poměrně vysoký vnitřní odpor standartních nevýkonových článků



3.3 Jednotlivé typy akumulátorů a jejich použití v praxi

Lithium oxid kobaltu (LiCoO_2)

Vyznačují se vysokou měrnou energií. Nevýhodou je cena kobaltu, která je vysoká.

Napětí	3,0-4,2V	jmenovité 3,6V
Energie	150-200Wh/kg	
Nabíjení	0,7 - 1C	
Vybíjení	1C	koncové napětí 2,5V
Počet cyklů	500-1000	
Aplikace	Mobilní telefony, tablety, notebooky, fotoaparáty	

Tabulka 1: Specifické hodnoty pro článek Lithium oxid kobaltu (LiCoO_2) [3]

Lithium oxid manganu (LiMn_2O_4)

Podávají vysoký výkon za cenu menší kapacity. Jsou bezpečnější než lithium kobaltové články.

Napětí	3,0-4,2V	jmenovité 3,7V
Energie	100-150Wh/kg	
Nabíjení	0,7 - 1C	maximální 3C
Vybíjení	10C	koncové napětí 2,5V
Počet cyklů	300-700	
Aplikace	Elektrické nářadí, lékařské přístroje, elektrické pohony	

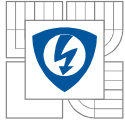
Tabulka 2: Specifické hodnoty pro článek Lithium oxid manganu (LiMn_2O_4) [3]

Lithium nikl mangan oxid kobaltu (LiNiMnCoO_2)

Poskytují vysoký výkon a vysokou kapacitu

Napětí	3,0-4,2V	jmenovité 3,6V
Energie	150-220Wh/kg	
Nabíjení	0,7 - 1C	
Vybíjení	2C	koncové napětí 2,5V
Počet cyklů	1000-2000	
Aplikace	Elektrokola, zdravotnické prostředky, průmysl	

Tabulka 3: Specifické hodnoty pro článek Lithium nikl mangan oxid kobaltu (LiNiMnCoO_2) [3]



Lithium železo fosfát (LiFePO_4)

Články mají velmi plochý průběh napětí při vybíjení. Mají malou hodnotu měrné energie.

Napětí	2,5-3,65V	jmenovité 3,2V
Energie	90-120Wh/kg	
Nabíjení	1C	
Vybíjení	25C	koncové napětí 2,5V
Počet cyklů	1000-2000	
Aplikace	Aplikace vyžadující vysoké proudy	

Tabulka 4: Specifické hodnoty pro článek Lithium železo fosfát (LiFePO_4) [3]

Lithium nikel kobalt oxid hlinitý (LiNiCoAlO_2)

Mají podobné vlastnosti jako lithium kobaltové články.

Napětí	3,0-4,2V	jmenovité 3,6V
Energie	200-260Wh/kg	
Nabíjení	0,7C	
Vybíjení	1C	koncové napětí 3,0V
Počet cyklů	500	
Aplikace	Zdravotnické potřeby, elektrické pohony (Tesla)	

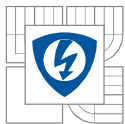
Tabulka 5: Specifické hodnoty pro článek Lithium nikel kobalt oxid hlinitý (LiNiCoAlO_2) [3]

Lithium titan ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Disponují velmi dlouhou životností. Patří mezi nejbezpečnější lithium iontové baterie. Výhodou je rychlé nabíjení. Nevýhodou nízká měrná energie a vysoká cena.

Napětí	1,8-2,85V	jmenovité 2,4V
Energie	70-80Wh/kg	
Nabíjení	1C	maximální 5C
Vybíjení	10C	koncové napětí 1,8V
Počet cyklů	3000 - 7000	
Aplikace	UPS, elektrické pohony (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV)	

Tabulka 6: Specifické hodnoty pro článek Lithium titan ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) [3]



4 KONSTRUKCE AKUMULÁTORU

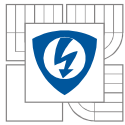
V případě naší konstrukce používáme li-ion články 18650 od firmy Sanyo. Specifikace článku i celého akumulátoru je zpracována v tabulce 1 a 2.

Jmenovitá kapacita		2300mAh
Jmenovité napětí		3,7V
Nabíjecí napětí		4,2V
Nabíjecí proud		2300mA
Rozměry	Průměr článku	18.10mm
	Délka článku	64.80mm

Tabulka 7: Parametry li-ion článku 18650 Sanyo

Jmenovitá kapacita	48300mAh	
Jmenovité napětí	25,9V	
Nabitý stav (BMS)	28,7V	4,1V na článek
Vybitý stav (BMS)	21,7V	3,1V na článek
Maximální vybíjecí proud	96,6A	
Konstantní vybíjecí proud	48,3A	
Nabíjecí proud	48,3A	

Tabulka 8: Parametry li-ion akumulátoru



5 OCHRANNÝ OBVOD (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM)

Ochranný obvod (BMS) je nedílnou součástí každého Li-ion akumulátoru. Slouží k tomu, aby se články nevybily pod určitou mez, ale také nepřebily. Tyto stavy totiž mohou způsobit trvalé poškození, nebo dokonce zničení článků. Ochranný obvod je důležitý hlavně u akumulátorů skládajících se z více sériově zapojených článků.

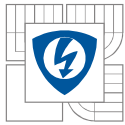
Články totiž nejsou z výroby úplně stejné a to znamená, že i jejich kapacita se liší. Z toho tedy vyplývá, že napětí na článku s nejnižší kapacitou poklesne jako první. Aby nedocházelo k tomu, že li-ion článek poklesne pod hodnotu napětí 2,5V, což je minimální hodnota, při které ještě článek není trvale poškozen, ochranný obvod odpojí zátěž, jakmile kterýkoli z článků sériového zapojení klesne právě na tuto nebo vyšší hodnotu napětí. Tím se eliminuje poškození článku.

Hodnota napětí, která u li-ion článků znamená 100% stav nabití je 4,2V. Při nabíjení na vyšší napětí sice zvýšíme kapacitu, ale dramaticky snížíme životnost článku. Při napětí nad 4,3V navíc dochází k přehřívání článku a hrozí nafouknutí či exploze. Tento stav by mohl nastat například při použití rekuperace, kde bychom při jízdě z kopce brzdili do plně nabitého akumulátoru. V této chvíli musí dát ochranný obvod signál řídicí jednotce motoru, která vypne rekuperaci. Při nabíjení takto vysoké nabití většinou nehrozí, protože nabíječka má nastavené určité konečné napětí, po jehož dosažení se odpojí. Nicméně, jak už jsme zmiňovali, články nemají nikdy úplně stejnou kapacitu a to se projeví i při nabíjení. Proto je dobré nabíjet články na nižší hodnotu napětí než 4,2V, například na 4,1V. Přijdeme tím sice o 5% kapacity, dosáhneme však vyšší životnosti článku a budeme mít jistotu, že se články vlivem rozdílné kapacity nebudou přebíjet.

5.1 Použití napěťového balancingu

Součástí ochranných obvodů může být také balanční obvod. Balanční obvody můžeme rozdělit na pasivní a aktivní balancingu.

- Pasivní balancingu je jednodušší a finančně méně náročný. Je v provozu pouze při nabíjení. Snaží se vyrovnat napěťové rozdíly na jednotlivých sériových článcích. Při dokončení nabíjení by tedy všechny sériové články měly mít stejnou hodnotu napětí. Pasivní balancingu můžeme využít také při nabíjení. Pokud máme nabíječku, která nabíjí pouze na hodnotu napětí celého akumulátoru a nemá zpětnou vazbu od obvodu BMS, použitím správně dimenzovaného pasivního balancingu můžeme nabít akumulátor bez dalších obvodů. Balanční obvod má nastavené konečné napětí sériového článku. Po dosažení tohoto napětí se nabíjecí proud přeměruje do odporu, kde se mění v teplo. Obvod by měl být dimenzován na maximální proud nabíječky. Pokud by byl dimenzován na menší proud, nabíjení by pokračovalo a mohlo by dojít ke zničení sériového článku.



- Aktivní balancing je finančně náročný a složitější obvod. Funguje při vybíjení i nabíjení. Jeho obvod musí být dimenzován na plný pracovní proud. Dokáže přesunout energii ze sériového článku s větší kapacitou, do sériového článku s menší kapacitou. Tím pak narůstá kapacita celého akumulátoru.

Použití aktivního nebo pasivního balancingu řešíme z důvodů nesymetrie jednotlivých sériových článků v akumulátoru. Články mohou být nesymetrické z několika důvodů. Ne vždy je použití balancingu nutné. Všechny tyto vlivy se vztahují k systému elektrokola a akumulátoru, který je předmětem této práce.

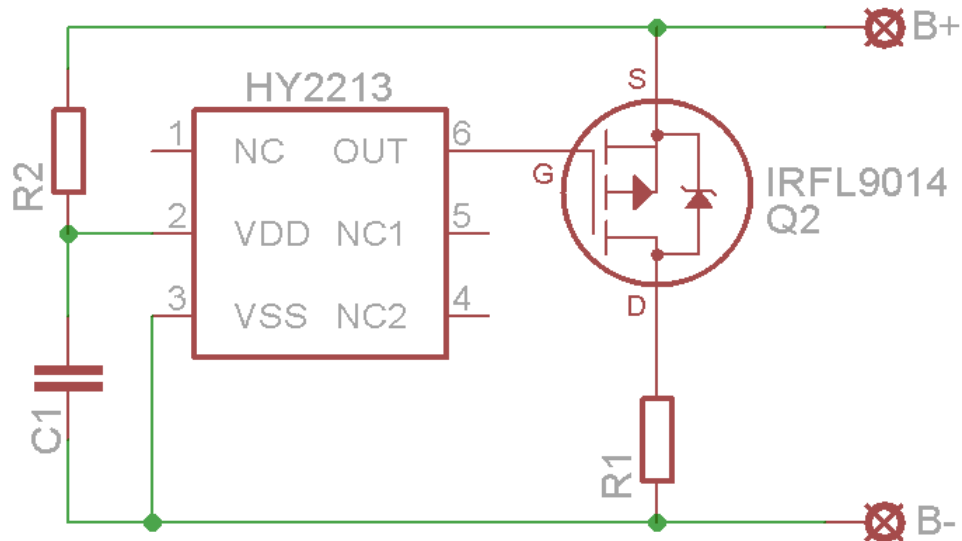
- Vliv nesymetrie kapacity sériových článků bychom mohli eliminovat pouze aktivním balancinem. Akumulátor má vždy kapacitu nejhoršího sériového článku, proto se vybíjí i nabíjí na kapacitu pouze tohoto článku, zbytek sériových článků také dosáhne pouze kapacity nejhoršího článku. Použitím aktivního balancingu bychom tedy navýšili kapacitu akumulátoru přesunutím energie mezi články. Toto řešení je bohužel drahá záležitost a v našem projektu zbytečná.
- Vliv nesymetrie samovybíjením sériových článků můžeme řešit oběma typy balancingu. Pokud se u sériových článků liší svodový proud, může se rozdíl napětí článků postupem času zvětšovat. Použitím pasivního balancingu vyrovnáme rozdíl napětí pouze při nabíjení, aktivním balancinem i při vybíjení. Zde se hodí jednu z variant využít.
- Vliv rozdílného vnitřního odporu způsobí zpomalení nabíjecího procesu, protože nabíječka začne dříve omezovat nabíjecí proud akumulátoru. Při použití pasivního balancingu se tento problém minimalizuje.

5.1.1 Pasivní balancing jako součást BMS

Použití pasivního balancingu jako součást ochranného obvodu akumulátoru má řadu výhod. Při nabíjení stačí použít pouze silové vodiče a nemusí být od každého článku vyveden vodič zvlášť. To značně snižuje náročnost zapojení a je zde i menší pravděpodobnost poruchy. Další výhodou, která dovoluje použití jako součást BMS, tedy stálého připojení balancovacího obvodu k článkům, je nízká vlastní spotřeba. Tato spotřeba činí podle výrobce $2,5\mu A$. V neposlední řadě je také velkou výhodou cena, která je velmi nízká.

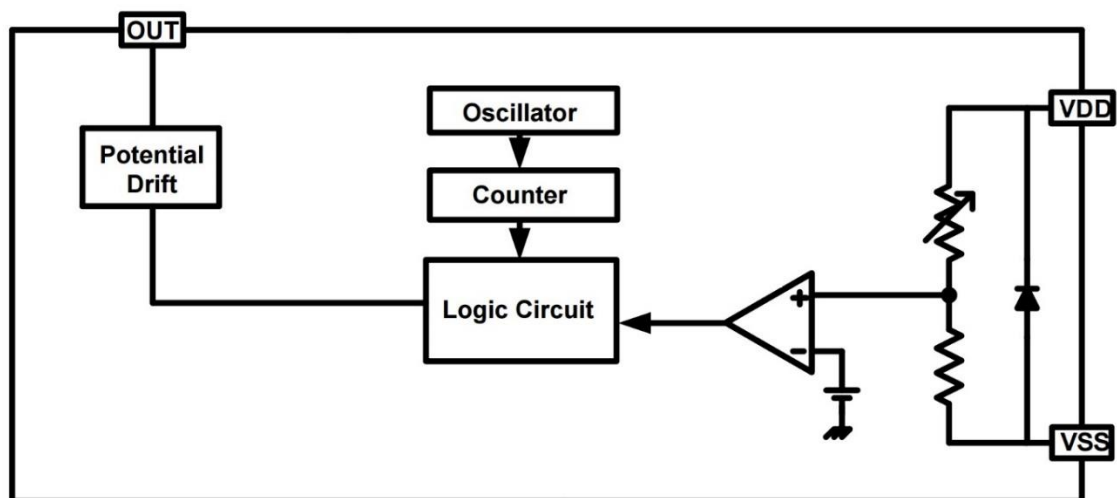
Nevýhodou tohoto obvodu se paradoxně stává to, že je právě součástí ochranného obvodu, tudíž musí být použité velmi malé balancovací proudy. Důvodem je jednak velikost rezistorů, která vzrůstajícím výkonem roste. Dalším důvodem je pak to, že ochranný obvod je většinou součástí akumulátoru a teplo uvolněné z balancovacích rezistorů by určitě neprospělo životnosti li-ion článků.

Ze všech výhod a nevýhod tedy můžeme usoudit, že balancovací obvod tohoto typu bude vhodnější spíše pro články nově zakoupené, které budou mít velmi podobné parametry.



Obrázek 1: Zapojení balancingu jako součást BMS

Na obr. 1 je zobrazeno zapojení balancéru. Jeho hlavní částí je obvod HY2213. Tento obvod obsahuje komparátor, který vyhodnocuje napětí na článku. Pokud napětí překročí hranici 4,2V, logický signál na výstupu komparátoru se změní. To má za následek sepnutí tranzistoru MOSFET, který přiřadí paralelně k balancovanému článku rezistor. Tranzistor je sepnutý do doby, než napětí na článku klesne pod 4,2V. Poté je rezistor odpojen.



Obrázek 2: Blokové schéma obvodu HY2213 [4]

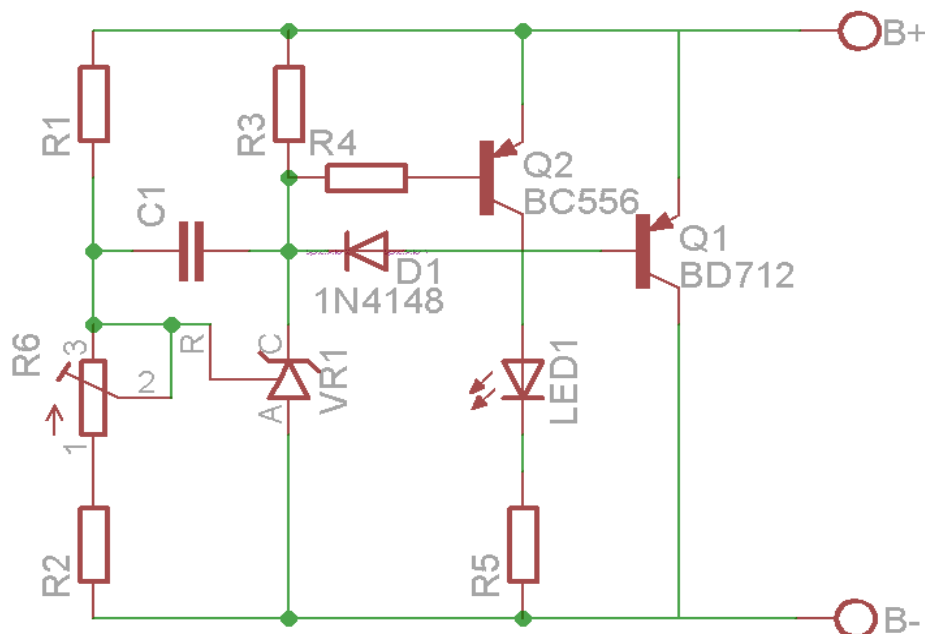
5.1.2 Pasivní balancng jako součást nabíječky

Pasivní balancng jako součást nabíječky má také řadu výhod a nevýhod. Některé z nich už vyplývají z předešlého popisu balancngu jako součást BMS.

Hlavní výhodou tohoto balancngu je vysoká hodnota balancovacích proudů, které díky připevnění výkonových součástek na chladič mohou být v řádu ampér. Dále je výhodné, že v obvodu BMS není žádné zbytečné teplo, které by zbytečně zatěžovalo články.

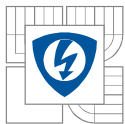
Z vysokých proudů ovšem plyne většina nevýhod tohoto balancngu. Hlavní nevýhodou, jak již bylo řečeno, je nutnost připojení každého článku k balancéru, což obnáší mnoho vodičů navíc a tedy i větší náchylnost k poruše. Kvůli velkému chladiči bude i velikost balancéru velká. Poslední nevýhodou je pak vyšší cena než u předešlého případu, která je způsobena potřebou dimenzovat součástky na větší proudy se kterými balancér pracuje.

Ve shrnutí můžeme říct, že toto řešení bude vhodné pro články s různým stářím a parametry vnitřního odporu. Další možností využití, i když v podstatě jednorázovou by bylo vybalancování článků po dlouhé době nečinnosti akumulátoru například po zimním skladování, kdy by balancér v BMS nemusel zvládnout vybalancovat větší rozdíly v napětí způsobené rozdílným vnitřním odporem.



Obrázek 3: Zapojení balancngu jako součásti nabíječky

Na obr. 3 je vyobrazeno zapojení obvodu balancéru. Základem tohoto zapojení je referenční zdroj VR1. Je to zpětnovazební regulátor s napěťovou zpětnou vazbou a referenčním napětím 2,5V. Výstupní napětí se nastavuje pomocí rezistorů R1, R2 a proměnného rezistoru R6, které dohromady tvoří napěťový dělič. Proměnným rezistorem se nastaví přená hodnota výstupního napětí, která odpovídá koncové hodnotě napětí nabíjeného článku. Můžeme tedy nastavit koncové napětí na



4,1V a tím zajistit delší životnost článku. Po dosažení referenčního napětí se VR1 otevře. Tím začne protékat bázevý proud tranzistorů Q1, Q2 a dojde k jejich otevření. Tranzistor Q2 slouží k rozsvícení LED diody, která signalizuje balancování. Tranzistor Q1 se připojí paralelně k balancovanému článku. Na tranzistoru Q1 se přeměňuje energie na teplo a tím udržuje napětí článku na požadované hodnotě. Je tedy třeba tento tranzistor vhodně dimenzovat a dobře chladit.

5.1.3 Použití balancingu

Nutnost použití balancingu závisí na celém konceptu nabíjení a ochranného obvodu.

V případě využití komponent na elektrokole VUT, které jsou popsány v této práci je použití balancingu zbytečné. Ochranný obvod totiž komunikuje s nabíječkou, takže není možné žádný z článků přebít. Pokud by měl jakýkoli ze sériových článků menší kapacitu, bude kapacita celého akumulátoru rovna tomuto článku a ostatní články tedy nebudou využívat celou svoji kapacitu. Pro navýšení kapacity by bylo možno použít aktivního balancingu. Jeho cena je ale vysoká, a tak je levnější variantou vyměnit sériový blok. Po zkušenostech z jedenáctiletým provozováním elektrokola a měření akumulátoru můžeme říct, že tato teorie je zcela pravdivá a akumulátor má od své výroby stále vybalancovány všechny články i bez použití balancéru. K tomuto faktu přispívá i konstrukce 21 paralelně řazených článků, která zvyšuje pravděpodobnost, že všechny články budou mít stejné vlastnosti.

V případě komerčních elektrokol a přestavbových sad je ovšem využití balancingu nutné. Nabíječka zde nemá zpětnou vazbu od ochranného obvodu, takže nabíjí pouze na nastavené koncové napětí. To znamená, že se například vlivem rozdílné kapacity nebo vnitřního odporu mohou koncová napětí článků pomalu rozcházet, až dojde k havárii akumulátoru. Jednoduchým příkladem může být akumulátor složený ze dvou sériových článků. Koncové napětí nastavené na nabíječce je 8,4V (2x4,2V). Pokud by měli články rozdílné vlastnosti, mohlo by dojít k tomu, že jeden článek se postupem času nabije na 4,3V a druhý na 4,1V. Výsledné napětí bude stejné a nabíječka bude tedy normálně pracovat. Ovšem nabití například Li-Po článku na 4,3V může způsobit explozi a požár. Zde je tedy balancink na místě a jeho použití je velmi důležité.

5.2 Realizace ochranného obvodu

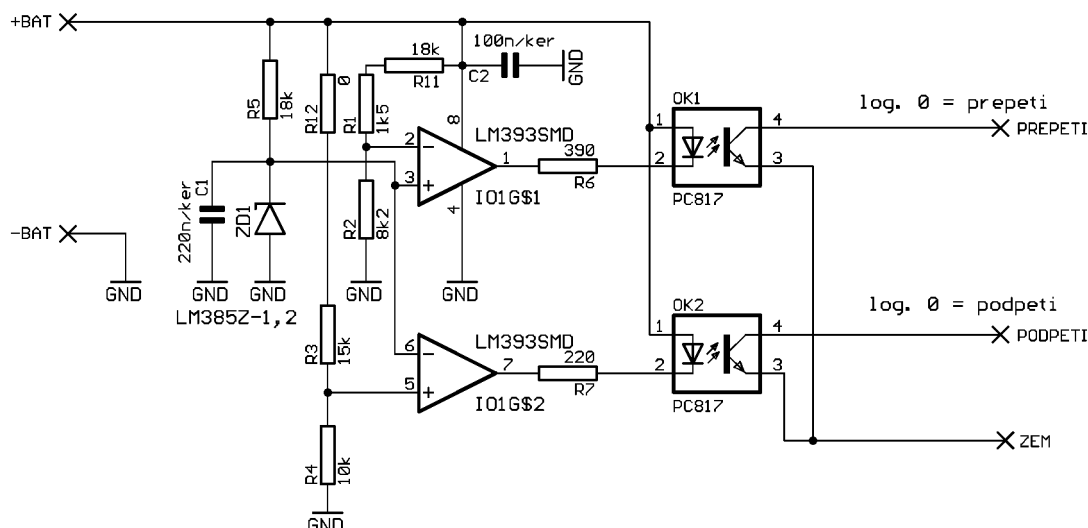
Realizace ochranných obvodů může být různá. Ve většině případů záleží na konečné aplikaci, pro kterou je obvod určen. Obvod BMS, který využíváme v naší aplikaci má dvě části. První z nich je měřicí obvod, který je připojen ke každému sériovému článku a hlídá jeho napětí. Měřicích obvodů je tedy tolik, kolik máme článků v sérii, v našem případě sedm. Druhou částí je základní deska. Na tuto desku jsou všechny měřicí obvody připojeny. Základní deska má za úkol, na základě signálu z měřicího obvodu, odpojit zátěž při vybití článku, nebo vyslat signál k odpojení nabíjení.

5.2.1 Měřicí obvod

Měřicí obvod je připojen ke každému sériovému článku trvale. Obvod je napájen z článku, na který je připojen. Vlastní spotřeba je ale velmi malá. Je srovnatelná se samovybíjením článku, takže nemusíme mít obavy ze zničení článku. Zapojení měřicího obvodu je řešeno použitím dvou komparátorů, jejichž výstupem jsou logické signály. Ty signalizují dva stavy, které se na článku mohou objevit. Výstupy musí být galvanicky odděleny.

Prvním stavem je podpětí. V tomto stavu klesne napětí článku pod nastavenou hranici 3,1V a na výstupu se objeví logická nula.

Druhým stavem je přepětí. To může nastat, pokud má vozidlo, v našem případě kolo, rekuperaci. Při jízdě z kopce s plně nabitou baterií by bylo nežádoucí, aby se nám při použití rekuperace baterie ještě více nabíjela. Měřicí obvod tedy vyšle signál o stavu přepětí základní desce. Výstup přepětí používáme také při nabíjení, kde slouží jako zpětná vazba pro dvoupolohový regulátor napětí baterie.



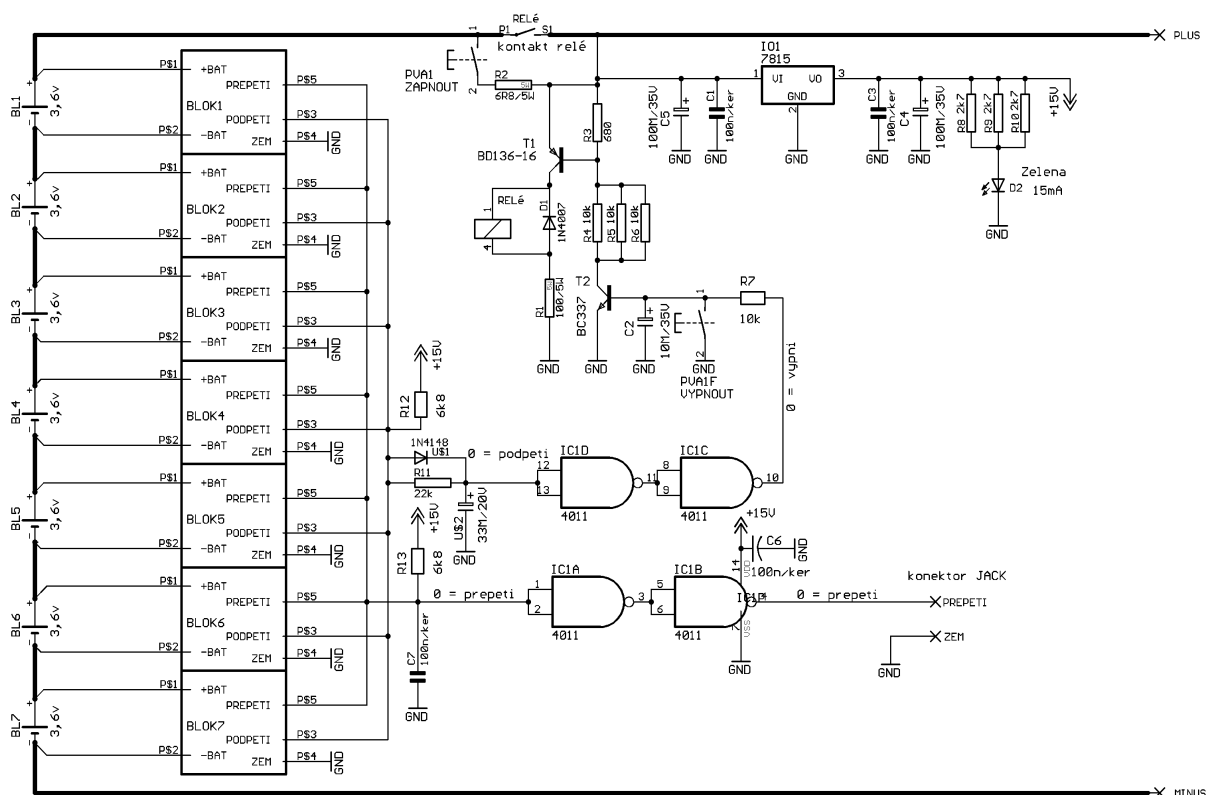
Obrázek 4: Zapojení modulu komparátorů (BLOK1 až BLOK7 v Obrázek 2) [2]

5.2.2 Základní deska

Základní deska přijímá signály od všech měřicích obvodů a na jejich základě zajišťuje odpojení akumulátoru nebo předání signálu řídicí jednotce či nabíječce. Jak již bylo zmíněno v popisu měřicích obvodů, základní deska přijímá signál o přepětí a podpětí. Na obr. 5 si můžeme všimnout, že všechny bloky měřicích obvodů jsou zapojeny paralelně. Takovéto zapojení je možno díky logice signálů a řešení s otevřeným kolektorem.

Odpojení akumulátoru od zátěže z důvodu podpětí zajišťuje relé, jehož kontakty rozpojí kladný pól akumulátoru. Akumulátor lze vypnout i zapnout ručně pomocí dvou tlačítek.

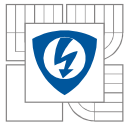
Pokud při rekuperačním brzdění dostane základní deska signál o přepětí na kterémkoli článku, neodpojuje akumulátor, protože by mohlo dojít k poškození řídicí jednotky motoru vlivem zvýšeného napětí v meziobvodu. Tato situace může nastat při brzdění s plně nabitou baterií. Při nabíjení slouží tento signál jako zpětná vazba pro nabíječku.



Obrázek 5: Zapojení ochranných obvodů [2]

5.2.2.1 Funkce obvodu

Ve vypnutém stavu, kdy na výstupních kontaktech akumulátoru není napětí, jsou pod napětím pouze měřicí obvody. Abychom dostali napětí i na výstupních svorkách, stiskneme tlačítko PVA₁ (podle obr. 5) a tím přemostíme rozpojený kontakt relé. Proud začne protékat přes odpor R₂, který slouží k jeho omezení a tím i zamezí svaření kontaktů tlačítka. Zároveň se také otevře tranzistor T₁, který dovolí průchod proudu cívkou relé. Ta sepne hlavní kontakt relé a tím přivede trvale napětí na výstupní svorky. Pro odpojení výstupních svorek slouží další tlačítko PVA_{1F}, které při jeho stisku zkratují bázi a emitor tranzistoru T₂. Tranzistor přeruší obvod, který budí tranzistor T₁. Tím dojde k přerušení proudu do cívky relé, která rozpojí hlavní kontakt. Stejným způsobem dojde k rozpojení kontaktu i v případě podpětí kteréhokoli článku v akumulátoru. Místo tlačítka však budící proud tranzistoru T₂ přeruší hradla, u kterých se na výstupu objeví logická 0.



Výpočet proudu a napětí cívky relé:

$$U_{\text{cívka}} = U_{\text{aku}} * \frac{R_{\text{cívka}}}{R_{\text{cívka}} + R_1} = 25,9 * \frac{80}{80 + 100} = 11,511\text{V}$$

$$I_{\text{cívka}} = \frac{U_{\text{cívka}}}{R_{\text{cívka}}} = \frac{11,511}{80} = 143,89\text{mA}$$

Rezistory R_{12} a R_{13} jsou takzvané pull-up rezistory. Ty jsou připojeny na kolektory tranzistorů (zapojení s otevřeným kolektorem) a zajišťují, aby na vstupu hradel byla vždy buď logická 0, nebo 1.

Obvod IO1 7815 je stabilizátor napětí, který zajišťuje napájecí napětí hradel.

Na základní desce je také RCD člen. Ten slouží k odbourání krátkodobých impulzů logické nuly (vliv impulzního nabíjení a rušení), které by mohly způsobit chybné vyhodnocení a nežádoucí odpojení akumulátoru.

6 NABÍJEČKA

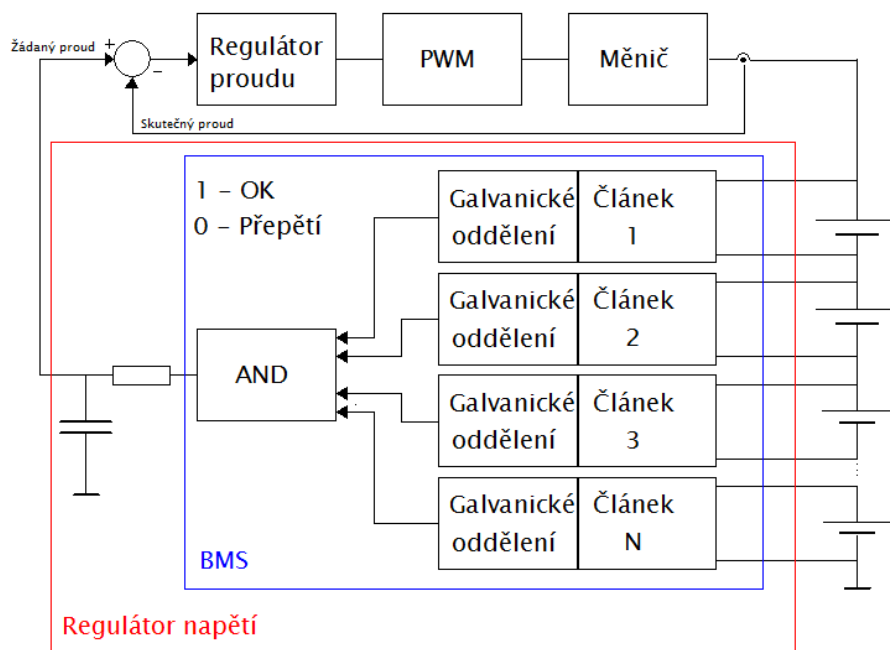
Nabíječka k akumulátoru, který je předmětem této práce, je řešena jako jednočinný propustný měnič s transformátorem.

Napájení	1x230/50Hz
Maximální výstupní proud	600W
Výkon	20A
Nosný kmitočet PWM	200kHz
Rozměry	60x120x170
Hmotnost	1kg

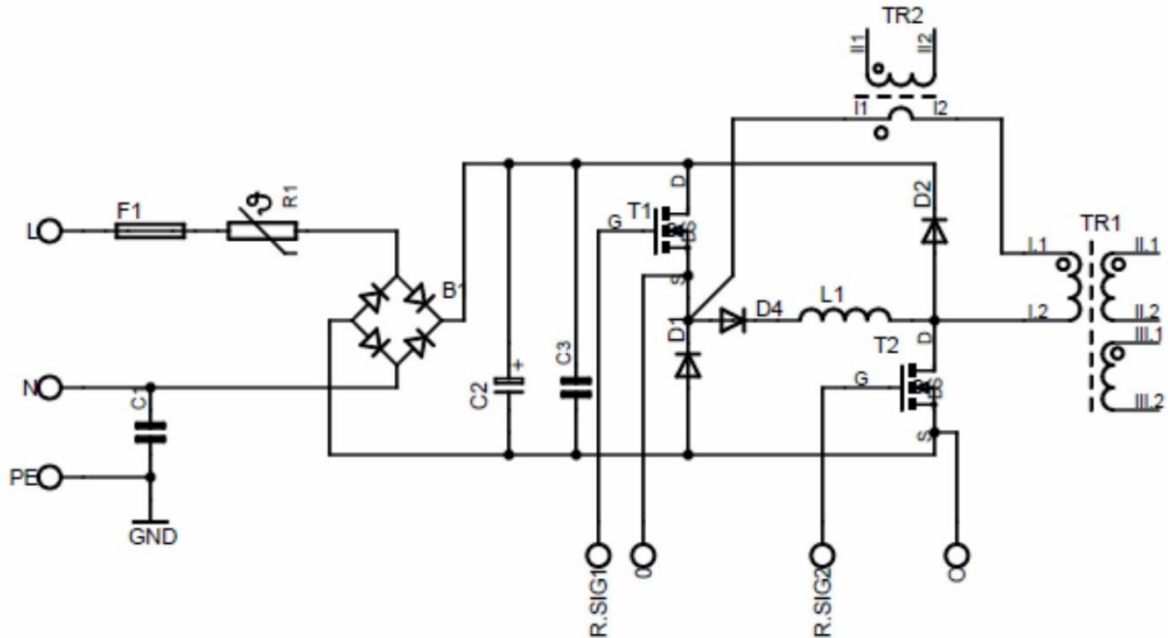
Tabulka 9: Parametry nabíječky

Nabíjení probíhá ve dvou částech. První z nich je část konstantního proudu, při které je proud maximální a napětí roste. Po dosažení nastavené hodnoty napětí přejde nabíjení do druhé části konstantního napětí. Zde se napětí udržuje na nabitém stavu a klesá nabíjecí proud. Jakmile proud klesne na nulovou hodnotu, akumulátor je nabit.

Princip nabíječky vidíme na blokovém schéma na obr. 6. Vnořený blok BMS jsme již popisovali. Jedná se o paralelní kombinaci s otevřeným kolektorem. Výstupem je pak signál nabývající logické 0 nebo 1. Signál je přiveden do RC členu s dlouhou časovou konstantou, kde z logické 0 a 1 filtruje střední hodnotu. Střední hodnota je pak použita jako žádaná hodnota proudu pro podřízenou proudovou regulační smyčku. Nadřazená napěťová regulace je řešena BMS obvody. V konečné fázi nabíjení se na výstupu stále mění logická 0 a 1. Napětí každého článku je tedy kontrolováno samostatně, takže nemůže dojít k přebití některého ze sériových článků. Pokud by došlo k poruše spojovacího signálového kabelu k nabíječce, objeví se na vstupu nabíječky logická 0. Tento stav vyhodnotí nabíječka jako přepětí a nabíjení se ukončí. Nedojde tedy ke zničení akumulátoru.

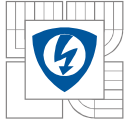


Obrázek 6: Blokové schéma řízení nabíječky



Obrázek 7: Zapojení primární části nabíječky [5]

Na vstupu primární části nabíječky je zapojena pojistka F1. Za pojistkou následuje termistor NTC s označením R1. Ten slouží k omezení nabíjecího proudu kondenzátoru C2, který teče po připojení do sítě. S průchodem proudu se termistor ohřívá a snižuje se tím jeho odpor, až klesne na minimum. Následuje Graetzův usměrňovací můstek. Zapojení je konstruováno jako jednočinný propustný měnič s transformátorem. Tranzistory T1 a T2 jsou spínací tranzistory a diody D1 a D2 jsou diody blokové. Transformátor TR2 je měřicí transformátor proudu.



7 ŽIVOTNOST LI-ION ČLÁNKŮ

Životnost li-ion článků závisí na mnoha aspektech. Většinou je úzce spjata s tím, jak a za jakých podmínek články používáme. S ohledem na to může mít li-ion článek životnost v řádu desítek cyklů, v opačném případě i 2000 cyklů.

7.1 Nabíjení a vybíjení s ohledem na životnost

Jak již bylo řečeno v kapitole ochranného obvodu, je velmi důležité v jakém rozmezí napětí li-ion články používáme. Obecně v rámci většiny výrobců platí, že napěťové rozmezí, tedy napětí, při kterém je baterie nabita či vybita, je 4,2V – 2,5V. Při použití v takovémto rozmezí využíváme 100% kapacity a článek má životnost 500 cyklů. Po vykonání tohoto počtu cyklů ovšem článek není zničen, ale má pořád ještě 80% svoji původní kapacity.

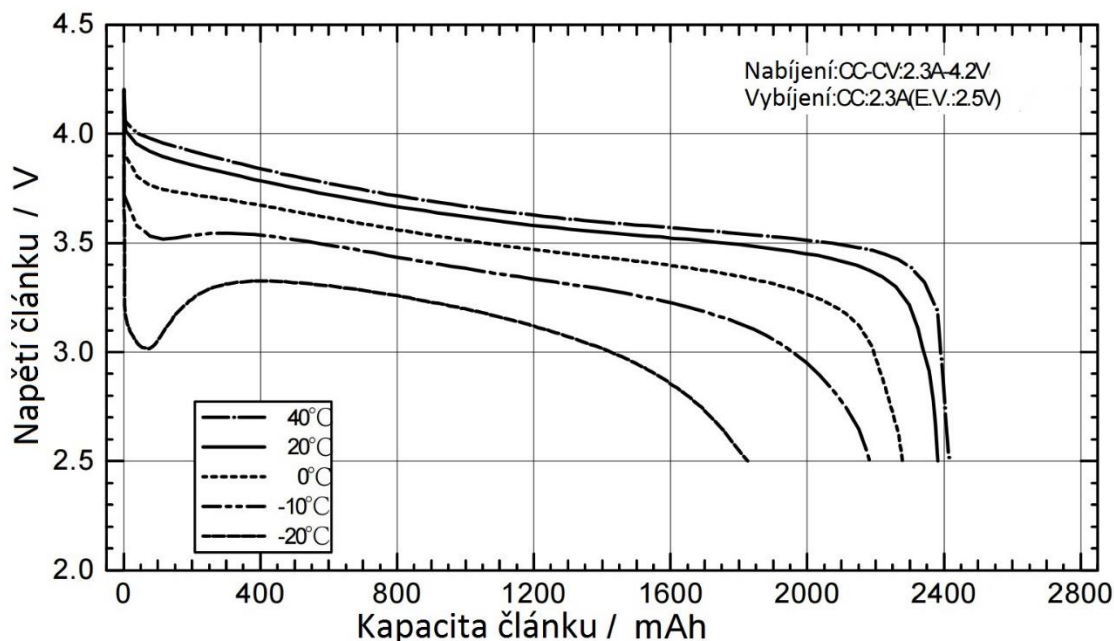
7.2 Vlastnosti článků při různých teplotách okolí

Teplota, ve které články pracují, je velmi důležitá jak pro jejich vlastnosti, tak i pro životnost. Výrobce u článků, které používáme, udává teplotu při nabíjení v rozmezí 0 až + 40°C a při vybíjení -20 až + 60°C.

V případě elektrokola nás budou zajímat hodnoty teploty nad 20°C, protože tento dopravní prostředek budeme používat hlavně v létě, kdy se při slunečném dni může teplota akumulátoru dostat až na kritickou hranici 60°C.

V případě elektrického vozidla například automobilu musíme brát v potaz teploty nízké i vysoké. Většina dnes dodávaných vozů problém s přehříváním a podchlazením článků neřeší. Je několik výrobců automobilů, kteří se na tento problém zaměřili. Nedílnou součástí tohoto systému musí být vodní okruh, který články jak chladí, tak ohřívá na ideální pracovní teplotu.

Jak je vidět na obr. 8, teplota velmi ovlivňuje charakteristiku napětí při vybíjení článku. Čím je teplota nižší, tím větší je počáteční pokles napětí.



Obrázek 8: Vybíjecí charakteristiky při různých teplotách článku Sanyo UR18650F [1]

Na obr. 8 si také můžeme všimnout zvláště u teplot pod bodem mrazu, že napětí nejdříve značně poklesne, pak ale začne narůstat. To je způsobeno ohříváním článku při vybíjení vlivem jeho vnitřního odporu.

Mohlo by se zdát, že provozování článku při vysoké teplotě je výhodné. Na obr. 8 ostatně vidíme, že při teplotě 40°C má článek dokonce vyšší kapacitu než při 20°C. Při takto vysokých teplotách však velmi rychle degraduje, což se velmi výrazně projeví na počtu cyklů, které je schopen poskytnout.

7.3 Používání článků s ohledem na životnost

Lithium iontové články ztrácejí svoji kapacitu, i když nejsou používány. Důležité v takovém stavu je, aby články nebyly úplně vybité. Dlouhodobým nepoužíváním by mohlo dojít vlivem jejich vnitřního odporu k úplnému vybití a tím i zničení. Nabitý stav také není vhodný pro dlouhodobě nepoužívané články, protože rychleji stárnou. Ideální stav pro skladování li-ion článků je nabití na 40% jejich nominální kapacity. V takovém stavu by měly stárnout články nejpomaleji.

Z praxe můžeme uvést jeden příklad, kdy nadšenci koupili a testovali články akumulátorů ze starých notebooků IBM thinkpad. Tyto akumulátory měly za sebou 12 let skladování při jmenovitém napětí. Kapacita takto uskladněných článků se snížila o 40% tedy na 60% původní kapacity.

8 MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ AKUMULÁTORU

Mechanická konstrukce je řešena s ohledem na umístění akumulátoru v rámu elektrokola. Jednotlivé bloky skládající se z 21 paralelně řazených článků mají tvar rovnostranného trojúhelníka. Články mají na sobě bodově přivařené kovové pásky, které jsou potom připájeny na kuprexitovou desku, jak je vidět na obr. 9. Tím jsou všechny články spolehlivě spojeny v jeden blok. Ty jsou poskládány tak, aby co nejlépe kopírovaly tvar rámu kola. Sériové zapojení všech sedmi bloků zajišťují měděné pásky, které jsou připájeny na kuprexitových deskách. Takto zapojený akumulátor je již plně připraven k provozu. Jelikož se ale baterie nedají “vypnout“, je potřeba obal, který bude akumulátor chránit jak proti zkratu jednotlivých bloků, tak proti mechanickému poškození. V našem případě máme celý obvod akumulátoru krytý PVC deskou, která kopíruje tvar seskládaných bloků. V jednom rohu je mezi články a deskou mezera, do které je nainstalovaný obvod BMS, relé a také tlačítko na vypnutí a zapnutí přívodu k řídicí jednotce motoru.

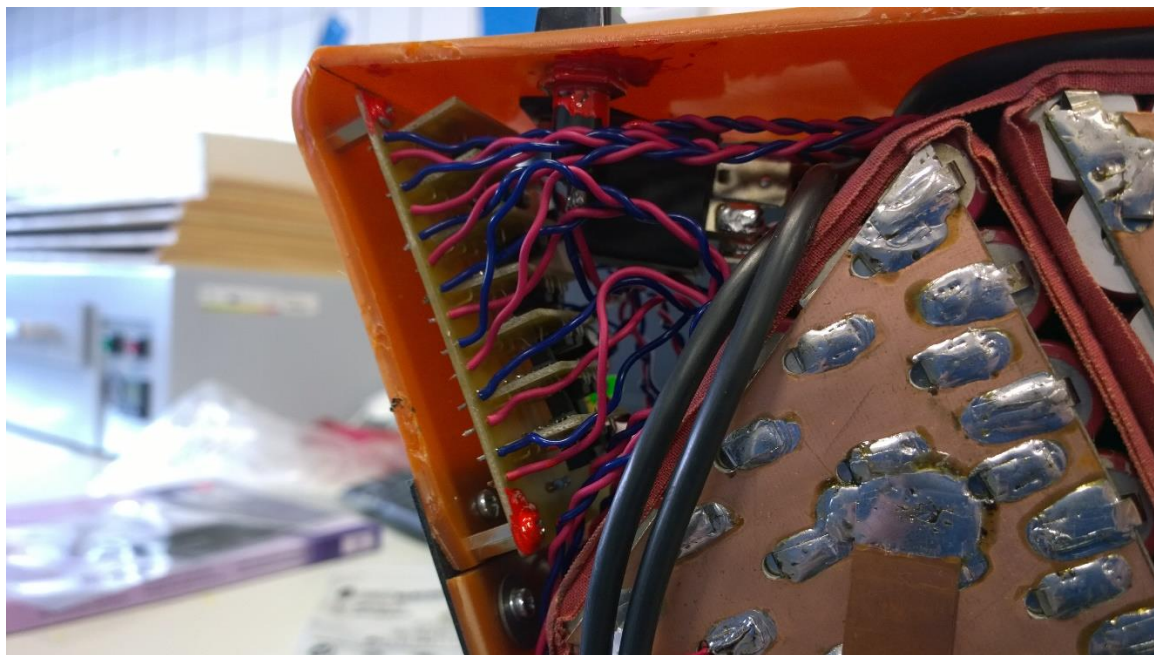


Obrázek 9: Akumulátor před zapojením BMS obvodu

8.1 Dokončení mechanického zpracování

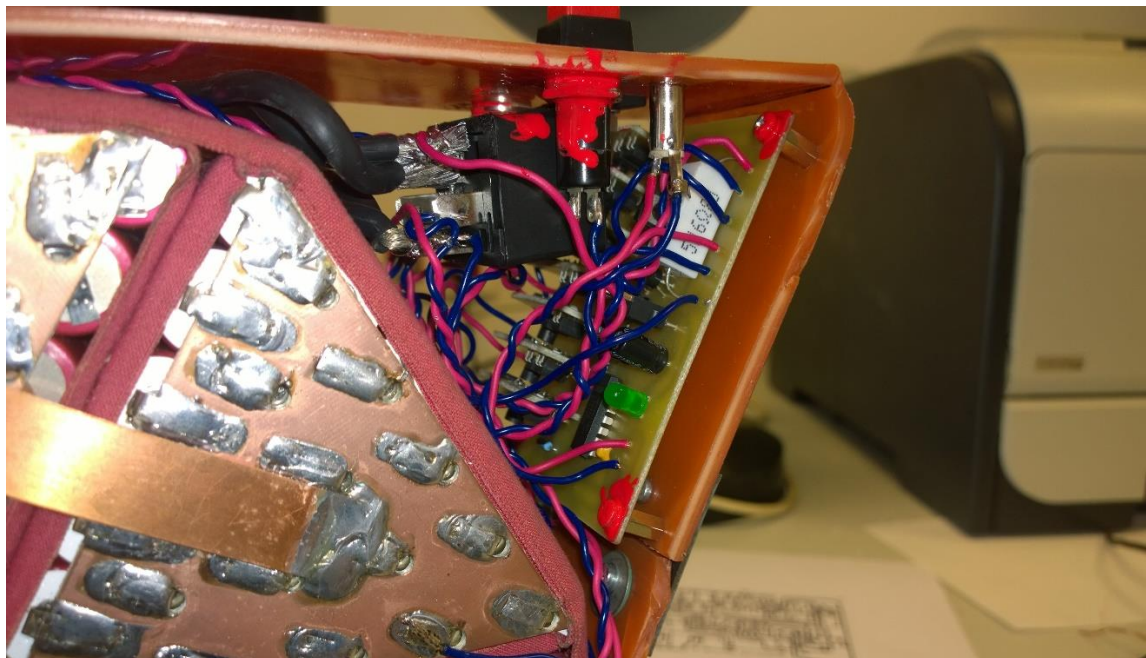
V semestrální práci, na kterou tato práce navazuje, byla dokončena mechanická část akumulátoru. Ta obsahovala rám z termoplastu, který články ochrání před mechanickým poškozením. Dále tedy bylo potřeba zajistit elektrické zapojení a umístění do brašny.

Elektrické zapojení započalo připojením jednotlivých sériových článků v ochranném obvodu.



Obrázek 10: Připojení sériových článků k ochrannému obvodu

Potom bylo třeba připojit relé, který se stará o připojení a odpojení zátěže od akumulátoru a také zásuvku 3,5 jack, přes kterou dává ochranný obvod zpětnou vazbu nabíječce o stavu nabití.



Obrázek 11: Připojení relé a zásuvky jack 3,5

K dokončení mechanické části byla třeba mikroporézní pryž, kterou se obložil akumulátor po stranách, aby se zabránilo zkratu a poškození článků.



Obrázek 12: Obložení akumulátoru mikroporézní pryží

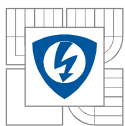
Nakonec byl celý akumulátor vložen do brašny ušité na míru. Ta slouží jako ochrana proti povětrnostním vlivům a hlavně k upevnění akumulátoru do rámu elektrokola.



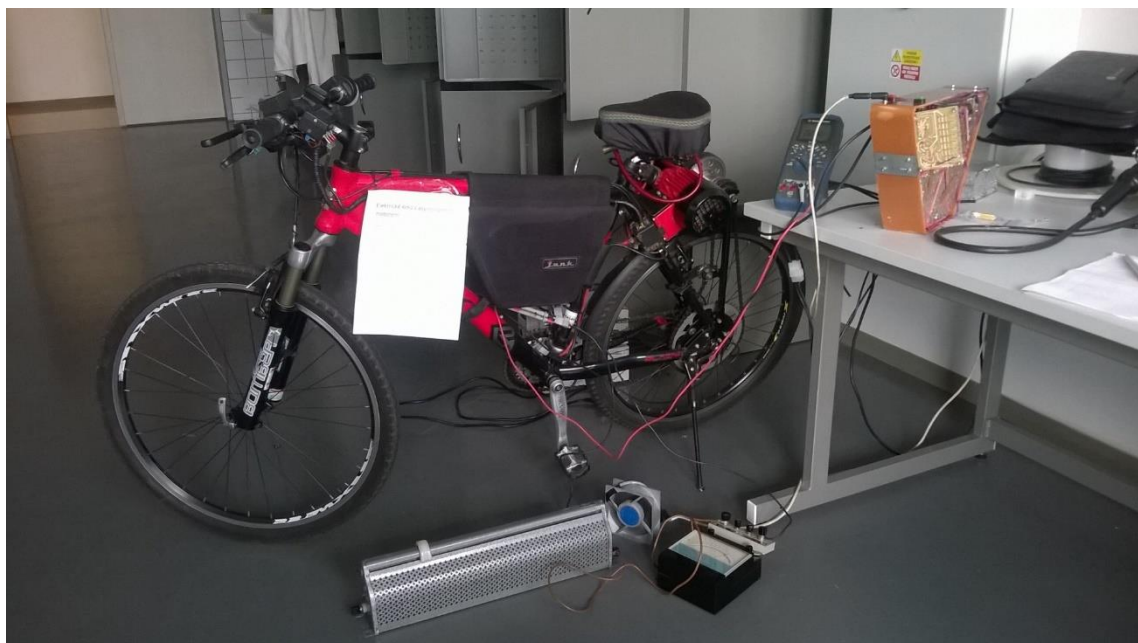
Obrázek 13: Akumulátor vložený v brašně

8.2 Ověření funkčnosti BMS a kapacity akumulátoru

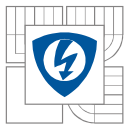
Ověření kapacity akumulátoru probíhalo vybíjecím proudem 20A. Nejdříve se musely jednotlivé sériové články vybalancovat tak, že se po jednom nabíjely, až měly stejnou hodnotu napětí. Po vybalancování se akumulátor připojil na rychlonabíječku a proudem 20A se nabíjel až do doby, kdy první z článků dosáhl napětí 4,08V. V této chvíli přešel zdroj z fáze nabíjení konstantním proudem do fáze nabíjení konstantním napětím. Nabíjecí proud tedy začal klesat a asi po další hodině nabíjení jsme tento proces ukončili. Akumulátor se poté připojil přes ampérmetr k potenciometru, kterým se nastavovala odporová zátěž tak, aby byl vybíjecí proud stále konstantní. Vybíjení trvalo 121 minut a ukončil ho ochranný obvod, který zaznamenal, že jeden ze sériových článků klesl na nižší napětí než 3,1V. Tímto procesem byla tedy ověřena funkčnost ochranného obvodu jak při nabíjení tak při vybíjení.



Obrázek 14: Nabíjení akumulátoru (u červeného tlačítka pro odpojení akumulátoru můžeme vidět vodič s koncovkou 3,5 jack, který se stará o zpětnou vazbu od BMS k nabíječce)



Obrázek 15: Vybíjecí sada a oba měřené akumulátory (jeden v brašně na kole a druhý na stole)

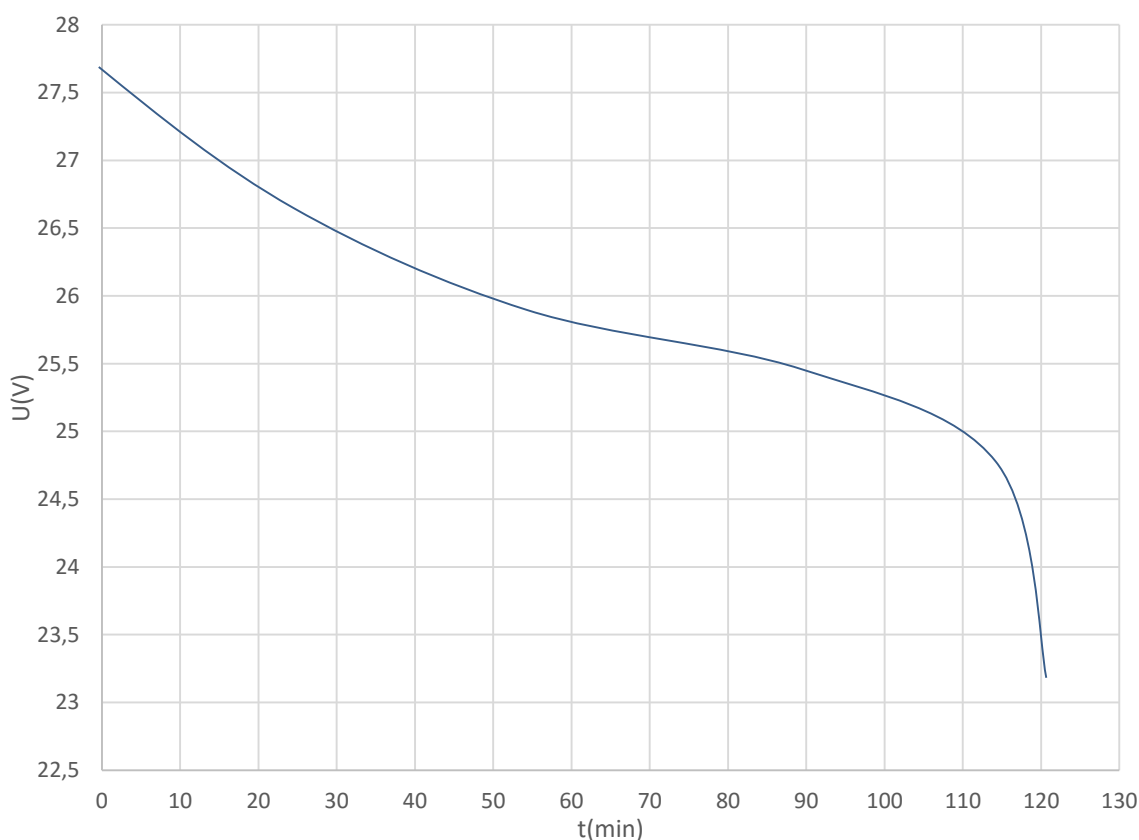


9 MĚŘENÍ AKUMULÁTORŮ

Měřením lithium-iontových článků dostáváme informace o hodnotách, které udávají vlastnosti celého akumulátoru. Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, nejdůležitějším parametrem je kapacita. Při měření kapacity, kde máme konstantní zatěžovací proud, sledujeme také průběh napětí celého akumulátoru i jednotlivých článků.

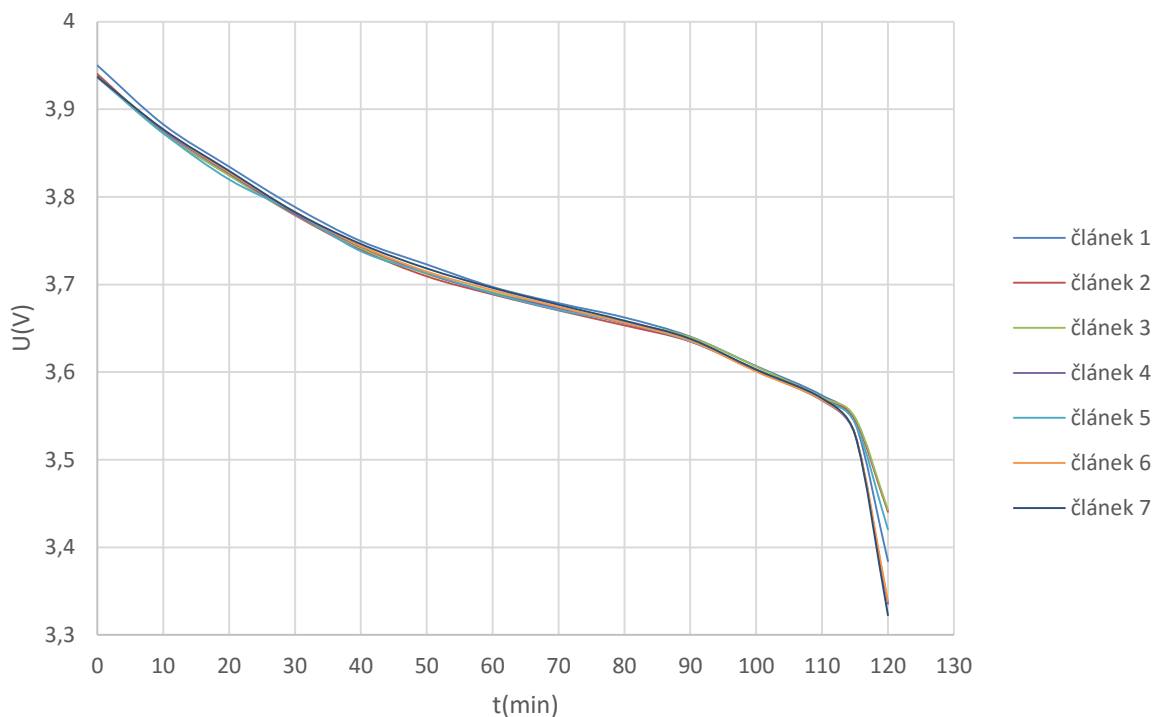
9.1 Měření akumulátoru obsahující články Sanyo 2,3Ah

9.1.1 Měření kapacity a průběhu napětí akumulátoru

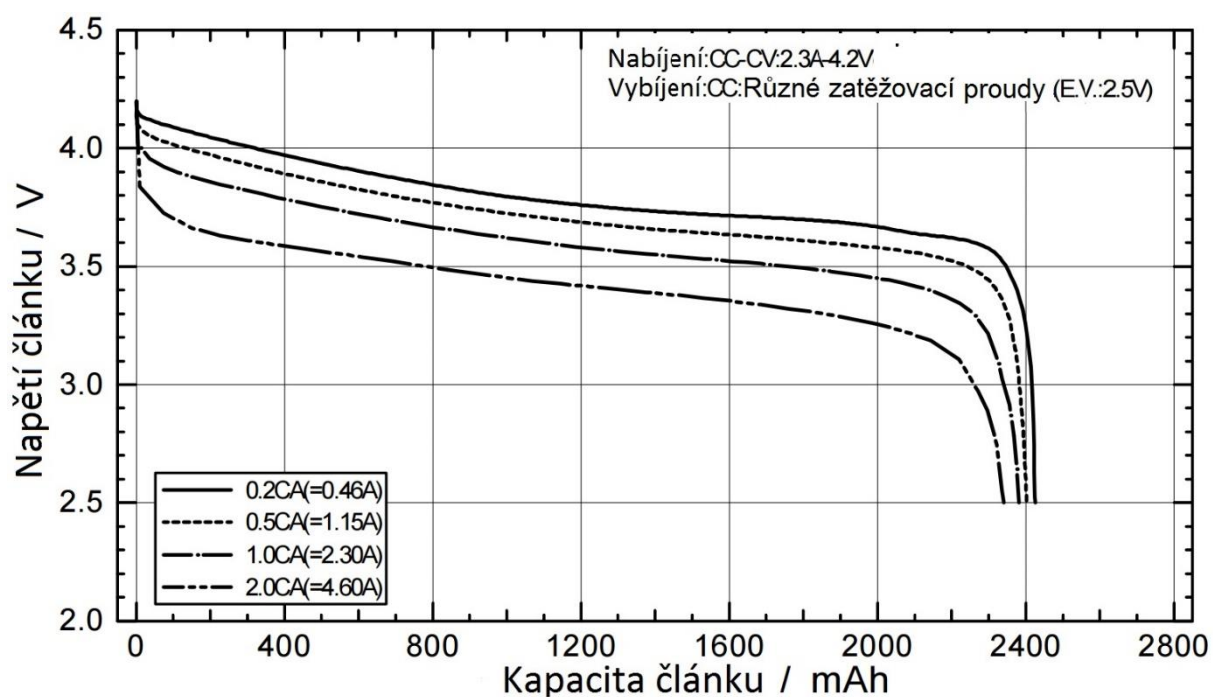


Obrázek 16: Průběh napětí při vybíjení li-ion akumulátoru konstantním proudem 20A, články Sanyo 2,3Ah

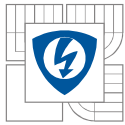
9.1.2 Měření průběhu napětí jednotlivých článků akumulátoru



Obrázek 17: Průběhy napětí jednotlivých článků při vybíjení konstantním proudem 20A, články Sanyo 2,3Ah



Obrázek 18: Vybíjecí charakteristiky článku Sanyo 2,3Ah pro různé zatěžovací proudy [1]



Na obr. 17 vidíme průběhy napětí při vybíjení jednotlivých sériových článků. Všechny články byly před měřením vybalancovány na setinu voltu. Z grafu je patrné, že články mají po celou dobu vybíjecího cyklu velmi podobné napětí. To svědčí o tom, že mají stejný nebo velmi podobný vnitřní odpor. Za povšimnutí také stojí samotný tvar průběhu napětí, jež je vcelku plochý. Akumulátor vybíjíme proudem 20A což je přibližně 0,5C. Vybíjecí proud tedy není velký, ale i tak je to dobrý výsledek. Pro porovnání je na obr. 18 vybíjecí charakteristika jednoho článku, která je převzata z datasheetu. Jak je vidět, pokles napětí je velmi podobný novému článku, což odkazuje na kvalitu použitých článků. Grafy sice působí rozdílně, je to ale způsobeno tím, že při našem měření byly články odpojovány při 3,1V a při měření v datasheetu byly odpojovány při 2,5V

Čas vybíjení	121 min
Zatěžovací konstantní proud	20A
Hodnota napětí při odpojení	Kterýkoli článek klesne pod 3,1V
Kapacita akumulátoru	40,33Ah
Ztráta kapacity skladováním	8Ah
Napětí naprázdno (pro výpočet vnitřního odporu)	27,765V
Napětí v zátěži 20A (pro výpočet vnitřního odporu)	27,05V
Vnitřní odpor	35,75mΩ

Tabulka 10: Změřené a vypočtené hodnoty akumulátoru

Výpočet kapacity akumulátoru:

$$Q = t * I = \frac{121}{60} * 20 = 40,33\text{Ah}$$

Výpočet vnitřního odporu akumulátoru:

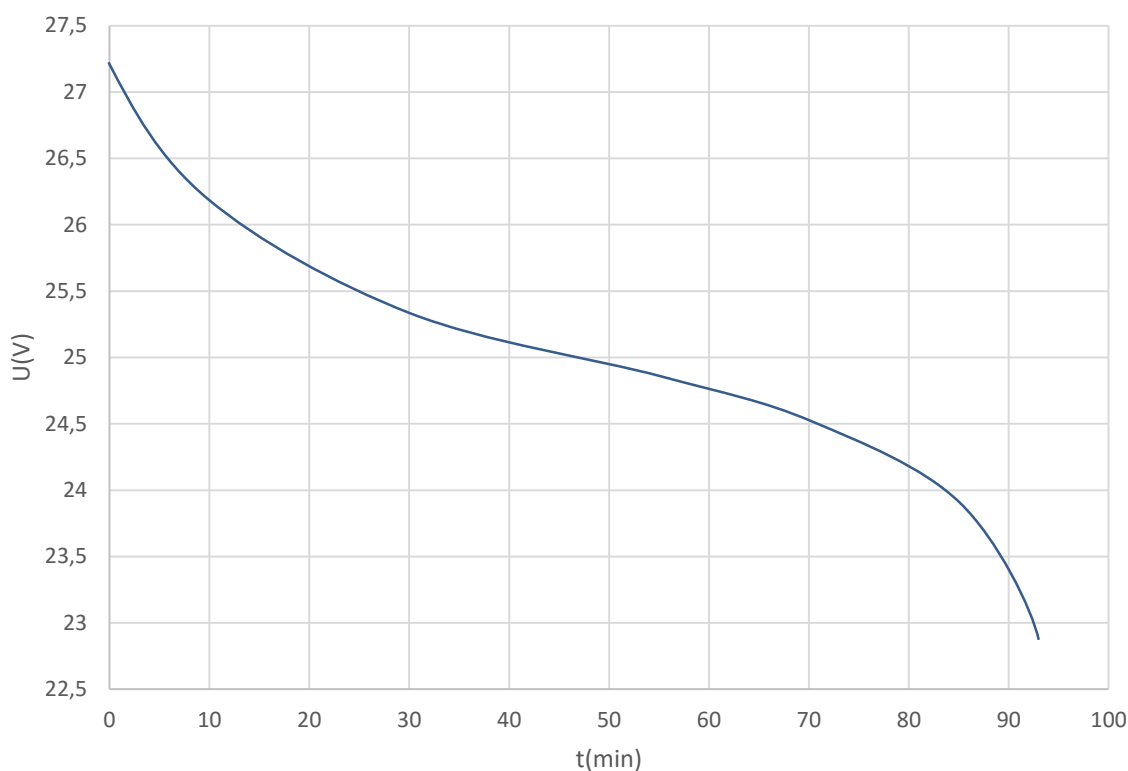
$$R_i = \frac{U_{\text{Naprázdko}} - U_{\text{Zátěž}}}{I} = \frac{27,765 - 27,05}{20} = 0,03575\Omega$$

Měřením akumulátoru složených z článků Sanyo 2,3Ah jsme dostali výsledné hodnoty kapacity a mohli jsme tedy zhodnotit úbytek kapacity. Akumulátor jsme zatěžovali konstantním proudem 20A po celou dobu vybíjení. Čas vybití byl 121 minut. Z výše uvedeného výpočtu jsme tedy dostali hodnotu kapacity, která je 40,33Ah. Původní kapacita byla podle výrobce článků 48,3Ah. To znamená, že akumulátor má nyní 83,44% své původní kapacity. Akumulátor byl zakoupen v roce 2008. Berme v úvahu, že při nákupu se jednalo o nové články a do výpočtu tedy není zahrnuta doba od výroby k prodeji. Články byly skladovány 8 let. Ztráta kapacity je 8Ah, což znamená 1Ah/rok. Podle zkušeností jiných uživatelů se úbytek kapacity pohybuje kolem 3% za rok. Výsledek našeho měření je 2,1% za rok, což poukazuje na dobré skladovací podmínky a kvalitu článků.

Dále jsme měřili úbytek napětí při připojení akumulátoru do zátěže. Tento parametr slouží k výpočtu vnitřního odporu. Podle něho jsme zjistili, že vnitřní odpor akumulátoru má hodnotu 35,75mΩ. Po přepočtu sérioparalelní kombinace článků dostaneme hodnotu vnitřního odporu na

jeden článek, která činí $107,25\text{m}\Omega$. Tato hodnota je o něco vyšší než mají podobné články jiných výrobců. Musíme brát ale v potaz, že použité články Sanyo byly několik let skladovány. Z toho vyplývá, že vnitřní odpor je zcela adekvátní stáří článků a akumulátor je zcela v pořádku.

9.2 Měření akumulátoru obsahující články Panasonic 2,15Ah



Obrázek 19: Průběh napětí při vybití li-ion akumulátoru konstantním proudem 20A, články Panasonic 2,15Ah

datum	kilometry	t[min]	I[A]	Q[Ah]	$U_{\text{naprázdno}}$ [V]	$U_{\text{zátěž}}$ [V]	R_i [$\text{m}\Omega$]
2005	540	128	20	42,67	-	-	-
26. 07. 2006	2663	113	20	37,67	-	-	-
30. 01. 2008	5667	105	20	35,00	-	-	-
21. 10. 2008	9192	105	20	35,00	-	-	-
07. 07. 2009	10847	103	20	34,33	-	-	-
01. 04. 2010	12074	99	20	33,00	-	-	-
04. 03. 2011	13865	99	20	33,00	-	-	-
07. 04. 2016	-	94	20	31,33	27,635	26,4	61,75

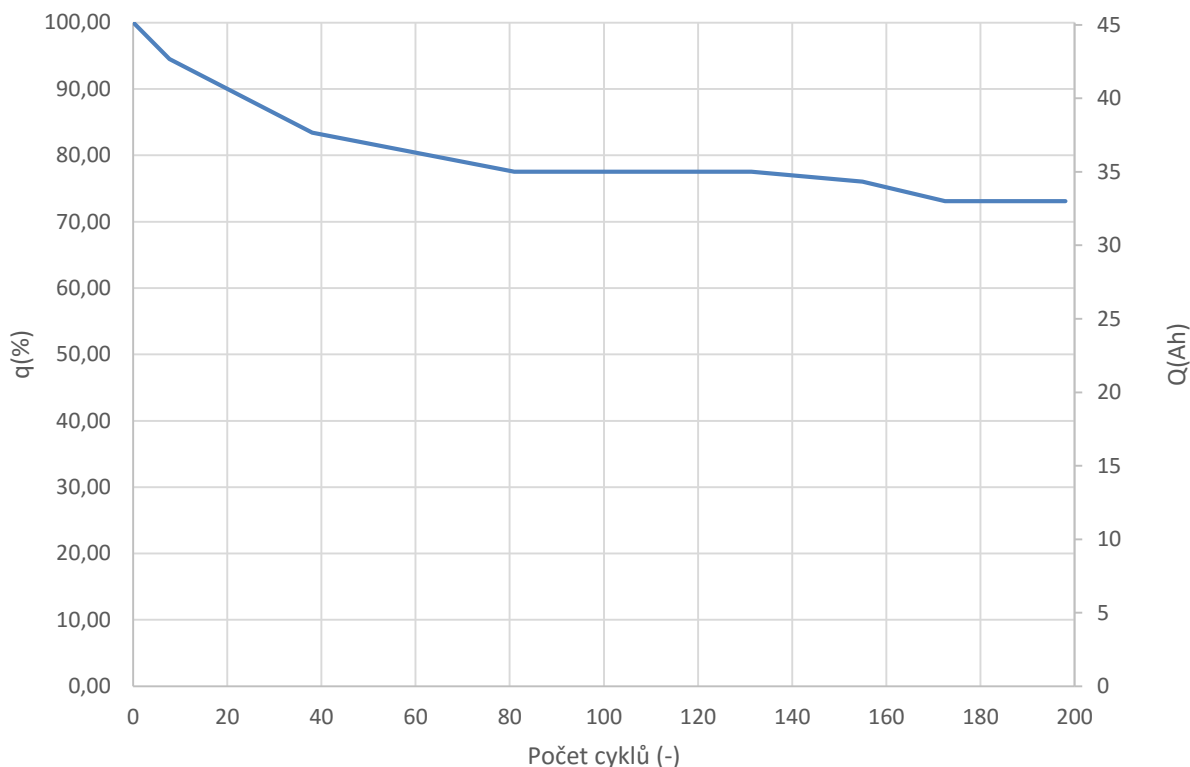
Tabulka 11: Naměřené a vypočítané hodnoty akumulátoru v průběhu jeho používání

Měřením akumulátoru skládajícího se z článků Panasonic 2,15Ah jsme určili průběh napětí. Z něho je patrné, že používáním akumulátoru a jeho stářím na něm, rychleji klesá napětí už od



začátku vybíjecího cyklu. Dále byla vypočítána kapacita, která je po 11 letech používání 31,33Ah. Je to tedy asi 31% úbytek. Pokud bychom vzali v úvahu z předchozího měření, že články ztrácejí za rok asi 2,1% své kapacity, výsledek celkového úbytku by byl rozdělen na 23% ztráty skladováním a 8% ztráty použitím.

Dále byl podle rozdílu napětí naprázdno a v zátěži vypočítán vnitřní odpor. Jeho hodnota je 61,75m Ω . Hodnota jednoho článku po přepočtení sérioparalelní kombinace je pak 185,25m Ω . Tato hodnota je na stáří a používání článků nízká, což opět značí dobrou kvalitu použitých článků.



Obrázek 20: Graf závislosti úbytku kapacity na počtu nabíjecích cyklů

Na elektrickém kole bylo najeto bezmála 14000km. Záznam nájezdu posledních lech bohužel chybí. Kolo ujede na jedno nabití přibližně 70km. Z toho jsme mohli určit počet cyklů, které proběhly za dobu používání akumulátoru. Ve výše uvedeném grafu obr. 20 je zobrazen úbytek kapacity v závislosti na počtu nabíjecích cyklů. Jak již bylo zmíněno, velká část ztracené kapacity je způsobena skladováním a menší část opotřebením při používání. Nicméně se jedná o charakteristiku, která vzniká při reálném použití akumulátoru.

10 MONTÁŽ AKUMULÁTORU A OVĚŘENÍ JÍZDNÍCH VLASTNOSTÍ

Po odměření a dokončení všech potřebných prací na obalu akumulátoru mohla přijít na řadu samotná montáž do rámu. Upevnění je řešeno pomocí suchých zipů našitých na brašně. Připojení akumulátoru je řešeno konektorem faston. Ten je umístěn na spodní straně akumulátoru.

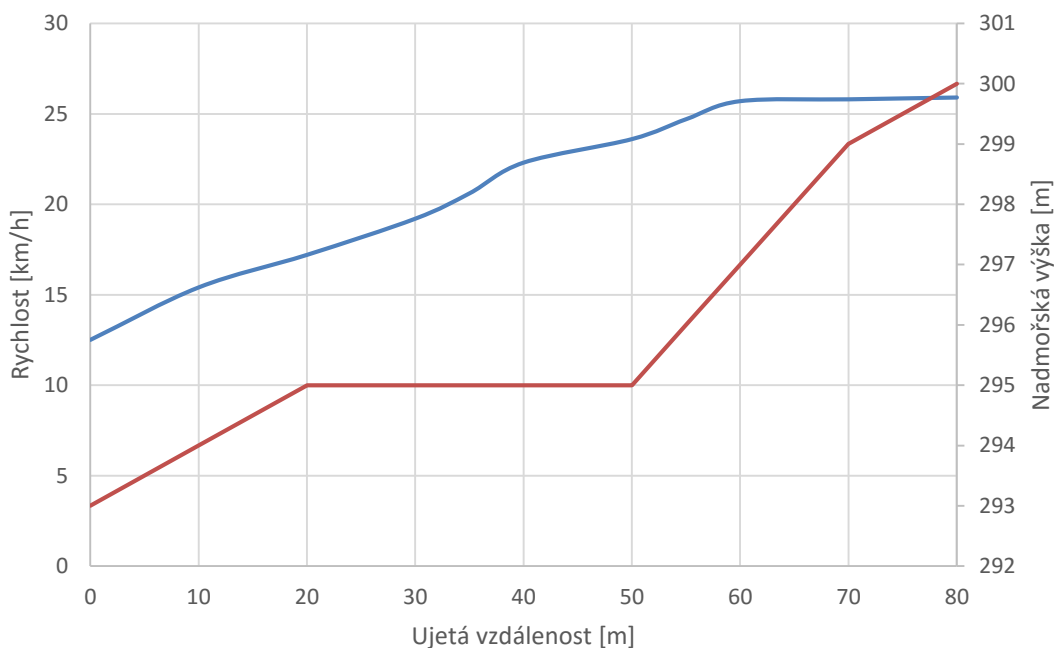
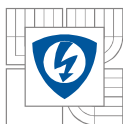


Obrázek 21: Elektrokolo s novým akumulátorem

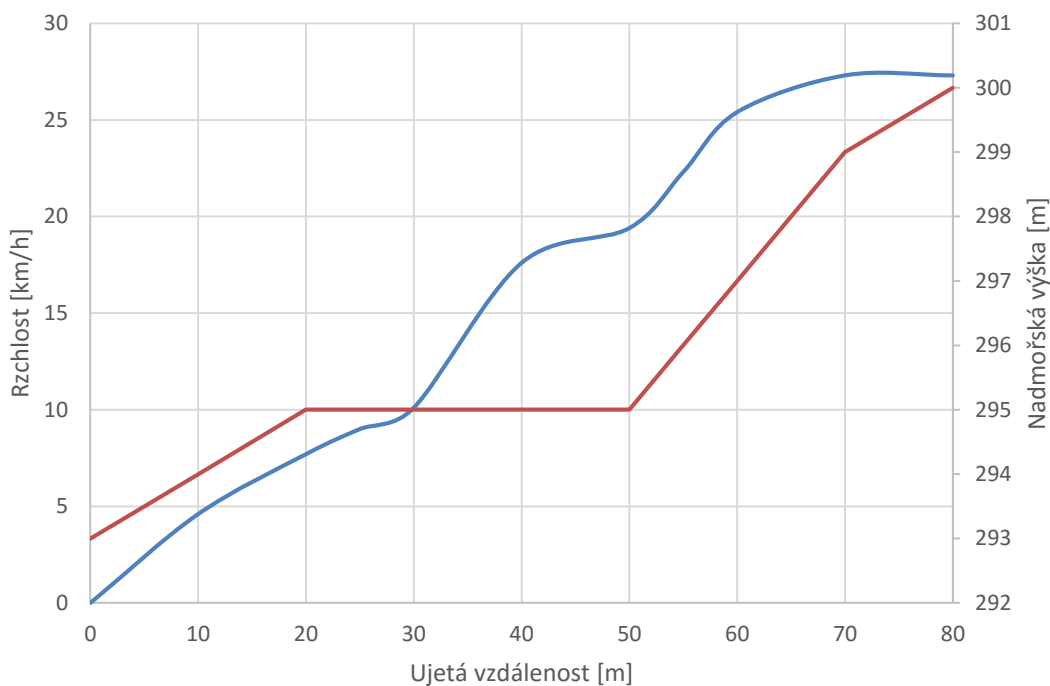
10.1 Ověření jízdních vlastností

Elektrokolo bylo testováno jak se starým tak s novým akumulátorem, proto bylo možné jejich přímé porovnání. Zkušební jízdy byly provedeny na zkušební dráze, která se nachází za budovou FEKT technická 12 a 14, kde bylo možno vyzkoušet maximální rychlost na dlouhé rovince i akceleraci do kopců o různém stoupání.

První zátěžovou zkouškou byl kopec kratší, nicméně s větším převýšením. Podle naměřených údajů z GPS bylo spočítán úhel stoupání na 8,75%.

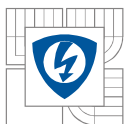


Obrázek 22: Graf akcelerace elektrokola s články Panasonic 2,15Ah (červená křivka – stoupání, modrá křivka – rychlost)

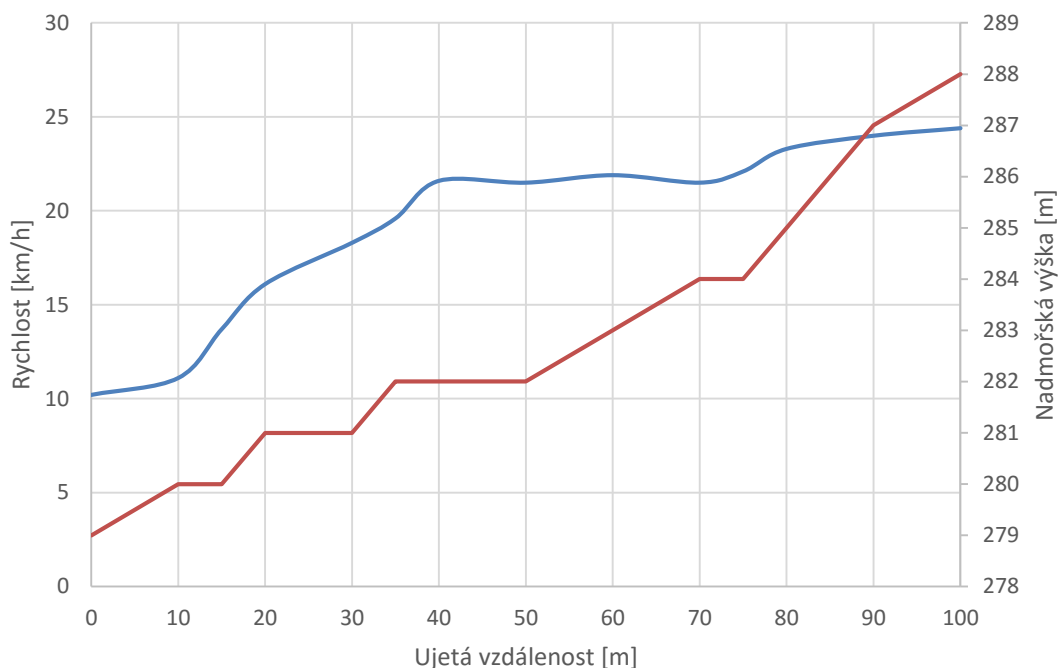


Obrázek 23 : Graf akcelerace elektrokola s články Sanyo 2,3Ah (červená křivka – stoupání, modrá křivka – rychlost)

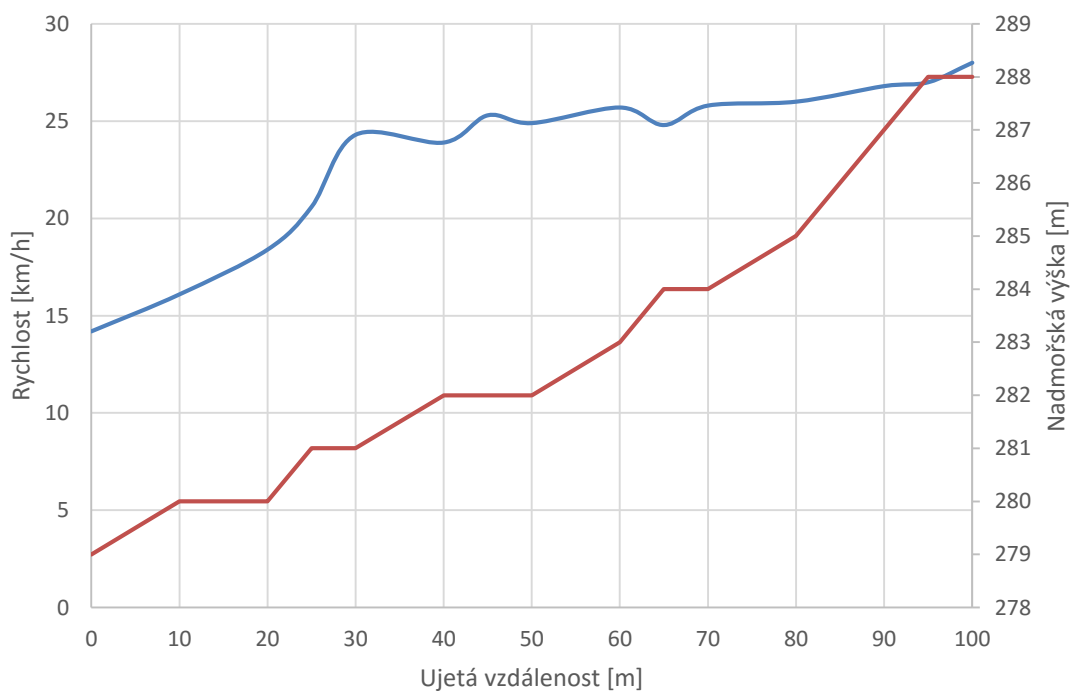
Grafické závislosti akcelerace (na obr. 22, 23, 24, 25) nemohly být přímo porovnány kvůli jiným počátečním rychlostem a chybě zaznamenávacího zařízení. Rozdíl mezi akumulátory je však zásadní. U grafické závislosti původního akumulátoru je vidět, že kolo mělo počáteční rychlost



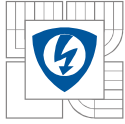
12,5km/h. I tak dosáhlo maximální rychlosti pouze 25,9km/h. Naproti tomu graf nově vytvořeného akumulátoru ukazuje nulovou počáteční rychlost. Maximální rychlost pak dosáhla hodnoty 27,3km/h.



Obrázek 24: Graf akcelerace elektrokola s články Panasonic 2,15Ah (červená křivka – stoupání, modrá křivka – rychlost)



Obrázek 25: Graf akcelerace elektrokola s články Sanyo 2,3Ah (červená křivka – stoupání, modrá křivka – rychlost)



Další test probíhal na kopci se sklonem 6%. Z grafických závislostí je opět patrná vyšší maximální rychlost nově vytvořeného akumulátoru, která má hodnotu 27km/h. Také průběh zrychlování je strmější.

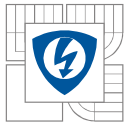
Podle palubního měřicího přístroje byl zjištěn pokles napětí a odebíraný proud při jízdě do zmíněných kopců.

	akumulátor Panasonic 2,15Ah	akumulátor Sanyo 2,3Ah
Napětí bez zátěže	26,6V	27,6V
Napětí v zátěži	23V	25,3V
Odebíraný proud	55A	60A

Tabulka 12: Parametry akumulátorů při jízdě

Na původním akumulátoru z článků Panasonic 2,15Ah byl zjištěn úbytek napětí 3,6V při dodaném proudu 55A, zatímco na nově sestaveném akumulátoru byl úbytek pouze 2,3V při proudu 60A. Tyto rozdíly jsou z velké části způsobené stářím akumulátorů a z malé části také nepatrně větší kapacitou nově sestaveného akumulátoru.

Posledním testem bylo zjištění maximální cestovní rychlosti elektrokola. Zde byly hodnoty v podstatě stejné kromě dynamiky zrychlování, což vyplynulo z předchozích grafů. Maximální cestovní rychlost byla změřena GPS a dosáhla hodnoty 42km/h.

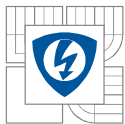


10.2 Zhodnocení testu a pohled na elektrokolo ze strany autora

Testování elektrokola bylo velmi příjemným zážitkem a hlavně vynikající novou zkušeností s tímto pohonem. Elektrokolo jede velmi dobře hlavně do kopců, kde se v celkem prudkém stoupání dokázalo rozjet a stále zrychlovalo. Mám srovnání s vlastním nábojovým BLDC motorem s převodovkou. Je sice fakt, že špičkový výkon mého motoru se pohybuje kolem 900W, což je velký rozdíl oproti testovanému, nicméně si nejsem jist, že by i s dodaným výkonem, který má VUT elektrokolo vyjelo kopec se stejnou dynamikou. Na rovině byl příkon z baterie na hodnotě 780W, nicméně foukal silný protivítr, takže je tato hodnota v pořádku. K dalším zkušenostem ohledně reálného dojezdu a použitelnosti v městském provozu by bylo třeba kolo testovat několik měsíců, na což není v rámci této práce prostor.

Co se týče samotného elektrokola a jeho konstrukce, z krátkého testování mám pár postřehů a návrhů na změnu, pokud by se kolo mělo používat v městském provozu.

Většina věcí, které zde zmíním, se týká rychlosti, které je elektrokolo schopné dosáhnout. Není možno bezpečně provozovat kolo, které dosahuje rychlosti 42km/h a je těžší o celý elektropohon na komponentech z obyčejného kola. Řeč je hlavně o pláštích, které musí snášet daleko větší zátěž vzhledem k váze a rychlosti. Dalším komponentem jsou brzdy, které jsou na tomto kole špalkové. Na zadním kole bohužel kotoučovou brzdou použít nelze, nicméně na předním kole tomu nic nebrání. Tím se dostávám k věci, na kterou jsem si během pár najetých kilometrů na tomto kole nedokázal zvyknout a myslím, že bych si na ni nezvykl vůbec. Jde o rekuperační brždění, které má vynikající brzdny účinek na zadním kole a jejím využitím se výrazně šetří opotřebení brzd. Tento systém je při stisknutí mechanické brzdy vyřazen z provozu a místo toho, aby se brzdny účinek zvýšil, se kolo rozjede rychleji. Dalším problémem je, že páka k ovládní rekuperačního brždění je umístěna nad pákou přední brzdy. Když už tedy dojde k oné opsané situaci při brždění, uživatel je odkázán pouze na brzdny účinek zadní špalkové brzdy, protože přechytnutí na druhou páku přední brzdy je v krizové situaci velmi zdoluhavý proces. Tento problém omezuje velký potenciál rekuperačního brždění a i z hlediska bezpečnosti není toto uspořádání dobré. Poslední věc je patrná z konstrukce samotného elektrokola a tou je vysoké těžiště a tím i horší ovládní. Nicméně bych řekl, že jako přestavba obyčejného kola je toto uspořádání pohonu nejvhodnější. K vyřešení tohoto problému by bylo třeba zasahovat do konstrukce rámu popřípadě mít rám vlastní výroby, který s tímto pohonem již počítá.



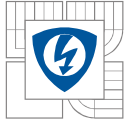
11 ZÁVĚR

Kompletace akumulátoru proběhla úspěšně. Započala výrobou rámu z termoplastu, který tvoří svojí pevností ochranný prvek po celém obvodu akumulátoru. Zároveň také tvoří podkladovou plochu pro montáž ochranného obvodu. Ten je umístěn uvnitř rámu na distančních sloupcích. K rámu je také přiděláno relé k odpojení zátěže, tlačítka pro jeho manuální ovládání a konektor jack, který zajišťuje zpětnou vazbu od BMS k nabíječce. Z obou stran akumulátoru je připevněna mikroporézní pryž. Takto zkompletovaný akumulátor byl vložen do na míru ušité brašny. Na vývody z brašny byly nainstalovány konektory faston, které propojují pohon kola s akumulátorem.

U akumulátoru bylo třeba změřit kapacitu. Toto měření nám poskytlo zajímavé údaje nejen o kapacitě, ale i o vlivu používání a skladování na úbytek kapacity. Kapacita byla změřena nejen u nově vytvořeného akumulátoru, ale i u akumulátoru původního. Původní akumulátor složený z článků Panasonic 2,15Ah měl původní kapacitu 45,15Ah. Námi změřená hodnota byla 31,33Ah což odpovídá 31% úbytku kapacity. U nově vytvořeného akumulátoru z článků Sanyo 2,3Ah byla původní kapacita udávaná výrobcem 48,3Ah. Naměřená hodnota potom byla 40,33Ah, což odpovídá 16,5% úbytku kapacity. Funkčnost ochranného obvodu byla ověřena při měření akumulátoru, jehož odpojení při vybití obstaralo právě BMS a to na hodnotě přibližně 3,1V jednoho ze sériových článků. Ochrana proti překročení horní hranice napětí byla vyzkoušena při rychlonabíjení. Zde bylo konečné napětí asi 4,1V na sériový článek. Na základě zpětné vazby od obvodu BMS začala nabíječka při dosažení tohoto napětí omezovat proud.

Po odměření akumulátoru, otestování BMS a uložení do brašny následovala montáž na elektrokolo. Akumulátor je připevněn pomocí dvou suchých zipů a jednoho stahovacího pásku. Elektrokolo bylo třeba podrobit testu jak se stávajícím akumulátorem, tak s nově vytvořeným. K testování byly zvoleny dva kopce o různém stoupání. Nově vytvořený akumulátor byl ve všech ohledech lepší. Výrazně se zlepšila dynamika jízdy. Všechny testované jízdy byly provedeny bez pomoci příšlapem. Cestovní rychlost elektrokola byla podle měření odhadnuta na 42km/h při protivětru. Špičková maximální rychlost změřená jízdou po rovině byla 48km/h.

Ani jeden akumulátor neobsahuje balanční obvod. Bylo tedy třeba se zamyslet, zdali je to chyba, anebo může být tento systém bez pasivního napětového balancingu bezpečně používán. Výhodou ochranného obvodu vyvinutým na UVEE je fakt, že při nabíjení má nabíječka zpětnou vazbu od BMS. Tím pádem nemůže dojít k přebití žádného ze sériových článků. To znamená, že pokud by měl jeden ze sériových článků menší kapacitu než ostatní, budou se ostatní sériové články nabíjet pouze na tuto nižší kapacitu a provoz akumulátoru bude dál zcela bezpečný. Důležité je si uvědomit, že tento fakt platí pouze za použití tohoto systému a u nabíječky, která nemá zpětnou vazbu od BMS je balanční obvod nutností.



LITERATURA

- [1] Sanyo cell type UR18650F. *Battex* [online]. [cit. 2015-11-16]. Dostupné z: <http://shop.battex.cz/pdf/1S1P-UR18650-K.pdf>
- [2] VOREL, Pavel. *LITHIUM-IONTOVÝ TRAKČNÍ AKUMULÁTOR PRO ELEKTRICKÉ KOLO* [online]. Plzeň, 2006, 2015-11-18 [cit. 2015-11-18].
- [3] Types of Lithium-ion. *Battery university* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [4] Block diagram. *HY2213 datasheet* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.hycontek.com/attachments/Battery/DS-HY2213_EN.pdf
- [5] KOVÁŘ, Robert. *TRAKČNÍ AKUMULÁTOR LI-ION 28V/40AH S VESTAVĚNÝMI OCHRANNÝMI A OVLÁDACÍMI PRVKY*. BRNO, 2010. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.