

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Li-ion akumulátorový pack pro elektrický skútr

Bc. Libor Palivec

Diplomová práce

2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Libor Palivec**
Osobní číslo: **D16388**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Název tématu: **Li-ion akumulátorový pack pro elektrický skútr**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je výroba kompaktního akumulátorového packu pro elektrický skútr. Uvažovaný elektrický skútr je poháněn BLDC motorem o jmenovitém výkonu 1,5kW, o jehož řízení se stará příslušný měnič v kombinaci s akumulátorovým packem o jmenovitém napětí 48V DC. Předmětem práce diplomanta bude návrh sofistikovaného battery managementu pro Li-ion 48V pack, výroba BMS, výroba packu a mechanická montáž. Dále bude provedeno měření charakteristik packu a test funkčnosti BMS v limitních stavech přetížení, přehřátí, apod.

Specifikace zařízení a úkoly diplomanta:

1. Hlubší seznámení s problematikou Li-ion technologie akumulátorů
2. Definice stěžejních specifik Li-ion technologie z pohledu bezpečnosti, bezproblémového provozu a dlouhé životnosti
3. Seznámení s poháněným vozidlem, elektrické zapojení a parametry
4. Možné přístupy k řešení energetického zásobníku vozidla
5. Návrh vhodné koncepce packu ve vztahu k vozidlu
6. Návrh vhodného battery managementu vozidla včetně funkcionality balancování
7. Výroba battery managementu
8. Sestavení packu
9. Oživení packu jako celku
10. Test kompaktního packu jak v laboratorních podmínkách tak přímo na vozidle

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.

LINDEN, David a Thomas B. REDDY. Handbook of Batteries: Third edition. McGraw-Hill, 2002, , 1454. ISBN 0-07-135978-8

KISLITSYN, Ph.D.Mikhail. Li-ion Batteries Basics. s. 40

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **20. prosince 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2018**



doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.



Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. března 2018

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 17. 5. 2019

Bc. Libor Palivec

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Ondřeji Sadílkovi Ph.D., za širokou odbornou podporu, předání praktických zkušeností a obětavost při řešení problémů vzniklých při tvorbě mé diplomové práce.

Anotace

Diplomová práce „Li-ion akumulátorový pack pro elektrický skútr“ rozebírá problematiku baterií používaných k pohonu elektrických vozidel. Zabývá se nutností ochrany moderních akumulátorů před nepříznivými provozními stavy a dopady nevhodných podmínek, v nichž se akumulátory provozují. Vnáší také základní pohled na nabídku na trhu elektrických vozidel, tzn. elektrických koloběžek, kol, skútrů, elektromobilů, apod.. Ve vztahu ke konkrétnímu elektrickému vozidlu je v práci navržen, vyroben a zprovozněn nový zdroj, který demonstruje možnosti zlepšení parametrů sériově vyráběných strojů. K samotné baterii je v práci popsán vývoj, kompletace a oživení příslušných ochranných a balančních obvodů. Celkové výsledky práce jsou shrnuty při měření nabíjení a vybíjení na kompletně sestavené baterii se zapojenými ochrannými a balančními obvody.

Klíčová slova

Akumulátor, baterie, BMS, BLDC, měnič napětí, elektrický skútr, elektrické pohony, elektromobilita, elektrické vozidlo, Li-ion.

Title

Li-ion battery pack for electric scooter

Annotation

This diploma thesis called „Li-ion accumulator pack for electric scooter“ examines the topic of batteries used in electric vehicles. It focuses on the necessity of protecting modern accumulators from unfavourable operating state and impacts of unsuitable conditions. Moreover, it briefly introduces the view of electric vehicles supply, including bicycles, scooters, electric cars, and others. In view of a particular electric vehicle, the author has designed, manufactured and put into operation a new battery pack, which demonstrates the possibilities of mass-produced machines specifications improvement. Also, the work describes the developing, assembling and running of corresponding safety and balance circuits. The overall results of the thesis are summarized due to taking measurements of the completely assembled battery being charged and discharged with the protective and balance circuits on.

Keywords

Accumulator, battery, BMS, BLDC, power inverter, electric scooter, electrical drive, electromobility, electric vehicle.

OBSAH

OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 Současný pohled na elektromobilitu.....	10
1.1 Elektropohony v silniční dopravě	11
1.1.1 Porovnání z hlediska hmotnostní hustoty energie	11
1.1.2 Akumulátory v silničních vozidlech.....	12
1.1.3 Elektrické pohony v silničních vozidlech.....	12
1.1.4 Hybridní vozidla	13
1.2 Mikroelektromobilita	14
1.2.1 Hoverboardy	15
1.2.2 Elektrické jednokolky	16
1.2.3 Elektrické longboardy.....	16
1.2.4 Elektrické brusle	17
1.2.5 Elektrické koloběžky	17
2 Lithiové baterie	18
2.1 Technologie Li-ion akumulátorů.....	18
2.2 Významné parametry Li-ion článků.....	19
2.3 Ochrany akumulátoru.....	20
2.4 Topologie baterií	22
2.5 Způsoby balancování	23
2.5.1 Pasivní.....	23
2.5.2 Aktivní	23
2.6 Ochranné a balanční obvody.....	23
2.6.1 ISL94212	24
2.6.2 BQ77905.....	25
2.6.3 BM3451	26
2.6.4 LTC 3300-2.....	27
2.6.5 R5432V	28
3 Popis elektrického skútru a koncepce úprav.....	29
3.1 Elektrický skútr Akumoto A10/60.....	29

3.2	Návrh nového pohonu ve vztahu ke skútru.....	29
3.3	Výběr základu pro BMS.....	31
4	Realizace akumulátorového packu	32
4.1	Bateriová deska	32
4.1.1	Dimenzování vodivých cest.....	32
4.1.2	Měření a řízení teploty	33
4.1.3	Interface	34
4.2	Deska BMS	35
4.2.1	Výběr komponent	35
4.2.2	Popis návrhu DPS	38
5	Validační měření.....	42
5.1	Prvotní testy	42
5.1.1	Měření ochran při vybíjení	43
5.1.2	Měření ochran při nabíjení.....	44
5.1.3	Měření funkce balancování baterie	45
5.2	Zapojení s realizovanou baterií	46
5.2.1	Měření zatěžovacích charakteristik	46
5.3	Ověření funkce v elektrickém skútru	50
6	Závěr	51
7	Seznamy.....	53
	Seznam použitých součástí	53
	Seznam použité literatury	53
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	56
	Seznam příloh	56
	Přílohy.....	57

ÚVOD

Všichni jsme svědky svižných tendencí odklánět se od zavedených procesů získávání, distribuce i spotřeby energie. Líbí se nám myšlenka využívat obnovitelnou energii pro výrobu elektřiny, líbí se nám komfort bezdrátového dobíjení mobilních telefonů, líbí se nám využívání elektřiny pro pohon dopravních prostředků. S rostoucím dosud relativně nekonvenčním získáváním a využíváním elektřiny se kladou nové požadavky v cestě přenosu energie. Čím dál více se vyžaduje elektrickou energii skladovat. Nejen pro mobilní provoz spotřební elektroniky, nejen pro možnost jezdit vozidly i mimo dosah trakčního vedení, ale i pro vyrovnávání nerovnoměrností výroby a spotřeby elektrické energie, způsobené zejména výrobou elektřiny z obnovitelných zdrojů. Všechny tyto oblasti doslova čekají na každý uplatnitelný pokrok ve vývoji akumulátorových článků, případně zlepšení výkonových parametrů celých baterií. Náhrada původního zdroje energie v konkrétní aplikaci, a to elektrickém skútru, je jedním z cílů této práce. Výroba nové baterie má demonstrovat možnosti, které nové technologie akumulátorů přinášejí.

Otázkou maximalizace efektivity samotných akumulátorů se zabývá spousta firem, neustále dochází ke zlepšování technologie výroby, k objevům nových, vhodnějších materiálů pro výrobu, s tlakem na snižování jejich (alespoň měrné) ceny. Hlavním vývojovým proudem jsou nyní články založené na kombinaci určitého materiálu spolu s lithiem. Oproti starším typům akumulátorů, např. na bázi niklu, mají tyto specifické požadavky na nabíjení, vybíjení i skladování, resp. jsou na tyto požadavky výrazně citlivější. Nedodržením podmínek stanovených výrobcem dochází k nevratnému poškození článku, bohužel může dojít i k výbuchu a následnému požáru. K zajištění spolehlivého a bezpečného provozu se využívají ochranné obvody, jež mají za úkol sledovat všechny články akumulátorové baterie. V případě zjištění překročení pracovního rozsahu některého se sledovaných parametrů baterie, ochranné obvody učiní patřičný zásah, kterým zamezí poškození článků. Ochranné obvody mimo jiné zásadním způsobem ovlivňují bezpečnost akumulátorového systému. Pro nejvyšší možnou efektivitu využití uložené energie v bateriích složených ze 2 a více článků, resp. omezení nepříznivých jevů, které se časem v bateriích objevují, se využívají balanční obvody. Návrh, výroba, oživení a měření takových obvodů je další částí této práce.

1 Současný pohled na elektromobilitu

Elektromobilita není rozhodně převratným objevem posledních let. Naopak s elektrickými pohony se začalo již v úplných počátcích automobilismu, kdy byla doba poznamenána postupným odklonem od parních pohonů a zavádění všeobecné elektrifikace. Ve stejné době se začala objevovat elektrická trakce i u kolejových vozidel. Kolejová, resp. drážní vozidla ale začala využívat tzv. **závislé trakce**. Závislou trakci tvoří externí zdroj energie pro jednotlivá vozidla, typicky nějakou formou kontaktního vedení, z něhož sběrač na vozidle během jízdy odebírá elektrickou energii potřebnou k jízdě. Tím, že je napájecí napětí pod trakční soustavou přítomno nepřetržitě, byl celý koncept elektrických drážních vozidel jednodušší o chybějící problematiku ukládání potřebné trakční energie přímo na vozidle. Tato forma napájení elektrických vozidel se dnes široce využívá a ve značné míře se bude pro svoje výhody oproti nezávislé trakci používat i v budoucnu.

Vozidlo, které má vlastní, mobilní zdroj energie, se nazývá vozidlo **nezávislé trakce**. Na počátku automobilismu byly elektrochemické zdroje energie velice jednoduché a z dnešního pohledu neefektivní, takže velmi záhy byly nahrazeny motory spalovacími, využívající fosilní paliva, které umožnily větší dojezd i výkon, při nižší výrobní ceně. Během 20. století došlo k výraznému rozvoji spalovacích motorů, ke zvýšení jejich efektivity a s postupem času se do popředí začala dostávat problematika vypouštěných emisí, hluku a energetické efektivity. Snižování emisních limitů nutí výrobce motorů využívat množství nových technologií, nové motory jsou neustále složitější a fyzikální podstata snižování emisí škodlivin a emisí skleníkových plynů (zvyšování účinnosti motoru) v rámci spalovacího procesu jde proti sobě. Konstrukteři si tak v 21. století začínají osvojovat technologie založené na trakčním využívání elektrické energie v kombinaci se spalovacím motorem tak, aby při homologačních zkouškách vyhověli požadovaným limitům na emise škodlivin a oxidu uhličitého, případně se rovnou vrací na počátek automobilismu a v podmínkách dnešních technologických možností konstruují dnešní, oproti tehdejším dobám použitelnější elektromobily.

Ovšem problematika elektromobilů nesahá pouze do oboru dopravy. Motivace snižovat emise škodlivin sice reflektuje situaci ve znečištění životního prostředí (zejména ve městech), což je poměrně lokální aspekt, stále více se skloňuje v souvislosti s pohledem na energetiku jako takovou. Pokud by energetika zůstala v době, kdy většina výroby elektrické energie pocházela z uhlí nebo jiných fosilních paliv, neměla by elektromobilita žádný význam z hlediska životního prostředí (kromě zmiňovaného lokálního znečištění ovzduší,

způsobeného koncentrací dopravy). Světová energetika ale v poslední době prochází poměrně bouřlivým vývojem, plynoucím z cílů např. „Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu“ nebo i jiných, mnohdy odvážných plánů samotných států. Tyto cíle upravují množství vypouštěného CO₂ do ovzduší. Omezenou možností, jak CO₂ snížit, je zvyšování účinnosti konvenčních energetických zdrojů, které narážejí na fyzikální možnosti a investiční náklady. Další možností jsou energetické úspory – a to jak na spotřebu elektrické energie, tak na spotřebu energie např. pro vytápění nebo ohřev TUV. Do popředí se ale dostaly zejména obnovitelné zdroje elektřiny, nejvíce pak fotovoltaické a větrné elektrárny. Tyto mají velkou nevýhodu ve velkém rozptylu reálně dodávaných výkonů v závislosti na povětrnostních podmínkách. Geograficky nerovnoměrně rozložená místa výroby a spotřeby extrémně zatěžují energetickou přenosovou soustavu a vyžadují značné regulační výkony, které se navíc mohou rychle měnit. Elektromobily by dle jednoho názorového proudu měly přispívat ke stabilizaci sítě tím, že by docházelo k jejich nabíjení v době, kdy je elektřiny na trhu nadbytek. Někteří dokonce mluví i o tom, že by se samy měly na regulaci sítě podílet tím, že využijí kapacitu svých akumulátorů pro tok energie oběma směry (tedy i zpět do distribuční sítě). To je důkazem, jak rozsáhlou roli mají elektromobily v budoucnosti hrát.

1.1 Elektropohony v silniční dopravě

Jak již bylo v úvodu zmíněno, elektrická závislá trakce, ať už kolejová nebo silniční, je v současné době dobře zvládnutá, úspěšně se provozuje a výhledově se také provozovat ještě dlouho bude. Elektrická nezávislá trakce, tzn. dopravní prostředky napájené z baterií, je ale stále intenzivně vyvíjená, aby se mohla stát rovnocenným konkurentem vozidel poháněných spalovacími motory. Největší slabinou elektrických vozidel je totiž jejich omezený dojezd, který činí typicky čtvrtinu až polovinu hodnoty dojezdu srovnatelného vozidla se spalovacím motorem. Je to důsledkem nízké objemové i hmotnostní hustoty energie baterií ve srovnání s naftou nebo benzínem.

1.1.1 Porovnání z hlediska hmotnostní hustoty energie

Motorová nafta má výhřevnost přibližně 42 MJ/kg. To znamená zhruba 11,67 kWh/kg.

Lithiová baterie pak dle typu mezi 0,10-0,26 kWh/kg.

Budeme-li uvažovat třetinovou účinnost spalovacího motoru (30%) oproti elektrickému pohonu (90%), dostaneme hodnotu 3,89 kWh/kg trakční energie z nafty nebo benzínu. Znamená to, že pro dosažení obdobného dojezdu je třeba 15násobné až 39násobné hmotnosti baterie oproti spálenému množství paliva. Pokud na 1000 km spotřebuje automobil při průměrné spotřebě 5 l / 100 km a hustotě nafty 860 kg/m³ 43 kilogramů paliva, pak by

srovnatelný elektromobil musel být vybaven baterií o hmotnosti 645 – 1677 kg! Z toho plyne obrovská nevýhoda elektromobilů, kdy navzdory vysoké účinnosti samotného elektrického pohonu není možno dosáhnout za současných technologických možností srovnatelného dojezdu s vozidlem se spalovacím motorem. Větší baterie, umožňující delší dojezd, prudce zvyšuje pohotovostní hmotnost vozidla, což je nežádoucí jak z hlediska energetické efektivity, tak i z praktických důvodů (omezení užitečného zatížení v rámci limitu celkové hmotnosti) a mimo hmotnosti pak samozřejmě také cenu.

1.1.2 Akumulátory v silničních vozidlech

Za posledních 30 let se vystřídal v elektromobilech všechny hlavní typy akumulátorů. Na počátku se jednalo o olovené trakční akumulátory, např. v letech 1992-1994 ve vozidle Škoda Favorit Eltra 151L šlo o sériové řazení 14 kusů baterií 6 V / 180 Ah, což v součtu znamenalo 15,12 kWh.

Nástupce tohoto vozidla Tatra (Škoda) Beta z let 1994-1997 již využívala modernější a na údržbu méně náročné akumulátory NiCd v počtu 30 kusů 6 V / 100 Ah, dohromady tedy 18 kWh energie.

V letech 1998-2002 vyráběla zahraniční automobilka Toyota model RAV 4EV a vybavila jej 24 kusy NiMH akumulátorů 13,2 V / 95 Ah s celkovými 30 kWh.

Technologickou řadu akumulátorů pak zakončil v letech 2004-2005 vůz Mitsubishi Colt již s lithiovými moduly Li-ion v konfiguraci 22 kusů modulů 14,8 V / 40 Ah, kde se každý modul skládal ze 4 kusů článků. Dohromady tedy disponoval 13 kWh. Od této doby se lithiové články začaly prosazovat stále častěji s tím, jak klesala jejich cena.

Nutno dodat, že všechny elektromobily té doby měly zanedbatelný tržní podíl s nejméně nízkými tisíci vyrobených kusů a ke skutečnému rozvoji ve smyslu počtu vyrobených vozidel dochází až v nedávné době.

1.1.3 Elektrické pohony v silničních vozidlech

Historie byla rovněž svědkem rozmanitých technických řešení samotných elektrických pohonů, tzn. elektrických motorů a regulací jejich výkonu. Nejprve šlo o stejnosměrné sériové stroje (Škoda Favorit Eltra 151L), případně stejnosměrné stroje s cizím buzením (Peugeot 106 Electrique). Díky vývoji polovodičových střídačů bylo umožněno aplikovat asynchronní třífázové motory, které kromě úspory energie a snížení hmotnosti přinesly také podstatné zvýšení životnosti a snížení servisní náročnosti oproti komutátorovým motorům. Dalším stupněm, který si kladl za cíl další úspory energií a zvyšování výkonu motoru vzhledem k jeho velikosti a hmotnosti, bylo využití třífázových synchronních motorů s permanentními

magnety a to konkrétně v letech 1994-1998 ve vozidlech Volkswagen Golf City Strömer. Dnes se setkáváme v nových vozidlech s motory asynchronními, synchronními s permanentními magnety PMSM, resp. bezkomutátorovými stejnosměrnými motory s permanentními magnety BLDC.

Co se týče měničů pro regulaci výkonu trakčních motorů, v počátcích šlo u stejnosměrných pohonů o tyristorové pulsní měniče, jejichž spínací prvky byly v rámci vývoje brzy nahrazeny tranzistory MOSFET nebo IGBT. Ve střídavé trakci pak bylo použito střídačů s frekvenčním procesorovým řízením, využívající tranzistory MOSFET, později pak IGBT.

Způsob přenosu točivého momentu elektromotoru na kola je dán možnostmi, jaké nabízí použitý elektromotor. Dříve, v dobách stejnosměrných sériových motorů se používaly převodové skříně, které zajišťovaly výhodnější pracovní bod na momentové charakteristice motoru. Cize buzené motory s vyrovnanější charakteristikou momentu se již obešly bez vícerychlostní převodovky a dán byl pouze stálý převod, díky čemuž se zvýšily otáčky motoru a nebylo třeba navrhovat rozměrný a těžký pomaluběžný stejnosměrný stroj s vysokým točivým momentem. Obdobná situace byla u motorů asynchronních. Koncepce se mohla změnit až s příchodem kompaktních synchronních motorů s permanentními magnety, které díky své konstrukci umožnily pohon každého kola zvlášť, dokonce se mohly stát součástí náboje kola. To přineslo značné úspory energie, hmotnosti a náročnosti na servis, navíc konstruktéři mohli využít daleko větších možností v dynamice vozidla z hlediska kontroly prokluzu, stabilizačních systémů, asistentů průjezdu zatáčkou, což je u běžných diferenciálů problematické a omezené.

1.1.4 Hybridní vozidla

Hybridní vozidla jsou jakýmsi přechodem mezi konvenčními automobily a elektromobily. Kombinují výhody i nevýhody obou koncepcí. Disponují klasickým spalovacím motorem menšího výkonu, který doplňuje v určitém spojení elektromotor. Výkon spalovacího a elektrického motoru je rozdělen podle míry „elektrizace“ vozidla. Hybridní vozidla (ať už jakéhokoliv typu) mají nespornou výhodu ve využívání jindy brzdami mařené kinetické energie, jejich výhoda je tedy zejména provoz ve městech, s častými rozjezdy a zastaveními. Spalovací motor při chladném počasí dodatečně zvyšuje energetickou využitelnost paliva vytápěním kabiny (princip kogenerace – kombinované výroby kinetické energie a tepla). Elektrický motor umožňuje držet motor spalovací v nižších otáčkách, případně pro nízké rychlosti a zatížení sám převezme roli hlavního trakčního pohonu. Obojí šetří palivo a emise.

Mild-hybrid tvoří elektromotor spojený trvale se spalovacím motorem (někdy i pouze přes drážkový řemen pohonu příslušenství, jindy může být součástí setrvačnicku motoru). Elektromotor tedy nemůže pohánět automobil samostatně. Vozidla této koncepce již mívají rozdělenou palubní a trakční napájecí síť, každá z nich má svoje akumulátory. Rozdělení sítě bylo nutné, z hlediska výkonové nedostatečnosti palubní sítě na napěťové hladině 12 V.

Full-hybrid již nemá pevně svázaný elektromotor se spalovacím motorem, proto umožňuje jízdu čistě na elektrický pohon. **Sériový hybrid** má umístěný elektromotor v hnacím řetězci mezi koly a spalovacím motorem, typicky je navázaný na převodovku. Rozpojením spojky je tak možný pohyb vozidla se zastaveným spalovacím motorem. **Paralelní hybrid** pak umožňuje zcela nezávislý pohon na spalovací motor, na elektromotor, případně na oba současně. Buď je elektromotor umístěn úplně mimo hnací řetězec spalovacího motoru (např. na druhé nápravě) nebo je spojen se stejným hnacím řetězcem pomocí planetové převodovky, která umožňuje přenos točivého momentu nezávisle na otáčkách druhého motoru.

Plug-in hybrid je pouze nadstavbou nad všemi typy hybridních vozidel a to přidanou funkcionalitou dobíjení z distribuční sítě a tím prodloužení dojezdu čistě na elektrinu.

1.2 Mikroelektromobilita

Zcela novým oborem v rámci elektromobility a v podstatě hitem posledních let je miniaturizace elektrických zdrojů a elektrických pohonů do takové míry, že je možné instalovat je i do nejmenších vozítek, které byly dosud poháněny lidskou silou. Některé dopravní prostředky (např. již dobře známé segwaye) do té doby ani vůbec neexistovaly. Otevírají se tak zcela nové možnosti, jak pojímat individuální přepravu osob. V ideálním případě pak lze dosáhnout snížení intenzity provozu na pozemních komunikacích, při zachování určitého pohodlí a jízdní doby. Rovněž lze zrychlením individuálních přesunů (a možností takový dopravní prostředek vzít s sebou do vozidla veřejné dopravy) rozšířit využívání příměstské hromadné dopravy, neboť taková kombinace se začne jevit časově i cenově velice výhodně. Velice nízká spotřeba (méně než 1 kWh / 100 km), plynoucí z malé hmotnosti i rozměrů vozidla vůči přepravované osobě, je důležitým ekologickým i ekonomickým aspektem. Účel použití, tj. jízda malou rychlostí (do 25 km/h) na krátké vzdálenosti (do cca 10 km), umožňuje dimenzovat baterie na udávaný maximální dojezd okolo 30 km, při výkonu zhruba 250 W, aniž by pohonná jednotka neúměrně zvyšovala hmotnost výrobku a zhoršovala tak jeho mobilitu, nemluvě o přijatelné výrobní ceně. V podstatě se dá říci, že aktuální technologie akumulátorů a elektrických pohonů v oboru

malých až miniaturních dopravních prostředků již **dostatečně splňuje požadavky** obsluhy na výkon a dojezd, při přijatelných rozměrech, hmotnosti a ceně výrobku. Rovněž potřebná elektrická infrastruktura je na rozdíl od větší elektrické nezávislé trakce bez potíží, díky malému potřebnému výkonu na dobíjení baterií (40 - 500 W), což jsou výkony potřebné pro napájení např. stolního počítače. Níže jsou uvedeny druhy vozidel spadající do této velikostní kategorie.

1.2.1 Hoverboardy



Obr. 1.1 Hoverboard - Standard BLK [5]

Standard BLK hoverboard	
Výkon motoru	2x 350 W
Maximální rychlost	12 km/h
Baterie	Li-ion 36 V / 4,4 Ah
Dojezd	20 km
Hmotnost	12 kg
Cena	6 199 Kč

Tab. 1.1 Technické údaje Hoverboard - Standard BLK

1.2.2 Elektrické jednokolky



Obr. 1.2 El. jednokolka - Inmotion V10F [6]

Inmotion V10F	
Výkon motoru	2000 W
Maximální rychlost	40 km/h
Baterie	Li-ion 75 V / 12,8 Ah
Dojezd	90 - 100 km
Hmotnost	20 kg
Cena	41 900 Kč

Tab. 1.2 Technické údaje Inmotion V10F

1.2.3 Elektrické longboardy



Obr. 1.3 El. longboard - Inmotion K1 [7]

Inmotion K1	
Výkon motoru	150 W
Maximální rychlost	20 km/h
Baterie	Li-ion 25,9 V / 2,15 Ah
Dojezd	8 km
Hmotnost	3,6 kg
Cena	5 990 Kč

Tab. 1.3 Technické údaje Inmotion K1

1.2.4 Elektrické brusle



Obr. 1.4 El. brusle - Segway Drift W1 [8]

Segway Drift W1	
Výkon motoru	2x 37,5 W
Maximální rychlost	12 km/h
Baterie	2x Li-ion 44,4 Wh
Dojezd	6 km
Hmotnost	2x 3,5 kg
Cena	9 890 Kč

Tab. 1.4 Technické údaje Segway Drift W1

1.2.5 Elektrické koloběžky



Obr. 1.5 El. koloběžka - Xiaomi Electric Scooter [9]

Xiaomi Mi Electric Scooter	
Výkon motoru	250 W
Maximální rychlost	25 km/h
Baterie	Li-ion 36 V / 7,8 Ah
Dojezd	30 km
Hmotnost	12,5 kg
Cena	10 900 Kč

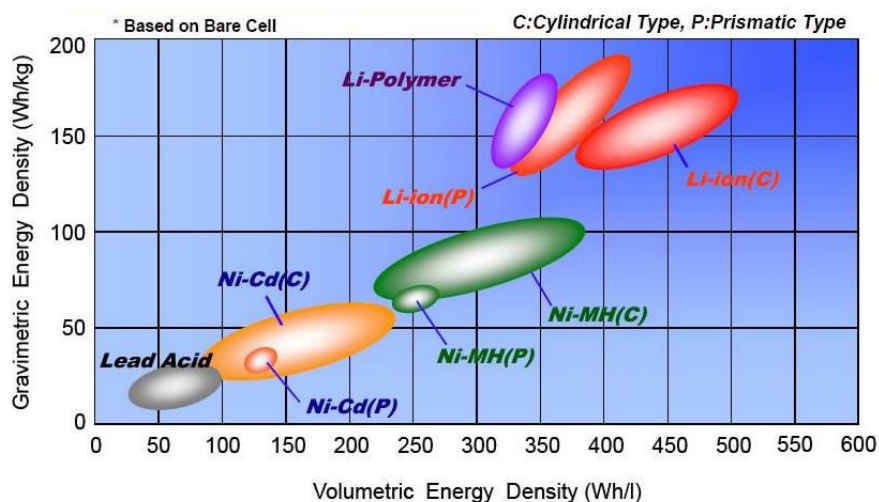
Tab. 1.5 Technické údaje Xiaomi Electric Scooter

2 Lithiové baterie

2.1 Technologie Li-ion akumulátorů

Aktuálně technicky nejdokonalější akumulátory, které jsou dnes masově využívány, jsou vždy založeny na lithiové technologii. To znamená, že článek v nějaké své aktivní části (katodě, anodě nebo elektrolytu), případně více částech obsahuje lithium. Konkrétní materiály jsou odlišné podle konkrétního podtypu. Navíc elektrolyt nemusí být vždy tekutý. Pokud je vyroben z pevného vodivého polymeru, hovoříme pak o akumulátorech lithium-polymerových (Li-pol). Vyráběny jsou buď v plochém provedení, tzv. prismatické (typicky použité např. v mobilních telefonech), ve válcovém tvaru, tzv. cylindrické (typicky skládané v baterie pro náročnější použití), případně v provedení tzv. pouch-cell, což jsou články plochého tvaru, hermeticky uzavřené pouze v ochranné fólii, z níž jsou vyvedeny ploché kontakty. Tvar článku ovlivňuje parametry **objemové hustoty energie** [Wh/l] a **hmotnostní hustoty energie** [Wh/kg]. Zpravidla vycházejí cylindrické články lépe v hmotnostní hustotě energie, oproti tomu prismatické dosahují lepších hodnot v objemové hustotě energie. Články typu pouch-cell mají výhodu v absenci pevného obalu, vykazují tedy nižší hmotnost i rozměry. Pevný obal je nutné dodat až v rámci kompletní baterie.

Oproti dříve používaným akumulátorům přináší lithiová technologie zejména mnohem vyšší hustotu energie a to jak objemovou, tak hmotnostní. V praxi to znamená zmenšení potřebných rozměrů a snížení hmotnosti při zachování stejné kapacity a výkonu nebo zlepšení výkonnostních parametrů. Porovnání hmotnostní i objemové hustoty energie lithiových článků s jejich předchůdci je zobrazeno na obrázku níže.



Obr. 2.1 - Porovnání článků z hlediska hm. a obj. hustoty energie [3]

Je evidentní, že rozdíly v hustotách energie jsou značné, ve prospěch nových typů akumulátorů. Nutno ovšem říct, že i starší typy akumulátorů mají stále svůj význam. Např. olověné akumulátory se stále výhodně používají jako startovací zdroje pro automobily, díky schopnosti dodat krátkodobě značný proud, přičemž navíc relativně dobře snáší velké proudové přetížení. Další vhodné použití je v energetických zásobnících, např. pro zdroje záložního napájení UPS. Zde většinou příliš nevádí velké rozměry a hmotnost olověných akumulátorů. Niklové akumulátory mají zase své opodstatnění tam, kde dochází k úplnému vybití článků, v důsledku primitivní elektroniky, kterou tyto články napájí. Ovšem během času lze očekávat ústup starších typů akumulátorů ve prospěch lithiových, jednak díky dalšímu zlepšení parametrů nových článků a také díky poklesu jejich ceny.

2.2 Významné parametry Li-ion článků

Akumulátory na bázi lithia zahrnují rozsáhlou podmnnožinu dílčích typů, které se odlišují aktivním materiálem elektrod. Každá varianta Li-ion akumulátoru má svá specifika a tudíž nelze hovořit v souvislosti s Li akumulátory pouze o jedněch typických hodnotách jednotlivých parametrů. Mezi základní typy Li článků patří LCO, LiFePO₄ (LFP), LTO, NMC, atd. Stěžejní parametry článků jsou uvedeny níže.

- U_N – jmenovité napětí článku (uvedené na pouzdru)
- U_{MAX} – nejvyšší provozní napětí
- U_{MIN} – nejnižší provozní napětí
- I_N – nejvyšší doporučený nabíjecí proud
- I_V – nejvyšší doporučený vybíjecí proud

Pozn.: překračováním hodnoty uvedených proudů dochází k rychlejšímu zahřívání článku a ke snižování životnosti. Uvedené proudy jsou vždy vztažené ke kapacitě baterie, proto nejsou uvedeny v absolutních hodnotách proudu (A), ale v hodnotách násobku jejich kapacity (C). Např. pokud budeme nabíjet akumulátor o kapacitě 5000 mAh = 5 Ah, hodnotou nabíjecího proudu 1C, bude výsledná absolutní hodnota proudu činit 5 A.

LCO - Lithium Cobalt Oxide (LiCoO ₂)		
	Typicky	Poznámka
U_N	3,6 V	
U_{MAX}	4,2 V	
U_{MIN}	3,0 V	(při vybíjení 2,5 V)
I_N	0,7-1C	
I_V	1C	

LFP - Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄)		
	Typicky	Poznámka
U _N	3,2/3,3 V	
U _{MAX}	3,65 V	
U _{MIN}	2,5 V	poškození pod 2 V
I _N	1C	
I _V	Až 3C	

LTO - Lithium Titanate (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)		
	Typicky	Poznámka
U _N	2,4 V	
U _{MAX}	2,85 V	
U _{MIN}	1,8 V	
I _N	1C	5C max.
I _V	10C	30C pulzně 5s

Tab. 2.1 Typické hodnoty lithiových akumulátorů typu LCO, LFP a LTO [4]

Z výše uvedených parametrů vybraných podtypů lithiových akumulátorů vyplývá, že pro zajištění bezpečnosti provozu a zároveň využití energetických možností článku, je třeba nastavit hodnoty ochrany co nejpřesněji k udávaným hodnotám konkrétního typu článku.

2.3 Ochrany akumulátoru

Jak již bylo v úvodu řečeno, provoz samotných akumulátorů nebo baterií vyžaduje dodržování výrobcem stanovených parametrů. A pokud byl nějaký externí dohled pro olověné nebo niklové akumulátory vhodný, pro lithiové je přímo nutný. U lithiových akumulátorů dochází při nadměrném vybití k rychlému a nevratnému poškození článku, projevující se zejména sníženou kapacitou a zvýšeným vnitřním odporem. Kromě zajištění stupně nabití během skladování (samovybíjení je u lithiových akumulátorů relativně malé), které ovlivní pouze odpovědná osoba, je třeba docílit, aby spotřebič napájený z daného akumulátoru nevybil článek nebo baterii pod určitou mez (pokles napětí pod hodnotu stanovenou výrobcem).

Naopak při nabíjení je nepřijatelné překročit maximální dovolené napětí. Při překročení dovoleného napětí začne docházet k zahřívání článku a výraznému snižování životnosti. V extrémním případě může přebíjení vyústit v růst tlaku uvnitř článku, jeho nafouknutí, a v možnou explozi. Nutno poznamenat, že lithium jako takové poměrně ochotně

hoří, což může způsobit i fatální zkázu celého zařízení. V případě dosažení maximální hodnoty napětí je nutno nabíjení okamžitě přerušit.

Mezní parametry nejsou stanoveny pouze spodní a horní hranicí napětí, ale také maximálními proudy nabíjení a vybíjení. K překročení nabíjecího proudu dojde v případě, použijeme-li nabíječ s nevhodnou nabíjecí charakteristikou. Proces nabíjení lithiového článku je složen z několika fází. V první fázi dochází k nabíjení maximálním přípustným proudem, kdy v čase roste napětí článku. Po dosažení stanovené hodnoty napětí dojde ke změně charakteru nabíjení na napětí – udržuje se konstantní napětí a nabíjecí proud klesá. Při poklesu nabíjecího proudu pod definovanou mez obvykle nabíječ přeruší nabíjení a s určitou hysterezí čeká na pokles napětí pod hodnotu opětovně spouštějící nabíjení. V případě nevhodně nastaveného nabíjecího proudu nebo i v případě závady na článku by mělo dojít k odstavení nabíjení.

Podobně je třeba hlídat i velikost vybíjecího proudu. Nadproud může nastat při špatně nastavené limitaci proudu na straně spotřebiče, při poruše tohoto zařízení, případně i při zkratu přívodních vodičů. Samotný zkrat lze diagnostikovat kromě měření proudu i měřením napětí – jeho poklesem hluboko pod mez dovoleného vybití.

Při hlídání stavu akumulátoru se neomezujeme pouze na elektrické veličiny. Důležitým parametrem je totiž teplota článku. Příliš nízká teplota (typicky pod 0°C) u některých podtypů lithiových akumulátorů znemožňuje správné nabíjení, neboť při nabíjení v teplotách pod bodem mrazu dochází k jeho poškození. Je tedy nutné zabránit nabíjení podchlazeného akumulátoru nebo velice omezit nabíjecí proud.

Ovšem i teplota nadměrná je nevhodná. Vznikne typicky přetížením při nabíjení nebo vybíjení, nevhodným umístěním s omezenou možností chlazení nebo naopak tepelným ovlivněním od okolních prvků. Přehřívání akumulátoru může být důsledkem jeho závady a naopak přehřívání je příčinou zkracování životnosti článku, dojít může i ke vznícení nebo explozi.

Uvedené mezní parametry dnes dokážou hlídat **ochranné obvody**, vyráběné s větší či menší funkcionalitou.

2.4 Topologie baterií

Ve většině aplikací si nevystačíme s parametry jednotlivých článků, ať už z hlediska požadovaného napětí, výkonu nebo kapacity. Sériovým, paralelním nebo sérioparalelním řazením článků vznikne akumulátorová baterie (dále jen „baterie“). Při sériovém řazení dosáhneme znásobení svorkového napětí podle počtu zařazených článků, při kapacitě dle použitých článků (v Ah). Celková energie (Wh) baterie je pak dána součinem kapacity a jmenovitého napětí baterie. Při paralelním řazení dosáhneme znásobení kapacity (a maximálního proudu) dle počtu článků, ale svorkové napětí baterie zůstane na hodnotě napětí jednoho použitého článku. Celková energie uložená ve stejném počtu stejných článků je při sériovém i paralelním řazení stejná. Sérioparalelní řazení článků v baterii je kombinací obou předchozích metod. Typicky se využívá při potřebě energeticky vydatnějších baterií, kde umožňuje využívat rozměrově relativně menší články, ale ve značném počtu.

Typické značení topologie sérioparalelních baterií vypadá takto:

xSyP,

kde:

x - počet článků řazených sériově v jedné skupině

y - počet těchto skupin řazených paralelně

Např. baterie 10S3P bude mít dohromady 30 článků – 3 skupiny řazené paralelně po 10 člancích v sérii.

Problémem při sestavování baterií jsou výrobní tolerance jednotlivých článků. Stačí minimální odlišnost ve vnitřním odporu článku a během provozu postupně dojde k tzv. rozbalancování baterie. Dojde k tomu, že každý z článků bude provozován s jinou energetickou hladinou a tento rozdíl se bude neustále prohlubovat. V praxi to znamená snížení využitelné kapacity baterie, neboť nabíjení bude ukončeno při dosažení maximálního napětí jednoho ze článků, ačkoliv ostatní stále nejsou plně nabity a vybíjení bude ukončeno při dosažení minimálního napětí jednoho ze článků (tak, aby byla zachována bezpečnost a spolehlivost baterie), ačkoliv ostatní články nejsou vybité. Lze zde použít analogie s ocelovým článkovým řetězem. Nejslabší (poškozený) článek stanovuje vlastnosti celého řetězu, v našem případě baterie.

Obvody, monitorující každý článek zvlášť a umožňují plné nabití a vybití každého z článků baterie, se nazývají **balancéry**. Jejich úkolem je udržovat napětí článků (resp. stupeň nabití) stejné napříč celou baterií.

2.5 Způsoby balancování

Technicky nejprimitivnějším řešením, jak dosáhnout jednorázového vybalancování baterie, je celou baterii rozebrat a jednotlivé články nabít samostatně na úroveň plného nabití a posléze opětovně složení článků v baterii. Teoreticky je možné takto lithiové akumulátory provozovat, v praxi se toho ale nevyužívá z důvodu složitosti.

Určitý typ pokročilejšího řešení balancování se nasazuje podle charakteru konkrétní baterie. Některé, vzhledem k jejich kapacitě, provoznímu proudu, druhu provozu, počtu článků, sklonem k rozbalancování, vyžadují více sofistikované (energeticky úspornější) řešení, než jiné. Tato řešení se dělí na **pasivní** a **aktivní**.

Nutné je upozornit na fakt, že balancéry mají určitou vlastní spotřebu a mohou způsobit vybití baterie pod dovolenou mez. V případě poruchy na balancéru pak může způsobit rychlé zničení článku nebo celé baterie.

2.5.1 Pasivní

Jednodušším, avšak v zásadě bezproblémově použitelným a většinou i nejvhodnějším řešením, je využití pasivního balancování pomocí specializovaného řízení. Toto se skládá z měření napětí jednotlivých článků a následnou iniciací balancovacího proudu pomocí spínacích prvků na jednotlivých článcích. Pasivní balancování je typické tím, že vyrovnávání napětí je ztrátové. Přebytečná energie je mařena v rezistorech, jimiž je dána velikost balancovacího proudu.

2.5.2 Aktivní

Složitějším, ale teoreticky efektivnějším řešením je použití DC-DC měničů namísto rezistorů, kde lze využít přebytečné energie jednoho ze článků pro článek s menším stupněm nabití. Odpadají tak ztráty na rezistorech při procesu balancování. Nevýhodou pro mnoho aplikací může být příliš složité, rozměrné a drahé řešení, kde případná úspora energie při balancování je nepřipustně malá ve srovnání s cenou, někdy dokonce spotřeba samotného aktivního balancéru je vyšší, než v případě jednoduššího pasivního balancéru.

2.6 Ochranné a balanční obvody

Ochranné a balanční obvody (BMS) dostupné na trhu se významně liší zejména v nabízené funkcionalitě. Některá řešení nabízí pouze dohled ochrany nad baterií, jiná nabízejí zejména možnosti balancování a jiná dokáží zajistit ochranu i balancování v jediném řídicím obvodu. Vzhledem ke konečné aplikaci pak do výběru vchází požadavek na rozměry, možnost parametrizace funkcí, (ne)omezení počtu obsluhovaných článků a možnosti datové komunikace s nadřazeným systémem. U mnoha obvodů je možné rozšířit maximální počet

článků spojováním jednotlivých částí baterie a pomocných obvodů. Obsloužit baterii složenou z 16 článků je tak možné např. spojením 4 obvodů, které umí obsluhovat každý samostatně 4 články. Informace o stavu dané části akumulátorového packu se přenáší zvláštním kanálem mezi jednotlivými obvody.

2.6.1 ISL94212

Tento řídicí obvod slouží k ochraně a pasivní balancování bateriových článků. Umožňuje připojení až 12 článků do jednoho pouzdra. Dovoluje tzv. stackování, tj. zřetězení obvodů při požadavku na větší počet současně zapojených článků. Podporuje ochranu proti přehřátí baterie, umí detekovat přerušeni kontaktu s některým ze článků (open-wire), zajišťuje samozřejmě ochranu proti podpětí a přepětí. Je vybaven komunikační jednotkou pro spojení s nadřazeným HW. Vyráběn je v 64 pinovém pouzdře TQFP.

ISL94212

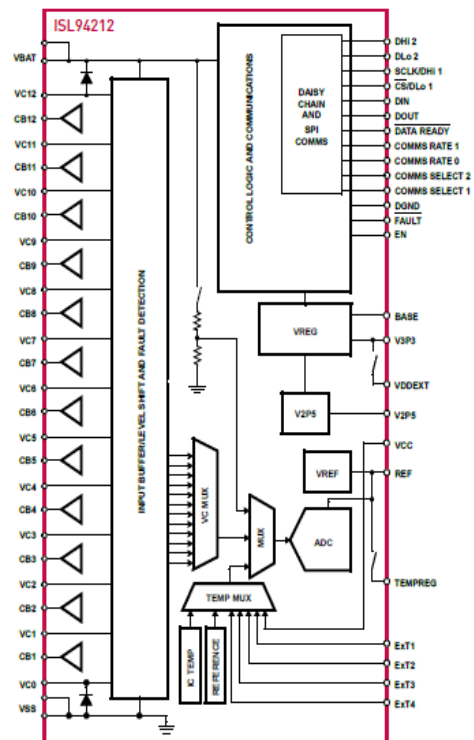


ISL94212EVZ

Multi Cell Battery Management and Balancing IC

Key Features

- Supervises up to 12 cells
- Daisy chain capable up to 14 devices or 168 cells
- Cell voltage measurement accuracy
 - $\pm 10\text{mV}$ from 0 to 50°C , 2.6 to 4.0V
- Cell voltage scan rate of $20\mu\text{s}$ per cell
- Simple daisy chain communications
 - Low cost twisted pair wiring for stacking
 - Capacitive isolation
- 2.5Mbps SPI - Stand alone & Daisy Chain
- Integrated system diagnostic functions:
 - Cell over and under voltage
 - Over temperature
 - Open cell monitoring wires
 - Open temperature monitoring wires
 - VBAT and VSS connection integrity
 - Voltage reference function
 - Oscillator function
 - Watchdog shutdown of IC if communications are lost
- Robust Hot-Plug performance
 - No hazardous conditions due to random connection of battery pack or cell wiring
 - No degradation due to hot plugging
- Extensive Cell Balance Control
 - Built-in cell balance FET drivers
 - Automatic cell balance based on manual control by μC , time, or target capacity



Obr. 2.2 Integrovaný obvod ISL94212 [10]

2.6.2 BQ77905

Výrobce Texas Instruments nabízí tento produkt zajišťující pouze ochranu jednotlivých článků baterie a nikoliv jejich balancování. Podporuje ochranu proti podpětí, přepětí, nedovolenému proudu při vybíjení i nabíjení, ochranu proti přehřátí a každý z obvodů umí obsluhovat nejvýše 5 článků. Obvody mohou být spojovány do rozsáhlejších celků. Vyráběn je v pouzdře TSSOP-20.

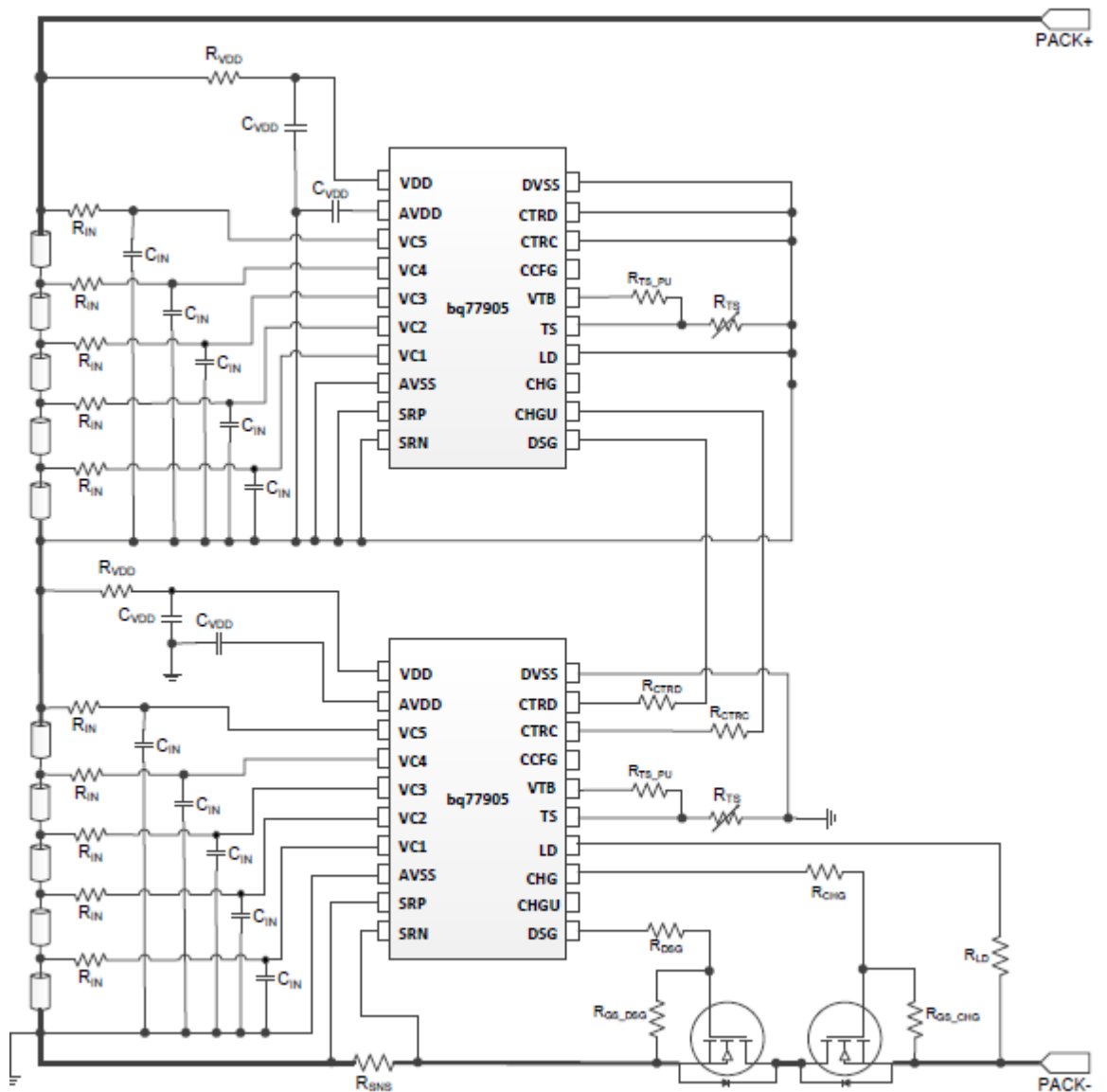


Figure 17. 10S Pack Using Two bq77905 Devices

Obr. 2.3 Doporučené zapojení pro integrovaný obvod bq77905 [11]

2.6.3 BM3451

Obvod BM3451 popisuje výrobce Bydít jako obvod určený pro ochranu a pasivní balancování nabíjecích baterií pro elektrické nářadí, elektrokola a UPS. Podporuje ochrany proti přebití, vybití pod dovolenou mez, ochranu proti zkratu nebo nadproudu při nabíjení i vybíjení, ochranu proti přehřátí a lze zde parametrizovat zpoždění a hystereze jednotlivých funkcí pomocí připojených externích kondenzátorů. Vyráběn je v pouzdře TSSOP-28.

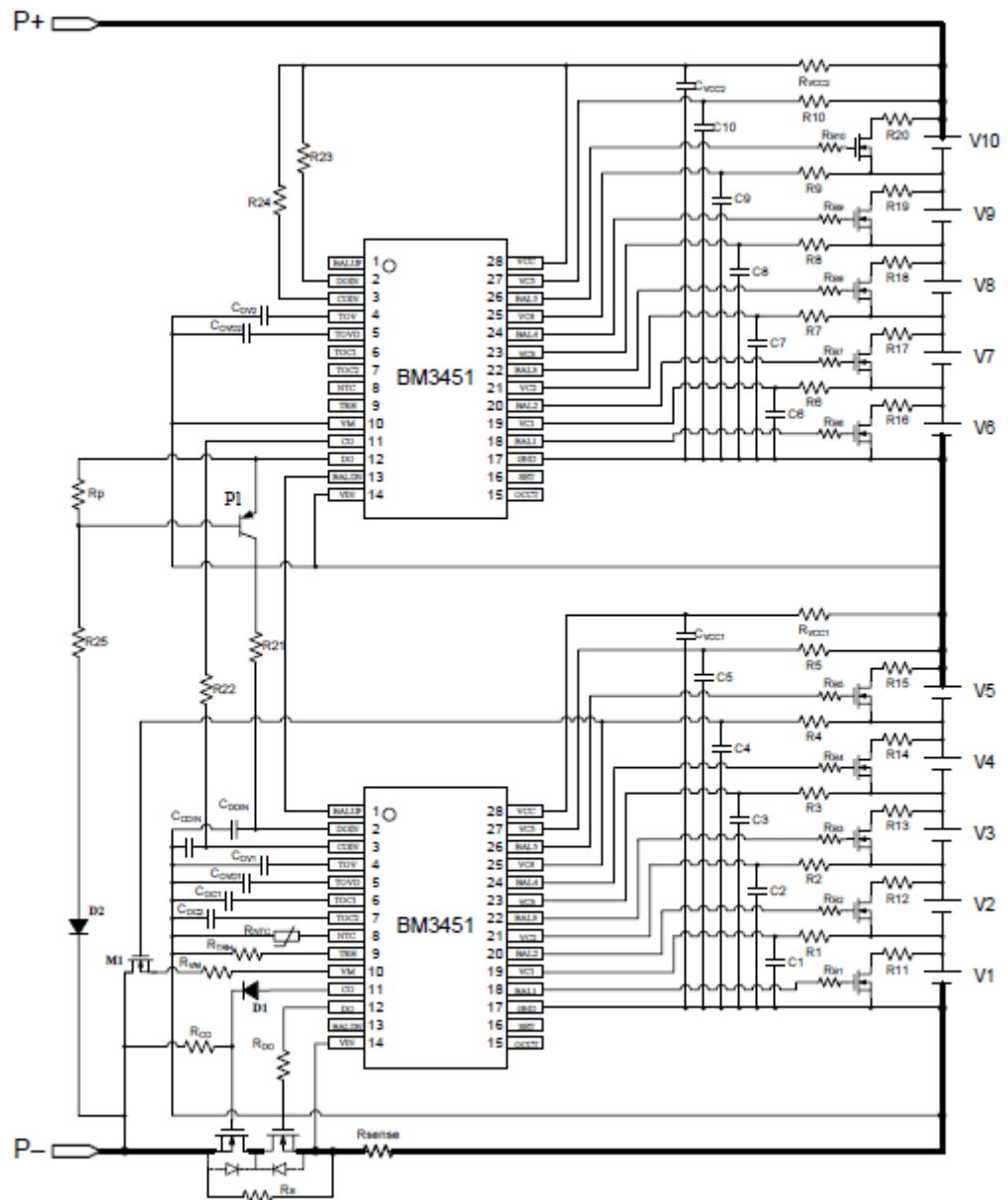


Figure 7 10-cell application — with balance function

Obr. 2.4 Doporučené zapojení pro integrovaný obvod BM3451 [12]

2.6.4 LTC 3300-2

Zástupcem obvodů schopných řídit aktivní balancování je LTC 3300-2 od výrobce Linear Technology. Zabezpečuje ochrany proti podpětí, přepětí, zkratu, ochranu před nadproudem při vybíjení i nabíjení. Umožňuje zřetězení pro dosažení vyššího počtu článků. Jeden obvod obsluhuje 6 článků. Podporuje komunikaci po sériové lince. Ze schématu doporučeného zapojení je jasně zřetelný složitější návrh aktivního balanceru z důvodu faktické realizace DC-DC měniče pro každý balancovaný článek. Pro spoustu aplikací je toto řešení zbytečně komplikované a drahé.

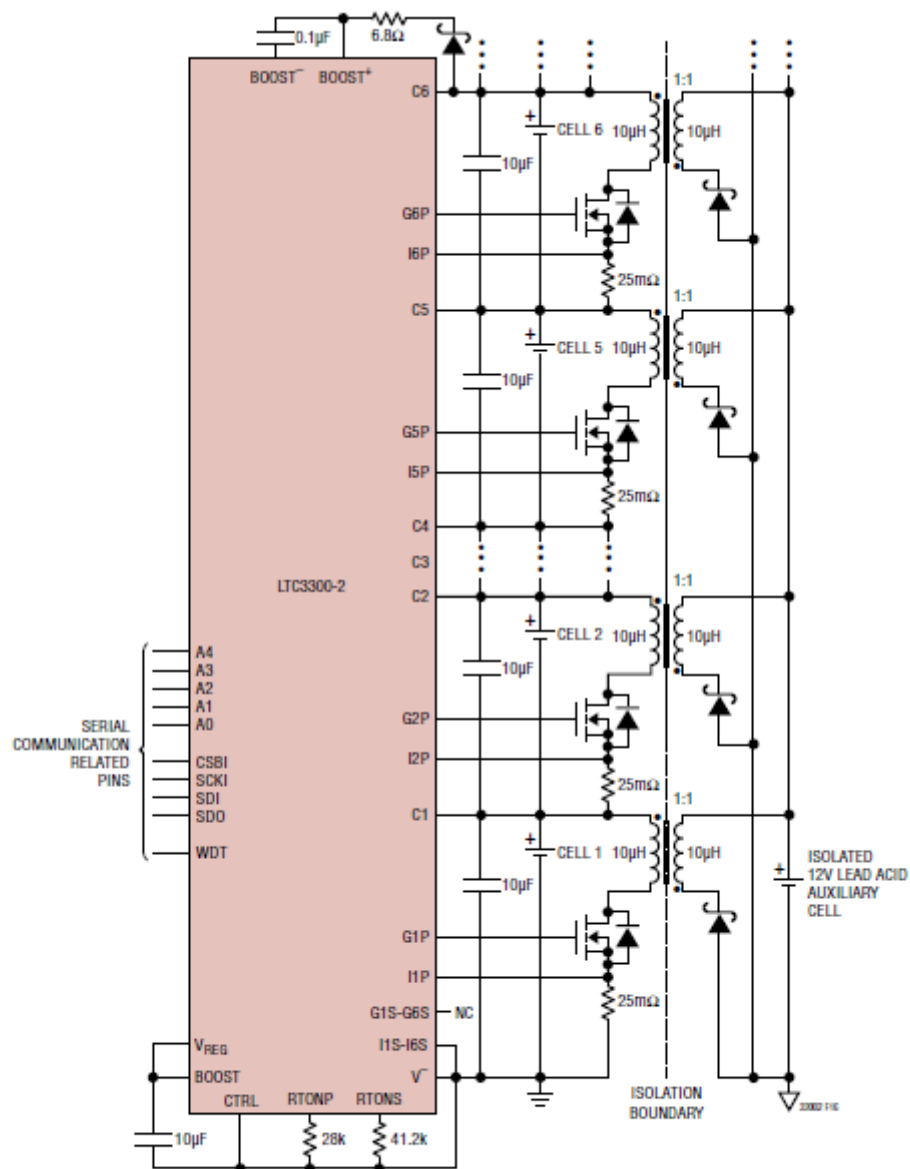
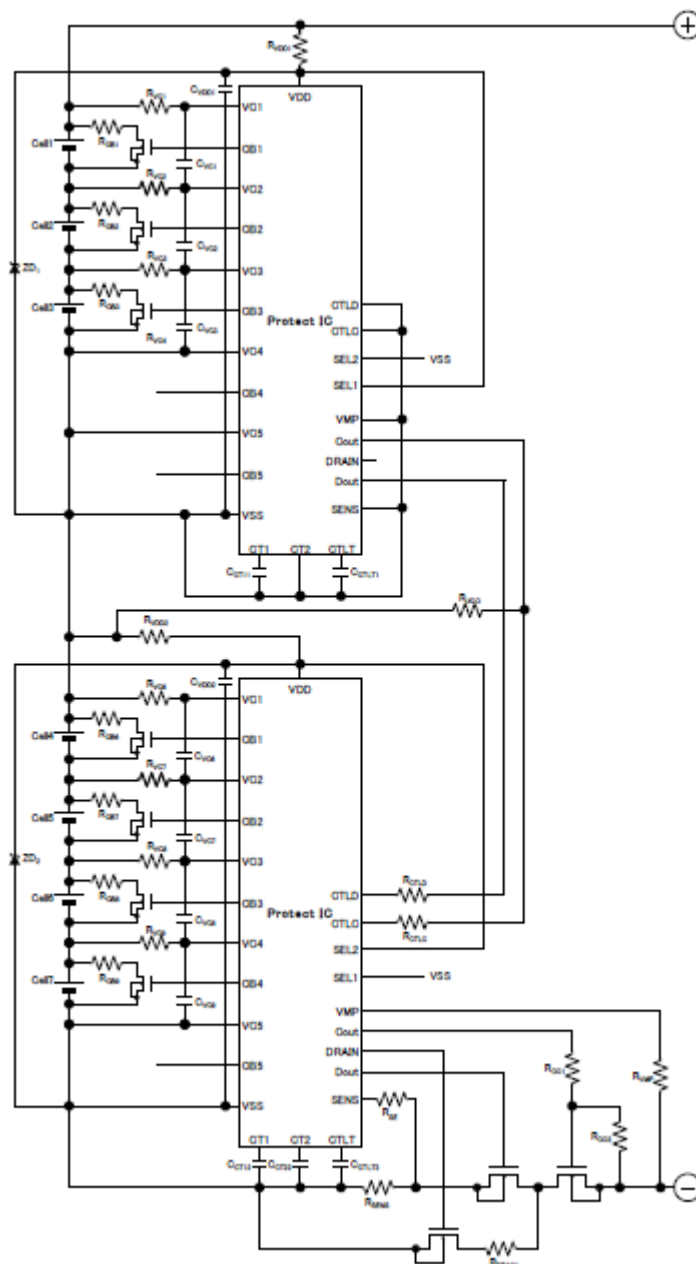


Figure 16. LTC3300-2 Unidirectional Discharge-Only Balancing Application to Charge an Isolated Auxiliary Cell

Obr. 2.5 Doporučené zapojení pro integrovaný obvod LTC3300-2 [13]

2.6.5 R5432V

Posledním ze zde uváděných obvodů je řada produktů R5432V společnosti Ricoh. Poskytují ochranné funkce jako ochrana před přebitím, před nadměrným vybitím, zkratovou ochranu, zamezení nadproudu při nabíjení i vybíjení. Nepodporuje ochranu proti přehřátí. Disponuje funkcionalitami pro pasivní balancování. Nastavení hysterezí a zpoždění v některých funkcích je realizováno připojením externích kondenzátorů. Nastavení napěťových spouští je definováno při výrobě obvodu a je nutné použít konkrétní model z katalogu výrobce pro parametry použitých článků.



Obr. 2.6 Doporučené zapojení integrovaného obvodu R5432v [14]

3 Popis elektrického skútru a koncepce úprav

3.1 Elektrický skútr Akumoto A10/60

Elektrický skútr Akumoto A10/60 je založen na stejnosměrném elektrickém pohonu s BLDC motorem a s příslušným polovodičovým měničem. V původní konfiguraci je osazen gelovou baterií o jmenovitém napětí 48 V. BLDC motor tvoří zároveň náboj zadního kola skútru. Chybí tedy jakýkoliv převod, motor je pomaluběžný. Součástí tohoto náboje je i bubnová brzda. Skútr umožňuje v příplatkových verzích rekuperační brzdění. Výkon trakční výzbroje činí 1500 W.

Palubní síť skútru, tedy napájení osvětlení, houkačky, apod., je postavena na napětí klasických 12 V, které se získávají z trakční baterie pomocí snižovacího měniče napětí. Jednotlivé prvky napájené z tohoto obvodu tedy nejsou závislé na velikosti napětí akumulátoru.

BLDC pohon je dnes nejrozšířenější v malých dopravních prostředcích, jako jsou elektrické skútry, koloběžky, jízdní kola a jiná vozítka rozličných koncepcí a počtů kol. Kombinuje relativní jednoduchost řízení (spínání statorových vinutí ve dvou napěťových úrovních) s na údržbu nenáročným motorem, přičemž dosahuje vzhledem k rozměrům a hmotnosti solidní efektivity. Nevýhodou je potřeba drahých permanentních magnetů ze vzácných zemin.

3.2 Návrh nového pohonu ve vztahu ke skútru

Vzhledem k tomu, že použitý skútr disponuje dobře využitelným prostorem pro umístění baterie, nebylo třeba zabývat se využitím místa ve smyslu nepravidelných tvarů a podobně. To umožnilo využít ploché články KOKAM SLPB75106100 obdélníkového průřezu a pro dosažení požadovaných parametrů použít pouze sériového spojení jednotlivých akumulátorů. Použité články jsou typu HE (High Energy) NMC, o kapacitě 7,5 Ah a vnitřním odporu 4 mΩ.



Obr. 3.1 Pouch-cell článěk KOKAM [15]

KOKAM SLPB75106100	3,7 V / 7,5 Ah
Jmenovité napětí	3,7 V
Maximální napětí	4,2 V
Minimální napětí	2,7 V
Maximální vybíjecí proud trvale	5 C (37,5 A)
Maximální vybíjecí proud pulzně	8 C (60 A)
Maximální nabíjecí proud	1 C (7,5 A)
Životnost - při DOD 80%	> 800 cyklů
Provozní teploty - nabíjení	0 - 40 °C
Provozní teploty - vybíjení	-20 - 60 °C
Šířka	107 mm
Délka	102 mm
Tloušťka	7,9 mm
Hmotnost	165 g
Hmotnostní hustota energie	173 Wh/kg
Technologie	HE NMC
Vnitřní odpor	4 mΩ

Tab. 3.1 Technické údaje článku KOKAM SLPB75106100

Vzhledem k povaze vozidla bylo rozhodnuto o navýšení jmenovitého napětí oproti původnímu stavu, ve snaze dosáhnout vyšší maximální rychlosti, respektive dosáhnout nižšího poklesu rychlosti při větší úrovni vybití baterie. Jelikož je skútr vybaven měničem napětí, kde nedochází ke ztrátové regulaci výkonu (oproti zastaralé regulaci odporové), nečiní vyšší jmenovité napětí problém v režimu rozjezdů nebo jízdy nízkou rychlostí. Nevýhodou použití baterie s vyšším napětím je potřeba nového nabíječe, odpovídajícího změněným parametrům.

Ochranné a balanční obvody jsou sdružené v jednom zapojení a tvoří se samotnou baterií montážně jeden celek. V případě potřeby je možné řídicí obvody odpojit a demontovat. Vytvořena byla příprava pro řízení tepelných poměrů baterie – ohřev a měření teploty jednotlivých článků.

Skútr je bohužel z výroby vybaven trakčním měničem a pomocným měničem 48 V / 12 V pro napájení palubní sítě, které nejsou dimenzované na uvažované vyšší napětí. Z tohoto důvodu je pro plné využití potenciálu baterie nutné měniče vyměnit za výrobky s vyšším dovoleným vstupním napětím. Na základě demontáže základních stavebních prvků měniče bylo zjištěno příliš nízké maximální napětí elektrolytických filtračních kondenzátorů (63 V) a poměrně nízká napěťová rezerva výkonových tranzistorů ($U_{DS} = 70 \text{ V}$).

3.3 Výběr základu pro BMS

Pro vývoj a výrobu vlastní BMS byl zvolen řídicí obvod R5432V, který jako jediný z uváděných vyhověl požadavkům jak na ochranné, tak balancovací funkce a zároveň jeho koncepce umožňuje ruční výrobu funkčních vzorků. Čip je zhotoven v 24-pinovém pouzdře pro povrchovou montáž SSOP-24, čímž může obsluhovat pouze 5 článků samostatně. Tato nevýhoda je eliminována možností řetězového řazení, kdy každý z použitých čipů může aktivovat společné ochranné prvky při zjištění závady na parametrech některého ze článků. V tomto řetězu je jeden z čipů v řídicí roli, ostatní předávají informace o stavu v jejich části baterie a podmiňují skrze příslušné vývody možnost nabíjení nebo vybíjení článku. Samotný řídicí obvod pak obsluhuje příslušné tranzistory a snímá proudy protékající v rámci celé baterie, čímž tvoří základní ochranu v případě nadproudu při nabíjení nebo vybíjení (ve vybíjení 2 stupně nadproudové ochrany, lišící se spouštěcí hodnotou proudu a dovolenou dobou trvání takového stavu), ale také rychlou zkratovou ochranu pro zamezení nevratného poškození baterie.

4 Realizace akumulátorového packu

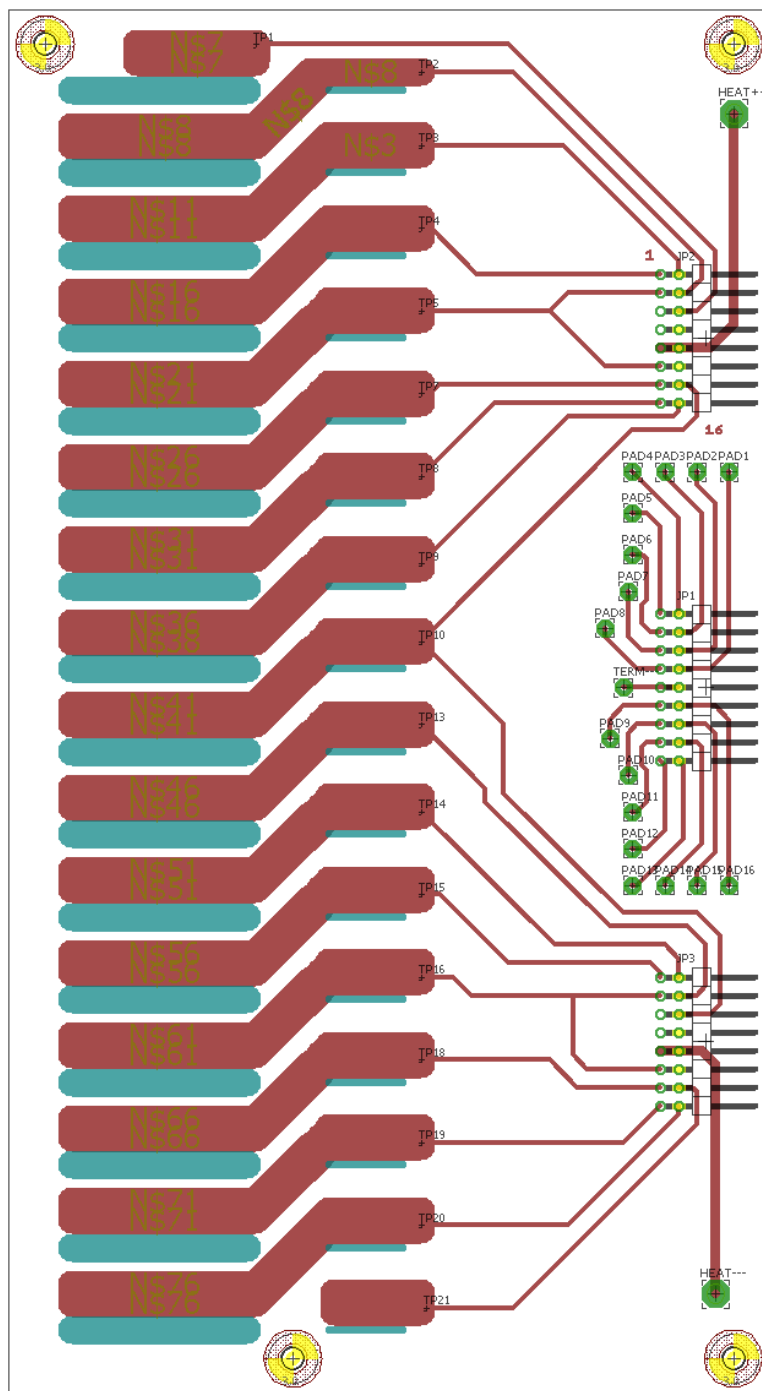
4.1 Bateriová deska

Navrženo bylo sériové spojení článků přes vodivé cesty DPS, z nichž budou odebrány potenciály pro měření a tyto přeneseny skrze propojovací vodiče do desky BMS. Zapracováno bylo i připojení termistorů pro měření teploty na každém článku zvlášť. Termistory spolu s připojovacími body pro vodiče vyhřívání článků jsou vyvedeny do zvláštního konektoru, připraveného pro možnou budoucí instalaci rozšiřující desky měření a řízení teploty. Připojení silových vodičů je možné pouze pájením. Výroba desky (leptání, vrtání a frézování) byla zajištěna externím dodavatelem.

4.1.1 Dimenzování vodivých cest

Ukázalo se, že použité články jsou problematické z hlediska jejich vývodů. Záporný kontakt je tvořen páskem z materiálu, který je dobře pájitelný. Oproti tomu kladný kontakt je tvořen hliníkovou slitinou, kterou lze pájet obtížně, navíc je vzhledem k nízké tloušťce mechanicky velice málo odolná. Bylo tedy rozhodnuto realizovat spoj skrze přechodovou svorku, připájenou do DPS. Žádná ze známých svorek, běžně vyráběná, neodpovídala požadavku na malé rozteče mezi jednotlivými články – hrozilo nebezpečí zkratu článku, zejména při montáži. Proto došlo k výrobě vlastních svorek, střídavě směrově orientovaných, čímž došlo k žádoucímu zvětšení mezer mezi sousedícími svorkami a bylo tedy možné udělat baterii kratší. Problematické spojení měď-hliník je ochráněno před působením vlhkosti použitím konzervačního maziva.

Samotná DPS, resp. tloušťka její měděné vrstvy, neodpovídala požadavkům proudové zatížitelnosti. Byla použita zesílená verze s 70 μm vrstvou mědi, šíře cest maximalizována (na hranici možností daných roztečí článků) a k tomu pro značné snížení odporu byly cesty pocínovány. Dostatečnost tohoto řešení byla ověřena termovizní kamerou při měření teploty DPS během průchodu maximálních uvažovaných proudů.



Obr. 4.1 Návrh DPS pro bateriovou desku

4.1.2 Měření a řízení teploty

Každý článek je opatřen měřicím termistorem 10 k Ω s tepelnou konstantou 3977K. Tabulka hodnot odporů vztažených k teplotám je uvedena v tab. 4.1. Termistory jsou vyvedeny vodiči do DPS a následně do zvláštního konektoru, každý termistor má svůj vodič pro jeden z vývodů, druhé vývody jsou u všech termistorů vzájemně propojeny.

Baterie je připravena pro případný provoz v nízkých teplotách. Na každý článek byl nalepen vyhřívací pásek s napájecím napětím 5 V. Všechny pásy byly propojeny do série,

což odpovídá maximálnímu napájecímu napětí 75 V. Předpokládá se, že doplňková řídicí jednotka měření a řízení teploty bude napájet vyhřívání připojením napětí baterie.

T_{OPER} [°C]	R_T [Ω]		T_{OPER} [°C]	R_T [Ω]
-30	175200		20	12488
-25	129287		25	10000
-20	96358		30	8059
-15	72500		35	6535
-10	55046		40	5330
-5	42157		45	4372
0	32554		50	3605
5	25339		55	2989
10	19872		60	2490
15	15698		65	2084

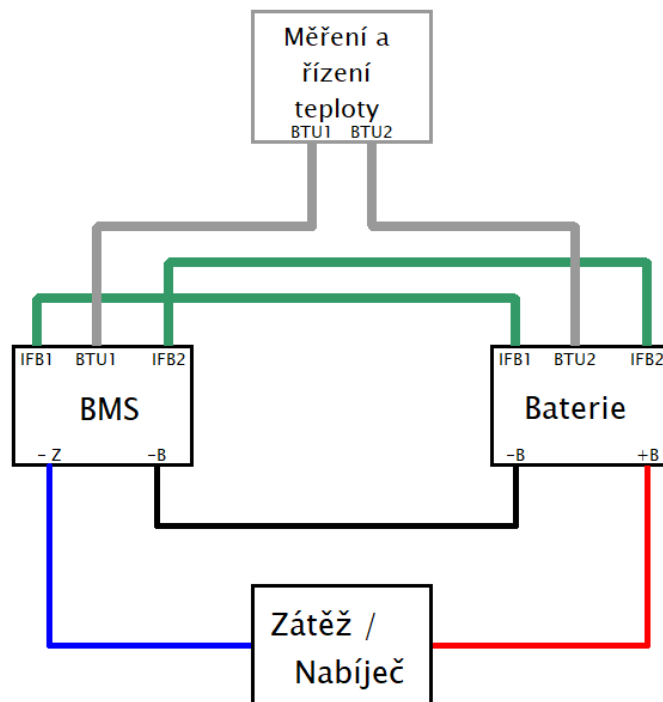
Tab. 4.1 Tabulka hodnot odporu při daných teplotách

4.1.3 Interface

Na blokovém schématu obr. 4.2 je zobrazeno zapojení signálové i silové části v obvodu baterie, včetně zátěže, případně dobíječe. Šedou barvou je zobrazena doplňková jednotka měření a řízení teploty. Ta disponuje piny s napětím baterie pro napájení vyhřívacích pásků, piny CTLC a CTLD pro možnost vypnutí nabíjecího, resp. vybíjecího tranzistoru (např. v případě překročení nebo podkročení dovolené teploty článku) a vodiči z měřicích termistorů.

Zelenou barvou jsou vyznačeny realizované měřicí vodiče napětí od jednotlivých článků. Zároveň slouží i pro napájení řídicích obvodů BMS.

Červená barva reprezentuje trvalý kladný pól baterie, černá barva trvalý záporný pól baterie a modrý pól je plovoucí v závislosti na sepnutí nebo rozepnutí vybíjecího tranzistoru při připojené zátěži.



Obr. 4.2 Blokové schéma zapojení BMS a baterie, příprava pro měření a řízení teploty

4.2 Deska BMS

Deska ochranných a balančních obvodů byla navržena jako oboustranná, tloušťka mědi činí 35 μ m. Ve snaze minimalizovat rozměry byla deska navržena pro součástky jak s drátovými vývody, tak v provedení SMD. Připojení silových vodičů je možné realizovat šroubovým spojem v připravených otvorech, případně pájením. Výrobu desky zajišťoval stejně jako u bateriové desky externí dodavatel.

4.2.1 Výběr komponent

Řídicí obvod R5432V je vyráběn v řadě podtypů, lišící se hodnotami spouští jednotlivých funkcionalit – tedy prahové napětí detekce přepětí VDET1, uvolňovací napětí detekce přepětí VREL1, prahové napětí spuštění balancování VCBD, napětí ukončení balancování VCBR, napětí detekce podpětí VDET2, uvolňovací napětí detekce podpětí VREL2 a různé prahové hodnoty, související se snímáním proudu na odporu R_{SENSE} . To znamená hodnota napětí prvního stupně nadproudu VDET31, druhého stupně nadproudu se zkrácenou reakční dobou VDET32, rychlé zkratové ochrany VSHORT a prahové napětí vzniklé průchodem nadproudu při nabíjení VDET4.

Code	VDET1n (V) *1	VREL1n (V) *1	VCBDn (V) *1	VCBRn (V) *1	VDET2n (V) *1	VREL2n (V) *1	VDET31 (V)	VDET32 (V)	VSHORT (V)	VDET4 (V)
R5432V402BA	4.350	4.050	4.200	4.200	2.400	2.700	0.200	0.600	1.000	-0.100
R5432V403BA	3.900	3.800	3.500	3.500	2.500	3.000	0.100	0.600	1.000	-0.100
R5432V404BA	4.250	4.100	4.200	4.200	2.500	3.000	0.200	0.600	1.000	-0.200
R5432V405BA	3.900	3.800	3.650	3.650	2.000	2.300	0.100	0.600	1.000	-0.200
R5432V406BA	3.650	3.550	3.500	3.500	2.500	3.000	0.300	0.600	1.000	-0.200
R5432V407BA	4.200	4.000	3.900	3.900	2.700	2.850	0.200	0.450	1.000	-0.200
R5432V408BA	3.800	3.600	3.450	3.450	2.000	2.300	0.200	0.450	1.000	-0.100
R5432V409BA	4.100	4.000	3.900	3.900	3.000	3.100	0.200	0.600	1.000	-0.200
R5432V410BC	4.200	4.000	4.150	4.150	2.750	2.950	0.100	0.250	0.750	-0.050
R5432V412BA	4.300	4.050	4.200	4.200	2.700	3.000	0.200	0.600	1.000	-0.100
R5432V413BA	4.250	4.100	4.200	4.200	2.500	3.000	0.100	0.600	1.000	-0.100
R5432V416BA	4.200	4.100	4.170	4.170	2.500	3.000	0.200	0.450	1.000	-0.100
R5432V417BC	4.200	4.100	4.180	4.180	2.500	3.000	0.100	0.400	0.750	-0.050
R5432V418BC	4.180	4.080	4.180	4.180	2.500	3.000	0.100	0.400	0.750	-0.050
R5432V419BD	3.900	3.800	3.500	3.500	2.500	3.000	0.100	0.300	0.500	-0.100
R5432V420BD	4.350	4.050	4.200	4.200	2.400	2.700	0.100	0.250	0.418	-0.100
R5432V501BA	3.900	3.700	3.800	3.600	2.000	2.300	0.200	0.600	1.000	-0.200
R5432V502BA	4.250	4.100	4.200	4.190	2.800	3.000	0.100	0.450	1.000	-0.050
R5432V503BB	4.250	4.150	4.150	4.140	2.700	3.000	0.150	0.300	0.750	-0.050
R5432V504BD	4.250	4.100	4.200	4.190	2.800	3.000	0.100	0.250	0.418	-0.050
R5432V505BD	4.250	4.100	4.200	4.190	2.500	3.000	0.100	0.250	0.418	-0.050
R5432V506BD	3.900	3.800	3.650	3.640	2.000	2.300	0.100	0.250	0.418	-0.050
R5432V507BD	4.215	4.100	4.200	4.180	2.800	3.000	0.100	0.250	0.418	-0.100

Obr. 4.3 Tabulka modifikací obvodu R5432V, použitý obvod vyznačen [14]

Vzhledem k parametrům článků a požadovaným parametrům nabíjení a vybíjení byl zvolen obvod specifikace R5432V504BD. V souvislosti s uvažovaným maximálním proudem baterie 5C byla stanovena hodnota spouště nadproudu prvního stupně výpočtem snímacích rezistorů R_{SENSE} .

$$\begin{aligned}
 I_{DET31} &= 37,5 \text{ A} \\
 I_{DET31} &= \frac{U_{DET31}}{R_{SENSE}} \rightarrow R_{SENSE} = \frac{U_{DET31}}{I_{DET31}} \\
 R_{SENSE} &= \frac{0,100}{37,5} = 0,00266 \bar{\Omega} \doteq 2,67 \text{ m}\Omega
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Pro $R_{SENSE} = 2,67 \text{ m}\Omega$ pak platí hodnoty dalších spouští:

$$\begin{aligned}
 I_{DET32} &= \frac{U_{DET32}}{R_{SENSE}} = \frac{0,25}{0,00266} = 93,75 \text{ A} \\
 I_{SHORT} &= \frac{U_{SHORT}}{R_{SENSE}} = \frac{0,418}{0,00266} = 156,75 \text{ A} \\
 I_{DET4} &= \frac{U_{DET4}}{R_{SENSE}} = \frac{0,05}{0,00266} = -18,75 \text{ A}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Pro zajištění požadovaného odporu R_{SENSE} a zároveň vyhovujícího proudového zatížení byly zvoleny snímací rezistory o hodnotě $3\text{ m}\Omega$ v bezindukčním provedení a vhodné sérioparalelní kombinaci (2s, 2p), jejichž konečná hodnota odporu byla vyladěna pocínováním.

Dále bylo nutné stanovit velikost odporu R_{DRAIN} . Tento odpor slouží k regulaci množství proudu protékajícího překlenovacím tranzistorem ve stavu mezi přechodem z režimu rozepnutého vybíjecího tranzistoru zpět do sepnutého. Při příliš nízké hodnotě R_{DRAIN} by docházelo k průtoku velkého proudu tímto tranzistorem při rozepnutém vybíjecím tranzistoru a připojené zátěži. Oproti tomu při příliš vysoké hodnotě odporu by bylo obtížné opětovně vybíjecí tranzistor sepnout. Velikost odporu R_{DRAIN} by měla odpovídat tomuto vzorci:

$$\begin{aligned} R_{DRAIN} &< 0,1 \cdot (1 \cdot 10^6 + 2 \cdot 10^6) / 50 \\ R_{DRAIN} &< 6000 \Omega \\ R_{DRAIN} &\approx 5600 \Omega \end{aligned} \quad (4.3)$$

Stanoveny byly hodnoty vybíjecích rezistorů určených pro balancování baterie. Pro napětí $U_{CBD} = 4,20\text{ V}$, při němž dojde ke spuštění balancování, a pro zvolené odpory $R_{CBn} = 68\ \Omega$ platí:

$$\begin{aligned} I_{CBn} &= \frac{U_{CBDn}}{R_{CBn}} = \frac{4,20}{68} \doteq 0,0618\text{ A} \\ P_{CBn} &= \frac{U_{CBn}^2}{R_{CBn}} = \frac{4,20^2}{68} \doteq 0,26\text{ W} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Vzhledem k maření výkonu na rezistorech R_{CBn} byly tyto vybrány v pouzdru SMD 2512, s maximálním ztrátovým výkonem 1 W .

Malé napěťové a proudové nároky balančních obvodů umožnily využít pro spínání vybíjecích rezistorů levné tranzistory MOSFET TN0104N3-G v malém THT pouzdru TO-92.

Zbýlé rezistory a kondenzátory byly zvoleny dle doporučení výrobce řídicích obvodů, neboť deklarované hodnoty (např. zpoždění spouští a uvolnění ochranných a balančních mechanismů) vyhovovaly.

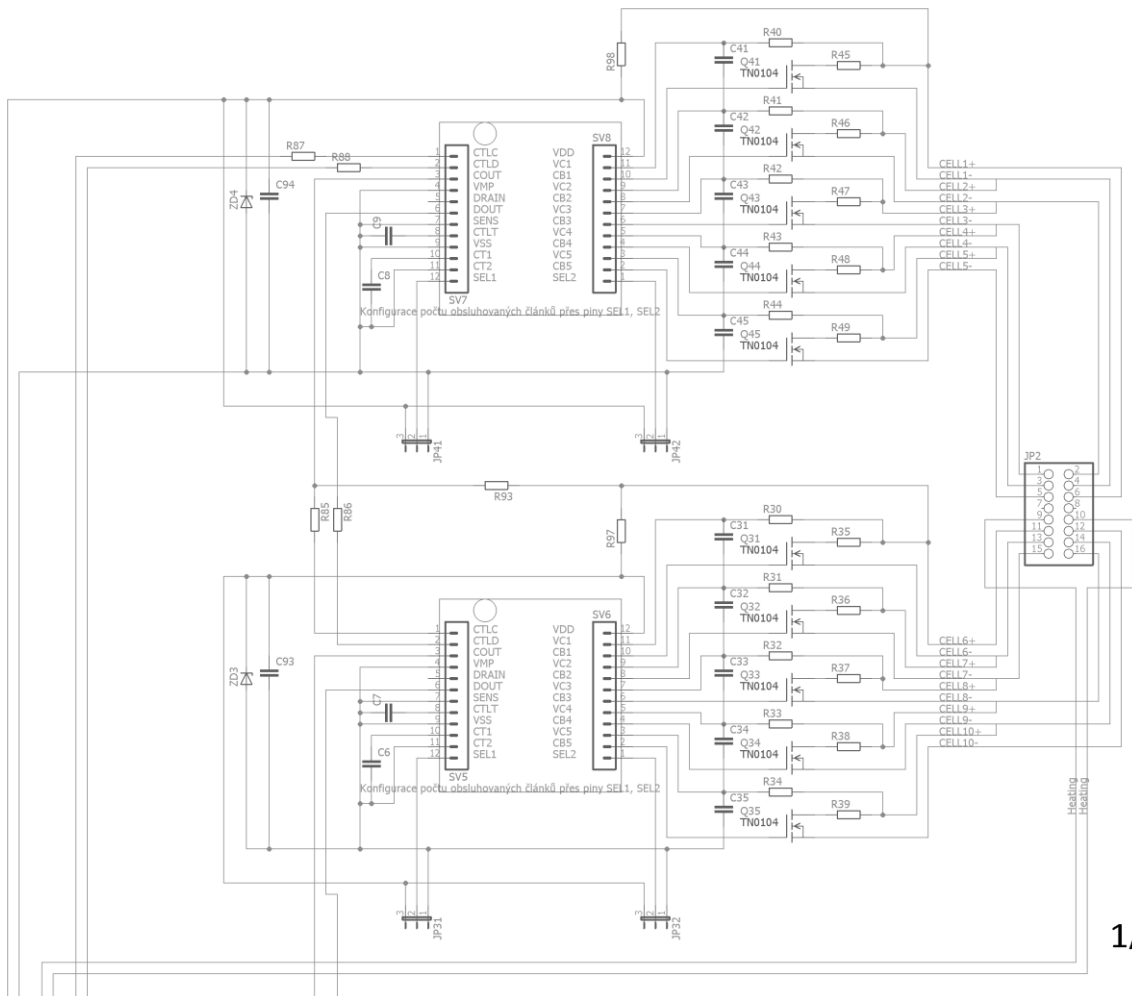
Původní návrh počítal s osazením výkonových spínacích prvků ochranných obvodů tranzistory AOT2500L v pouzdře TO-220, přičemž při realizaci byl vybíjecí tranzistor nahrazen výkonovým modulem MOSFET IXFN180N15P, nabíjecí tranzistor pak baterií šesti

tranzistorů MOSFET řady IRF540. Všechny výkonové tranzistory jsou umístěny mimo DPS na hliníkovém chladiči. Náhrada tranzistorů byla provedena z důvodu větší bezpečnosti proti poškození vysokým proudem, zejména co se týče integrovaných parazitních diod.

4.2.2 Popis návrhu DPS

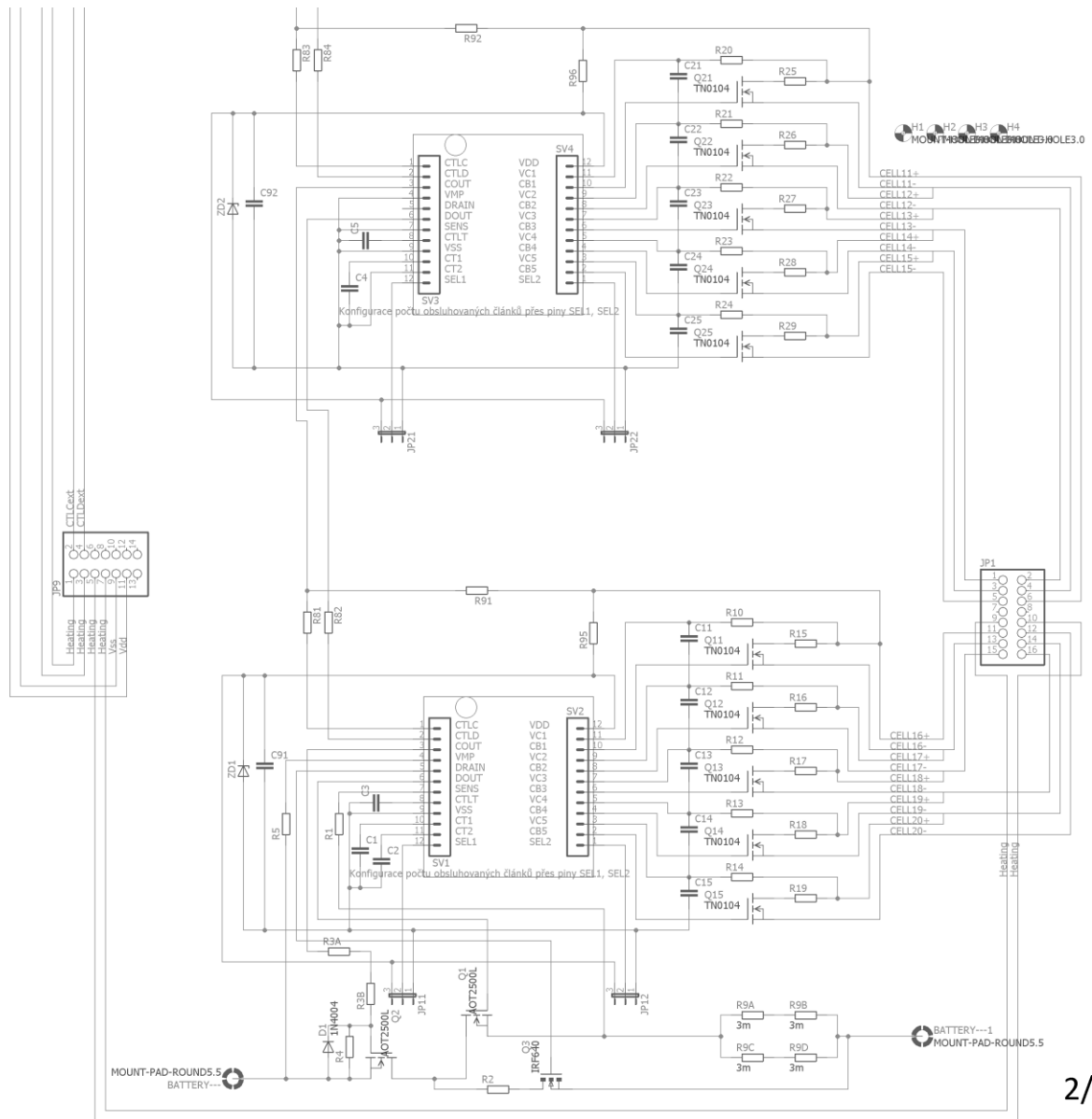
V první řadě bylo rozhodnuto o vytvoření redukce z pouzdra SSOP-24 na DIP-24 z důvodu zjednodušení výroby DPS. Úzké signálové cestičky pod 0,25 mm se vyrábějí příliš obtížně a hrozilo by riziko vzniku obtížně řešitelné závady. Deska proto byla připravena pro rozteč drátových vývodů dle pouzdra DIP-24. Při osazování se ukázalo, že výrobce redukce nedodržel vzdálenost mezi řadami vývodů dle DIP-24, proto bylo třeba upravit propojovací hřebínky na širší rozteč.

DPS lze pomyslně rozdělit na 2 části, kde první část je nízkovýkonová a obsahuje pouze měřicí přívody k řídicím obvodům, a spínané vybíjecí obvody pro balancování článků. Na druhé straně se pak nachází u hlavního řídicího obvodu silová větev pro rozpínání proudu vybíjení a nabíjení. Součástí této větve je i sérioparalelní spojení měřících rezistorů R_{SENSE} . Celá deska kombinuje snahu o minimalizaci rozměrů a zároveň snahu o šablonovité řešení zřetězených dílčích obvodů, aby bylo možné v případě potřeby v jiných projektech jednoduše přidávat nebo ubírat množství řídicích obvodů podle počtu obsluhovaných článků.

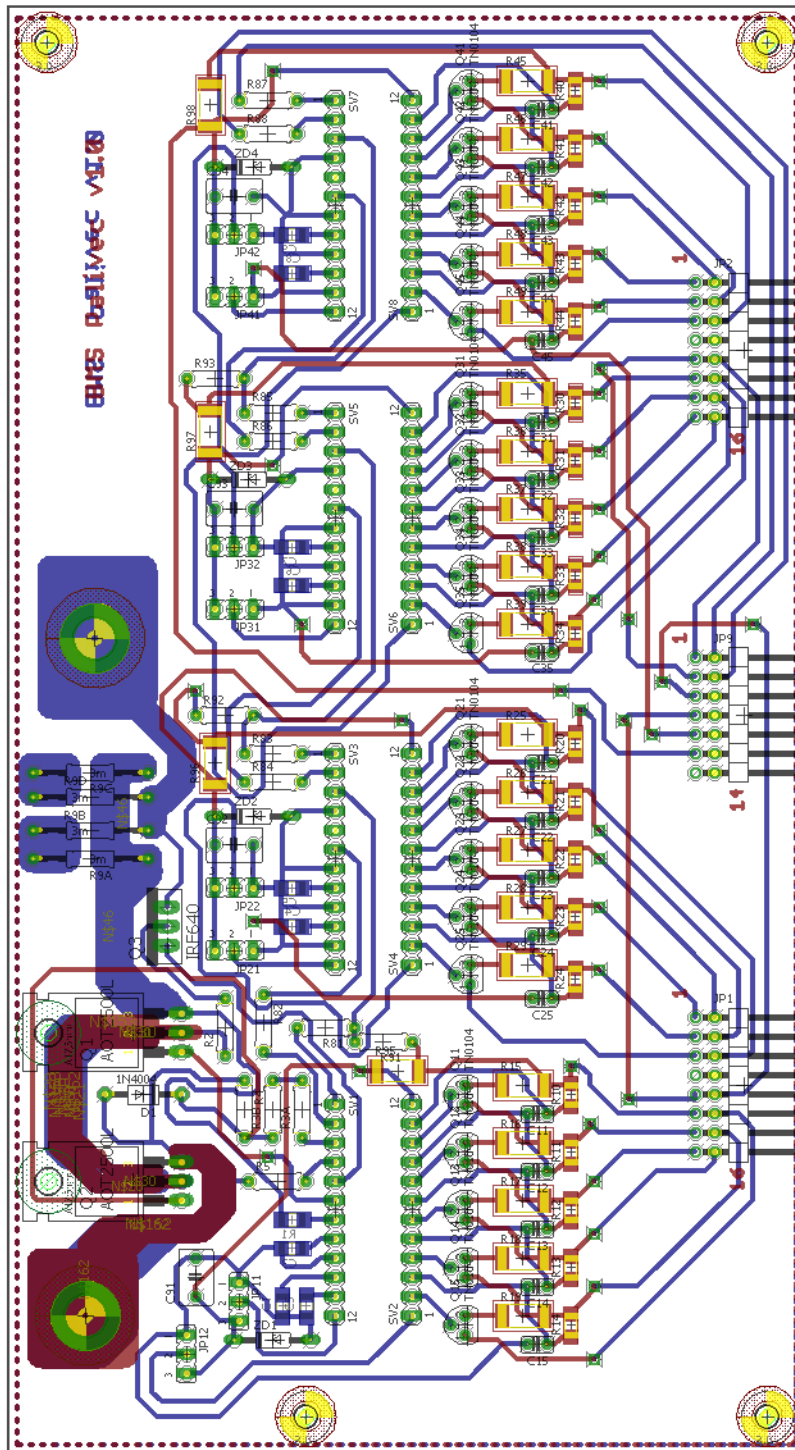


1/2

Obr. 4.4 Schéma BMS, část 1/2



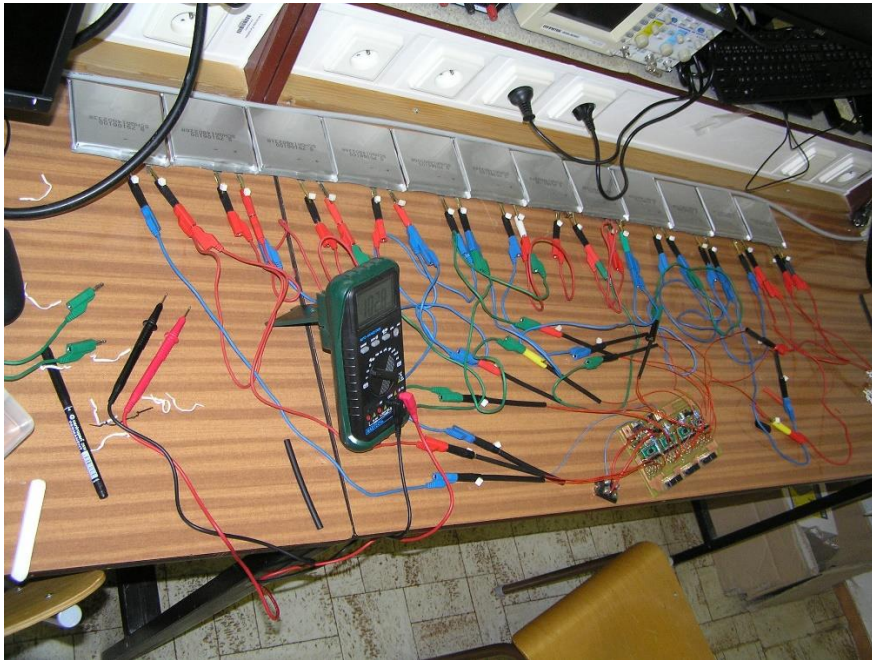
Obr. 4.5 Schéma BMS, část 2/2



Obr. 4.6 Návrh DPS pro BMS

5 Validační měření

5.1 Prvotní testy



Obr. 5.1 Prvotní ověřování funkce BMS

Základním úkolem při provádění závěrečných testů a měření bylo prokázat zejména ochranné funkcionality navržené BMS. Provedeny byly testy ochran proti překročení nejvyššího dovoleného proudu nabíjení i vybíjení, proti překročení nejvyššího dovoleného napětí při nabíjení a naopak proti podkročení nejnižšího dovoleného napětí při vybíjení. Dále bylo provedeno měření na balančních obvodech, které zajišťují vyrovnaní napětí nestatečně nabitých článků. Všechny požadované vlastnosti byly úspěšně odzkoušeny po vyřešení několika problémů.

Jednou ze závad, která byla odstraněna ještě před prvotním zapojením, byla chyba v návrhu obvodu. Chybějící propojení záporných potenciálů řídicích obvodů na pinech VSS se zápornými póly posledních článků příslušných akumulátorových skupin byly vyřešeny izolovanými drátovými propojkami.

Druhou závadou, která se projevila až při zapojení, byla závada na jedné z cest na DPS, kde došlo z neznámého důvodu k uvolnění měděné vrstvy. Závada byla odstraněna drátovou propojkou.

Třetí závada, projevující se nesprávnou úrovní vybavení nadproudové ochrany při nabíjení, byla způsobena úbytkem napětí mezi pinem VSS a záporným pólem baterie. Důvod nesprávné úrovně záporného potenciálu není znám. Závada vyřešena dodatečně přivedeným potenciálem přímo ze silové cesty záporného pólu baterie.

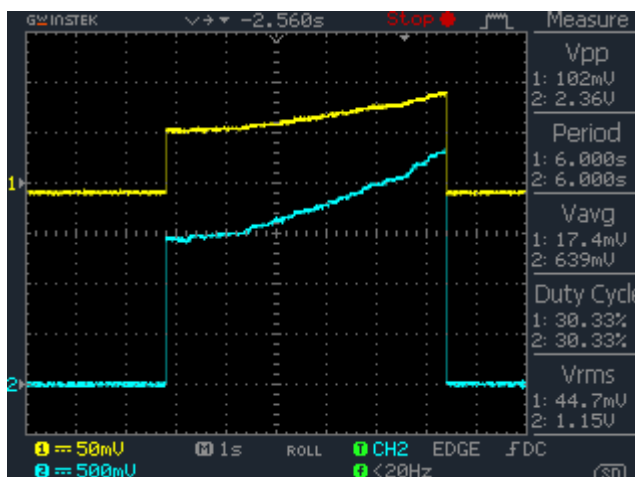
Měření nadproudové ochrany při vybíjení odhalilo přechodové odpory na některých svorkách plusových pólů akumulátorů, které intenzivně dané spoje zahřívaly. Přechodové odpory byly pravděpodobně způsobeny nepřesnostmi při ruční výrobě svorek a nerovným povrchem vývodů (takto dodáno dodavatelem). Přechodové odpory vyřešeny dodatečným propojením poměrně obtížným pájením hliníku.

Nejzákeřnější, velice obtížně odhalitelnou závadou, projevující se neschopností řídicího obvodu zareagovat na nadproud při vybíjení (navzdory tomu, že při nadproudu nabíjení obvod reagoval správně a zároveň při vnějším požadavku na rozepnutí tranzistoru určeného pro vybíjení tento tak učinil), byla porucha na samotném řídicím obvodu. Příčina poruchy není známa, lze spekulovat o prodělaném poškození elektrostatickým výbojem. Závada vyřešena výměnou řídicího obvodu.

Všechny testy byly provedeny v otevřeném, provizorním mechanickém provedení a hodnota spouští nadproudových ochran byla pro snazší a bezpečnější měření ponechána snížena. Použity byly proudové kleště s charakteristikou $100 \text{ mV} = 1 \text{ A}$.

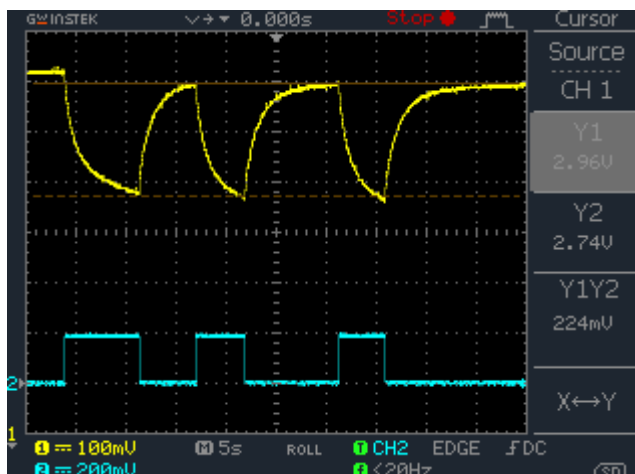
5.1.1 Měření ochran při vybíjení

Při měření ochrany proti nadproudu při vybíjení byl stykačem sepnut reostat v poloze nejvyššího odporu, následně byl posuvným jezdcem odpor snižován až do hranice rozepnutí vybíjecího tranzistoru následkem vybavené nadproudové ochrany, ke kterému došlo při proudu 23,6 A a hodnotě $U_{\text{SENSE}} = 102 \text{ mV}$. Při rychlém nárůstu vybíjecího proudu účinkuje spoušť při asi o 20% nižším proudu a prodleva do rozepnutí zátěže trvá 10 ms.



Obr. 5.2 Oscilogram napětí U_{SENSE} (žlutě), zátěžného proudu (tyrkysově)

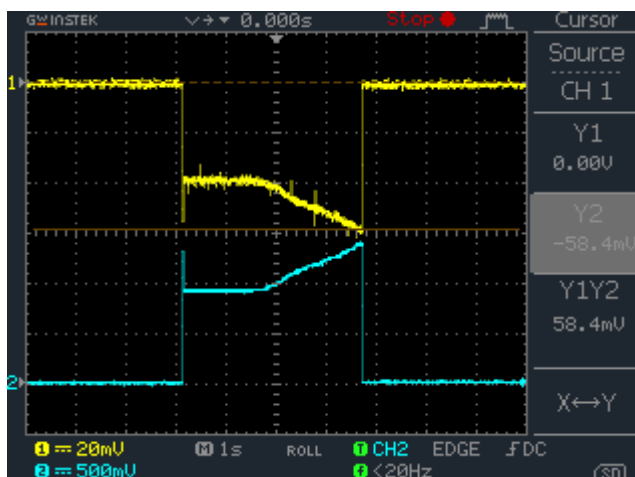
Při následném dalším vybíjení byla hlídána hranice podkročení nejnižšího dovoleného napětí. Podpětí bylo obvodem detekováno při úrovni napětí 2,74 V a k opětovnému připojení zátěže docházelo při dosažení 2,96 V.



Obr. 5.3 Oscilogram napětí U_{C1} (žlutě), zátěžného proudu (tyrkysově)

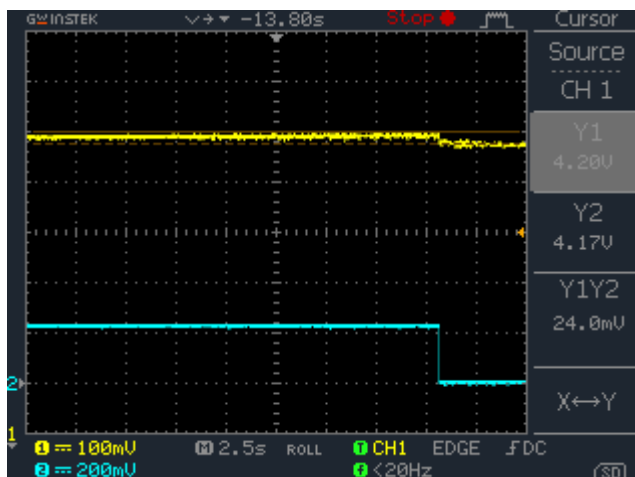
5.1.2 Měření ochran při nabíjení

Snímání nadproudu při nabíjení využívá stejných principů, jako při vybíjení. Vzhledem k opačnému směru toku proudu je úbytek napětí na U_{SENSE} záporný. Měření nadproudu při nabíjení vyžaduje nabíječ s dostatečnou napěťovou rezervou (vzniká úbytek napětí na vnitřním odporu článků) a schopný dodat proud nutný k zaúčinkování nadproudové ochrany. K reakci obvodu došlo při nabíjecím proudu 13,8 A, což odpovídalo $U_{SENSE} = -58,4$ mV.



Obr. 5.4 Oscilogram napětí U_{SENSE} (žlutě), nabíjecího proudu (tyrkysově)

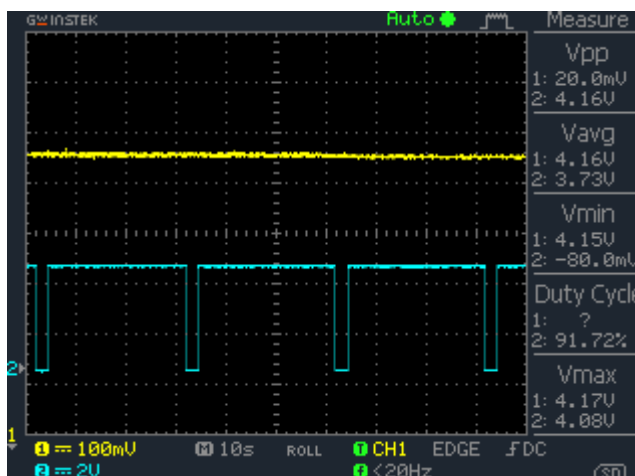
Měření vybavení ochrany proti přepětí některého ze článků poukázalo na chyby měřicích přístrojů. Ačkoliv osciloskop ukazoval ukončení nabíjení již při hodnotě 4,20 V, ruční měření daného článku voltmetrem indikovalo hodnotu 4,24 V, více odpovídající hodnotám deklarovaným v parametrech řídicího obvodu.



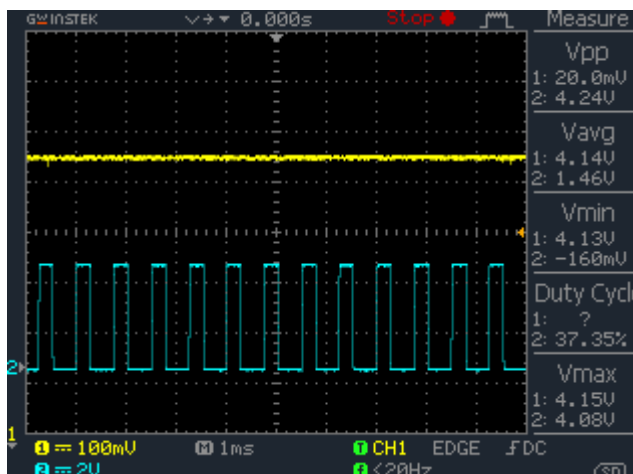
Obr. 5.5 Oscilogram napětí U_{C1} (žlutě), nabíjecího proudu (tyrkysově)

5.1.3 Měření funkce balancování baterie

Obdobně jako ve výše uvedeném případě i zde jsme se potýkali s chybami měření. Hodnota, při níž dochází ke spuštění balancování, byla dle osciloskopu 4,19 V i řídicího obvodu vyhodnocena téměř správně, nicméně při měření spodní hranice napětí, po jejímž podkročení má být balancování ukončeno a nastavena opětovně spoušť na vyšší hodnotu z hystereze, docházelo při napětích velmi blízkých spodní hranici napětí k opětovnému spuštění balancování, případně k balancování střídou spínání tranzistoru $s = 0,5$. Výpadky v balancování jsou důsledkem testování obvodu funkcionalitou open-wire s periodou 30 s.



Obr. 5.6 Oscilogram napětí U_{C15} (žlutě), napětí U_{G15} (tyrkysově)



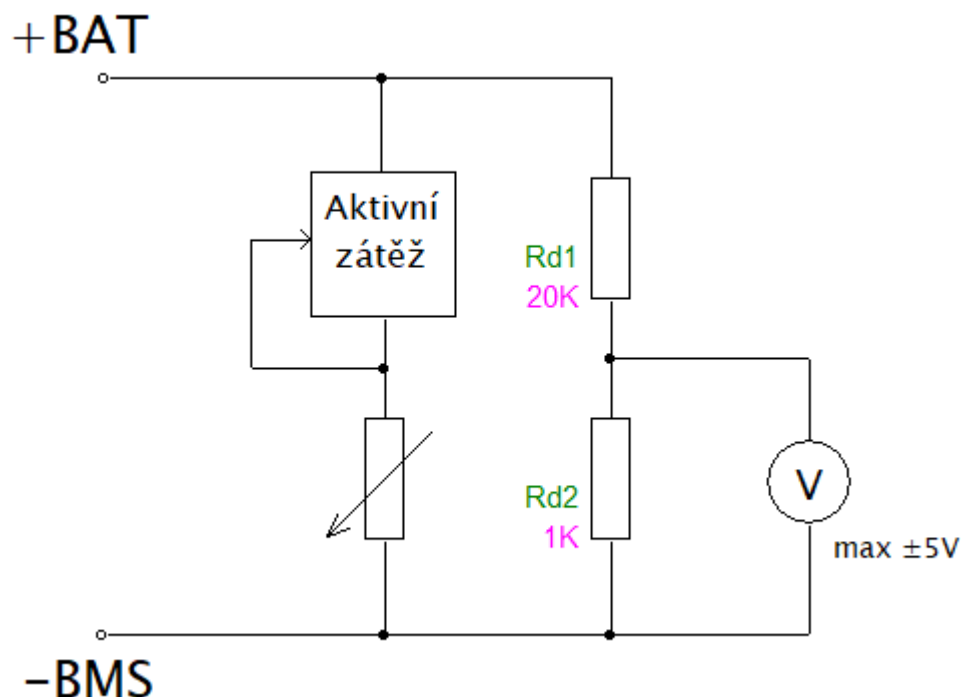
Obr. 5.7 Oscilogram napětí U_{C15} (žlutě), napětí U_{G15} (tyrkysově)

Definitivní ukončení režimu balancování nastalo až po ustálení napětí pod hranicí 4,15 V.

5.2 Zapojení s realizovanou baterií

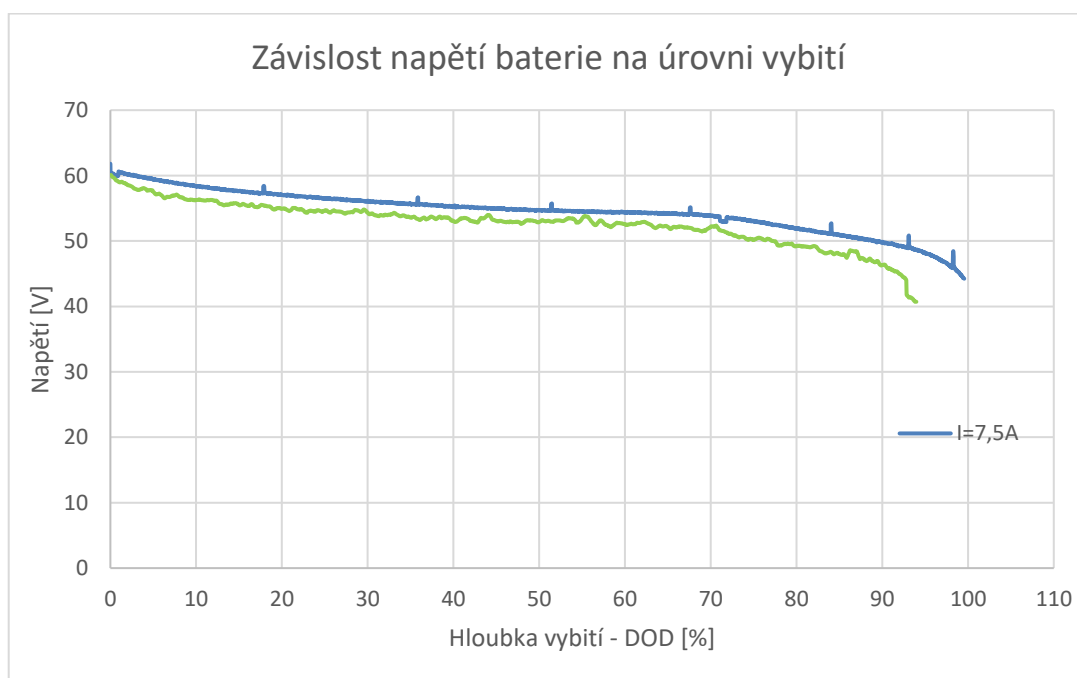
5.2.1 Měření zatěžovacích charakteristik

Pro stanovení skutečné kapacity baterie bylo provedeno měření vybíjení packu při třech hodnotách odebíraného proudu. Měření bylo ukončeno při prvním zareagování ochrany proti podpětí, které se projevilo poklesem výstupního napětí na nulu. Měření bylo automatizováno použitím měřicí karty s rozsahem měřených napětí ± 5 V, proto bylo využito děliče napětí. Následně byl změřením skutečné hodnoty napětí baterie a dělením napětím měřeným měřicí kartou stanoven přepočtový koeficient. Násobením měřených hodnot tímto koeficientem bylo dosaženo odpovídajících hodnot napětí packu, ale bohužel také přineslo určitou nepřesnost měření vzniklou zesíleným šumem, který byl při měření zachycen. Udržování zátěžného proudu na konstantní hodnotě bylo rovněž provedeno částečně automatizovaným způsobem. Bylo využito aktivní zátěže s proudovou zpětnou vazbou. Na trimru aktivní zátěže byl nastaven přesný odpor, jehož důsledkem byla pro aktivní zátěž informace o požadovaném proudu. Aktivní zátěž udržovala konstantní proud využíváním výkonových tranzistorů MOSFET v lineárním režimu, přičemž maximální úbytek napětí na těchto tranzistorech byl stanoven na 5 V, aby tyto nebyly tepelně přetíženy. Zbylý ztrátový výkon byl mařen v reostatech, které sloužily k hrubému nastavení zatěžovacího proudu a tedy udržení úbytku napětí na aktivní zátěži v rozsahu zhruba 0,15 – 5 V. Reostaty bylo nutné intenzivně chladit, teploty na odporových drahách se dle termovizní kamery pohybovaly i nad 150°C, jelikož zatížení proudy blízkými maximálním dovoleným hodnotám pro tyto reostaty trvalo desítky minut.



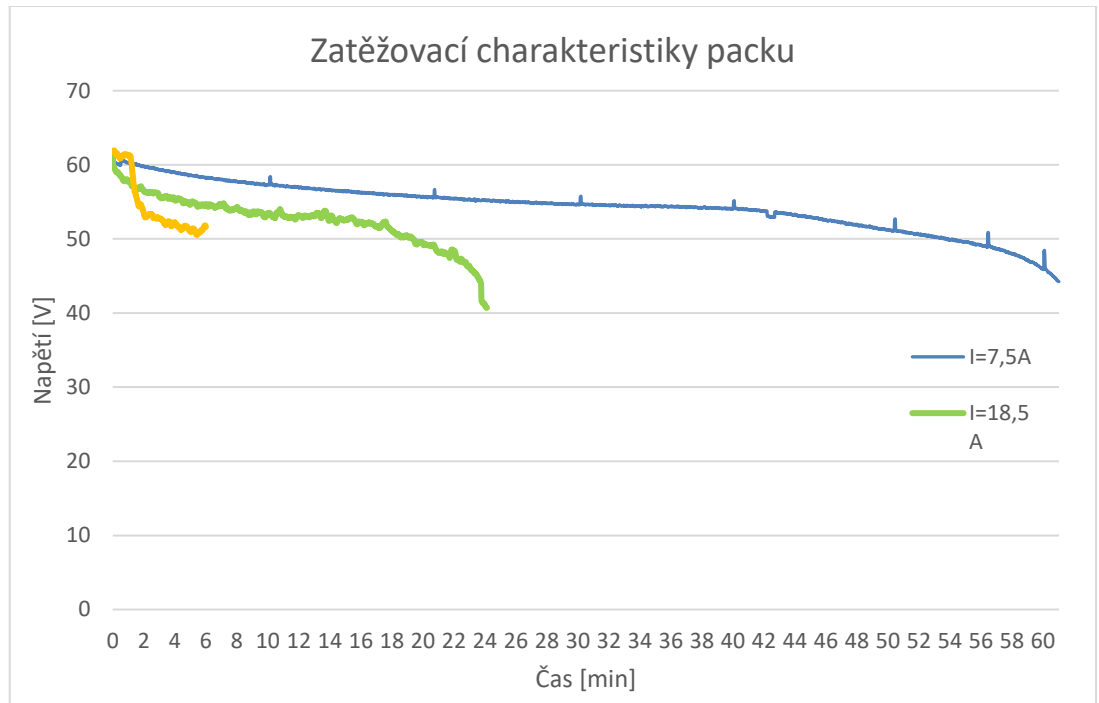
Obr. 5.8 Schéma měření zatěžovacích charakteristik konstantním proudem

Výsledky měření jsou shrnuty ve společných grafech (obr. 5.9 a 5.10). Špičky při měření zátěžným proudem $I = 7,5 \text{ A}$ byly záměrně vytvořené krátkými odpojeními zátěže pro změření vnitřního odporu packu. V první řadě je zobrazena závislost napětí baterie na úrovni vybití DOD (Depth Of Discharge), která reprezentuje relativní množství reálně odebraného výkonu z baterie a srovnává tak vztažnou základnu.



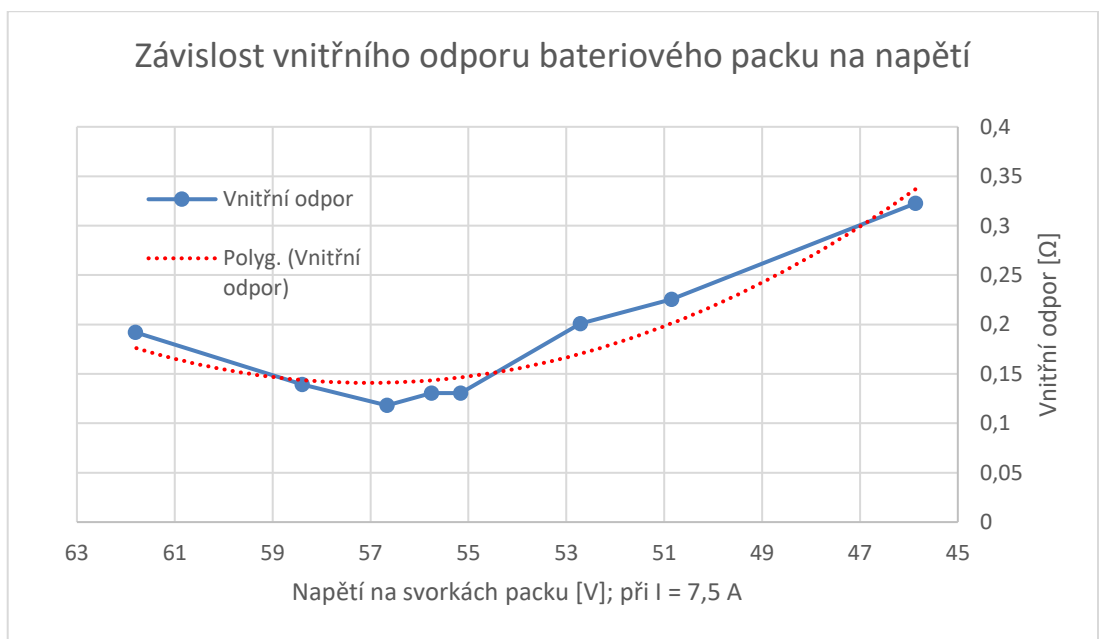
Obr. 5.9 Závislost napětí baterie na úrovni vybití

V druhém grafu je pro zajímavost stejná charakteristika vztažena k času. Tím, že se vybíjí baterie násobně větším proudem, nepřímo úměrně tomu klesá doba, po kterou je schopná baterie proud dodávat. Charakteristika přináší představu, po jakou dobu bude baterie schopna provozu při daném zátěžném proudu.



Obr. 5.10 Zatěžovací charakteristiky packu

S měřením zatěžovacích charakteristik byl tedy v několika bodech nepřímo změřen vnitřní odpor packu (tzn. včetně odporu BMS a propojovacích vodičů). V závislosti na napětí se při odebíraném proudu 7,5 A pohyboval od 0,12 do 0,32 Ω viz graf.



Obr. 5.11 Závislost vnitřního odporu bateriového packu na napětí

Skutečná kapacita baterie [Ah] byla vypočtena dle vzorce:

$$C = I_Z \cdot t; I_Z = konst. \quad (5.1)$$

Energie [Wh] v baterii pak dosazením naměřených napětí v čase podle:

$$E = \int_0^t U_B \cdot I_Z \cdot dt \quad (5.2)$$

Pro $I_Z = 7,5$ A platí:

$$C = 7,5 \cdot 3662 = 27465 \text{ As} = 7,63 \text{ Ah} \quad (5.3)$$

$$E = \int_0^t U_B \cdot 7,5 \cdot dt \quad (5.4)$$
$$E \doteq 414 \text{ Wh}$$

Pro $I_Z = 18,5$ A platí:

$$C = 18,5 \cdot 1448 = 26788 \text{ As} = 7,44 \text{ Ah} \quad (5.5)$$

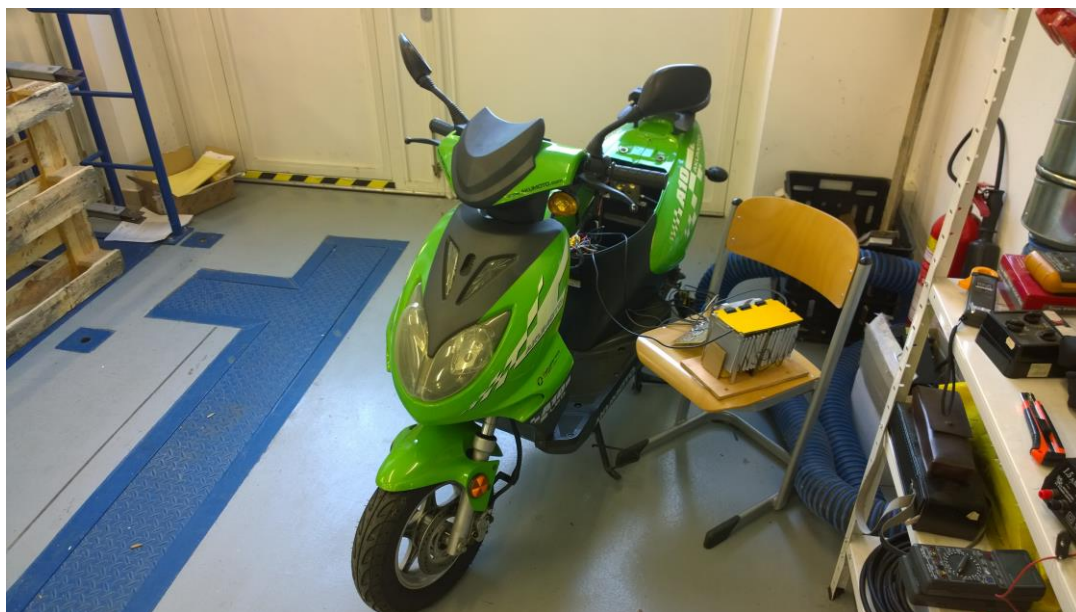
$$E = \int_0^t U_B \cdot 18,5 \cdot dt \quad (5.6)$$
$$E \doteq 391 \text{ Wh}$$

Z měření při různých proudech I_Z je patrné, že vybíjení menším proudem je energeticky hospodárnější a baterie je schopna dodat více energie při stejném počátečním stupni nabití a téměř stejném koncovém stupni vybití (zareagování ochrany proti podpětí).

Pro zatěžovací proud $I_Z = 35$ A bylo měření ukončeno předčasně zareagováním nadproudové ochrany. K němu došlo v důsledku významného ohřevu snímacích rezistorů, kde došlo ke zvýšení odporu, což se projevilo ve vyšším úbytku napětí a zareagování spouště nadproudu prvního stupně. Vzhledem k ohřevu silových částí BMS, propojení článků a později ohřevu samotných článků jde o žádoucí jev. Teploty článků dosahovaly při $I_Z = 18,5$ A na konci měření hodnoty 55°C .

5.3 Ověření funkce v elektrickém skútru

Na závěr byl celý akumulátorový pack v provizorní sestavě (materiál pro finální pouzdro packu nebyl v době měření dostupný) zapojen ve vozidle. Pack byl záměrně ponechán částečně vybitý, aby napětí baterie bylo bezpečné pro napěťově poddimenzovaný trakční a pomocný měnič. Po připojení napětí a sepnutí obvodů spínací skříňkou skútr úspěšně ožil a byl plně funkční. Vzhledem k problematickým měničům nebylo prováděno měření trakčních charakteristik, to bude možné po výměně měničů za odpovídající kusy.



Obr. 5.12 - Ověření funkce akumulátorového packu v elektrickém skútru

6 Závěr

V teoretické části diplomové práce byla nastíněna problematika nastupující masové elektromobility, zejména co se týče elektrochemických zdrojů energie, používaných ve vozidlech elektrické nezávislé trakce. Pokud je výroba a distribuce elektřiny pro nabíjení elektrických vozidel věcí technicky vyřešenou a rozhoduje se o ní prakticky jen v politické a ekonomické rovině, vozidlové akumulátory jsou i dnes hlavně technickým problémem, neboť stále nedosahují takových parametrů, aby mohly plnohodnotně nahradit spalovací motory, zvláště vezmeme-li v úvahu obrovské množství vozidel na světě. V práci byly shrnuty způsoby uchovávání elektrické energie v akumulátorech z dob nedávné minulosti až k současným technologiím. Rovněž byly uvedeny příklady aplikací těchto akumulátorů včetně technických parametrů, na nichž je dobře vidět technický pokrok. Kladně je v práci hodnocena technická úroveň akumulátorů používaných pro malé stroje o výkonech v řádu stovek wattů až jednotek kilowattů, s předpokladem omezeného, avšak v praxi dobře vyhovujícího akčního rádiusu. Tyto malé stroje mohou být v budoucnu rozšířeným způsobem, jak cesty na krátké vzdálenosti (nebo na delší vzdálenosti v podobě kombinované dopravy) zrychlit, zlevnit a snížit dopady na životní prostředí, při využití současné dopravní a energetické infrastruktury.

Dále byla podrobněji rozebrána problematika balančních a ochranných obvodů, zajišťující jakost, spolehlivost a bezpečnost Li-ion baterií. Byly uvedeny možnosti, jak přistupovat k procesu balancování a jak navrhovat obvody, mající ochranu a balancování na starost. Ve vztahu k návrhové a realizační náročnosti byl vybrán vhodný řídicí obvod, který se stal základem pro stavbu balančních a ochranných obvodů vlastní výroby. Obvody byly navrženy pro potřeby akumulátorové baterie Li-ion, sestavené za účelem demonstrace výkonů dnešních akumulátorů vzhledem ke své velikosti a hmotnosti. Během práce vznikly problémy způsobené chybami návrhu, náhodnými závadami a za určitých okolností i nedostačujícími provozními parametry, všechny závady se ovšem podařilo v rámci prototypu uspokojivě vyřešit úpravou vodivých cest, výměnou poškozených součástí a náhradou nevyhovujících prvků lépe dimenzovaným řešením.

Celý bateriový pack byl po sestavení a oživení změřen, byly znázorněny zatěžovací charakteristiky pro tři různé zatěžovací proudy, byl stanoven vnitřní odpor packu a pro dva zatěžovací proudy byly vypočítány kapacity a množství dodané energie během vybíjení. Naměřené a vypočtené hodnoty překračovaly hodnoty uvedené výrobcem. V závěru byl pack provizorně zapojen a úspěšně zprovozněn v elektrickém skútru. Pro plnohodnotné využití je

třeba nahradit trakční a pomocný měnič, aby vyhovoval změněným napět'ovým poměrům nového zdroje.

7 Seznamy

Seznam vybraných použitých součástí

Součást	Výrobce	Model
Rezistory		1M0, 2M0, 10M, 1k0, 10k,
		5,6k, 330, 68R
Kondenzátory keram.		u47, 3n3, 3u3
Kondenzátory keram.		1u0/50V
Kondenzátory keram.		0u1
Tranzistor	TEXAS INSTRUMENTS	IRF640
Tranzistory	TEXAS INSTRUMENTS	IRF540
Tranzistory	MICROCHIP	TN0104N3-G
Termistor		232264063103
Zenerovy diody	DC COMPONENTS	BZX55C30
Dioda		1N4007
Konektory	AMPHENOL	T821116A1R100CEU
Konektory	ADAM TECH	BHR-14-HUA
Konektory	JST	B3P-VH
Propojovací kabely	AMPHENOL	FC14150-S
Hřebínky		rozteč 2,54 mm
Jumpery		rozteč 2,54 mm
Snímací rezistory		3m0
Distanční sloupky		20X3
Izolační podložky		slídové TO-220

Seznam použité literatury

[1] *ELEKTROMOBILY TECHNICKE PARAMETRY cars* [online]. [cit. 2019-05-21].

Dostupné z: http://www.electroauto.cz/tech_parametry_cars.html

[2] *Historie elektromobilů ve světě | Automotive* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z:

<https://automotive.oneindustry.one/historie-elektromobilu-ve-svete/>

[3] *Battery Comparison of Energy Density - Cylindrical and Prismatic Cells* [online]. [cit.

2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>

[4] *Basic to Advanced Battery Information from Battery University* [online]. [cit. 2019-05-

21]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/>

[5] *Standard BLK hoverboard | Alza.cz* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z:

<https://www.electroworld.cz/kolonozka-std-blk-kolonozka>

[6] *Inmotion V10F | Alza.cz* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z:

<https://www.alza.cz/sport/inmotion-v10f-d5325866.htm>

[7] *Inmotion K1 - Elektro longboard | Alza.cz* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z:

<https://www.alza.cz/sport/inmotion-k1-d5219476.htm>

- [8] *Segway Drift W1* / Alza.cz [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/sport/segway-drift-w1-d5362493.htm>
- [9] *Xiaomi Mi Electric Scooter Black ...* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.czc.cz/xiaomi-mi-electric-scooter-black-elektro-kolobezka-cerna/228231/produkt>
- [10] *ISL94212 - Multi-Cell Li-Ion Battery Manager* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/us/en/www/doc/datasheet/isl94212.pdf>
- [11] *Bq77904, bq77905 3-Series to 20-Series Ultra Low-Power Voltage, Current, Temperature, and Open-Wire Stackable Lithium-Ion Battery Protector* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq77905.pdf>
- [12] *BM3451 Series - 3/4/5 Cell Battery Protectors* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.si-semic.com/upload/1460800283.pdf>
- [13] *LTC3300-2 - Basic to Advanced Battery Information from Battery University* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3300-2.pdf>
- [14] *R5432v Series - 3 to 5 Cells Li-ion Battery Protector IC* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/792/r5432-ea-1085776.pdf>
- [15] *KOKAM Li-ion/Polymer Cell* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://kokam.com/wp-content/uploads/2016/03/SLPB-Cell-Brochure.pdf>
- [16] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0
- [17] LINDEN, David a Thomas B. REDDY. *Handbook of Batteries: Third edition*. McGraw-Hill, 2002, 1454. ISBN 0-07-135978-8
- [18] KISLITSYN, Ph.D. Mikhail. *Li-ion Batteries Basics*. s. 40

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Hoverboard - Standard BLK [5]	15
Obr. 1.2 El. jednokolka - Inmotion V10F [6]	16
Obr. 1.3 El. longboard - Inmotion K1 [7]	16
Obr. 1.4 El. brusle - Segway Drift W1 [8].....	17
Obr. 1.5 El. koloběžka - Xiaomi Electric Scooter [9].....	17
Obr. 2.1 - Porovnání článků z hlediska hm. a obj. hustoty energie [3]	18
Obr. 2.2 Integrovaný obvod ISL94212 [10]	24
Obr. 2.3 Doporučené zapojení pro integrovaný obvod bq77905 [11].....	25
Obr. 2.4 Doporučené zapojení pro integrovaný obvod BM3451 [12].....	26
Obr. 2.5 Doporučené zapojení pro integrovaný obvod LTC3300-2 [13]	27
Obr. 2.6 Doporučené zapojení integrovaného obvodu R5432v [14].....	28
Obr. 3.1 Pouch-cell článek KOKAM [15]	30
Obr. 4.1 Návrh DPS pro bateriovou desku	33
Obr. 4.2 Blokové schéma zapojení BMS a baterie, příprava pro měření a řízení teploty	35
Obr. 4.3 Tabulka modifikací obvodu R5432V, použitý obvod vyznačen [14]	36
Obr. 4.4 Schéma BMS, část 1/2	39
Obr. 4.5 Schéma BMS, část 2/2	40
Obr. 4.6 Návrh DPS pro BMS	41
Obr. 5.1 Prvotní ověření funkce BMS	42
Obr. 5.2 Oscilogram napětí U_{SENSE} (žlutě), zátěžného proudu (tyrkysově).....	43
Obr. 5.3 Oscilogram napětí U_{C1} (žlutě), zátěžného proudu (tyrkysově).....	44
Obr. 5.4 Oscilogram napětí U_{SENSE} (žlutě), nabíjecího proudu (tyrkysově).....	44
Obr. 5.5 Oscilogram napětí U_{C1} (žlutě), nabíjecího proudu (tyrkysově).....	45
Obr. 5.6 Oscilogram napětí U_{C15} (žlutě), napětí U_{G15} (tyrkysově)	45
Obr. 5.7 Oscilogram napětí U_{C15} (žlutě), napětí U_{G15} (tyrkysově)	46
Obr. 5.8 Schéma měření zatěžovacích charakteristik konstantním proudem	47
Obr. 5.9 Závislost napětí baterie na úrovni vybití	47
Obr. 5.10 Zatěžovací charakteristiky packu	48
Obr. 5.11 Závislost vnitřního odporu bateriového packu na napětí.....	48
Obr. 5.12 - Ověření funkce akumulátorového packu v elektrickém skútru.....	50

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Technické údaje Hoverboard - Standard BLK	15
Tab. 1.2 Technické údaje Inmotion V10F	16
Tab. 1.3 Technické údaje Inmotion K1	16
Tab. 1.4 Technické údaje Segway Drift W1	17
Tab. 1.5 Technické údaje Xiaomi Electric Scooter	17
Tab. 2.1 Typické hodnoty lithiových akumulátorů typu LCO, LFP a LTO [4]	20
Tab. 3.1 Technické údaje článku KOKAM SLPB75106100.....	30
Tab. 4.1 Tabulka hodnot odporu při daných teplotách	34

Seznam příloh

Příloha A: kompletní schéma zapojení	57
--	----

Přílohy

Příloha A: kompletní schéma BMS

