



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Návrh systému pro správu baterií (BMS) pro elektrickou formuli

Design of BMS for Electro Formula Car

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing Vít Hlinovský, CSc.

Jan Mánek

Praha 2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mánek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434760**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh systému pro správu baterií (BMS) pro elektrickou formuli

Název bakalářské práce anglicky:

Design of BMS for Electro Formula Car

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s vlastnostmi baterií typu Li-ion a typu Li-pol a s požadavky pro jejich monitoring a správu
- 2) Navrhněte hardware, který zvládne měřit a spravovat všechny potřebné parametry
- 3) Navrhněte celkovou koncepci BMS systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Andrea, Davide, Battery management systems for large lithium-ion battery packs [1-60807-104-9; 1-60807-105-7]
- [2] Advances in Battery Manufacturing, Service, and Management Systems, online
- [3] RÝZEK, Miroslav. BMS (Battery Management System) pro akumulátorovou baterii FSE. Bakalářská práce České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Praha, 2013.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vít Hlinovský, CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Vít Hlinovský, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze, dne

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu, Ing. Vítu Hlinovskému, CSc. za vedení mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval celému týmu eForce FEE Prague Formula za zkušenosti a vědomosti, které jsem během působení v tomto týmu získal. Rád bych také poděkoval společnosti Retry s.r.o. za poskytnutí licence pro Altium Designer a společnosti PragoBoard s.r.o. za výrobu plošných spojů pro tento projekt. Naposledy bych chtěl poděkovat rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

Cílem této práce je ukázat návrh akumulátorového boxu pro sedmou generaci studentské elektrické formule a poté pro tento akumulátorový box navrhnout kompletní battery management systém, který bude měřit napětí všech článků a teploty vybraných článků.

Klíčová slova

BMS, Baterie, Akumulátor, Formula Student, FSE

Abstract

Goal of this bachelor thesis is to show design of the accumulator pack for the seventh generation of formula student electric car and then to design proper battery management system for this accumulator pack. This battery management system must monitor all cells' voltages and selected cells' temperatures.

Key words

BMS, Battery, Accumulator, Formula Student, FSE

Obsah

1	Vozidlo kategorie Formula Student Electric a omezení daná pravidly této soutěže.....	10
1.1	Popis soutěže Formula Student Electric	10
1.2	Definice a pravidla omezující elektrický návrh akumulátoru.....	10
1.3	Definice a pravidla, která musí splňovat systém pro správu baterií.....	12
2	Technologie akumulátorů elektrické energie, výhody a nevýhody jednotlivých technologií	13
2.1	Olověné akumulátory	13
2.2	Nikl-metal hydridové a nikl-kadmiové akumulátory	13
2.3	Lithium-iontové akumulátory.....	14
2.4	Výběr vhodné technologie pro vozidlo Formula Student Electric sedmé generace.....	15
3	Mezní parametry vybraných Lithium-iontových akumulátorů.....	18
3.1	Napětí mezi elektrodami článku.....	18
3.1.1	Minimální napětí článku	18
3.1.2	Maximální napětí článku.....	18
3.2	Maximální proud článku	19
3.2.1	Vybíjecí proud	19
3.2.2	Nabíjecí proud.....	19
3.3	Teplota článku	19
4	Elektrický a mechanický návrh akumulátoru	20
4.1	Limity dané konstrukcí vozidla	20
4.2	Výběr vhodného zapojení článků	21
4.3	Mechanické uspořádání akumulátoru.....	23
4.3.1	Mechanické uspořádání jednoho segmentu	23
4.3.2	Propojení jednotlivých článků.....	25
4.3.3	Mechanické uspořádání celku	27
4.4	Blokové schéma celého systému akumulátoru	29
4.5	Výběr čipu pro monitorování a balancování jednotlivých částí akumulátoru	31
5	Návrh hardwaru systému pro správu baterií	33
5.1	Návrh části pro balancování článků.....	33
5.2	Návrh řídicí a monitorovací části.....	35
5.3	Propojení schémat.....	39
5.4	Návrh desky plošných spojů	40
6	Návrh doplňujících systémů.....	43
6.1	Systém měření teplot, přivedení napětí do hlavní jednotky	43
6.1.1	Horní část systému	43
6.1.2	Spodní část systému	45
6.2	Rozhraní pro komunikaci s PC	47
7	Osazování a montáž desek plošných spojů	49
8	Závěr.....	52

Seznam tabulek

3.1. Parametry článku VTC5A	18
4.1. Různá zapojení článků	22

Seznam obrázků

2.1. Prizmatický článek	16
2.2. Prizmatický článek	16
2.3. Cylindrický článek	16
2.4. Článek VTC5A.....	17
4.1. Prostor vyhrazený pro akumulátorový box	20
4.2. Pohled na články tvořící segment akumulátoru	24
4.3. Pohled shora na články tvořící segment akumulátoru	24
4.4. Sestava článků s přivařeným horním plechem	25
4.5. Sestava svařených článků před ohnutím, s naznačenou ohýbací rovinou	26
4.6. Sestava svařených článků, po ohnutí.....	26
4.7. Kompletní mechanická sestava jednoho segmentu	27
4.8. Rozložení segmentů uvnitř akumulátorového boxu.....	27
4.9. Segmenty uložené uvnitř akumulátorového boxu, včetně propojení mezi segmenty.....	28
4.1. Schéma celého akumulátorového boxu	29
4.11. Schéma jednoho segmentu	30
5.1. Schéma balancovací části	33
5.2. Schéma řídicí a monitorovací části	35
5.3. Vnitřní blokové schéma obvodu BQ76PL455A-Q1	36
5.4. Celkové schéma battery management systému	39
5.5. DPS s rozmístěnými součástkami a naznačenými spoji, které je nutné propojit	40
5.6. DPS s propojovacími cestami v horní vrstvě.....	41
5.7. 3D pohled na DPS v návrhovém systému Altium	42
5.8. Fotografie vyrobené DPS	42
5.9. Fotografie ručně osazené DPS	42
6.1. Schéma lineárního regulátoru napětí (ve schématu U_LDO).....	43
6.2. Schéma měření teplot a jejich multiplexování	43
6.3. Schéma celé horní měřicí desky	44
6.4. DPS pro horní část systému měření teplot a napětí.....	45
6.5. Schéma měření teplot a jejich multiplexování	42
6.6. Schéma celé spodní měřicí desky	46
6.7. DPS pro spodní část systému měření teplot a napětí.....	46
6.8. Schéma procesorové části	47
6.9. Schéma části s řídicím integrovaným obvodem	48
6.10. DPS rozhraní komunikace	48
7.1. Všechny elektrické části segmentu před složením	50
7.2. Plně sestavený segment se všemi elektrickými komponentami	51

1 Vozidlo kategorie Formula Student Electric a omezení daná pravidly této soutěže

1.1 Popis soutěže Formula Student Electric

Závody Formula Student vznikly v roce 1980 na Texaské univerzitě v Austinu. Soutěž (originálně pojmenovaná Formula SAE) byla založena skupinou SAE International (původně Society of Automotive Engineers).

Konceptem celé soutěže je fiktivní stavba tisícikusové série závodního auta (formule). Potenciální cílovou skupinou jsou neprofesionální víkendoví závodníci. [2]

Od tohoto konceptu se odvíjí celkové zadání projektu, jeho cíle, pravidla i struktura hodnocení.

Hodnocení se dělí na dvě části, nejprve se hodnotí tzv. statické disciplíny, mezi které patří:

- Business plan (podnikatelský plán na prodej a marketing celé série vozidel)
- Cost and manufacturing report (nacenění všech částí formule a jejich výroby)
- Engineering design (prezentace všech důležitých inženýrských řešení, použitých při stavbě auta)

Dále se hodnotí tzv. dynamické disciplíny, kam patří následující:

- Skid Pad (jízda na trati ve tvaru čísla 8, testuje stabilitu a přilnavost vozidla)
- Acceleration (test zrychlení na trati dlouhé 75 m)
- Autocross (jízda na trati kratší než 1,5 km, kde se otestují celkové jízdní vlastnosti formule)
- Endurance (vytrvalostní závod na trati o celkové délce 22 km)
- Efficiency (hodnocení spotřeby vozidla v závodě Endurance)

Maximální hodnocení je 1000 bodů. Z toho se dá 325 bodů získat ve statických disciplínách a 675 bodů v disciplínách dynamických. [3]

Soutěž Formula Student se dále dělí na dvě hlavní kategorie a to podle použitého pohonu. První (a původní) typ pohonu je spalovací motor (Formula Student Combustion). Druhý, novější typ pohonu je elektrický motor (Formula Student Electric).

Ve druhé kategorii vznikla v roce 2017 nová podkategorie, Formula Student Driverless, kde se auto naviguje autonomně po vytyčené trati.

Celá tato práce se věnuje výhradně návrhu auta pro kategorii Formula Student Electric.

Celá soutěž má velkou řadu omezení, která jsou daná pravidly pro konstrukci formule. Tato pravidla jsou každoročně aktualizována a mohou být různá pro každé jedny závody. V kontinentální Evropě se stalo standardem, že téměř všechny závody přebírají pravidla, která jsou vydána soutěží Formula Student Germany.

1.2 Definice a pravidla omezující elektrický návrh akumulátoru

- Výkon z akumulátoru nesmí překročit výkon 80 kW

- Rekuperace energie je povolena a neomezena, ale pouze při pohybu vozidla rychlostí větší než 5 km/h
 - Akumulátor pro trakční systém je definován jako všechny bateriové články či superkapacitory, které skladují energii, která může být použita pro pohon trakčního systému
 - Segmenty akumulátoru jsou podčástí akumulátoru
 - Energie článku je definována (pro účely soutěže) jako maximální napětí článku násobeno nominální kapacitou článku
 - Všechny typy akumulátorů, vyjma termálních baterií a bateriích založených na roztavených solích jsou povoleny
 - Palivové články jsou zakázány
 - Všechny články musí být zabudovány do segmentů akumulátoru a musí být uzavřeny v akumulátorovém boxu (boxech)
 - Napětí žádného ze segmentu nesmí v klidu překročit 120 V. Zároveň maximální energie v žádném ze segmentů nesmí překročit 6 MJ.
 - Musí být možné rozebrat akumulátorový box pro technickou inspekci
 - Každý akumulátorový box musí být vyjímatelný z auta. I při vyjmutí z auta musí plnit veškerá pravidla.
 - Na každém akumulátorovém boxu musí být uvedeno jméno univerzity, závodní číslo vozu a telefonní číslo na osobu zodpovědnou za bezpečnost akumulátorového boxu
 - Pokud je akumulátorový box vyroben z vodivého materiálu, pak musí být izolační bariéra adekvátně dimenzována proti vodivému proražení
 - Každý akumulátorový box musí obsahovat minimálně jednu pojistku a dvě akumulátorová izolační relé
 - Systémy nízkého napětí v akumulátorovém boxu nesmí být přítomné mimo přesně dané výjimky, kterými jsou: spínání izolačních relé, řízení HV DC/DC měničů, systém pro správu baterií, zařízení pro měření izolačního odporu a napájení ventilátorů
 - Musí být možné odpojit oba póly každého segmentu uvnitř bateriového boxu. Toto musí být možné i bez použití nářadí.
 - Nesmí být možné propojit jednotlivé segmenty v jiném než designem zamýšleném pořadí
 - Jednotlivé segmenty musí být od sebe izolovány tak, aby nemohlo dojít k hoření oblouku a kvůli ochraně při pádu nářadí dovnitř akumulátorového boxu při údržbě.
 - Každý vodič uvnitř akumulátorového boxu musí mít izolaci minimálně na maximální napětí celého akumulátoru
 - Každý akumulátorový box musí mít voltmetr nebo červenou LED diodu, která bude vždy indikovat přítomnost napětí vyššího než 60 V na výstupní části akumulátorového boxu. Indikace musí být řešena pomocí hardwarového obvodu, nesmí být použito softwarové řešení. Tento ukazatel musí být dobře viditelný při odpojování akumulátorového boxu. Zároveň musí být označen nápisem „Voltage Indicator“
- [3]

1.3 Definice a pravidla, která musí splňovat systém pro správu baterií

- Každý akumulátor musí být monitorován systémem BMS, pokud je akumulátor připojen do vozu a ve voze je přítomné napětí pro palubní systémy nebo pokud je akumulátor připojen k nabíjecímu zdroji.
- BMS musí kontinuálně měřit:
 - o Napětí všech jednotlivých článků akumulátoru
 - o Proud akumulátoru
 - o Teploty alespoň 30 % článků, měření musí být rovnoměrně rozloženo do celého akumulátorového boxu
- Teplota článku musí být měřena na negativním terminálu článku nebo na výkonovém vodiči spojujícím články ve vzdálenosti menší než 10 mm od negativního terminálu. Je možné měřit více článků jedním senzorem, pokud budou splněny předchozí podmínky
- Maximální teplota článku je 60 °C nebo hodnota uvedena v datasheetu článků (volí se nižší hodnota)
- BMS musí rozpojit obvod trakčního napětí vozu, pokud je změřena nadlimitní hodnota týkající se napětí článku, teploty článku, nebo proudu akumulátoru po dobu delší, než:
 - o 500 ms pro nadlimitní hodnoty proudu, či napětí
 - o 1000 ms pro nadlimitní hodnoty teplot
- BMS musí být schopen vyčíst veškerá data a zobrazit je pomocí laptopu připojeného k vozidlu

[3]

2 Technologie akumulátorů elektrické energie, výhody a nevýhody jednotlivých technologií

Tato práce se zabývá bateriemi pro elektrickou formuli, v této kapitole se tedy budu zabývat pouze elektrochemickými zdroji (akumulátory), které by teoreticky mohly být použity při konstrukci této formule. Budu zde také uvádět hlavní ukazatele, které rozhodují při výběru vhodné technologie právě pro vozidlo Formula Student. Mezi ty patří hlavně poměr mezi kapacitou článku a jeho hmotností (udává se ve $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$), schopnost článku dodávat velké proudy při nízkém poklesu napětí (běžně se udává v C, což by fyzikálně odpovídalo jednotce h^{-1} . Počet C znamená, jaký proud je akumulátor schopen dodat, vztaženo k jeho kapacitě v Ah. Např. akumulátor s kapacitou 2 Ah, který bude schopen dodat až 20 A bude označen jako 10 C). Další rozhodující vlastností jsou i velikost vnitřního odporu (udává se v Ω , nebo častěji v m Ω) a z toho vycházející ohřívání článku při vybíjení, charakteristiky článků pro různé vybíjecí podmínky a další.

Při vybírání ideálních článků je vždy potřeba zohlednit parametry důležité pro konkrétní systém. V některých případech, kde bude např. rozhodující cena a hmotnost nebude důležitá, bude vhodné použít jinou technologii akumulátorů než ve studentské formuli, kde je rozhodující hmotnost a velikost odevzdaného elektrického výkonu.

V dnešní době najdeme mezi běžně používanými typy akumulátorů následující technologie:

2.1 Olověné akumulátory

Jedná se o nejstarší komerčně používanou technologii akumulátorů. V těchto akumulátorech se při nabíjení a vybíjení mění koncentrace elektrolytu uvnitř akumulátoru. Tyto akumulátory se stále používají např. u osobních automobilů, kde je důležitá nízká cena, nutnost naprosto minimální údržby a vysoká odolnost.

Mezi hlavní přednosti těchto akumulátorů patří především:

- Nízká cena
- Schopnost krátkodobě dodávat velké rázové proudy
- Relativně nízké samovybíjení a žádný paměťový efekt akumulátoru
- Částečná odolnost proti přebíjení podbíjení (zničí se akumulátor, ale nehrozí riziko požáru či exploze)

Mezi jeho hlavní nevýhody patří:

- Nízký poměr hmotnost - kapacita, do $50 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Obsah toxických materiálů (kyselina sírová, olovo)
- Proměnlivá kapacita v závislosti na velikosti vybíjecího proudu
- Možnost pouze pomalého nabíjení (okolo 0,1 C)
- Nízká životnost (většinou pod 350 nabíjecích a vybíjecích cyklů)

2.2 Nikl-metal hydridové a nikl-kadmiové akumulátory

Nikl-kadmiové akumulátory byly objeveny na přelomu 19. a 20. století. Tyto akumulátory přinesly oproti olověným akumulátorům mnohem větší hustotu energie na jednotku hmotnosti. Články začaly být postupem času

nahrazovány nikl-metal hydridovými články, které mají ještě větší hustotu energie na jednotku hmotnosti. Charakteristickými vlastnostmi pro tento typ článků je hlavně napětí každého článku 1,2 V ve velké části vybíjecí charakteristiky.

Mezi hlavní přednosti těchto akumulátorů patří především:

- Vysoký poměr hmotnost - kapacita (ve srovnání s olověnými akumulátory), až $80 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Odolnost proti hlubokému vybití a skladování ve vybitém stavu
- Částečná odolnost proti přebití

Mezi jeho hlavní nevýhody patří:

- Nízký poměr hmotnost kapacita (ve srovnání s nikl-metal hydridovými, nebo lithiovými akumulátory)
- Obsah jedovatého kadmia
- Paměťový efekt, kterým baterie trpí

Nikl-metal hydridové akumulátory jsou oproti nikl-kadmiovým akumulátorům novější, objeveny byly v druhé polovině 20. století. Základními vlastnostmi se podobají nikl-kadmiovým akumulátorům, ale přináší přibližně dvojnásobnou hustotu energie na jednotku hmotnosti. Tyto akumulátory se stále používají v některých levnějších zařízeních, např. v domácím akumulátorovém nářadí, případně jako vícekrát použitelná náhrada alkalických článků.

Mezi hlavní přednosti těchto akumulátorů patří především:

- Vysoký poměr hmotnost - kapacita (ve srovnání s nikl-kadmiovými akumulátory), až $120 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Částečná odolnost proti přebití

Mezi jeho hlavní nevýhody patří:

- Nízký poměr hmotnost kapacita (ve srovnání s lithiovými akumulátory)
- Paměťový efekt, kterým baterie trpí

2.3 Lithium-iontové akumulátory

Lithium-iontové akumulátory lze rozdělit do mnoha skupin, v závislosti na použité chemii uvnitř článků.

Jedná se např. o tyto akumulátory:

- LiCoO_2 – nabízí vysokou hustotu energie na jednotku hmotnosti, ale přináší velké riziko vzplanutí, obzvláště při mechanickém poškození
- LiFePO_4 – nepřináší téměř žádné bezpečnostní riziko a trpí pouze malou ztrátou kapacity při cyklickém používání
- LiMn_2O_4 – jedná se o ekologickou a levnou technologii, prozatím se ale neuplatňuje v sériové produkci

Obecně lze říci, že lithiové akumulátory jsou dnes nejpokročilejší technologií, která najde uplatnění v mnoha oborech. Lithiové akumulátory lze nalézt téměř ve všech zařízeních vyšší kvality, která jsou napájena z akumulátoru.

Uplatnění lithiových akumulátorů je např. ve všech moderních přenosných počítačích, mobilních telefonech, chytrých nositelných doplňcích (hodinky a jiné), elektrických dronech, elektromobilech, ve vyrovnávacích bateriích pro solární elektrárny, záložních zdrojích a podobně.

Typickými parametry pro lithium-iontové akumulátory je především relativně vysoké napětí jednoho článku, které je 3,6-3,8 V v případě LiCoO_2 a 3,2 V u článku LiFePO_4 .

Mezi hlavní přednosti těchto akumulátorů patří především:

- Vysoký poměr hmotnost – kapacita, až $265 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Schopnost dodávat vysoký proud při vybíjení (v extrémních případech až 100 C)
- Možnost rychlého nabíjení (v extrémních případech až 5 C)
- Nízké zahřívání (v porovnání s nikel-metal hydridovými články)
- Žádný paměťový efekt akumulátoru
- Vysoká životnost

Mezi jeho hlavní nevýhody patří:

- Riziko požáru při:
 - o Příliš vysoké zátěži (např. zkrat)
 - o Příliš rychlém nabíjení
 - o Při přebití (překročení maximálního napětí článku)
 - o Při mechanickém poškození
- Téměř nulová šance uhašení hořícího článku
- Riziko nevratného poškození článku při podbití (vybití článku pod minimální povolenou hodnotu)

2.4 Výběr vhodné technologie pro vozidlo Formula Student Electric sedmé generace

Vzhledem k předchozím uvedeným vlastnostem se jeví jako nejvhodnější technologie pro vozidlo Formula Student Electric technologie lithiových akumulátorů s co největší hustotou energie na jednotku hmotnosti.

Po výběru vhodné technologie bylo nutné vybrat konkrétní články, které použijeme. Z běžně dostupných technologií nám vyplyne rozdělení do dvou hlavních podkategorií článků a to:

1) Prizmatické lithiové články

Tyto články jsou vyráběny nejčastěji ve tvaru tenkého kvádrů. Rozdělují se do následujících dvou skupin:

- **Prizmatické články s kovovým obalem** obsahují dielektrikum uzavřené v kovovém obalu, který zároveň tvoří negativní elektrodu. Používaly se především dříve v mobilních telefonech a přenosných počítačích. Články jsou relativně bezpečné, vzhledem k celokovovému obalu.



Obrázek 2.1. Prizmatický článek [10]

- **Prizmatické články s měkkým obalem** (tzv. pouch cells) obsahují celou veškerou chemii zatavenou do hermeticky uzavřeného plastového obalu. Obě elektrody jsou vyvedeny ve formě tenkých kovových plíšků. Toto je v dnešní době nejpoužívanější typ baterií pro spotřební elektroniku. Oproti článkům s kovovým obalem je zde možné dosáhnout větší hustoty energie na jednotku hmotnosti i objemu. Problémy však nastávají při jakémkoliv poruchovém stavu, kdy hrozí riziko exploze. Pro tyto články je také typické nafouknutí při poškození článku (článek se může poškodit jak samovolně, postupem času, tak i vnějšími vlivy, přetěžováním, přehříváním) [1]



Obrázek 2.2. Prizmatický článek [11]

2) Cylindrické lithiové články

Vzhledem ke standardizovaným velikostem jsou dnes neoptimalizovanějším druhem článků. Vyrábí se ve dvou velikostech, 18650 (18 mm průměr a 65 mm délka) a 26650 (26 mm průměr a 65 mm délka).

Tyto články poskytují vysokou hustotu energie na jednotku hmotnosti, je možné je efektivně chladit a jsou cenově dostupné.

[4]



Obrázek 2.3. Cylindrický článek

V letech 2010 – 2014 byly v monopostech týmu eForce FEE Prague Formula použity články prizmatické s měkkým obalem. Hlavními důvody k tomuto výběru byla relativně snadná dostupnost takovýchto článků, dobrá hustota energie na jednotku hmotnosti a přijatelná cena. Jak se ale časem ukázalo, tak tyto články trpěly nízkou spolehlivostí a postupem času bylo nutné vyrobit akumulátorový box, který bude lehčí při zachování stejných vlastností nebo jejich vylepšení.

Nízká spolehlivost se projevovala samovolným selháváním jednotlivých článků, kdy docházelo k jejich nafouknutí. Výstupní napětí takovéto baterie se blížilo k nule. Tyto články byly nenávratně poškozeny a byla nutná jejich výměna.

Ve druhé polovině roku 2014 bylo rozhodnuto o použití cylindrických článků.

Pro čtvrtou generaci formule, sezónu 2015, byly vybrány cylindrické články rozměru 18650 (18 mm průměr, 65 mm délka), od výrobce **Sony**, označení US18650VTC5, zkráceně **VTC5**. Tyto články jsou schopné dodávat trvale až 30 A při zajištění adekvátního chlazení. Zároveň mají vysokou hustotu energie na jednotku hmotnosti, v novém stavu přibližně $210 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. [5]

Tyto články byly použity i pro následující dvě generace vozidla. Při jízdě na závodním okruhu však docházelo k určitým problémům s přehříváním baterií a s nedostatečnou kapacitou baterií a z toho vyplývajícím nedostatečným dojezdem vozidla.

Pro sedmou generaci formule jsme se rozhodli přejít na novější typy článků. Po prozkoumání trhu a s přihlédnutím k požadovaným vlastnostem jsme se rozhodli použít opět cylindrické články od stejného výrobce, tentokrát však s označením **Sony** US18650VTC5A, zkráceně **VTC5A**.

Články VTC5A mají oproti článkům VTC5 snížený vnitřní sériový odpor, čímž je docíleno menšího zahřívání při vybíjení (nabíjení) při zachování stejného vybíjecího (nabíjecího) proudu.

Pro vyřešení problému s nedostatečnou kapacitou jsme byli nuceni navýšit celkový počet článků

v akumulátorovém boxu. Základními vlastnostmi charakterizujícími

článek VTC5A, jsou jeho nominální napětí 3,6 V, nominální kapacita 2,6 Ah a hustota energie 198 Wh/kg , respektive 526 Wh/l . [6]



Obrázek 2.4. Článek VTC5A

3 Mezní parametry vybraných Lithium-iontových akumulátorů

V následující kapitole se budu zabývat vlastnostmi článků Sony VTC5A, pro jiné lithium-iontové baterie budou parametry rozdílné, v některých případech se mohou lišit o řád i více!

Veškeré údaje zde uvedené, jsou dané výrobcem těchto baterií a nejsou námi nijak ověřovány (s výjimkou maximálního proudu a nominální kapacity). To by obnášelo vývoj dalšího speciálního zařízení, což by přesahovalo rozsah této práce.

Maximální napětí	4,25 V	
Nominální napětí	3,6 V	
Minimální napětí	2 V	
Maximální kontinuální nabíjecí proud	6 A	
Maximální kontinuální vybíjecí proud	35 A	
Povolená teplota okolí	Nabíjení	0 – 60 °C
	Vybíjení	-20 – 60 °C
Nominální kapacita	2,6 Ah	
Hustota energie	526 Wh/l; 198 Wh/kg	

[6]

Tabulka 3.1. Parametry článku VTC5A

3.1 Napětí mezi elektrodami článku

Napětí článku je jeden z nejkritičtějších parametrů článků, který je možné kontrolovat v reálném čase. Při vybíjení je tuto veličinu možné upravovat pomocí proměnné zátěže (v našem případě omezením maximálního odebíraného výkonu). Při nabíjení je tato hodnota regulována právě pomocí battery management systému, kterým se zabývá tato práce. Abychom mohli napětí na článcích upravovat, je nejprve nutné znát velmi přesnou hodnotu těchto napětí (maximální přijatelná absolutní chyba měření se pohybuje okolo 1 mV). Při překročení mezních parametrů napětí hrozí zničení článku, v horším případě exploze či požár!

3.1.1 Minimální napětí článku

Minimální napětí na článku VTC5A je rovné 2 V. Toto je napětí, pod které se nesmí článek dostat při libovolně malé zátěži. Pokud při provozu napětí poklesne k této hranici, je třeba adekvátně snížit zátěž článku, aby se omezilo riziko podbití baterie.

3.1.2 Maximální napětí článku

Maximální napětí článku VTC5A je rovné 4,25 V. Jedná se o napětí, nad které se článek nesmí nikdy dostat. Tato hodnota se musí kontrolovat především při nabíjení, v případě elektrického vozu i při rekuperaci kinetické energie.

Standardně využívané napětí na článku je 4,2 V. Tato hodnota je zvolena tak, aby i při drobně rozdílných parametrech jednotlivých sériových článků nedošlo při nabíjení k překročení hodnoty 4,25V na libovolném článku. Při překročení napětí 4,25 V hrozí riziko vzplanutí či exploze! Proto je nutné každý z článků monitorovat a v případě překročení 4,2 V adekvátně zareagovat.

3.2 Maximální proud článku

Maximální proud článku je pro naši aplikaci velmi důležitý parametr. Tento parametr je ovlivněn především vnitřním sériovým odporem článku, který se mění především s teplotou článku, úrovní nabití článku a směrem proudu v článku (nabíjení a vybíjení).

Měření proudu jednotlivými články by bylo v naší aplikaci velmi náročné, hlavně co se týče množství měřících kanálů. Zároveň by bylo velmi náročné zajistit dostatek bodů, ve kterých by bylo možné měřit proud a to v případě, že by proud byl měřen Hallovy sondami, i pokud by byl měřen pomocí měření úbytku na přesných sériových rezistorech. Při nutnosti měření proudu každého článku by byl návrh měřicí elektroniky náročnější, došlo by i ke zkomplikování mechanického a elektromechanického návrhu akumulátorového boxu. Proto je měření proudu v akumulátorovém boxu elektrické formule řešeno měřením celkového proudu. Toto řešení je možné použít díky malým rozdílům mezi jednotlivými sériovými odpory článků.

3.2.1 Vybíjecí proud

Pro články VTC5A je maximální kontinuální vybíjecí proud pro článek definován na 35 A s omezením maximální teploty. Maximální kontinuální proud je možné odebírat pouze do dosažení teploty 80 °C na povrchu článku. Článek je tedy možné plně zatěžovat pouze s adekvátním chlazením nebo po omezenou dobu.

3.2.2 Nabíjecí proud

Tento proud je u článků VTC5A omezen na 6 A. Zde opět platí teplotní omezení, tentokrát na 60 °C. Obecně pro nabíjení platí mnohem větší omezení než pro vybíjení. Toto je spojeno s chemickými reakcemi uvnitř článku, při nabíjení hrozí větší riziko exploze či požáru než při vybíjení.

Dále stojí za zmínku, že při větších nabíjecích proudech je omezeno nabíjecí napětí na nižší hodnotu. Při nabíjení proudem 6 A za teploty zvýšené nad 45 °C je povoleno nabíjet článek pouze na napětí 4,15 V (při teplotách od 10 °C do 45 °C je toto napětí 4,25 V).

3.3 Teplota článku

Teplota článku je taktéž velmi kritický parametr, který má nejdelší časovou konstantu ze všech zmíněných veličin. Je proto nutné zajistit správné chlazení článku již při návrhu celého akumulátorového boxu.

Jak již bylo zmíněno, maximální teplota na povrchu článku je 80 °C při vybíjení, 60 °C při nabíjení. Další teplotou, kterou je třeba uvažovat, pokud bychom provozovali články při teplotách nad 60 °C nebo naopak při nízkých teplotách pod bodem mrazu, je teplota prostředí.

Ta může být -20 °C až 60 °C při vybíjení. Pro nabíjení opět platí přísnější podmínky, teplota prostředí může být od 0 °C do 60 °C.

4 Elektrický a mechanický návrh akumulátoru

V předchozích kapitolách byly popsány hlavní vlastnosti samostatných článků, v následujících kapitolách se budu věnovat konstrukci celého akumulátorového boxu.

4.1 Limity dané konstrukcí vozidla

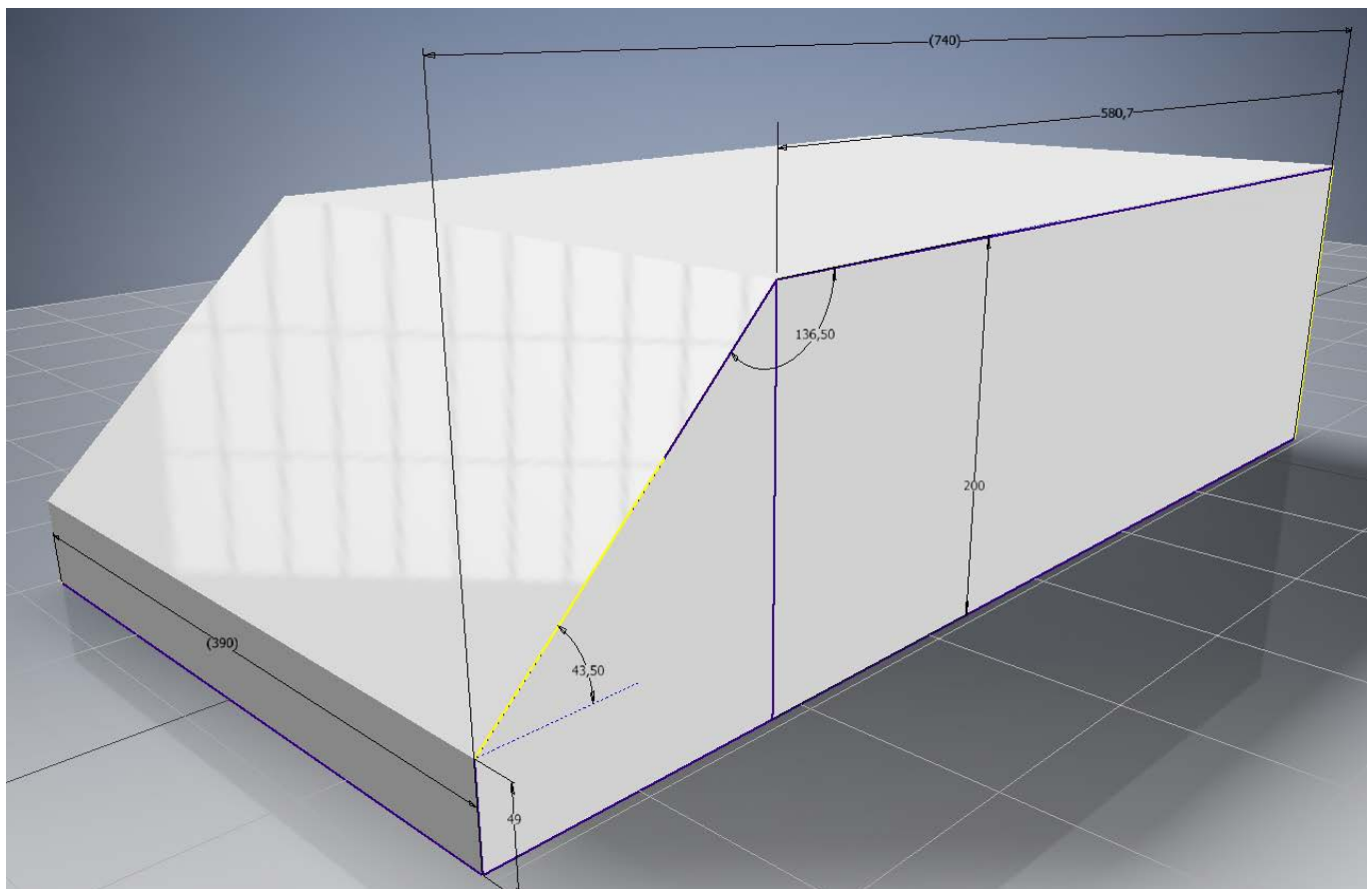
Vozidlo kategorie Formula Student je poměrně nestandardní kategorie, proto i akumulátorový box musí být nestandardní a plně přizpůsobený konkrétnímu vozu.

Prvním (a hlavním) omezením je tvar a maximální možné rozměry celého akumulátorového boxu.

Toto omezení je dané tvarem kompozitového monokoku, který tvoří nosnou konstrukci celého vozu. Kompozitový monokok je při stavbě nového vozu možné částečně upravovat, ale každá úprava obnáší velké množství technologických procesů. Každá úprava je tedy velmi časově i finančně náročná a je v zájmu celého studentského týmu těchto úprav dělat co možná nejméně.

Prostor pro akumulátorový box se při vývoji sedmé generace vozu nezměnil, musíme tedy vycházet z prostoru, který byl určen pro akumulátorový box v předchozích generacích vozu.

Tento prostor je naznačen na následujícím obrázku:



Obrázek 4.1. Prostor vyhrazený pro akumulátorový box

Přední šikmý tvar je omezen tvarem sedačky, zadní část je omezena prostorem, ve kterém jsou umístěny motory pro pohon zadních kol. Výška a šířka je omezena vnitřním prostorem monokoku, výška je navíc omezena kvůli dalším elektronickým jednotkám, které jsou umístěny nad akumulátorovým boxem.

Do celého akumulátorového boxu se musí vejít několik důležitých prvků:

Za prvé zde musí být umístěna jednotka, která řídí spínání silových kontaktů akumulátoru, chlazení, sběr a kontrolu dat o celém akumulátoru a zajišťuje transformaci vysokého napětí akumulátoru na palubní napětí (v našem případě 24 V) pro napájení všech nízkonapěťových systémů. Dále zde musí být pojistka na stejnosměrný proud v řádu stovek ampér, jejíž rozměry také nejsou zanedbatelné. Další neopomenutelnou částí jsou dva kusy výkonových spínacích relé, které každé dokáže rozepnout více než 1000 A stejnosměrného proudu! Tato relé také zabírají určitý prostor v akumulátorovém boxu. Největší část celého akumulátorového boxu zabírají samotné bateriové články. Ty jsou rozmístěny tak, aby bylo zajištěno dostatečné chlazení a aby zabíraly co nejméně místa. Poslední částí akumulátorového boxu je battery management systém, který zahrnuje měření napětí a teplot, balancování článků a předávání těchto informací hlavní řídicí jednotce akumulátoru.

4.2 Výběr vhodného zapojení článků

Výběr vhodné sérioparalelní kombinace článků je náročný především z důvodu shody člověka, který je odpovědný za mechanický design a člověka, který je odpovědný za elektrický design akumulátoru.

Jako první je nutné zvolit si maximální napětí, které bude možné využívat a na které budou navrženy motory a frekvenční měniče pro řízení motorů. U našeho vozidla bylo vybráno napětí 400 V a to především kvůli frekvenčním měničům. Ty, které jsou ve voze použity, mají vynikající poměr výkon / hmotnost, avšak jejich maximální napětí je 400 V. Maximální napětí akumulátoru bude ovlivněno počtem sériových článků.

Dalším krokem je zvolení dostatečné energie akumulátoru. Díky zkušenostem, které jsme získali v minulých letech při testování starších vozů, jsme letos byli schopni poměrně přesně určit, jakou energii musí mít akumulátor pro bezpečné dojetí vozu v kategorii endurance (vytrvalostní závod na 22 km).

Energie akumulátoru pro naše sedmé auto tedy byla stanovena na 8 kWh (+- 0,25 kWh). Spodní hranice energie je zvolena tak, aby auto bylo schopné bez problémů dojet do cíle, horní limit je zvolen kvůli tomu, abychom v autě nevozili zbytečnou hmotnost navíc, která by zhoršovala dynamické vlastnosti vozu. Energie akumulátoru se dá ovlivnit jak počtem sériových, tak počtem paralelních článků. Pokud si však v prvním kroku zvolíme počet sériových článků, tak jediné, čím můžeme ovlivnit energii baterie, je počet paralelních článků.

Z maximálního napětí akumulátoru se dá jednoduše vypočítat sériový počet článků, který je potřeba. Vypočítáme ho jako podíl maximálního napětí akumulátoru (400 V) a maximálního napětí jednoho článku (4,25 V). Tím dostaneme číslo 94,11. Toto číslo je nejmenší možný počet sériových článků, který vyhovuje našim požadavkům. Pokud bychom mírně snížili své požadavky, tak by vyhovovalo i 94 sériových článků (což by nebyl problém, na jízdních vlastnostech auta by se rozdíl např. jednoho sériového článku téměř neprojevil).

Nyní, když máme zvolený počet sériových článků, musíme vybrat počet paralelních článků. Jednoduchým výpočtem jsme schopni získat energii jednoho článku. Tu získáme vynásobením nominálního napětí (3,6 V) a nominální kapacity článku (2,6 Ah). Vyjde nám hodnota 9,36 Wh. Pokud nyní vydělíme požadovanou energii baterie zvoleným počtem sériových článků, tak získáme energii, kterou musí mít jedna paralelní větev článků.

Pokud toto číslo ještě podělíme energií jednoho článku, tak dostaneme potřebný počet paralelních článků.

V následující tabulce jsou vypočítané kapacity akumulátorového boxu při různých zapojeních.

Varianta č.	Počet sériových článků	Maximální napětí akumulátoru (V)	Počet paralelních článků	Kapacita akumulátoru (kWh)
1	94	399,5	8	7,04
2			9	7,92
3			10	8,80
4	95	403,75	8	7,11
5			9	8,00
6			10	8,89
7	96	408	8	7,19
8			9	8,09
9			10	8,99
10	97	412,25	8	7,26
11			9	8,17
12			10	9,08
13	98	416,5	8	7,34
14			9	8,26
15			10	9,17

nevhodné
 použitelné
 zcela vyhovující

Tabulka 4.1. Různá zapojení článků

Z tabulky je vidět, které kombinace jsou přijatelné z elektrického hlediska. Jedná se o kombinace 95s9p, 96s9p a 97s9p.

Dalším krokem je rozdělení tohoto návrhu na jednotlivé segmenty, kvůli pravidlům pro vozy Formula Student Electric. Jak již bylo zmíněno, tak jednotlivé segmenty musejí mít energii menší než 6 MJ, což odpovídá energii 1,67 kWh. Při podělení energie akumulátoru povolenou energií pro jeden segment dojdeme k tomu, že všechny kombinace, které jsou zcela vyhovující, musíme rozdělit alespoň do 5 segmentů. Počet segmentů se zároveň snažíme udržet co nejmenší, protože každý segment vyžaduje své vlastní mechanické části a svou vlastní jednotku BMS, což opět zvyšuje hmotnost, což je nežádoucí.

Segmenty by měly být pokud možno identické, kvůli snadné servisovatelnosti a případné výměně „kus za kus“. U všech zcela vyhovujících kombinací si proto rozložíme počet sériových článků na součiny prvočísel, ze kterých vyplynou možná zapojení segmentů.

Kombinace 95s9p

- číslo 95 je součin prvočísel 5 a 19
- jediná možná konfigurace segmentů je 5 segmentů v konfiguraci 19s9p

Kombinace 96s9p

- číslo 96 je součin čísel 3 a páté mocniny čísla 2
- vhodné konfigurace jsou:

- 6 segmentů v konfiguraci 16s9p
- 8 segmentů v konfiguraci 12s9p

Kombinace 97s9p

- Číslo 97 je prvočíslem. Tato kombinace není vhodná.

Nejlepší kombinací pro naše potřeby byla zvolena kombinace 96s9p, s rozdělením na 6 segmentů, s konfigurací 16s9p. Tato kombinace byla zvolena po hodinách 3D modelování různých kombinací, hledání vhodných řešení pro elektrické zapojení a hledání kompromisů mezi elektrickými a mechanickými designéry. Samostatný popis všech různých zkoušených kombinací a především popis jejich mechanického uspořádání by přesahoval rozsah této práce. Z tohoto důvodu budu v této práci uvádět pouze výsledné řešení, které bylo zvoleno jako nejvhodnější.

4.3 Mechanické uspořádání akumulátoru

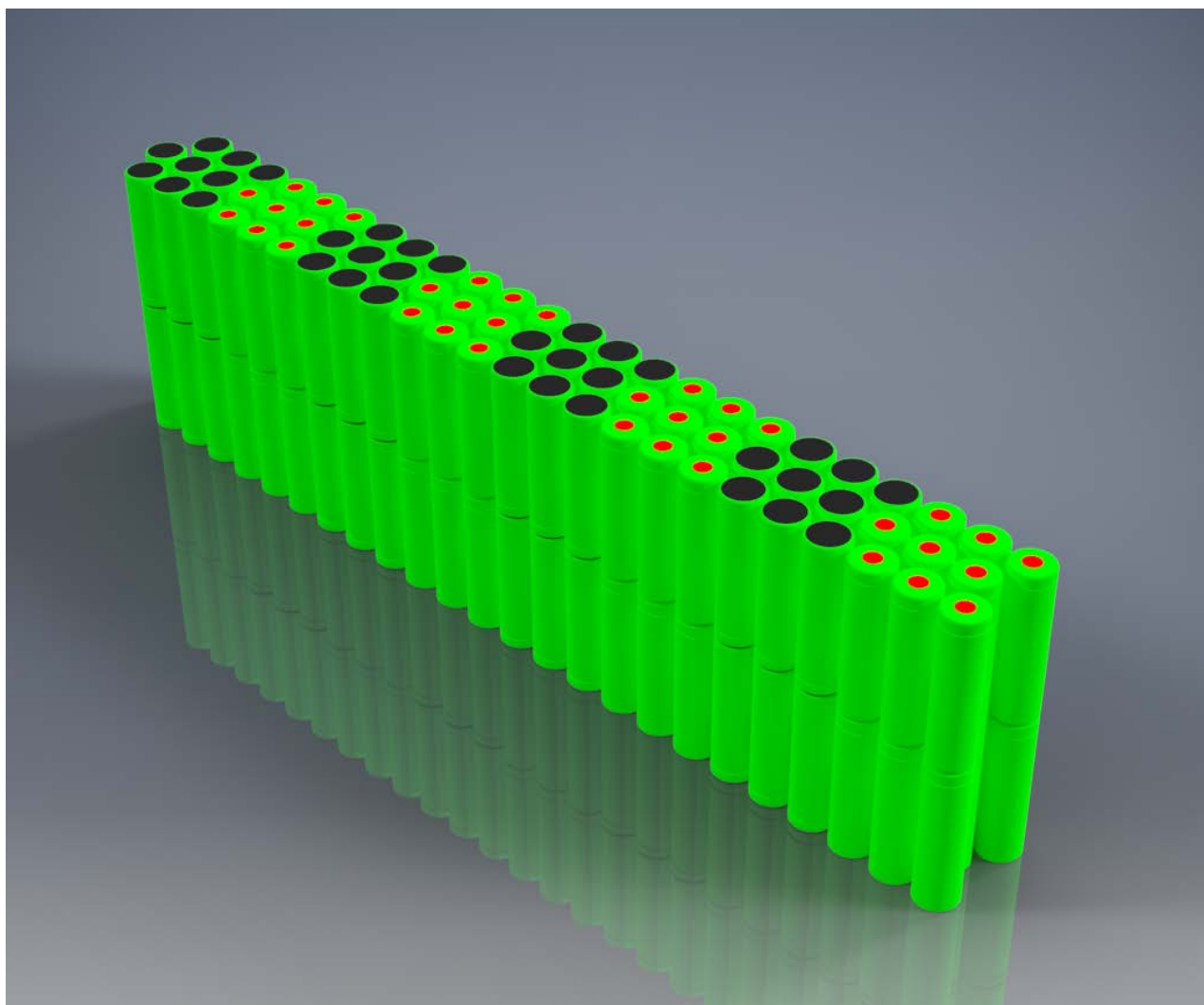
V následující kapitole bude uveden stručný popis mechanického uspořádání článků a hlavně pohledy na 3D model článků, uspořádaných do vhodných pozic.

4.3.1 Mechanické uspořádání jednoho segmentu

Články v segmentu jsou umístěny jako dvě skupiny po devíti člancích, vždy nad sebou. Tato poloha vycházela jako jediná možná při zachování dvou následujících požadavků:

- 1) Zachování elektrické konfigurace z předchozí kapitoly
- 2) Zajištění dostatečného prostoru pro průtok vzduchu kolem článků

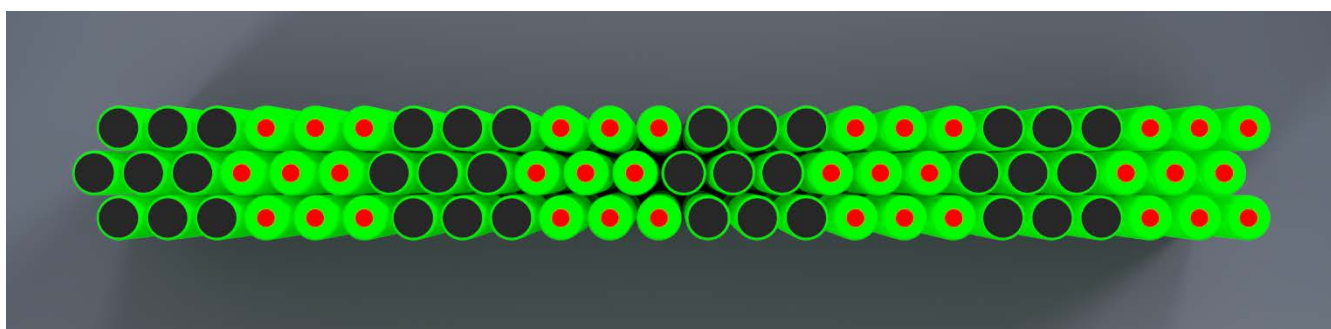
V následujícím obrázku je zobrazené umístění článků jednoho segmentu:



Obrázek 4.2. Pohled na články tvořící segment akumulátoru

Na obrázku jsou označeny kladné póly článků červenou barvou, záporné póly jsou označeny černou barvou.

Na dalším obrázku je, pro lepší představu o rozložení článků, pohled na sestavu článků shora:



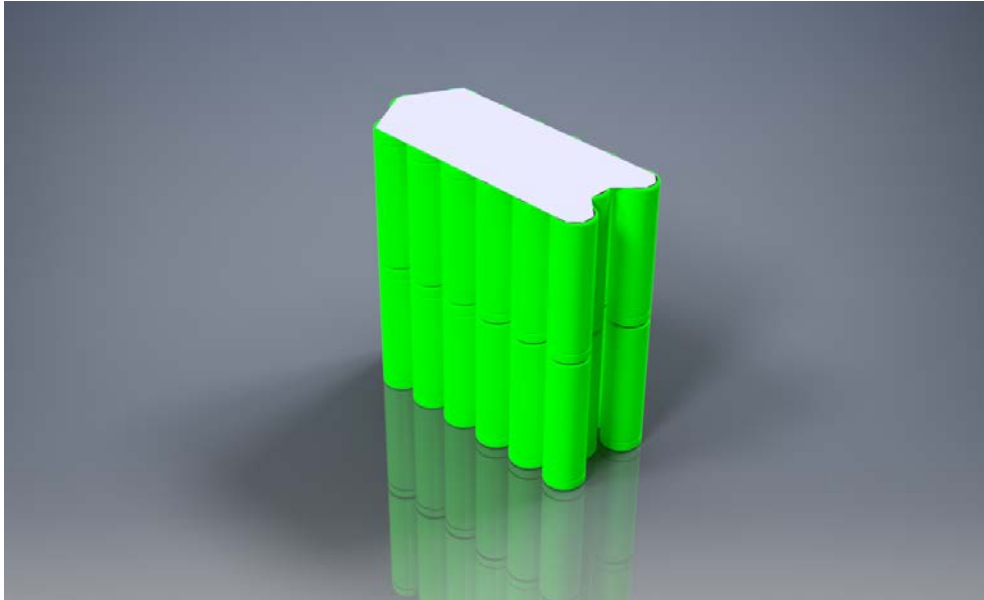
Obrázek 4.3. Pohled shora na články tvořící segment akumulátoru

Jak je vidět z předchozích obrázků, články nejsou rozmístěny do čtvercové mřížky, ale do kosočtvercové. Tím bylo dosaženo menších rozměrů jednotlivých segmentů a zároveň byla zvětšena plocha článku, která bude obtékána vzduchem. Zvětšení obtékané plochy s sebou ale nese zvýšení tlakové ztráty na člancích, zlepšení chlazení je tedy nejisté a bude záležet i na dalších faktorech. Simulace proudění vzduchu a předávání tepla z článků by velmi přesahovala rozsah této práce a u tohoto akumulátorového boxu nebyla v době psaní této práce dokončena.

4.3.2 Propojení jednotlivých článků

Pravidla pro vozy kategorie Formula Student Electric nepřipouštějí spojování článků pomocí pájení, proto musela být pro vodivé spojení článků vybrána jiná technologie. Po zhodnocení možností byla zvolena technologie bodového svařování elektrickým proudem. Tato technologie byla vybrána díky dobré dostupnosti a dobré kvalitě výsledného spojení.

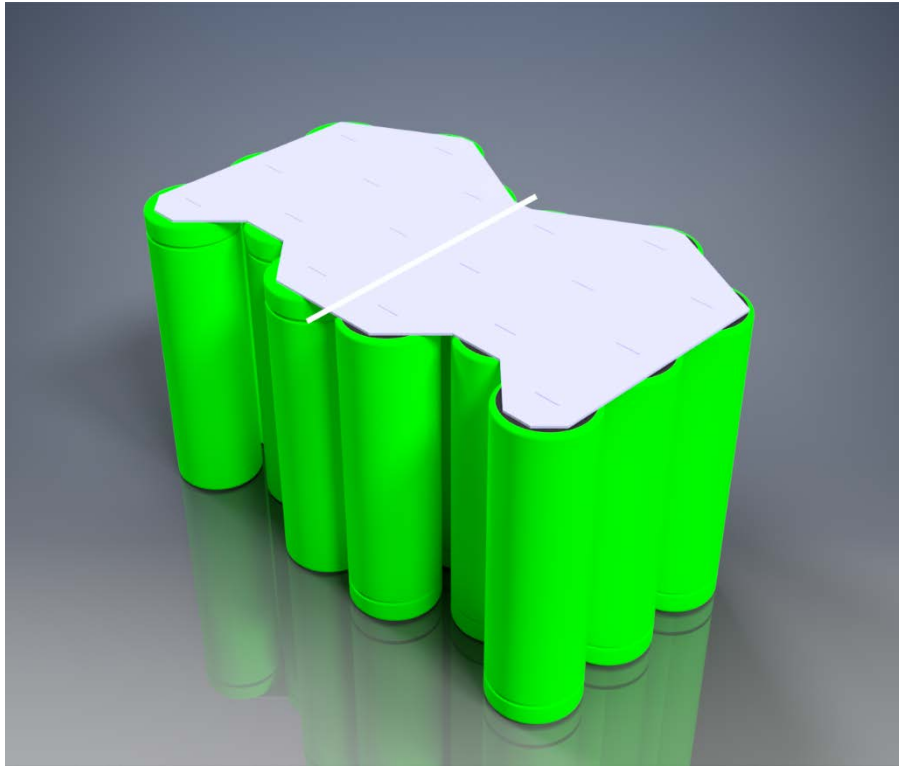
Na horní a na spodní straně segmentu bylo jednoduché vymyslet systém propojení jednotlivých článků. Pro propojení je využit niklový plech ve tvaru šipky (viz. další obrázek).



Obrázek 4.4. Sestava článků s přivařeným horním plechem

Mnohem větší výzvou bylo vymyslet prostřední propojení dvou skupin článků, umístěných nad sebou. Spojení těchto článků musí být kvalitní, s nízkým ohmickým odporem a všechny články by měly být spojeny paralelně, nestačí tedy spojit pouze články, které jsou nad sebou, vždy je třeba propojit najednou 18 článků.

Technologie spojování je zde použita stejná jako pro vrchní a spodní články – bodové svařování elektrickým proudem. Nevýhodou této technologie je možnost přivaření pouze tenkého plechu k dalšímu materiálu. Není tedy možné spojovat jednotlivé články v jejich finálních pozicích, ale je nutné nejdříve přivařit všechny články na niklový plech. Takto svařená sestava musí být následně ohnuta tak, aby nabrala finální tvar.



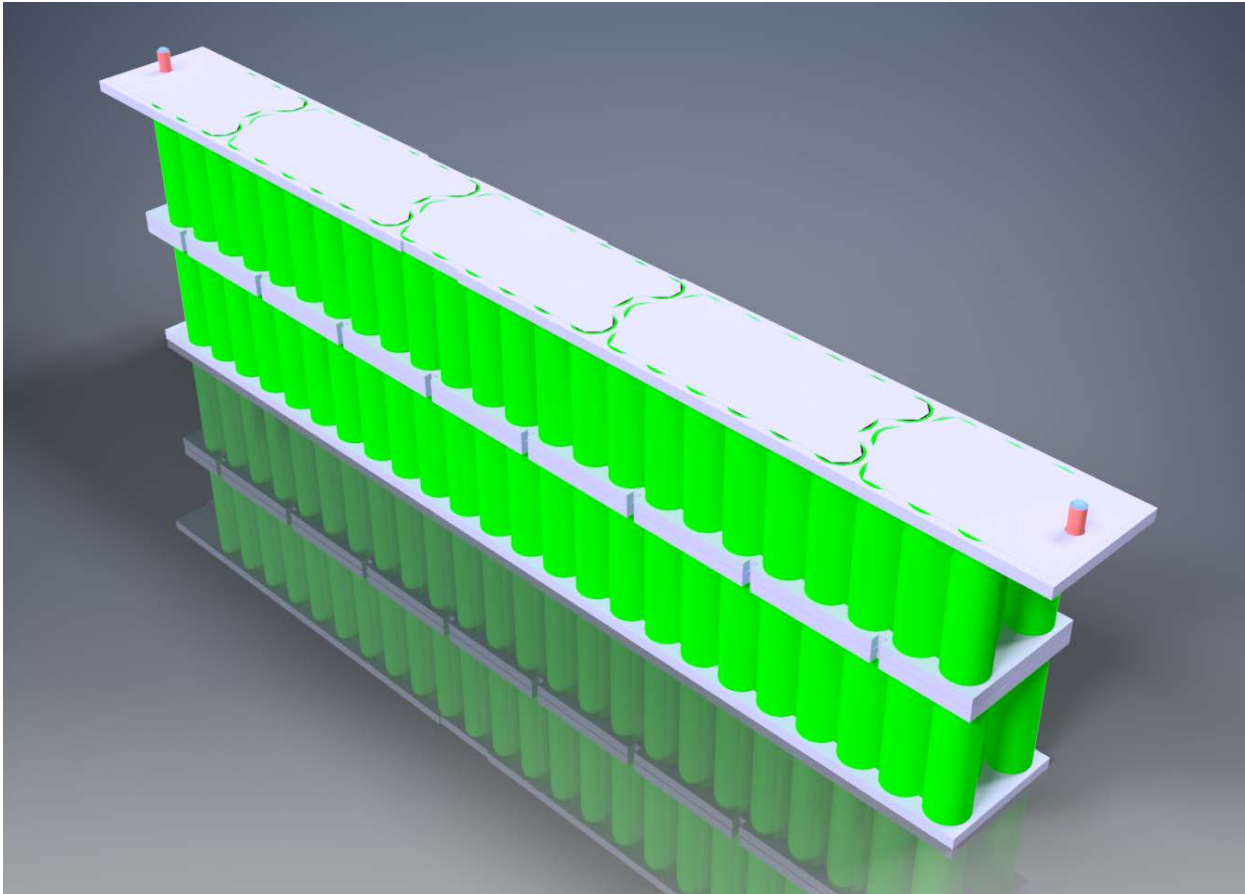
Obrázek 4.5. Sestava svařených článků před ohnutím, s naznačenou ohýbací rovinou



Obrázek 4.6. Sestava svařených článků, po ohnutí

Výše uvedeným způsobem může být svařen celý segment akumulátoru. Pro zlepšení mechanických vlastností a pro dodržení správných vzdáleností bude do segmentu umístěno několik plastových částí.

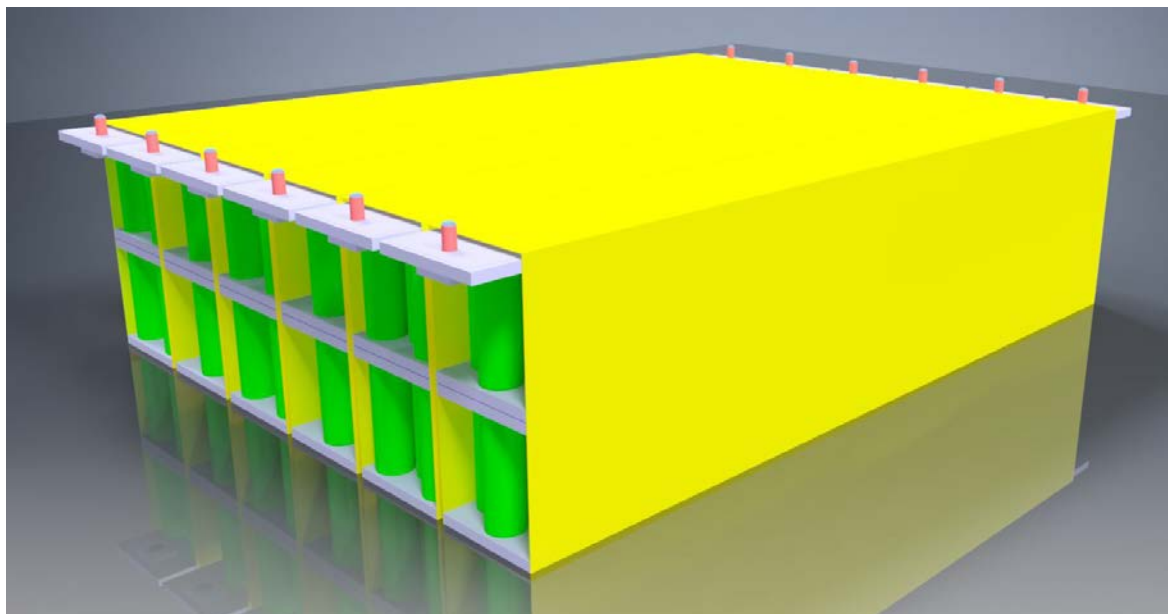
Celý segment, včetně plechů, článků a plastových částí je vidět na následujícím obrázku:



Obrázek 4.7. Kompletní mechanická sestava jednoho segmentu

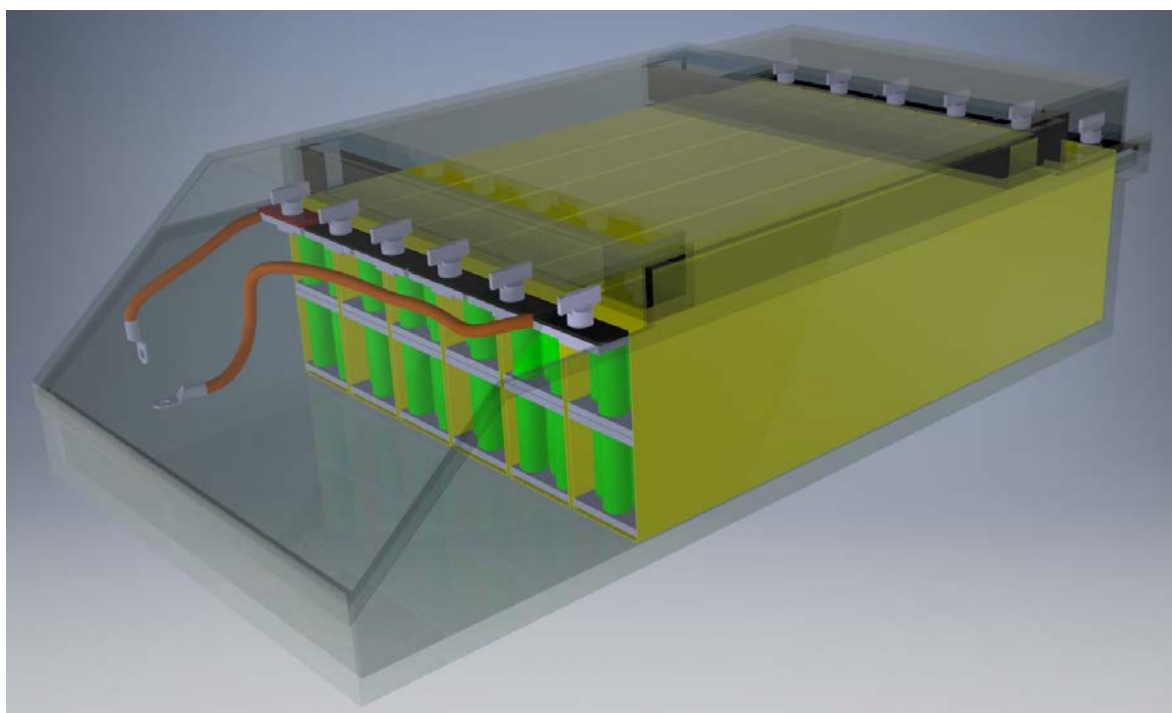
4.3.3 Mechanické uspořádání celku

Celý akumulátorový box je složen ze šesti segmentů, které byly popsány v předchozí podkapitole. Tyto segmenty jsou umístěny uvnitř boxu, vyrobeného z kevlarového laminátu. Segmenty jsou umístěny podélně, ve směru pohybu vozidla, každý segment je uložen do svého pouzdra vyrobeného taktéž z kevlarového laminátu. Segmenty jsou umístěny tak, aby se střídala polarita kontaktních plechů. Díky tomu je možné mít pouze krátké propojky mezi segmenty.



Obrázek 4.8. Rozložení segmentů uvnitř akumulátorového boxu

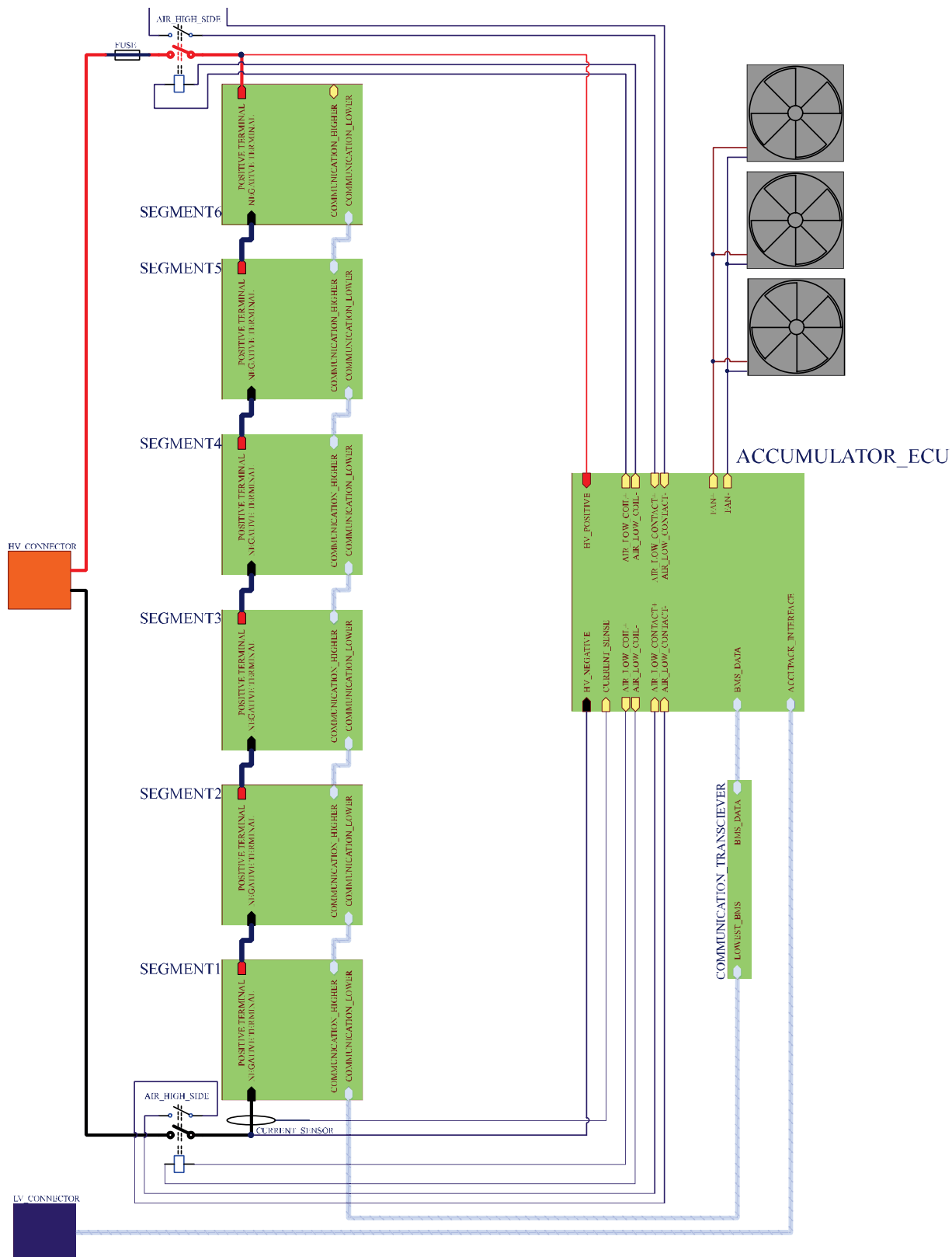
Propojení segmentů je realizováno pomocí tlustých měděných plechů, které jsou vyřezány do správného tvaru a poté nasazeny na kontaktní plochy každého segmentu. Z nejnižšího záporného a z nejvyššího kladného kontaktního plechu vedou silové kabely, které přivádějí napětí celého akumulátoru na výkonová spínací relé. Tyto plechy a kabely jsou upevněny pomocí šroubu, který je součástí segmentu a pomocí matky, která je umístěna v plastovém obalu takovém, aby byla zvnějšku izolována a aby se dala utáhnout a povolít bez pomoci jakéhokoliv nástroje.



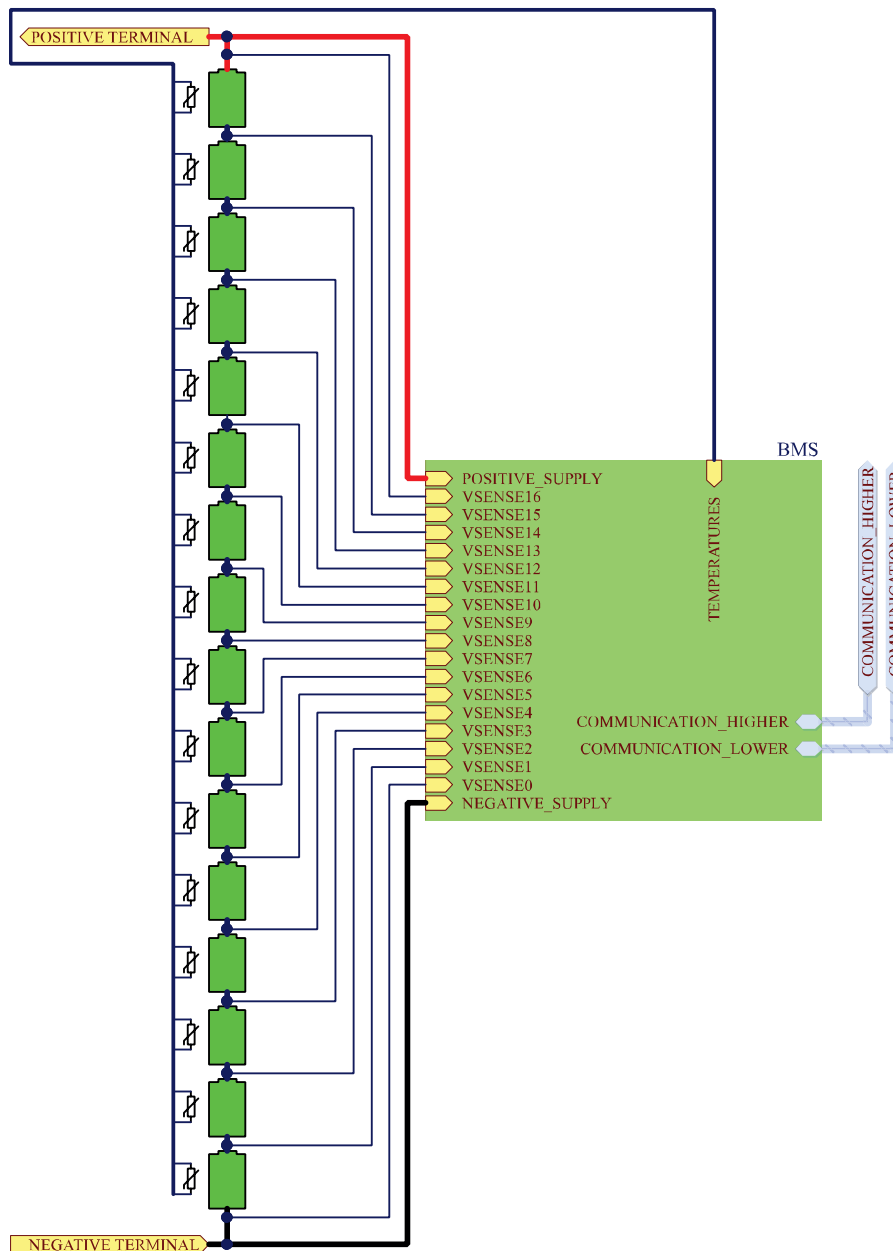
Obrázek 4.9. Segmenty uložené uvnitř akumulátorového boxu, včetně propojení mezi segmenty

4.4 Blokové schéma celého systému akumulátoru

Blokové schéma je rozděleno do dvou částí. Na prvním schématu je celý akumulátorový box, na druhém je nakreslen jeden segment. Segmenty jsou identické, proto by bylo zbytečné každý kreslit šestkrát. Schéma celého akumulátorového boxu je zde uvedeno pro lepší představu o uspořádání všech částí uvnitř akumulátorového boxu.



Obrázek 4.10. Schéma celého akumulátorového boxu



Obrázek 4.11. Schéma jednoho segmentu

Schéma jednoho segmentu je pro tuto práci důležitější, neboť jsou zde vidět všechna rozhraní, které battery management systém musí mít.

Zelené bloky v levé části představují vždy devět paralelně zapojených článků.

Teplotně závislé rezistory vedle nich představují měření teploty těchto článků.

Vstupy VSENSE0..VSENSE16 představují vstupní piny pro měření napětí na článcích.

Vstupy POSITIVE_SUPPLY a NEGATIVE_SUPPLY představují napájení battery management systému. Napájení je od měřicích pinů odděleno pro větší přesnost – měřícím vodičem nebude protékat téměř žádný proud a nevznikne na něm tedy téměř žádný úbytek napětí, který by ovlivňoval měření.

Vstup TEMPERATURES je vstup sběrnice, pomocí které se měří celkem 64 teplotních čidel.

Vstup COMMUNICATION_HIGHER slouží pro připojení BMS s vyšším potenciálem. U BMS s nejvyšším potenciálem zůstane tento vstup nezapojený.

Vstup COMMUNICATION_LOWER slouží pro připojení BMS s nižším potenciálem. U BMS s nejnižším potenciálem bude tento vstup připojen na převodník komunikace. Díky tomu bude možné předat veškerá naměřená data do procesoru, který je bude zpracovávat, případně do PC.

4.5 Výběr čipu pro monitorování a balancování jednotlivých částí akumulátoru

Při výběru řešení battery management systému jsem měl několik možností, jak celý systém zrealizovat.

První, avšak nejsložitější variantou by bylo sestavit celý systém z diskrétních součástek a pro řízení použít procesor. Tato varianta má spoustu nevýhod – při změně kódu pro procesor by se muselo přeprogramovat 6 procesorů, bylo by možné udělat chybu při programování a tudíž mít např. pouze jeden nefunkční systém bez zjevné příčiny. Takovýto systém s procesorem by byl výrazně větší než při použití integrovaného obvodu určeného pro správu baterií. Dalším problémem by byl program, který by musel běžet v procesoru – ten by také byl výrazně složitější, než bude program pro komunikaci s integrovaným obvodem pro správu baterií.

Pro výše zmíněné nevýhody a velmi málo výhod nebyla tato varianta vybrána.

Druhou variantou je využít integrovaný obvod určený ke správě baterií. Výhody tohoto řešení jsou zásadní – je potřeba méně součástek, celý systém tedy bude menší, je zde menší prostor pro případné chyby, není třeba vytvářet a nahrávat systém do procesorů. Nevýhodou je velmi omezený výběr integrovaných obvodů, které zvládnou monitorovat a spravovat 16 sériově zapojených článků najednou.

Třetí variantou bylo využít dva integrované obvody pro správu baterií pro každý segment. Každý by spravoval 8 sériově zapojených článků a z hlediska těchto obvodů by pak celý akumulátorový box byl rozdělen na 12 sériově spojených segmentů po 8 sériově zapojených člancích. Tato varianta by byla výhodná z hlediska dostupnosti integrovaných obvodů pro správu 8 sériových článků, kterých je na trhu velké množství. Nevýhodou této varianty je velké množství komponent, které musejí být umístěny jako podpůrné systémy pro integrovaný obvod.

Finální rozhodnutí padlo na integrovaný obvod pro správu 16 sériově spojených článků. Takovýchto integrovaných obvodů je ale v současné době na trhu opravdu velmi málo.

První variantou byl integrovaný obvod od firmy Maxim Integrated s označením MAX14921. Tento obvod nabízí správu až 16 sériově zapojených baterií, problém ale nastává při podrobnějším zkoumání. Výrobce u tohoto obvodu udává maximální doporučené vstupní napětí 65 V. Naše maximální napětí může dosáhnout až 68 V a tudíž by se napětí v obvodu mohlo pohybovat nad doporučenými hodnotami. Takovéto využívání obvodu mi přišlo příliš riskantní, proto tento obvod nebyl vybrán.

Další variantou byl obvod od firmy Texas Instruments. Ten vyrábí pouze jeden obvod pro 16 sériově spojených článků a to obvod s označením BQ76PL455A-Q1. K dispozici je ještě obvod s označením BQ76PL455A, což je ale téměř identický obvod, který ovšem není určen pro automotive průmysl (na rozdíl od BQ76PL455A-Q1). Tento obvod má doporučené maximální vstupní napětí až 79,2 V, plně tedy vyhovuje pro naše použití. V obvodu je k dispozici navíc 8 analogových vstupů pro další použití a 5 digitálních vstupně – výstupních pinů pro další použití. Toho lze využít pro měření a multiplexování teplotních senzorů.

Poslední variantou bylo použití integrovaných obvodů od čínských výrobců, např. obvodu CW1165 BMS AFE od výrobce Fengshuo Technology, to by ale bylo, vzhledem ke špatné dokumentaci a špatné dostupnosti, značně riskantní.

Po zhodnocení všech možností padla jasná volba na využití obvodu **BQ76PL455A-Q1** od firmy **Texas Instruments**.

Hlavní vlastnosti integrovaného obvodu BQ76PL455A-Q1 [7]:

- Monitorování a balancování 6 až 16 sériových článků lithiových akumulátorů
- 14-bitový AD převodník
- 8 AD vstupů pro další senzory
- Přesná interní napěťová reference
- Integrovaná ochrana proti podpětí a přebití
- Komunikace rychlostí až 1 MB/s po sběrnici UART
- Možnost spojení až šestnácti integrovaných obvodů za sebe pomocí dvou kroucených párů vodičů
- Pasivní balancování pouze s externími N-FET spínači a externími rezistory

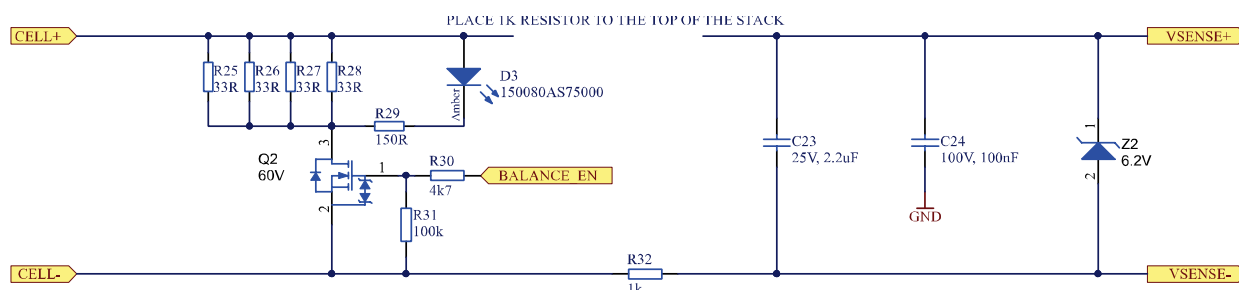
5 Návrh hardwaru systému pro správu baterií

V následující kapitole se budu věnovat návrhu elektrického schématu pro celý systém. Schéma bude rozděleno do několika bloků. Díky tomu nebude nutné kreslit opakující se části vícekrát a celý systém bude o něco přehlednější.

Celý systém bude rozdělen na následující tři části:

- 1) Část pro balancování článků – ta bude obsahovat balancovací rezistory, spínací prvky pro aktivování těchto rezistorů a vstupní filtry napětí.
- 2) Řídicí část – ta bude obsahovat integrovaný obvod pro správu baterií, regulátor napětí a komunikační rozhraní.
- 3) Hlavní schéma – zde bude propojení dvou předchozích částí.

5.1 Návrh části pro balancování článků



Obrázek 5.1. Schéma balancovací části

Do každé z těchto částí vstupuje kladný a záporný pól jednoho článku. Článek je napojen pouze přes pojistku. Je tedy nutné zajistit, aby se za běžných okolností nespojily oba vstupy tohoto bloku.

Součástky použité pro balancování jsou v levé části schématu. Jedná se o MOSFET tranzistor, čtyři výkonové rezistory a indikační LED diodu. U spínacího tranzistoru jsou navíc dva rezistory, rezistor R30 slouží k omezení proudu při nabíjení parazitní kapacity tranzistoru. Rezistor R31 zajišťuje rozeznání tranzistoru při stavu vysoké impedance na vstupu BALANCE_EN.

Tato část má jedinou funkci – po přivedení řídicího napětí na vstup BALANCE_EN začít odebírat energii z článku a tím ho vybíjet.

Řídicí napětí musí mít úroveň alespoň o 2 V vyšší, než je napětí na pinu CELL-. Toto napětí (a tedy i spínání tranzistoru) je řízeno integrovaným obvodem v řídicí části.

Při vybíjení se energie z článku mění především na teplo, které se protopí ve výkonových tranzistorech, zlomek energie se vysvítí pomocí indikační LED diody. Maximální napětí, které na článku může být je 4,25 V. Celkový odpor čtyř paralelně zapojených rezistorů je 8,25 Ω . Výkonová ztráta na těchto rezistorech je pak rovna $P=U^2/R$, což v našem případě vychází 2,2 W (0,55 W na každý rezistor). Povolená výkonová ztráta na každém rezistoru je 1 W, celkově tedy teoreticky můžeme na rezistorech protopit až 4 W. Z tohoto hlediska vychází vše v pořádku, je však potřeba vzít v úvahu i odvod tepla. Pro rezistory v pouzdře 2512 je tepelný odpor 45 K/W. Každý rezistor by

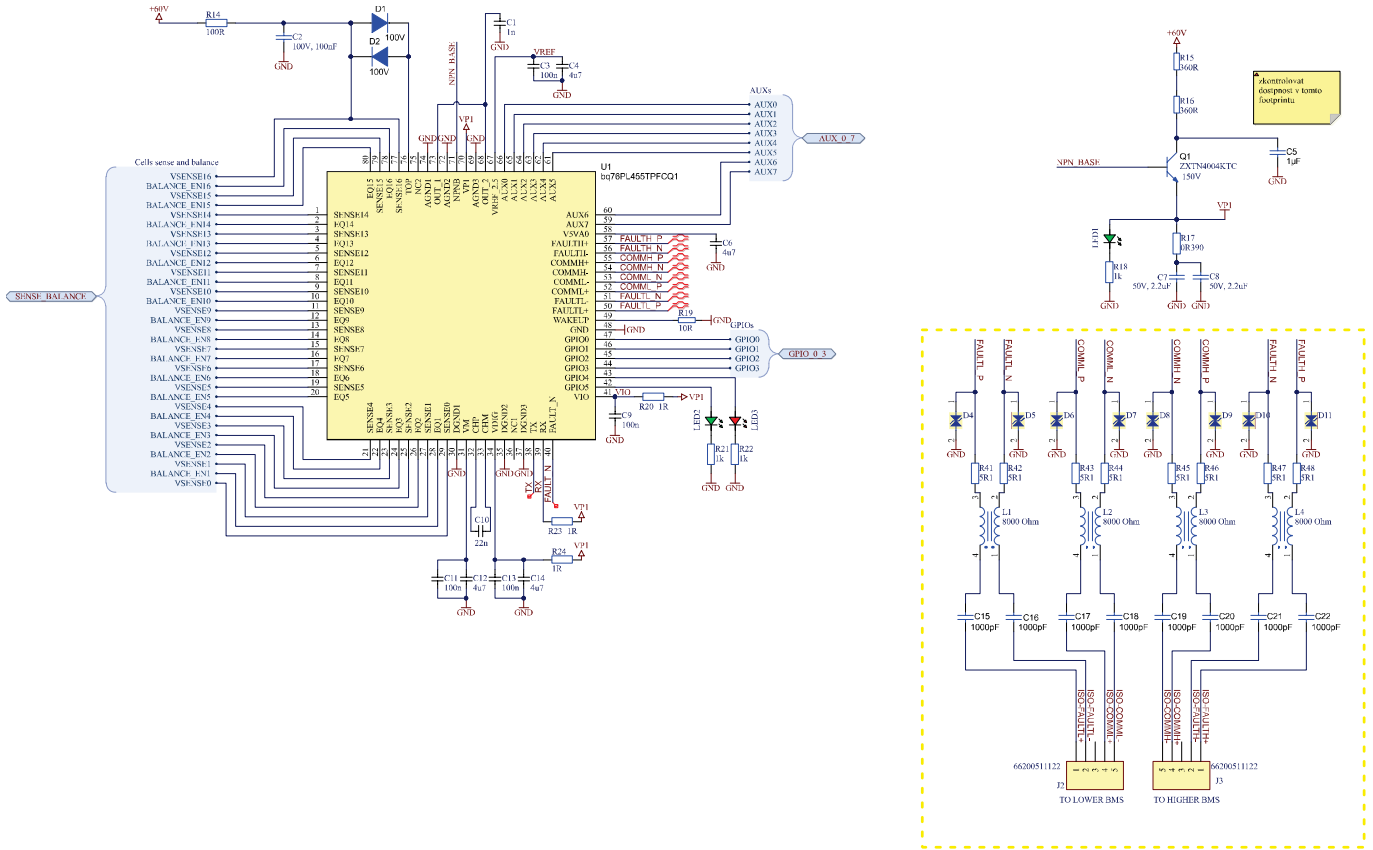
se tedy měl ohřát o 24,75 °C. To však platí, pouze pokud by byl odpor připájen samostatně na poměrně velké měděné ploše. To v našem případě není splněno, proto bylo třeba oteplení takto zapojených rezistorů otestovat. V našem případě není rychlost vybíjení kritickou veličinou, proto by bylo možné při přehřívání rezistorů zvětšit jejich hodnotu a tím snížit jejich ohřívání. Spolu se snížením teploty by však klesl i vybíjecí proud, což je nežádoucí.

Testování oteplení proběhlo po výrobě desky plošných spojů. Měření bylo prováděno při teplotě okolí 23 °C. Měřicím zařízením byl bezkontaktní teploměr SKF, emisivita byla nastavena na hodnotu 0,95. Při zaktivování dvou sousedních vybíjecích částí (celkem tedy topilo 8 rezistorů blízko u sebe) se teplota ustálila na hodnotě 83 °C. Maximální pracovní teplota vybíjecích rezistorů je 125 °C [9]. Oteplení rezistorů bylo 60 °C. Při uvažování relativně velkých nepřesností měření u bezkontaktního teploměru lze říci, že je možné bezpečně využívat balancování článků do teploty 50 °C uvnitř akumulátorového boxu (pokud se bude najednou využívat balancování maximálně dvou článků).

Druhou část schématu, která je na pravé straně, tvoří vstupní filtr. Součástí tohoto filtru je rezistor R32, který je na schématu, druhý rezistor R32, který je součástí dalšího schématu a jeho připojení je vidět v hlavním propojovacím schématu. Další součástí jsou dva kondenzátory. Kondenzátor C23 slouží k filtraci napětí článku. Tvoří s rezistory R32 dolní propust s časovou konstantou 4,4 ms, což odpovídá mezní frekvenci 36 Hz. Na této frekvenci bude mít filtr zisk -3 dB a ten bude dále klesat strmostí -20 dB na dekádu. C24 slouží k potlačení rychlých přechodových jevů, které mohou nastat např. při zapojování konektorů apod. Tento kondenzátor je na desce plošných spojů připojen přímo do vrstvy, která je celá tvořena zemní rovinou. Je tedy schopen potlačit tyto rychlé a nežádoucí jevy.

Poslední součástí je Zenerova dioda na 6,2 V. Ta chrání monitorovací obvod proti přepětí při nahodilém odpojení článku (např. při poruše pájeného spoje). Tato dioda, pokud by nastal poruchový stav a bylo by překročeno napětí 6,2 V, bude využívat rezistory R32 k omezení proudu.

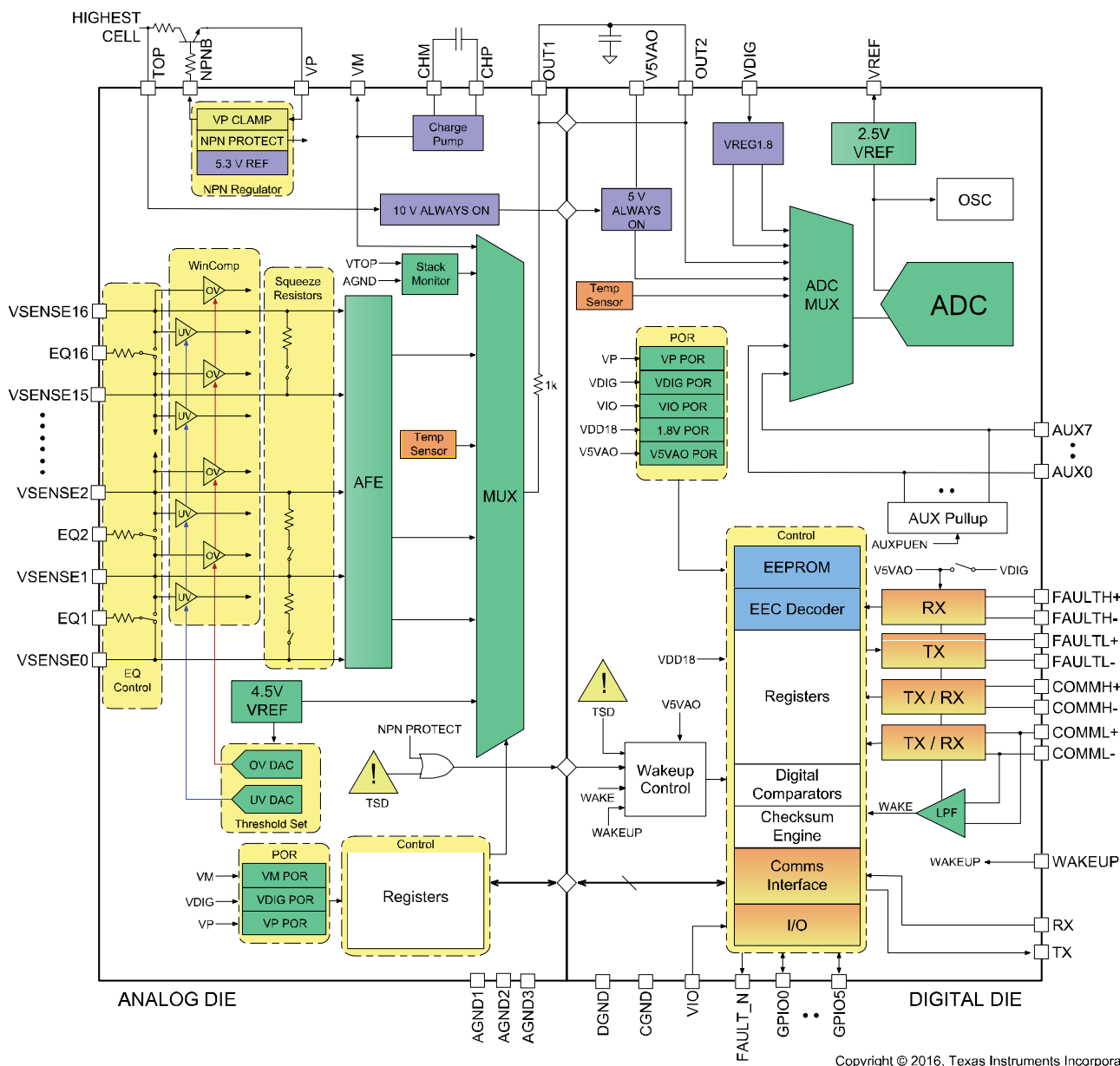
5.2 Návrh řídicí a monitorovací části



Obrázek 5.2. Schéma řídicí a monitorovací části (schéma bylo oříznuto o okraje a razítko, kvůli zvětšení)

Hlavní částí tohoto schématu je integrovaný obvod Texas Instruments BQ76PL455A-Q1. Ten zajišťuje monitorování napětí, ovládá spínání balancovacích rezistorů, komunikuje s okolními obvody, zajišťuje stabilizaci napětí na úroveň 5,3 V a ovládá podpurné obvody pro měření teplot článků. V následující části bude zmíněn poměrně často, proto budu v této kapitole používat pouze zkratku IC (integrated circuit). Na následujícím obrázku je vidět vnitřní blokové schéma tohoto IC, ze kterého vyplývají nutné podpurné prvky pro správnou funkci.

7.2 Functional Block Diagram



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Obrázek 5.3. Vnitřní blokové schéma obvodu BQ76PL455A-Q1 [7]

Částí schématu, bez které by celý systém nemohl fungovat, je napájení. To je zde řešené pomocí lineární stabilizace, při které se napětí snižuje pomocí tranzistoru pracujícího v lineárním režimu, v tomto případě se jedná o tranzistor Q1. Ten je ovládán z IC pomocí signálu označeného NPN_BASE. IC obsahuje uvnitř ještě dva další lineární regulátory napětí, které jsou vidět na vnitřním blokovém schématu. Označeny jsou jako 10V ALWAYS ON a 5V ALWAYS ON. Tyto lineární regulátory napájí vnitřní obvody s ultra nízkou spotřebou, které kontrolují, zda nebyl přijat požadavek na spuštění všech částí IC. Pokud takovýto požadavek zjistí, tak je aktivována vnější regulace napětí a začne se otevírat tranzistor Q1. Pro zpětnou vazbu je použit pin VP1. Tím se sleduje napětí za tranzistorem a je udržováno na hodnotě 5,3 V. Toto napětí budu označovat jako VP1. Další částí napájení je referenční napětí 2,5 V, které je používáno při převodu napětí na digitální hodnotu. To je

zafiltrované pomocí dvou kondenzátorů, C3 a C4.

Dále je zde napětí VDIG. Toto je napětí pro digitální vstupy a standardně je spojené se stabilizovaným napětím VP1. Je důležité umístit blízko tohoto pinu odrušovací kondenzátory, které sníží rušení na vstupu do čipu a zároveň jsou krátkodobým zdrojem energie, pokud obvod skokově změní svůj odběr.

Následuje napětí VM. To je vývod vnitřní nábojové pumpy, která zajišťuje -5 V pro vnitřní obvody. Toto napětí je vyvedeno pouze pro umístění odrušovacích kondenzátorů. K nábojové pumpě je nutné připojit ještě kondenzátor mezi piny CHP a CHM. Zde je umístěn kondenzátor C10. Ten zde slouží jako nosič energie při přepínání nábojové pumpy.

Dalším napětím je V5VAO. Toto je vždy aktivní napětí 5V a je vyvedeno pouze pro připojení odrušovacích kondenzátorů. Toto napětí není doporučeno používat pro jiné účely, proto je připojené pouze na odrušovací kondenzátor.

Posledním napětím je VIO. To slouží jako napětí pro logické komunikační obvody. Standardně je připojeno na napětí VP1. Pouze v systému pro komunikaci s dalším procesorem bude tento pin připojený na stejné napětí jako daný procesor. Tím bude dosaženo stejných logických úrovní.

Další částí je zapojení pro využití hlavní funkcionality IC a to monitorování a balancování článků. Pro připojení článků a ovládání balancovacích rezistorů je využito 33 pinů IC (16 pinů pro ovládání tranzistorů spínajících balancovací rezistory a 17 pinů pro diferenciální měření napětí článků). Na schématu je pro toto spojení využito symbolu sběrnice, filtry a ochrany jsou nakresleny v jiném bloku, který byl popisován v předchozí kapitole. V tomto schématu je přidána pouze jedna ochrana, a to diody D1 a D2. Ty slouží pro případ, kdy by napětí označené jako +60V kleslo o více než 0,7 V a napětí na pinu SENSE16 by bylo o více než 0,7 V vyšší než napájecí napětí. Tento stav nesmí nastat, proto jsou zde tyto diody, které by případně napětí na VSENSE16 snížily. Pro měření každého z 16 článků je použit analogový posuv úrovně (na vnitřním schématu AFE). To umožňuje měřit všechny články se stejnou přesností. Signál z AFE dále vstupuje do multiplexeru, výstup multiplexeru je vyvedený na pin IC označený jako OUT1. Odsud je doporučené zapojení do vstupu IC označeného jako OUT2, který vede do dalšího multiplexeru. Tento signál je vyveden a propojen mimo strukturu IC kvůli možnost dalšího filtrování signálu a tím zmenšení šumu (v našem případě je zde zapojený kondenzátor C1). Z multiplexeru, do kterého vede signál z OUT2 jde signál dále do analogově – digitálního převodníku. Zde je analogová hodnota napětí převedena na digitální signál pomocí 14 – bitového AD převodníku s postupnou aproximací. Celá konverze trvá pouze 3,44 μ s. Lze však nastavit čas mezi konverzemi tak, aby se stihlo plně srovnat napětí na kondenzátoru C1.

Komunikace mezi jednotlivými IC a tedy i mezi jednotlivými segmenty a jednotkou akumulátorového boxu je zajištěna pomocí dvou kroucených párů vodičů. Jeden pár slouží pouze k indikaci chyby na jakémkoliv segmentu, tento pár je označen FAULT. FAULTL vede do segmentu s nižším napětím, FAULTH vede do segmentu s vyšším napětím. Druhý pár slouží k plnohodnotné komunikaci a zároveň k zaktivování jednotlivých IC, pokud jsou ve stavu spánku. Obdobně zde COMML vede do segmentu s nižším napětím, COMMH vede do segmentu s vyšším napětím. Jak je vidět z vnitřního schématu, tak detekce aktivační (WAKEUP) sekvence je pouze na pinech COMML. Hlavní komunikační IC musí být zapojen na úrovni nejnižšího napětí tak, aby se postupně aktivovaly IC na

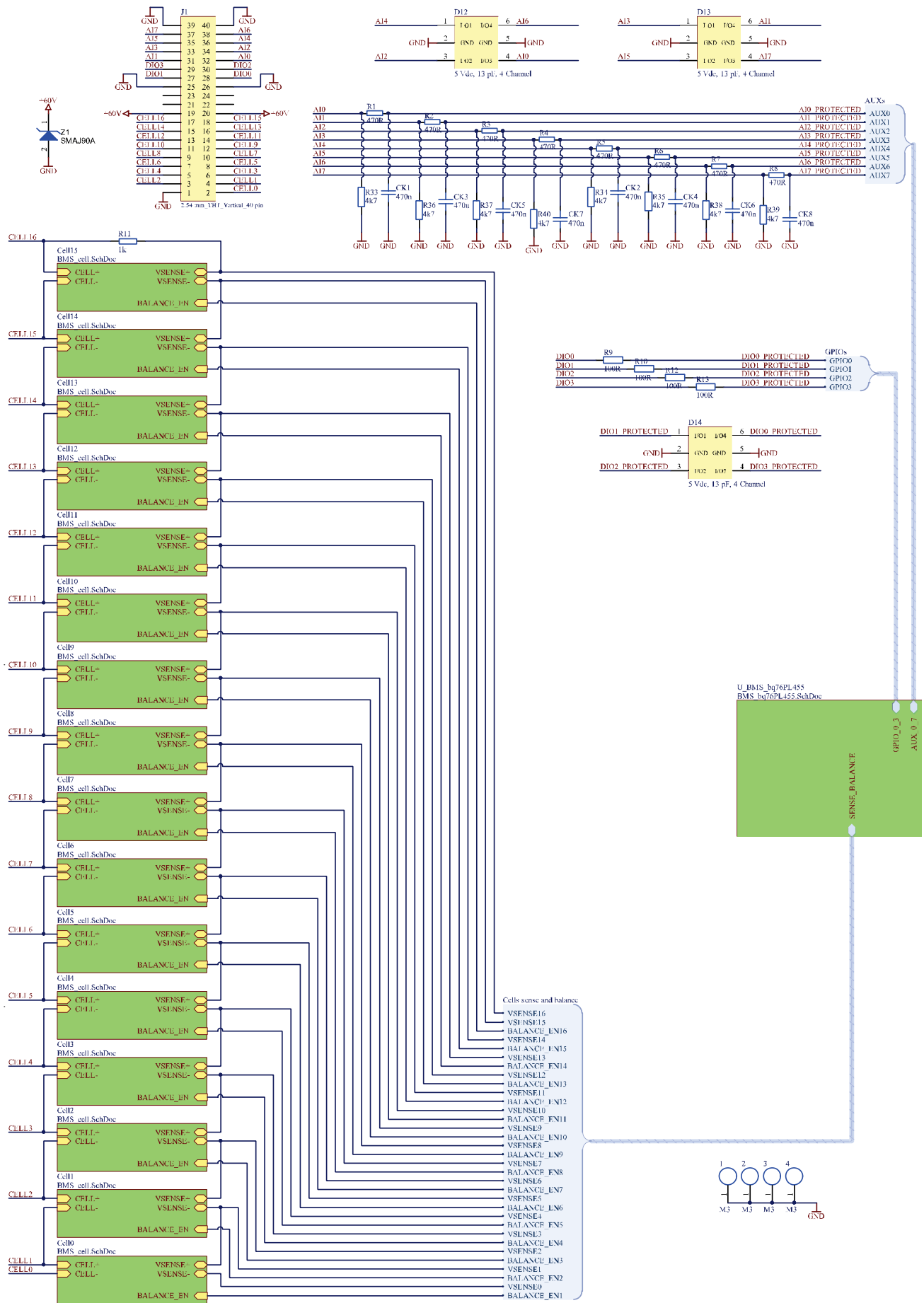
segmentech s čím dál vyšším napětím.

Veškerá komunikace je galvanicky oddělená pomocí kondenzátorů na napětí 1kV (C15 – C22). Komunikace je dále chráněna proti rušení čtyřmi soufázovými tlumivkami. Ty přemění soufázové rušení na magnetické pole, ale pokud zde bude vysílán signál z IC, tak se magnetická pole obou cívek vyruší a signál téměř nebude ovlivněn. V cestě signálu jsou ještě sériové rezistory a TVS diody připojené do země. Tato kombinace slouží jako ochrana proti elektrostatickým výbojům.

Pro indikaci stavu jsou zde přítomné dvě LED diody, ovládané z digitálních pinů IC. Logika využití závisí na finální podobě programu, který bude všechny IC řídit.

Na každém segmentu je dále nutné měřit teploty minimálně 44 článků (což vychází z pravidel – je nutné měřit teploty alespoň 30 % článků). Na IC je pouze 8 analogových vstupů pro další použití. Proto jsem zvolil možnost multiplexování analogových napětí z čidel teplot. Od IC je vyvedeno všech 8 analogových vstupů, ke kterým budou připojeny výstupy multiplexerů a 3 digitální výstupy. Pomocí digitálních výstupů je možné přepínat mezi až 8 různými vstupy multiplexerů. Když vynásobíme počet možných multiplexerů a počet kombinací, mezi kterými můžeme přepínat, dostaneme číslo 64. To je počet teplotních senzorů, který je možné s tímto zapojením snímat.

5.3 Propojení schémát



Obrázek 5.4. Celkové schéma battery management systému

Celé schéma se skládá z 16 bloků pro balancování a filtraci napětí, jednoho hlavního řídicího bloku, ESD ochran, filtrů pro měření teplot a konektoru pro měření napětí článků a teplot.

ESD ochrany jsou zapojeny na všechny analogové vstupy i digitální výstupy IC. Dále je připojena jedna TVS dioda do hlavního napájení pro ochranu proti elektrostatickým výbojům vybitým přímo do celého segmentu.

Jako filtr pro měření teplotních čidel slouží vždy sériový odpor a paralelní kondenzátor. Tato kombinace tvoří dolní propust s mezní frekvencí 720 Hz. Paralelní odpor je zde umístěn pouze pro účely ladění, na desce plošných spojů nebude osazen.

Zapojení konektoru pro přivedení napětí článků a teplot je vybráno s ohledem na několik věcí.

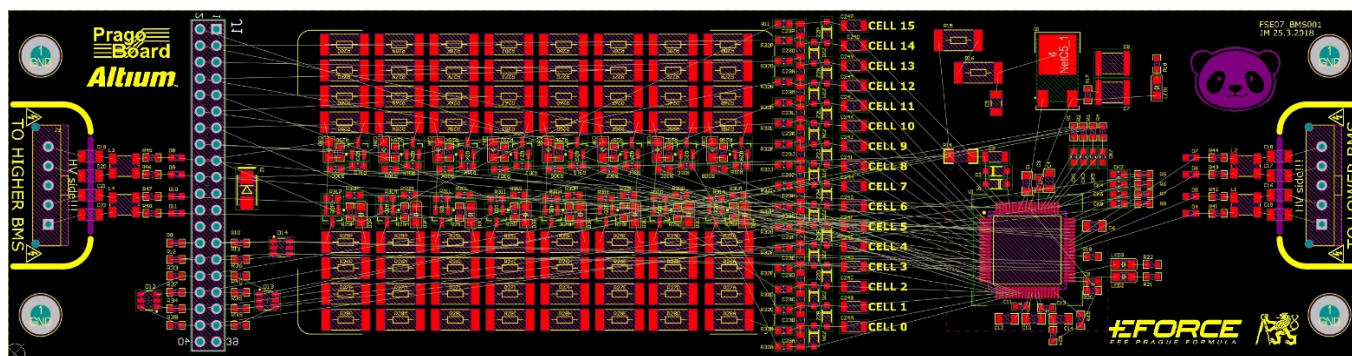
První z nich je co nejlepší rozdělení signálů pro teploty a napětí z článků. To je dosaženo rozdělením konektoru na dvě poloviny. Ve spodní části konektoru jsou zapojena napětí článků tak, aby vždy mezi blízkými kontakty bylo co nejnižší napětí. Prostřední část konektoru zůstala nezapojená, kvůli riziku náhodného spojení blízkých kontaktů např. šroubovákem či jiným vodivým nástrojem při údržbě. Horní část obsahuje signálové propojení pro měření teplot.

Druhým požadavkem je kvalitní zemní spojení s dalšími podpůrnými systémy. Toho je docíleno pěti zemními kontakty hlavního konektoru a ještě dodatečným přizemněním pomocí montážních otvorů, které jsou také připojeny na zemní rovinu.

5.4 Návrh desky plošných spojů

Návrh desky plošných spojů (dále pouze jako DPS) byl omezen několika skutečnostmi. První z nich byl maximální rozměr desky. Ten byl stanoven na 300 x 58 mm. Při využití těchto maximálních rozměrů by však celý systém musely tvořit dva různé druhy DPS (kvůli umístění konektorů). Maximální rozměry, které dovolí mít všechny DPS shodné je 218 x 58 mm. Tento rozměr, zmenšený o několik milimetrů na každé straně se ukázal jako nejvhodnější pro náš akumulátorový box. Finální rozměr desky byl stanoven na 210 x 54 mm.

Jako první jsem poskládal komponenty do přibližného umístění na DPS. Na obrázku níže jsou již komponenty poskládané do výsledného tvaru, který vznikl po vyzkoušení různých možných umístění a ještě se měnil při následném kreslení spojů. Vzhledem ke složitosti DPS byla zvolena čtyřvrstvá deska plošných spojů. Jednu samotnou vrstvu bude tvořit zemní rovina (signál GND ve schématech). Toto uspořádání pomůže menšímu rušení, lepšímu rozvodu tepla a zajistí lepší funkci prvků, které tvoří ESD ochrany.



Obrázek 5.5. PCB s rozmístěnými součástkami a naznačenými spoji, které je nutné propojit

V této fázi návrhu bylo rozhodnuto i o finálním umístění konektorů. Ty jsou umístěny tak, aby kabely mezi jednotlivými segmenty byly co nejkratší. Tyto kabely budou mít každý pouze 90 mm. Komunikace je na každém segmentu posílena, jediný prostor pro případné zarušení je právě na těchto kabelech. Díky takto krátkým kabelům je riziko zarušení komunikace minimální. U konektorů jsou dále umístěny izolační kondenzátory, pod kterými je

vyfrézována drážka pro zvýšení izolační bariéry (povrch DPS má menší izolační pevnost, než vzduch, kvůli tzv. plazivým proudům).

Stejně tak byly vybrány ideální pozice pro montážní díry. Ty jsou v každém rohu a jsou umístěny tak, aby byly v 10 mm rastru. V ose x jsou od sebe vzdáleny 200 mm, v ose y pak 40 mm.

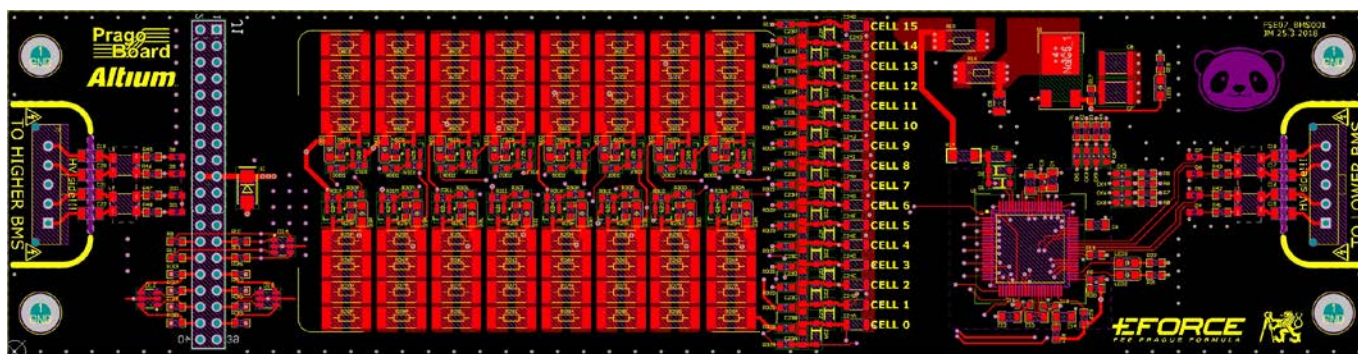
Další věcí, kterou bylo nutné rozhodnout je umístění a orientace konektoru který přivádí napětí článků a teploty na tuto DPS. Ten byl zvolen v levé části, kolmo na delší hranu DPS. Toto umístění je zvoleno především kvůli správnému připojení celé DPS. Správný postup připojování je následující:

- 1) Nasadit DPS montážními dírami na pravé straně na distanční sloupky. Tím se zajistí, že hlavní konektor nelze připojit nikterak posunutý.
- 2) Opatrně navést konektor J1 přesně na protilehlý konektor.
- 3) Zatlačit plastovým nástrojem (naprosto vyhovující je kus plastové desky) konektor až do plného mechanického dosednutí.
- 4) Plastovými matkami uchytit celou DPS na svém místě.

Dalšími prvky byly balancovací rezistory a jejich spínání. Tato část byla nakreslena pouze jednou a poté bylo rozmístění součástek zkopírováno do dalších 15 částí.

Poslední částí byl samotný IC, jeho napájení a odrušovací prvky. Tyto součástky byly rozmístěny s ohledem na správné rozvedení tepla do celé DPS a co nejkratší cesty u odrušovacích prvků.

Návrh DPS pokračoval propojování jednotlivých pinů vodivými cestami. Jako první jsem propojil menší celky – balancovací rezistory se spínacími prvky, IC s odrušovacími kondenzátory, napájecí prvky, konektory s oddělovacími kondenzátory a odrušovacími cívkami. Snažil jsem se propojit co největší množství těchto spojů v horní vrstvě DPS. To je výhodné jak z hlediska snazšího testování, tak z hlediska elektrického a tepelného – horní vrstvu dělí od zemní vrstvy pouze 0,2 mm izolačního materiálu. To zajišťuje rychlejší šíření signálů v horní vrstvě a dobrý přestup tepla i přes tento izolační materiál.

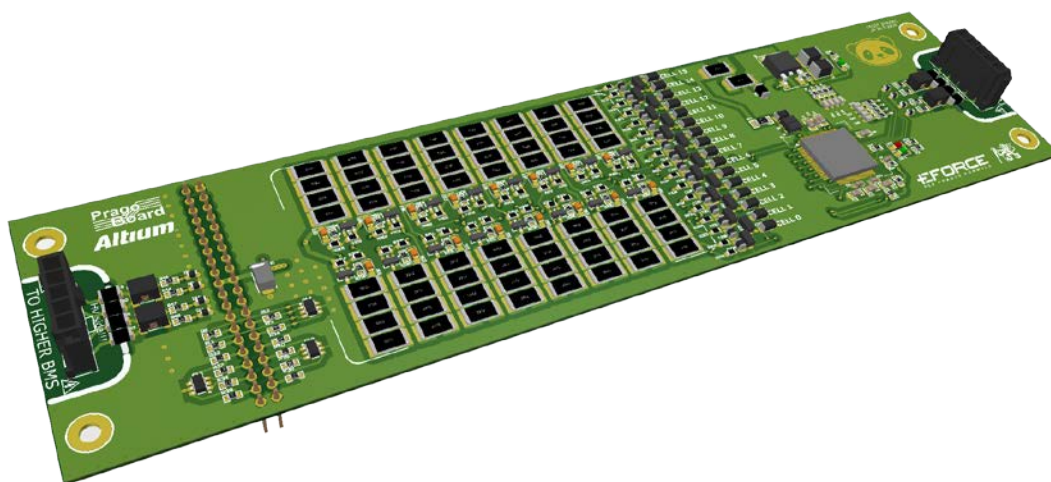


Obrázek 5.6. DPS s propojovacími cestami v horní vrstvě

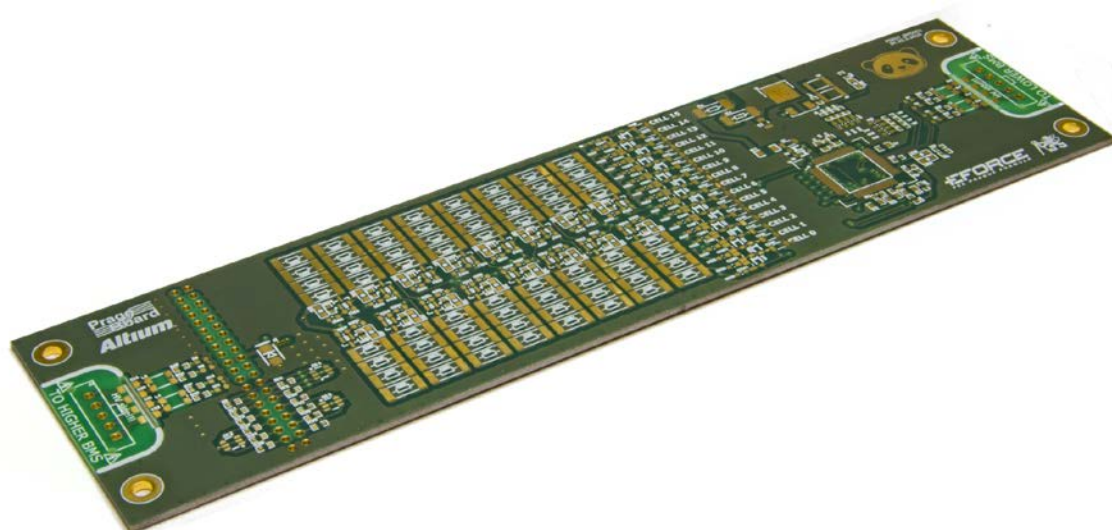
S hotovými propojeními v horní vrstvě bylo nutné propojit vše dohromady. To zahrnuje přivedení napětí z konektoru na balancovací rezistory a na IC, připojení tranzistorů pro spínání balancování, zapojení komunikace, signalizačních led diod, ovládání a měření teplot atd. Vysvětlovat zde postup každé nakreslené cesty by nemělo význam. „Řezy“ jednotlivými vrstvami tak, jak budou ve finále vyrobeny jsou v příloze.

Ve všech vrstvách jsou „rozlité“ zemní polygony – plochy mědi, kde nebyly spoje, připojené na signál GND. To zlepšuje odolnost proti rušení, snižuje impedanci GND a udržuje vyvážené množství mědi ve všech vrstvách. Pokud by množství mědi bylo nevyvážené, hrozilo by prohnutí DPS při výrobě. To by způsobovalo problémy jak při automatizovaném osazování, tak při následné montáži.

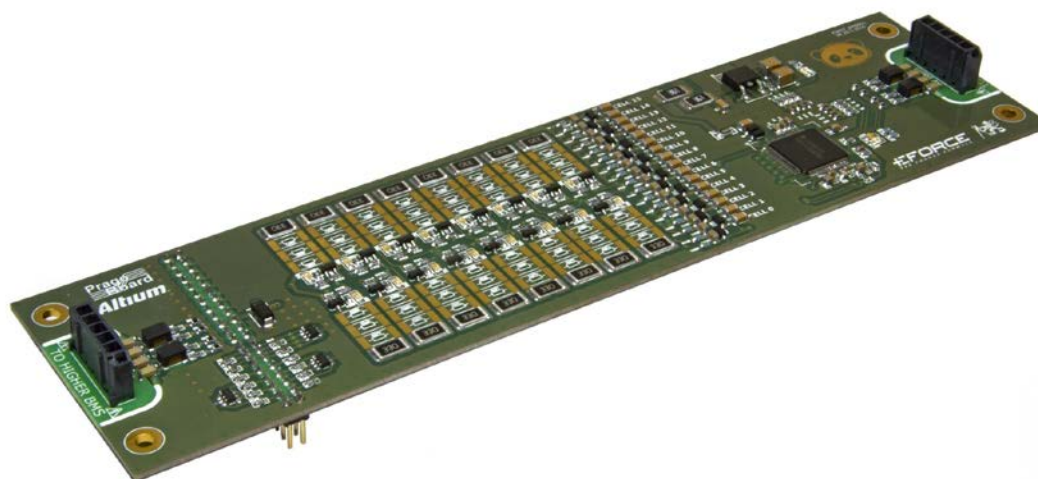
Výsledek návrhu DPS je vidět na následujících obrázcích:



Obrázek 5.7. 3D pohled na DPS v návrhovém systému Altium



Obrázek 5.8. Fotografie vyrobené DPS



Obrázek 5.9. Fotografie ručně osazené DPS

6 Návrh doplňujících systémů

Samotná DPS pro měření napětí teplot a balancování by nám byla k ničemu bez vhodných rozhraní. Je nutné vytvořit rozhraní pro připojení DPS k segmentu akumulátoru a také rozhraní, které umožní komunikaci řídicích obvodů s „okolním světem“.

6.1 Systém měření teplot, přivedení napětí do hlavní jednotky

Tento systém bude rozdělen do dvou částí.

Horní část, do které budou přivedena veškerá napětí, bude obsahovat konektor pro připojení hlavní řídicí jednotky. Zároveň v ní bude integrováno 32 teplotních senzorů a 4 analogové multiplexery.

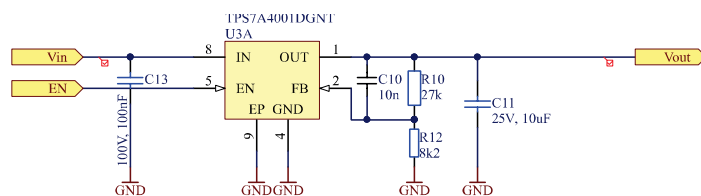
Spodní část, která bude připojena ke čtyřem propojovacím plechům a povede z ní konektor s napětími do horní části. Dále bude obsahovat taktéž 32 integrovaných senzorů teploty a 4 analogové multiplexery. Signály z těchto teplot budou též vyvedené do horní části, odkud povedou do hlavní jednotky.

Měření napětí z prostředních (ohýbaných) propojovacích plechů bude řešeno připájením vodičů přímo na tyto propojovací plechy a jejich dovedením na konektor na horní části.

Pro měření teploty jsem zvolil termistory NTC s hodnotou 10 k Ω při 25 °C. Mezi jejich výhody patří především malé rozměry, nízká cena, snadná dostupnost, vysoká přesnost a relativně snadné vyhodnocení.

6.1.1 Horní část systému

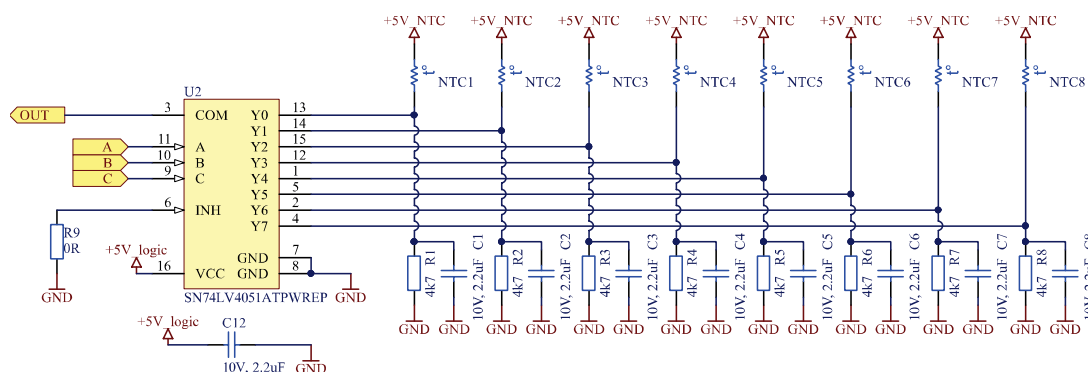
Tato část je složena ze třech schémat. Opakují se zde schémata multiplexerů a schémata lineárních regulátorů (které zajišťují napájení logických obvodů). Proto jsou tato schémata nakresleny pouze jednou, jako bloky.



Obrázek 6.1. Schéma lineárního regulátoru napětí (ve schématu U_LDO)

Lineární regulátor je zapojen tak, aby na jeho výstupu bylo napětí 5 V. Toto napětí je nastavitelné pomocí rezistorů R10 a R12. [8] Kondenzátor C10 je přidán pro zlepšení stability tohoto zdroje. Kondenzátor C11 je přidán jako výstupní kondenzátor, pro stabilnější napětí při proměnlivé zátěži. Kondenzátor C13 slouží k vykompenzování vstupních indukčností a slouží jako krátkodobý vyrovnávací zdroj napětí.

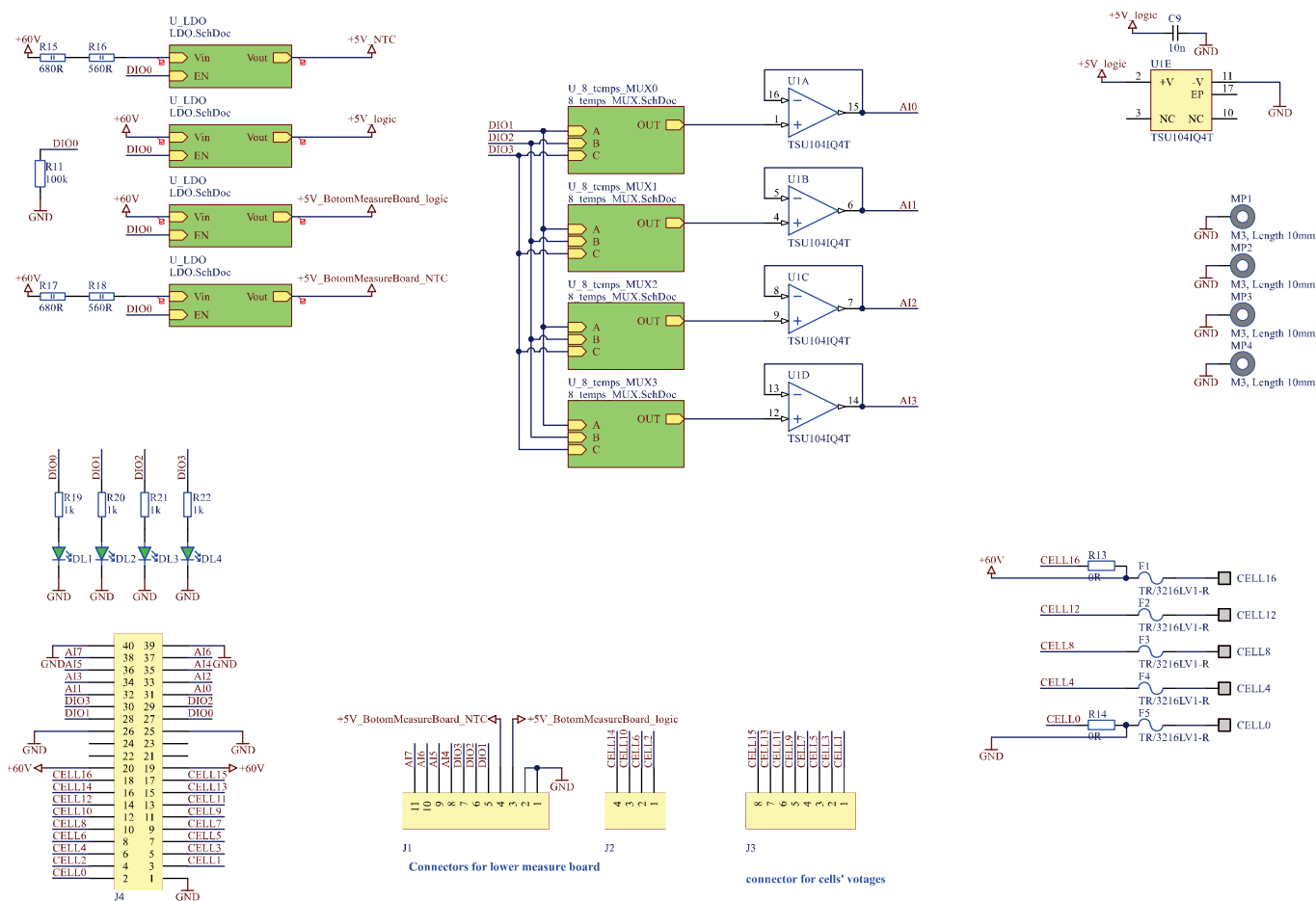
Vstup EN slouží k aktivaci tohoto regulátoru, aktivní je v logické 1.



Obrázek 6.2. Schéma měření teplot a jejich multiplexování

Všechny NTC termistory jsou zapojeny jako děliče napětí. Výhodou toho zapojení je jeho jednoduchost, nízká cena a možnost detekovat poruchové stavy. Oproti tomu nevýhodou tohoto zapojení je nízký rozsah měření s vysokou přesností. Tento rozsah se nastavuje velikostí sériového odporu. V našem případě je měření nejpřesnější v rozsahu 0 – 50 °C, kde je maximální odchylka pod 1 °C. Až do teploty 80 °C je maximální odchylka pod 1,5 °C, což je pro naše použití dostačující.

Multiplexer je ovládán vstupy A, B, C. Podle zvolené logické kombinace připíná jednotlivé termistory na výstupní pin COM.



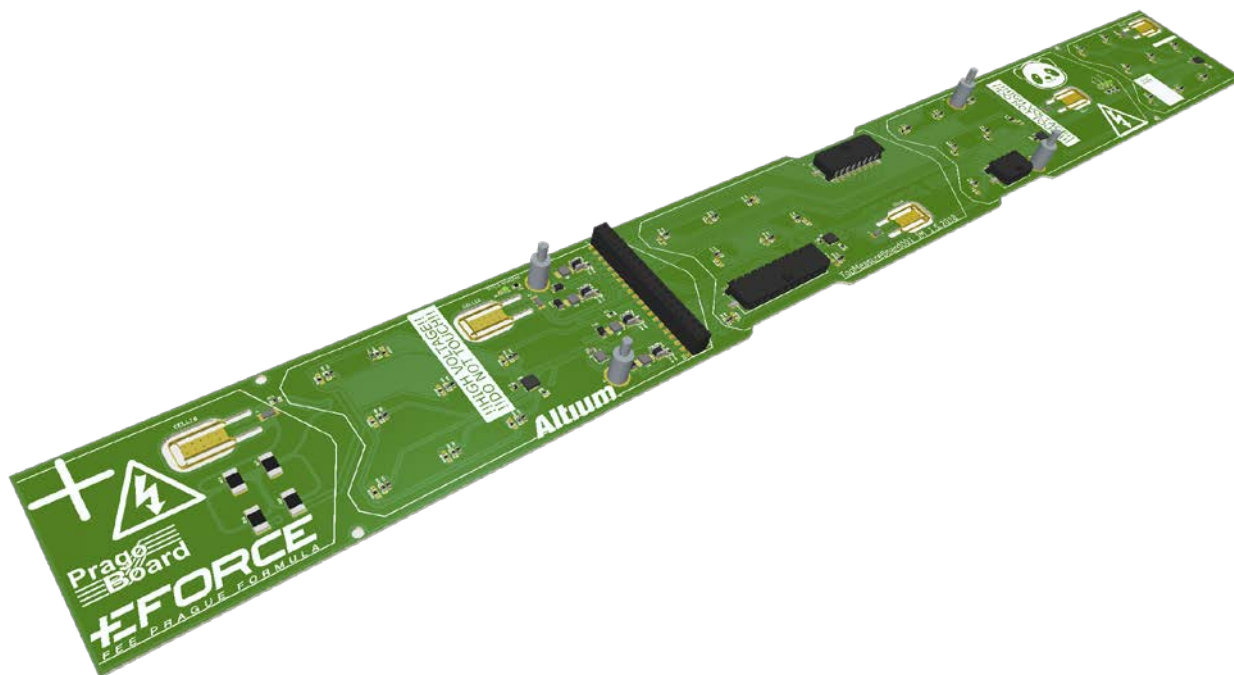
Obrázek 6.3. Schéma celé horní měřicí desky

Na schématu je nakreslené propojení obou předchozích částí a konektorů. Dále je zde operační zesilovač, který slouží jako analogový opakovač a pouze posiluje výstupní signál z multiplexerů. Jsou zde ještě led diody, které indikují stav zapnutí lineárních regulátorů (DL1) a stav ovládacích vstupů multiplexeru (DL2 – DL4).

Z bezpečnostních důvodů jsou zde pojistky, umístěné blízko u bodů, kterými se připojují články.

Pro mechanickou fixaci hlavní jednotky jsou zde distanční sloupky, které se pájejí přímo do DPS.

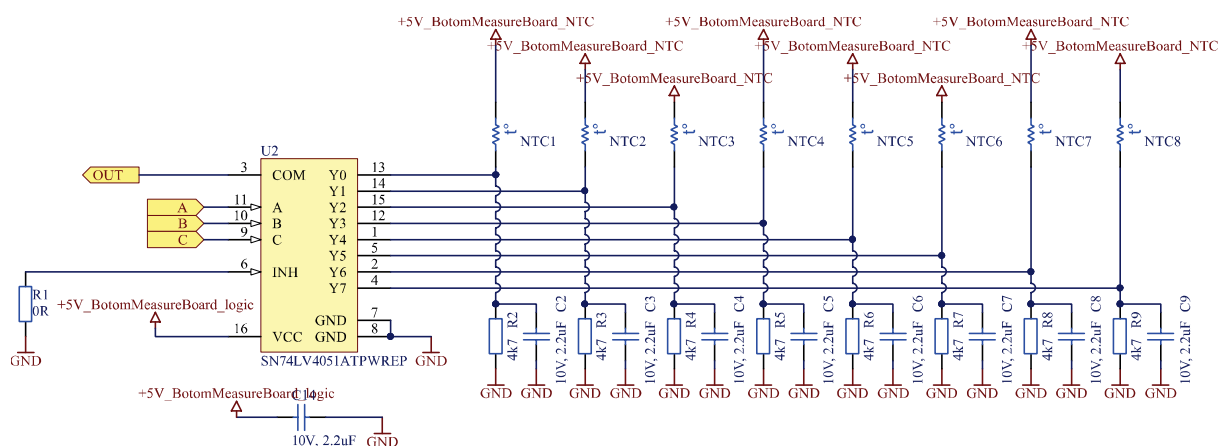
Následuje pohled na navrženou DPS, jednotlivé vrstvy jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 6.4. DPS pro horní část systému měření teplot a napětí

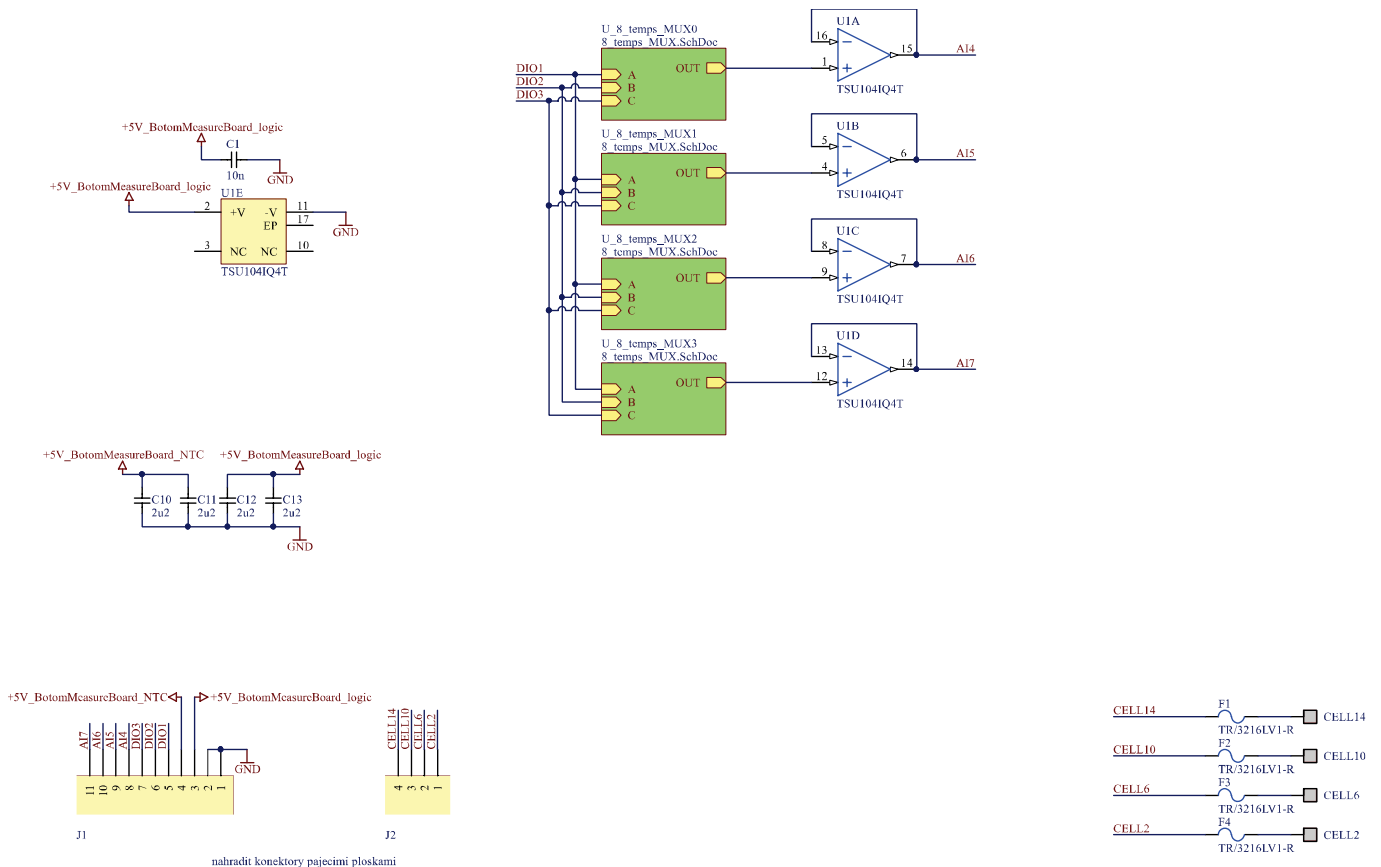
6.1.2 Spodní část systému

Spodní část je velmi podobná té horní, ale některé části zde chybí, je o to jednodušší.



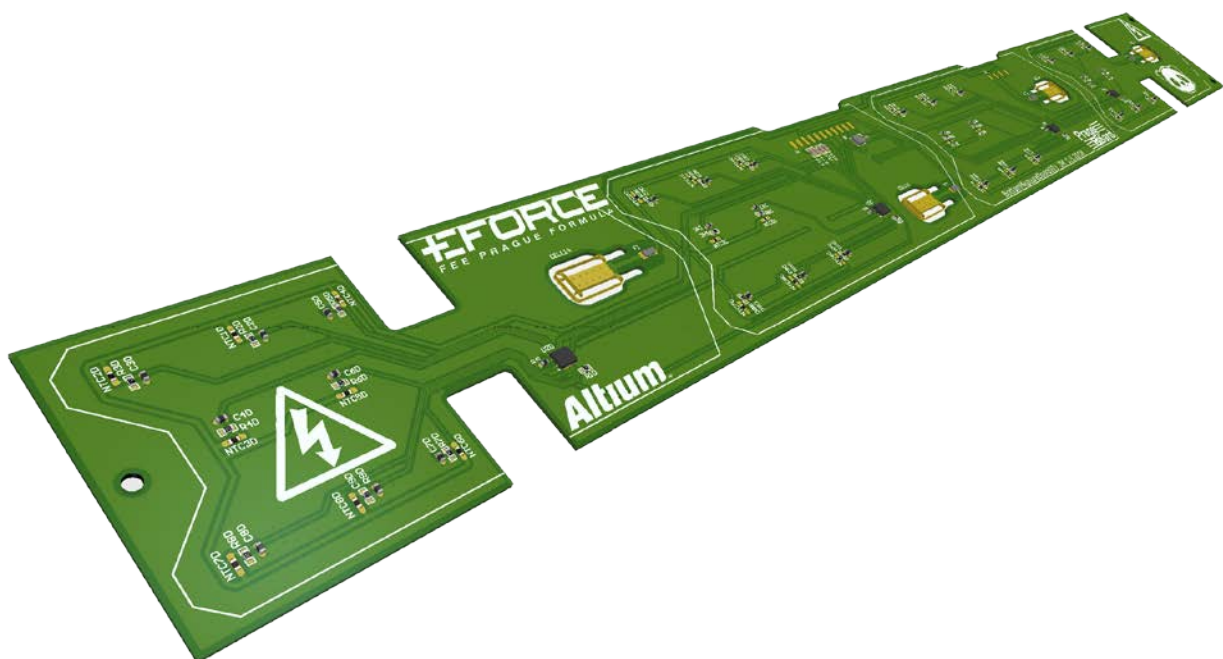
Obrázek 6.5. Schéma měření teplot a jejich multiplexování

Zapojení pro měření a multiplexování hodnot z NTC termistorů je identické se zapojením v horní části.



Obrázek 6.6. Schéma celé spodní měřicí desky

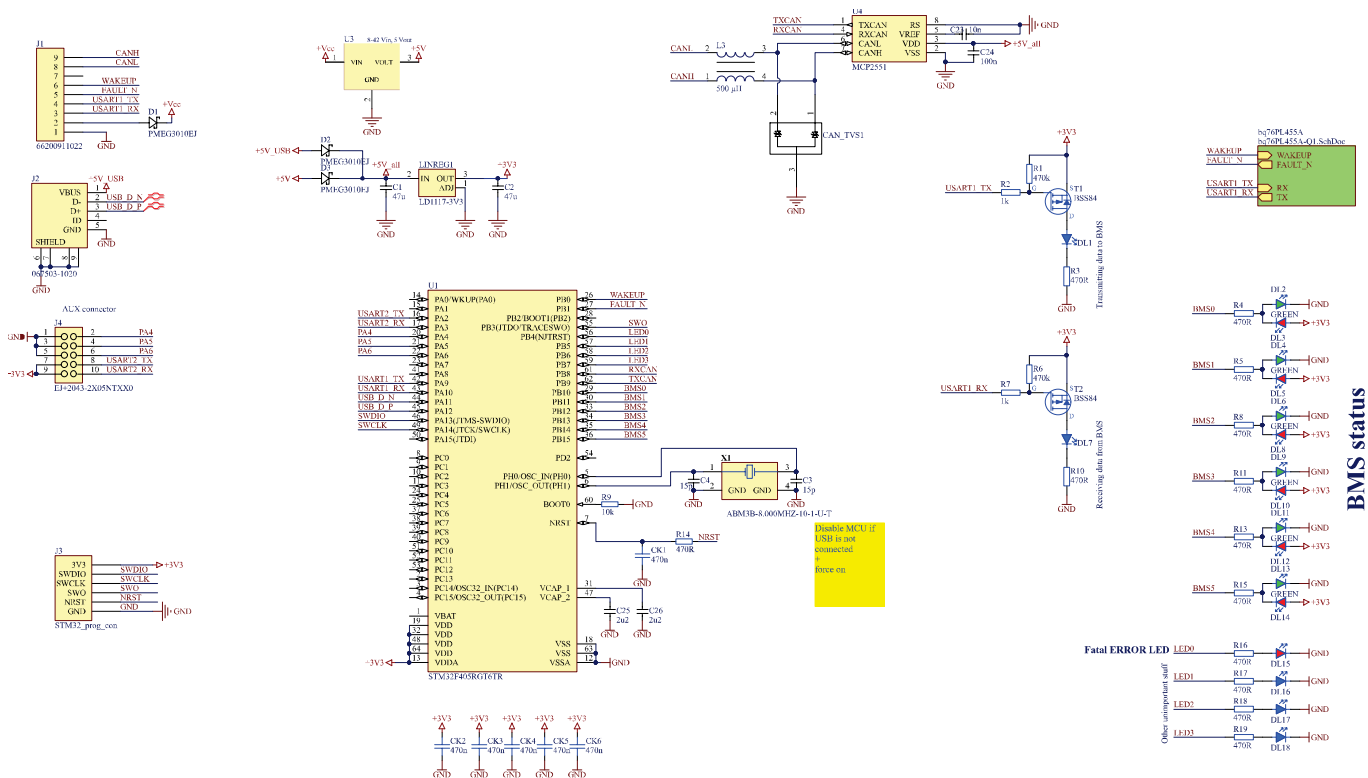
Na spodní desce se nachází pouze měření teplot (bloky U_8_temps_MUX0 – U_8_temps_MUX3), zesílení napětí z NTC, připojení článků přes pojistky (pravá spodní část) a konektory. Následuje pohled na navrženou DPS, jednotlivé vrstvy jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 6.7. DPS pro spodní část systému měření teplot a napětí

6.2 Rozhraní pro komunikaci s PC

Posledním systémem je rozhraní pro komunikaci s PC. Toto bude systém, který dokáže vyčíst veškerá data z celého akumulátorového boxu a přenést je do PC. Tento systém může zároveň sloužit jako převodník pro komunikaci s hlavní jednotkou akumulátorového boxu. Zvolená rozhraní této jednotky jsou CAN, USB a UART. Celý tento systém se skládá z procesoru, obvodu pro správu baterií (stejný jako je na hlavní řídicí desce), indikačních LED diod a z podpůrných součástek a obvodů. Schéma je rozděleno do dvou částí.



Obrázek 6.8. Schéma procesorové části

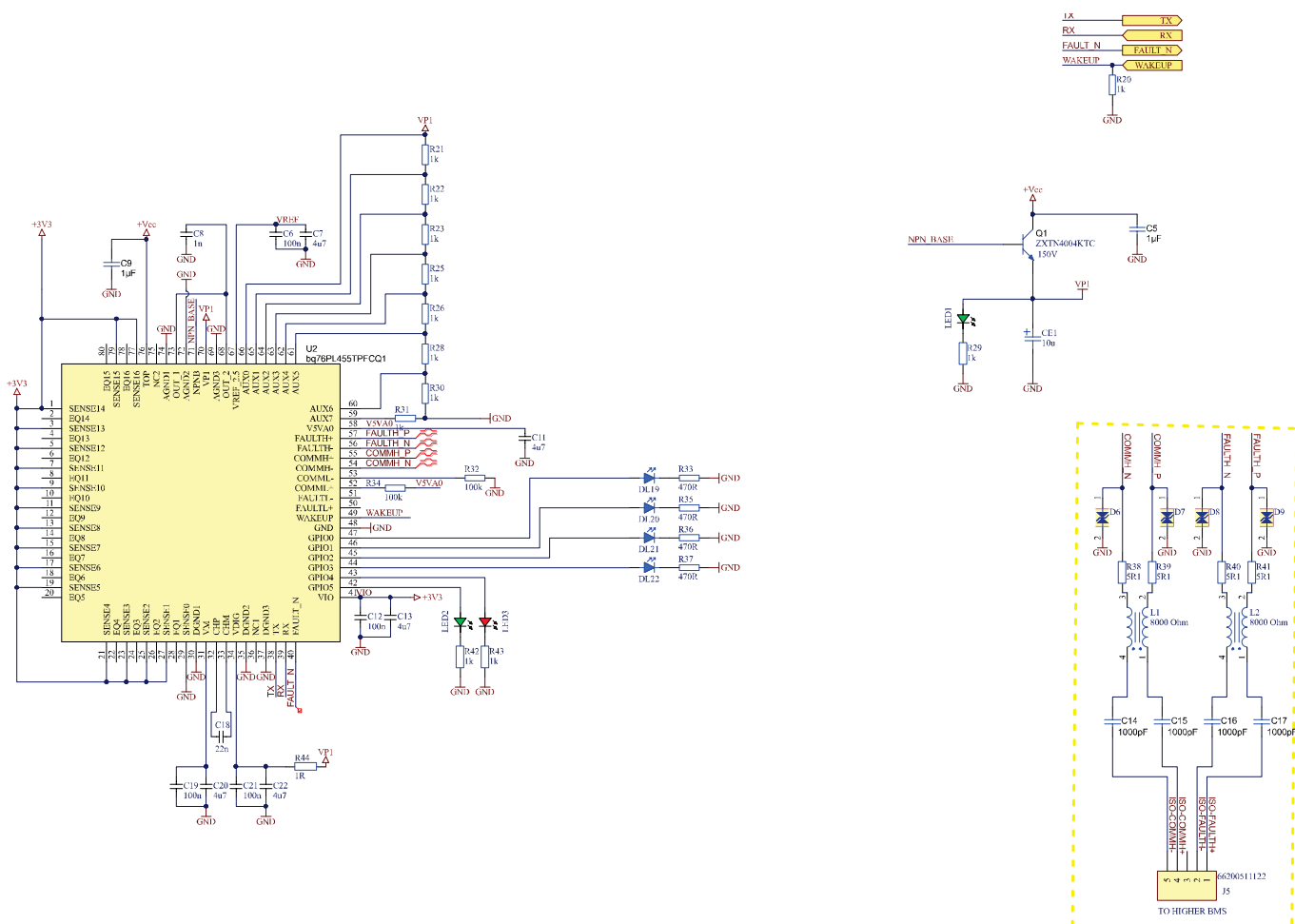
První část je procesorová. Procesor byl vybrán od firmy ST Microelectronics, typ STM32F409GT6TR. Ten má dostatek pinů, přebytek výpočetního výkonu, sběrnice UART, USB i CAN.

Napájení procesoru je přivedeno buď z USB portu, nebo z hlavního konektoru (J1). Výběr napájení je řešen dvěma diodami (D1, D2).

Dále je zde standardní zapojení CAN budiče s odrušením pomocí proudově kompenzované cívky a ochrannou dvojitou TVS diodou.

Indikace aktivity na komunikační lince UART je signalizována pomocí tranzistorů T1, T2 a k nim připojených LED diod DL1, DL7.

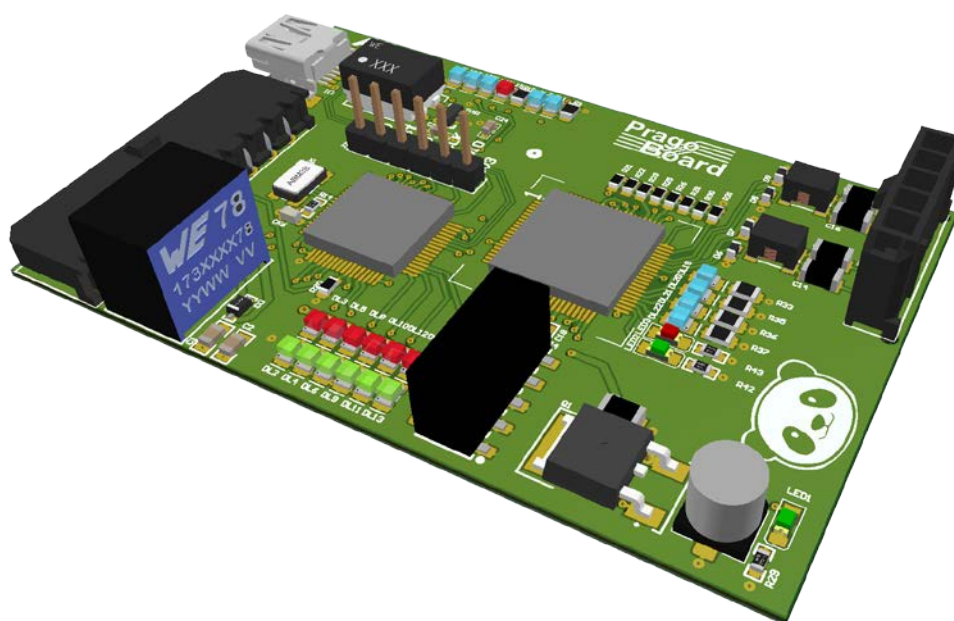
Zbylé LED diody jsou využity pouze pro indikaci stavů, případně pro ladění programu.



Obrázek 6.9. Schéma části s řídicím integrovaným obvodem

Druhá část je samotný integrovaný obvod pro správu baterií, který zde však nemonitoruje žádné napětí, ale pouze řídí ostatní čipy a funguje tedy jako jakýsi překladač komunikace. Schéma je principálně stejné, jako u hlavní řídicí desky, nemá tedy smysl dále rozvádět jeho popis.

Následuje pohled na navrženou DPS, jednotlivé vrstvy jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 6.10. DPS rozhraní komunikace

7 Osazování a montáž desek plošných spojů

Osazování všech prototypových desek probíhalo ručním osazováním. Pro osazování byla využita kombinace kontaktního pájení mikropájkou a pájení horkovzdušnou pájkou s využitím pájecí pasty.

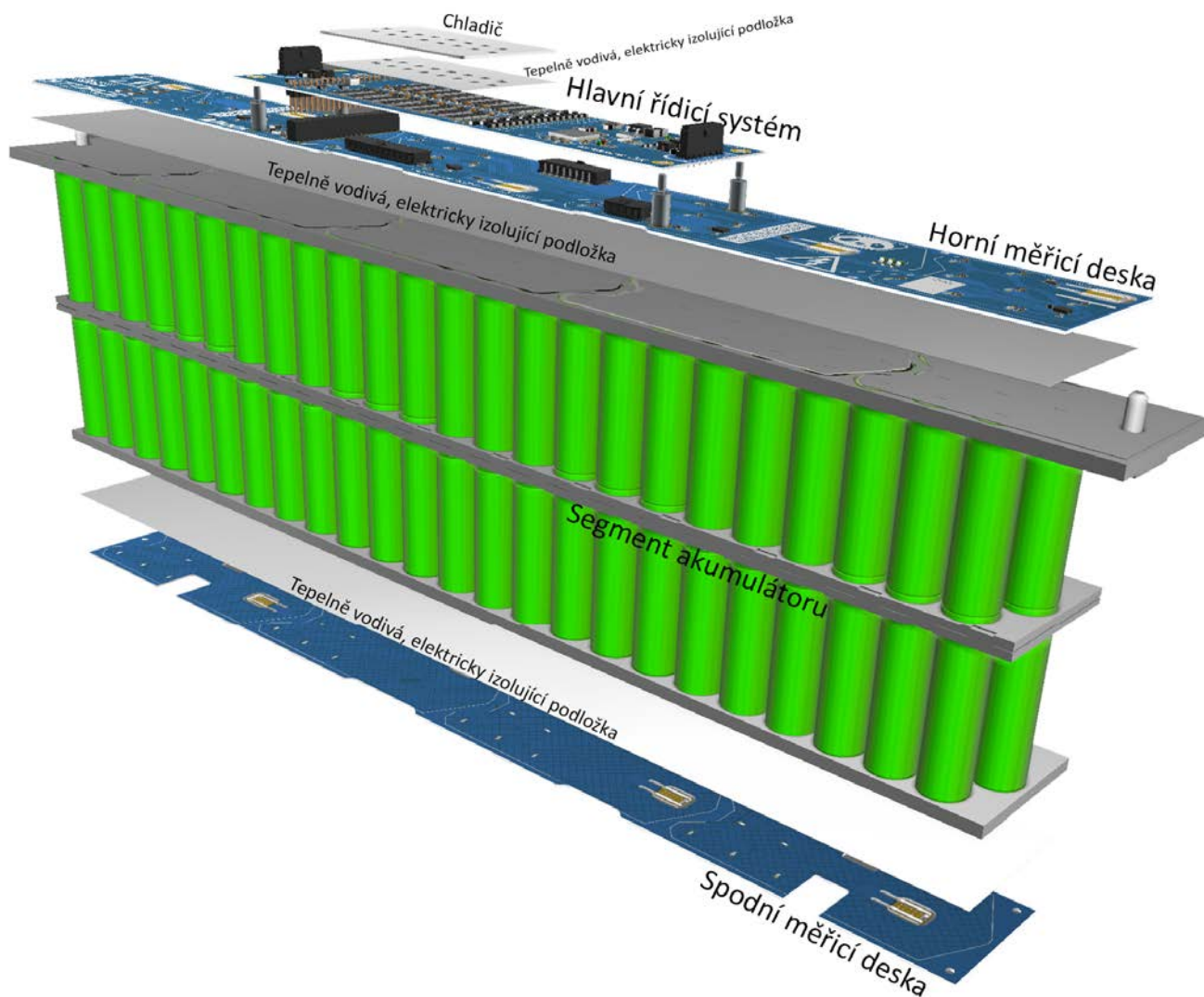
Finální série hlavních řídicích desek, která bude použita v akumulátorovém boxu pro 7. generaci elektrické formule bude osazována na osazovacím automatu. Toto osazování bude probíhat v laboratořích pro vývoj a realizaci (LVR) na půdě Fakulty elektrotechnické, ČVUT.

Pro desky pro měření napětí a teplot bude využita kombinace jak strojního osazování a pájení, tak ručního pájení. Ruční pájení bude využito pro NTC termistory. Toto je potřeba kvůli osazování NTC do vyfrézovaných drážek uvnitř DPS (senzor je stejně vysoký jako DPS).

Následná montáž bude probíhat poměrně jednoduše. Celá sestava elektrických dílů segmentu se bude skládat z:

- Článků s přivařenými plechy v plastových výztužích
- Horní měřicí desky
- Spodní měřicí desky
- Hlavního řídicího systému
- Chladiče pro balancovací rezistory (pokud bude potřeba)
- Třech kusů tepelně vodivé, elektricky izolující podložky ve správném tvaru

Na následujícím obrázku jsou vidět všechny části před sestavením:

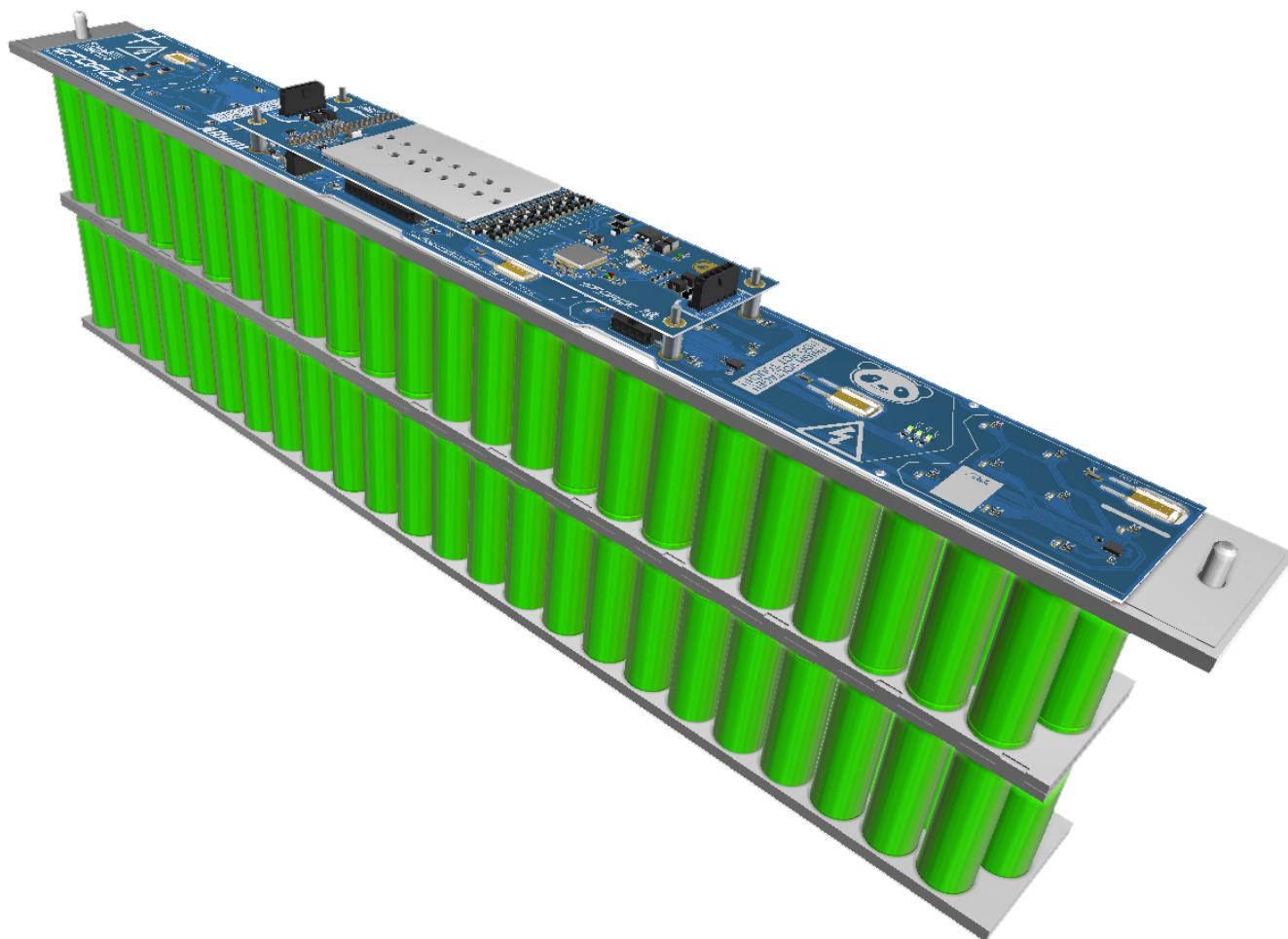


Obrázek 7.1. Všechny elektrické části segmentu před složením

Pro sestavení je nutné:

- přiložit spodní a horní desku přes tepelně vodivou podložku
- zafixovat je pomocí kaptonové izolační pásky
- připájet přípojovací body na obou deskách k propojovacím plechům
- Osadit na hlavní řídicí jednotku chladič přes tepelně vodivou podložku
- připojit hlavní řídicí jednotku k horní měřicí desce

Po sestavení bude vypadat segment takto:



Obrázek 7.2. Plně sestavený segment se všemi elektrickými komponentami

8 Závěr

V první části této bakalářské práce byly popsány důvody pro výběr technologie li-Ion, důvody pro zvolení konfigurace článků 96s9p a důvody pro rozdělení celého akumulátorového boxu do šesti segmentů s konfigurací 16s8p.

Druhá část práce se věnovala návrhu vhodného systému pro monitorování a správu každého z článků. V práci je popsán výběr vhodného řídicího čipu a důvody, proč byl zvolen právě čip BQ76PL455A-Q1. Dále je součástí práce návrh podpůrných systémů, které slouží pro měření napětí jednotlivých článků, pro měření teplot jednotlivých článků a pro komunikaci všech těchto systémů s PC či s dalšími systémy.

V době odevzdávání této bakalářské práce byly všechny zde popsané systémy vyrobeny a osazeny, probíhal proces testování. Testování se dostalo do fáze kontroly veškerého HW, kdy veškerá důležitá napětí odpovídala očekáváním a stejně tak veškeré základní chování integrovaných obvodů odpovídalo očekáváním. Dalším krokem v testování je propojení navrženého systému s PC, nebo dalším systémem pro vyčítání reálných hodnot.

Vzhledem k omezené době pro vývoj a testování systému popisovaného v této práci nebyly všechny funkce plně otestovány, ale prozatím nic nenasvědčovalo nefunkčnosti některé z jeho funkcí. Tento systém bude i nadále rozvíjen tak, aby byl plně použitelný ve vozidle kategorie Formula Student Electric. Systém je zároveň navržen tak, aby bylo pro případnou sériovou výrobu potřeba co nejméně změn a co nejméně ruční práce.

V aktuálním stavu by bylo potřeba pouze změnit některé konektory na jejich SMD variantu a vyřešit automatizované osazování teplotních čidel. To by šlo vyřešit buď nanášením snímatelné masky na DPS, nebo polepením DPS kaptonovou páskou. Obě z variant by pravděpodobně byly vyhovující, ale bylo by potřeba je otestovat.

Zdroje

- [1] *Prismatic Pouch packs* [online]. New Bedford: epec, 2016 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.epectec.com/batteries/prismatic-pouch-packs.html>
- [2] *Formula Student* [online]. Wikipedia, 2015 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_Student
- [3] *Pravidla Formula Student Germany* [online]. Německo: FSG, 2017 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [4] Types of battery cells [online]. Vancouver: Battery University, 2011 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells
- [5] Datasheet VTC5 [online]. Sony Energy Devices Corporation, 2013 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.powerstream.com/p/us18650vtc5-vtc5.pdf>
- [6] Datasheet VTC5A [online]. Sony Energy Devices Corporation, 2014 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://www.accushop.at/images/products_images/apdf/Sony_US18650VTC5A.pdf
- [7] Datasheet BQ76PL455A-Q1 [online]. Dallas: Texas Instruments, 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76pl455a-q1.pdf>
- [8] Datasheet TPS7A4001 [online]. Dallas: Texas Instruments, 2015 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a4001.pdf>
- [9] Datasheet SMD power resistors [online]. TE connectivity, 2011 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7F1773139%7FC%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_1773139_C.pdf%7F4-1622820-0
- [10] Samsung prismatic cell [online]. KeppPower [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://www.kepppower.com.cn/products_detail.php?id=390
- [11] Prismatic pouch cell [online]. buyA123batteries.com [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.buya123products.com/goodsdetail.php?i=8>

Seznam zkratek

FSE – Formula Student Electric

SAE – Society of automotive engineers (komunita automobilových inženýrů)

BMS – Battery management system (systém pro správu baterií)

HV – High voltage (vysoké napětí)

DC – Direct current (stejnoseměrný proud)

DPS – deska plošných spojů

IC – Integrated circuit (integrovaný obvod)

SMD – Surface mount device (Součást pro povrchovou montáž)

UART – Universal asynchronous receiver and transmitter (univerzální asynchronní přijímač a vysílač)

NTC – Negative temperature coefficient (Záporný teplotní koeficient)

USB – Universal synchronous bus (univerzální synchronní sběrnice)

CAN – Controller area network (Síť řídicích kontrolérů)

LED – Light emitting diode (Světlo emitující dioda)

TVS – Transient voltage suppressor (potlačovač přechodných napětí)

ESD – Electrostatic discharge (elektrostatický výboj)

GND – Ground (zem)

Seznam příloh

Příloha A – jednotlivé vrstvy DPS hlavního řídicího systému

Příloha B – jednotlivé vrstvy DPS horní měřicí desky

Příloha C – jednotlivé vrstvy DPS spodní měřicí desky

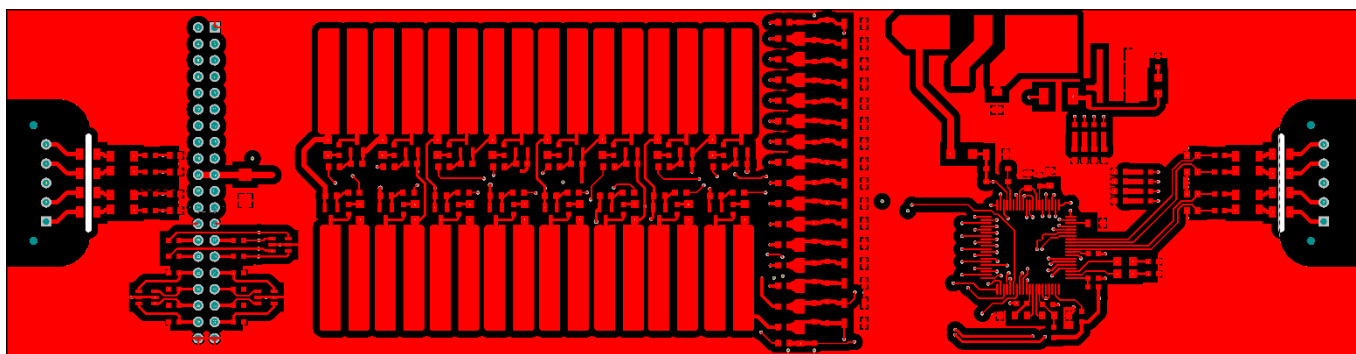
Příloha D – jednotlivé vrstvy DPS převodníku komunikace

Přílohy na přiloženém CD:

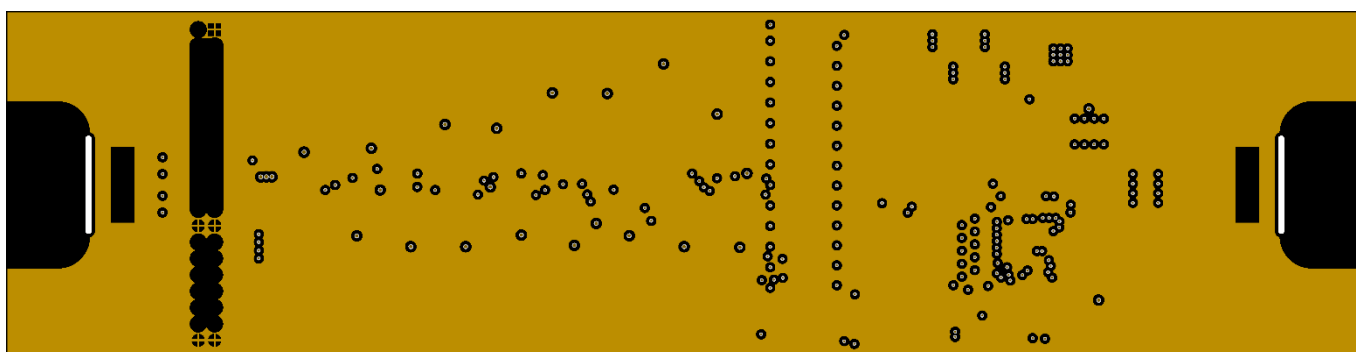
- Tato práce ve formátu PDF
- Blokové schéma akumulátorového boxu
- Schémata a DPS jednotlivých systémů
- Datasheet použitého řídicího integrovaného obvodu

Přílohy

Příloha A – jednotlivé vrstvy DPS hlavního řídicího systému



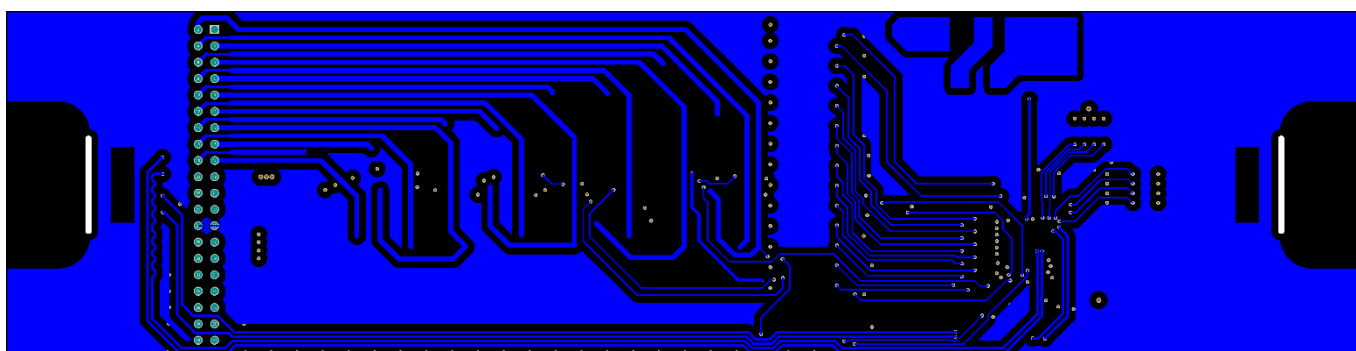
Vrstva TOP – horní vrstva součástek a propojů



Vrstva IN1 – vrstva zemní roviny

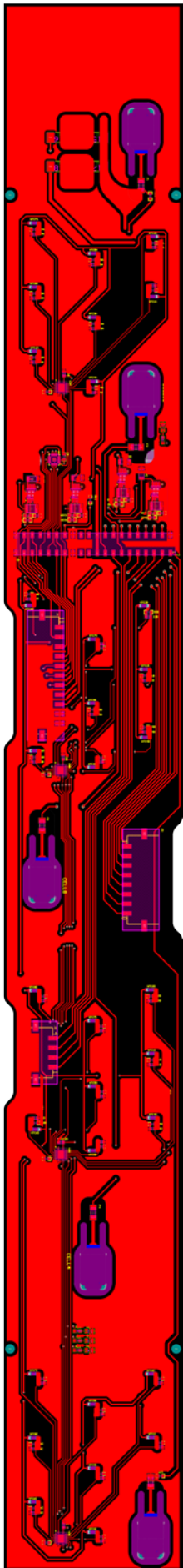


Vrstva IN2 – vrstva spojů

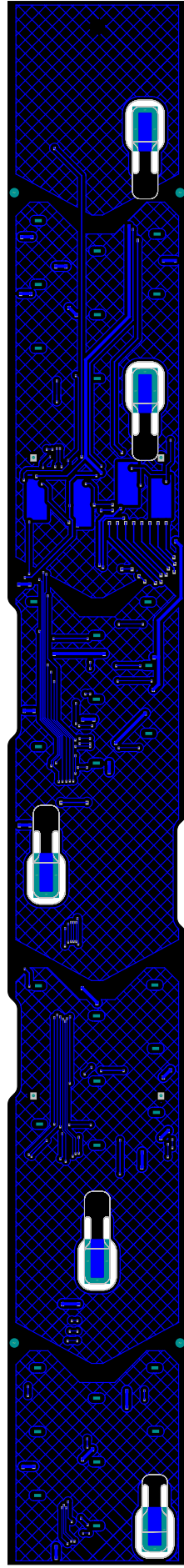


Vrstva BOT – spodní vrstva spojů

Příloha B – jednotlivé vrstvy DPS horní měřicí desky

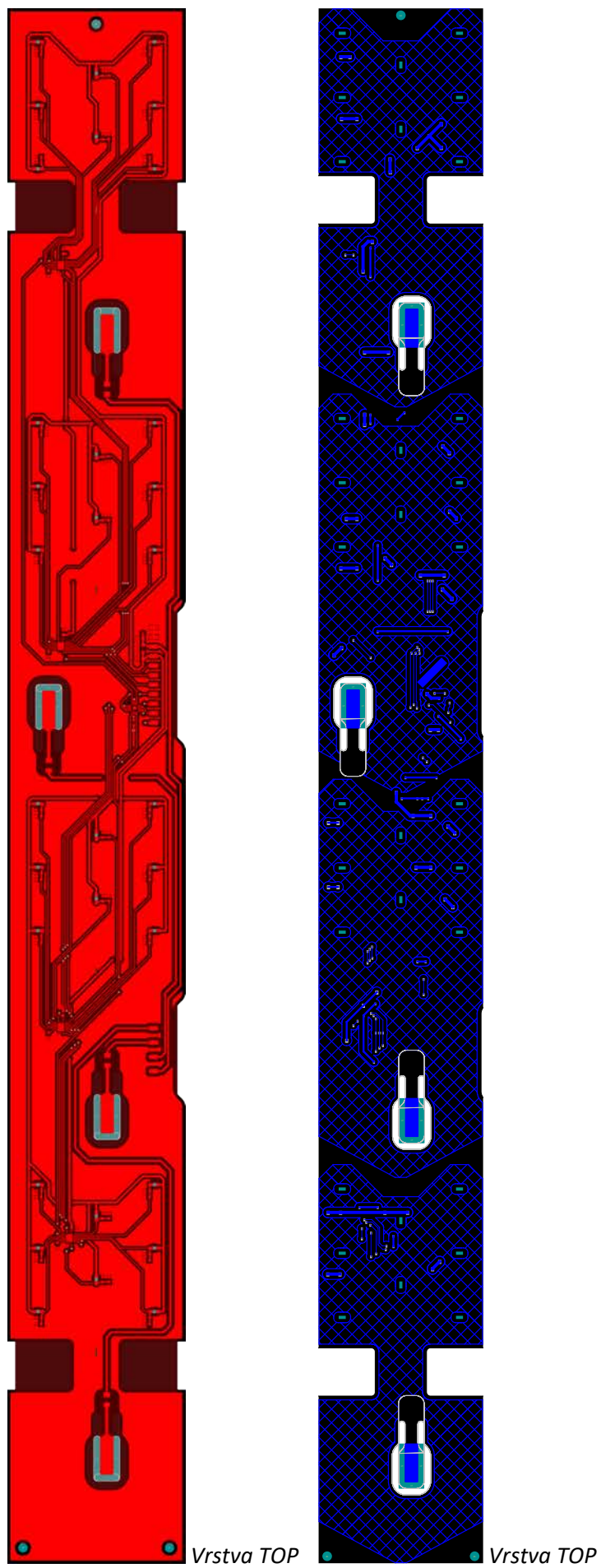


Vrstva TOP

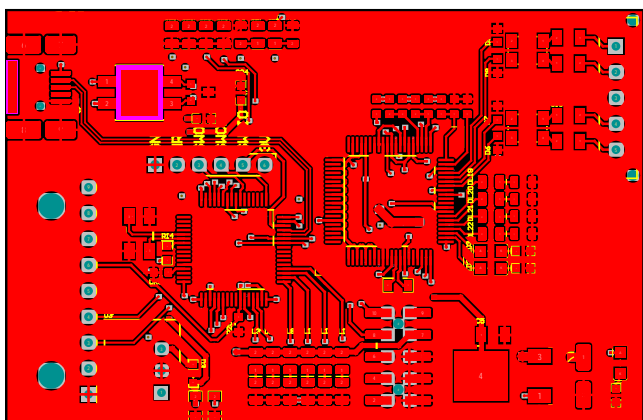


Vrstva BOTTOM

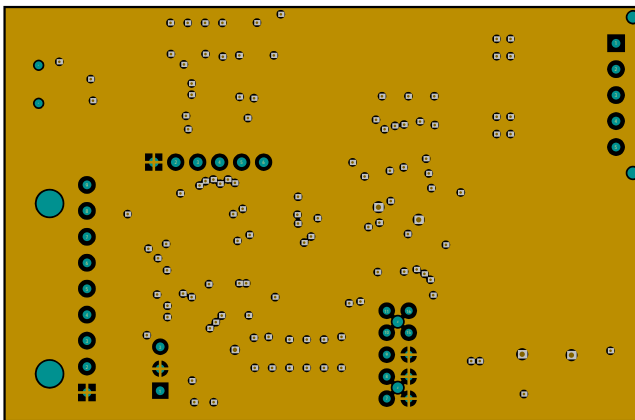
Příloha B – jednotlivé vrstvy DPS spodní měřicí desky



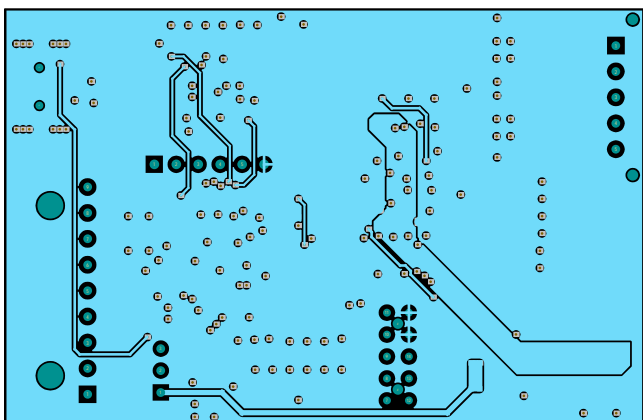
Příloha D – jednotlivé vrstvy DPS převodníku komunikace



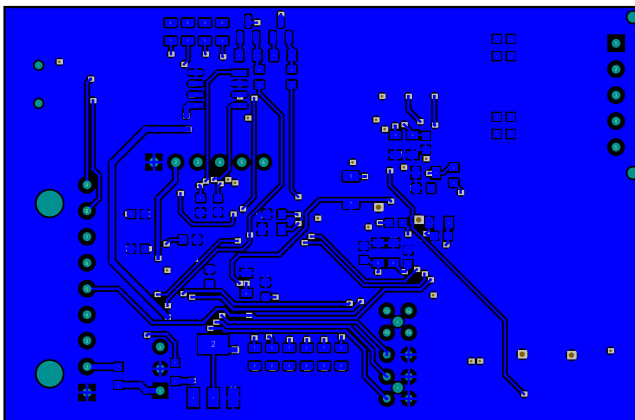
Vrstva TOP



Vrstva IN1



Vrstva IN2



Vrstva BOTTOM