

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Formula Student - konstrukce trakční baterie

Autor práce: **Bc. David Sonntag**
Vedoucí práce: **Ing. Luboš Streit,
Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David SONNTAG**
Osobní číslo: **E20N0069P**
Studijní program: **N0714A060013 Elektronika a informační technologie**
Specializace: **Výkonová elektronika**
Téma práce: **Formula Student – konstrukce trakční baterie**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Popište hlavní pravidla pro návrh trakční baterie.
2. Navrhněte mechanické a elektrické uspořádání komponent baterie.
3. Zkonstruuje a otestujte jeden segment baterie.
4. Sestavte baterii včetně silových obvodů.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Streit, Ph.D.**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**





Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato diplomová práce navazuje na autorovu bakalářskou práci s cílem dokončit návrh elektrického a mechanického uspořádání trakční baterie studentské elektroformule a zkonstruovat a otestovat nejprve jeden segment trakční baterie a poté i celou trakční baterii.

Trakční baterie popisovaná v této práci je vyvíjena v rámci projektu studentské elektroformule, což je soutěž, jejímž účelem je vytvořit příležitost pro studenty bakalářských a magisterských studijních programů ukázat svoje schopnosti na reálném interdisciplinárním mezinárodním projektu.

S ohledem na rychle se vyvíjející technologie v oblasti automotive bylo zapotřebí ověřit aktuálnost a správnost návrhu trakční baterie. Proto byl v první řadě proveden nový výpočet energie trakční baterie a také nová rešerše bateriových článků. Nově vybraný článek byl poté důkladně měřen. Na základě toho musela být navržena zcela nová mechanická a elektrická koncepce trakční baterie. Po dokončení návrhu byla spuštěna prototypová výroba jednoho segmentu baterie, jejíž součástí bylo i jeho odladění.

Nově navržená trakční baterie studentské elektroformule bude složená ze 288 článků typu Li-Po - SLPBA942126 a bude rozdělená do 8 segmentů s konfigurací 36S2P (celkově tak bude mít trakční baterie konfiguraci 144S2P). Díky nově vybranému článku se jmenovité napětí baterie zvýšilo na 532,8 V (maximální na rovných 600 V), baterie dokáže dodávat po celý svůj vybíjecí cyklus maximální dovolený výkon 80 kW, její jmenovitá energie bude 7,46 kWh a předpokládaná hmotnost trakční baterie by neměla přesáhnout 57,5 kg.

Výsledky této práce jsou pro vývoj studentské elektroformule velmi důležité, protože přináší z hlediska vývoje trakční baterie veliký posun dopředu. Zároveň tato práce poslouží jako pomocný materiál při samotné konstrukci a testování baterie i při vývoji baterií budoucích generací. Mimo jiné je možné poznatky získané z této práce využít i pro vývoj jiných trakčních baterií.

Klíčová slova

Studentská elektroformule, dimenzování trakční baterie, návrh trakční baterie, měření Li-Po článků

Abstract

This diploma thesis follows the author's bachelor's thesis in order to complete the design of the electrical and mechanical arrangement of the traction battery of the student electrical formula and to construct and test first one segment of the traction battery and then the entire traction battery.

The traction battery described in this work is developed within the project of student electroformula, which is a competition whose purpose is to create opportunity for students of bachelor's and master's degree programs to show their abilities on a real interdisciplinary international project.

With regard to the rapidly evolving technologies in the field of automotive, it was necessary to verify the currentness and accuracy of the traction battery design. Therefore, a new calculation of traction battery energy was performed in the first place, as well as a new search of battery cells. The newly selected cell was then thoroughly measured. Based on this, a completely new mechanical and electrical traction battery concept had to be designed. After the completion of the design, prototype production of one segment of the battery was started, which also included its debugging.

The newly designed traction battery of the student electrical formula will consist of 288 Li-Po cells - SLPBA942126 and will be divided into 8 segments with a 36S2P configuration (overall, the traction battery will have a 144S2P configuration). Thanks to the newly selected cell, the nominal voltage of the battery has increased to 532.8 V (maximum to 600 V), the battery can supply the tractive system by the maximum allowable power of 80 kW throughout its discharge cycle, its nominal energy will be 7.46 kWh and the expected weight of the traction battery would should not exceed 57.5 kg.

The results of this work are very important for the development of the student electrical formula, because it brings a great step forward in terms of traction battery development. At the same time, this work will serve as an auxiliary material in the construction and testing of the battery and in the development of batteries of future generations. Among other things, the knowledge gained from this work can be used for the development of other traction batteries.

Keywords

Student electric formula, traction battery design, traction battery dimensioning, Li-Po cell measurement

Poděkování

Tato diplomová práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu No. SGS-2021-021.

Upřímné poděkování patří také vedení Fakulty elektrotechnické, které svojí činností významně přispělo ke vzniku a rozvoje projektu studentské elektroformule na Fakultě elektrotechnické.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	vi
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 Dimenzování trakční baterie	2
1.1 Li-Ion versus Li-Po články	2
1.1.1 Shrnutí rozdílů mezi články typu Li-Ion a Li-Po	2
1.2 Výpočet energie trakční baterie	3
1.3 Rešerše Li-Po článků	4
1.3.1 Postup rešerše článků	4
2 Měření vybraného Li-Po článku	9
2.1 Výsledky měření	10
2.1.1 Zaznamenání nabíjení článku	10
2.1.2 Měření kapacity článku vybíjecí metodou	11
2.1.3 Měření vnitřního odporu článku	15
2.1.4 Měření termokamerou	17
2.2 Shrnutí výsledků měření	19
3 Hlavní pravidla pro návrh trakční baterie elektroformule	20
3.1 Definice	21
3.2 Výkonová omezení	21
3.3 Základní požadavky	21
3.4 Požadavky na trakční baterii	21
3.4.1 Obecné požadavky	21
3.4.2 Požadavky na elektrickou konfiguraci trakční baterie	22
3.4.3 Požadavky na mechanickou konfiguraci trakční baterie	22
4 Návrh trakční baterie	24
4.1 Topologie trakční baterie	24
4.2 Rozmístění článků v baterii	26
4.3 Návrh segmentu trakční baterie	28
4.3.1 Segmentový koš	29

4.3.2	Silová DPS	31
4.3.3	Ostatní elektronika	35
4.3.4	Propojky segmentu	36
4.3.5	Ostatní mechanické prvky	37
4.3.6	Parametry segmentu	39
4.3.7	Postup kompletace segmentu baterie	41
4.4	Návrh baterie	46
4.4.1	Pojistka	46
4.4.2	Hlavní stykače	47
4.4.3	Master BMS - Přednabíjecí obvod	48
4.4.4	Hlídač izolačního stavu - IMD	50
4.4.5	Napěťový indikátor	51
4.4.6	Dimenzování chlazení baterie	53
4.4.7	Výsledné uspořádání trakční baterie	56
4.5	Shrnutí návrhu trakční baterie studentské elektroformule	63
5	Prototypová výroba trakční baterie	66
6	Závěr	72
	Seznam použité literatury	75
	Přílohy	A

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
α	Teplotní součinitel elektrického odporu	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
C	Velikost kapacity v DC linku výkonového měniče	F
C_N	Jmenovitá kapacita bateriového článku	Ah
C_{th}	Tepelná kapacita PTC termistoru	J/K
C_V	Kapacita dosažená při vybíjení článku	Ah
E_M	Měrná energie	Wh/kg
E_N	Jmenovitá energie baterie	Wh
E_V	Hustota energie	Wh/l
I	Elektrický proud	A
I_{ef}	Efektivní hodnota proudu	A
I_{MAX}	Maximální trvalý vybíjecí proud bateriového článku	A,C
I_{VYB}	Vybíjecí proud článku během měření	A,C
K	Faktor pro dimenzování PTC termistoru přednabíjecího obvodu	-
l	Délka	m
M	Hmotnost baterie	kg
N	Celkový počet bateriových článků trakční baterie	-
N_P	Počet bateriových článků zapojený paralelně	-
N_S	Počet bateriových článků zapojený sériově	-
P_{BMAX}	Maximální výkon dodávaný baterií	W
P_{BMIN}	Minimální výkon dodávaný baterií	W
P_Z	Ztrátový výkon	Ω
ρ	Měrná elektrická vodivost	Ω/m
R	Elektrický odpor	Ω
R_0	Elektrický odpor při pokojové teplotě	Ω
R_i	Vnitřní odpor bateriového článku	Ω
S	Plocha	m^2
ΔT	Přírůstek teploty	$^{\circ}\text{C}$
$T_{A,max}$	Maximální očekávaná teplota okolí	$^{\circ}\text{C}$
T_B	Teplota na těle článku	$^{\circ}\text{C}$
T_{B0}	Teplota článku před měřením	$^{\circ}\text{C}$
T_{B1}	Teplota těla článku v bodě 1	$^{\circ}\text{C}$
T_{B2}	Teplota těla článku v bodě 2	$^{\circ}\text{C}$
T_{BMAX}	Maximální dovolená teplota článku	$^{\circ}\text{C}$
T_O	Teplota okolí	$^{\circ}\text{C}$
T_{ref}	Referenční teplota PTC termistoru	$^{\circ}\text{C}$

Značka	Popis	Jednotka
T_T	Teplota tabu článku	°C
t_{VYB}	Čas vybíjení článku	mm:ss
U	Napětí v DC linku výkonového měniče	V
U_{JM}	Jmenovité napětí segmentu/baterie	V
U_{MAX}	Maximální napětí segmentu/baterie	V
U_{MIN}	Minimální napětí segmentu/baterie	V
U_N	Jmenovité napětí bateriového článku	V
U_{NMAX}	Maximální napětí bateriového článku	V
U_{NMIN}	Minimální napětí bateriového článku	V
V	Objem baterie	dm ³
AIRs	Accumulator Isolation Relays	
BMS	Battery Management System	
CAN	Controller Area Network	
CPU	Central Processor Unit	
DPS	Deska plošných spojů	
FSG	Formula Student Germany	
GLV	Grounded Low Voltage	
HS	High Side	
IMD	Insulation Monitoring Device	
LED	Light Emitting Diode	
Li-Ion	Lithium Iont battery	
Li-Po	Lithium Polymer battery	
MP	Maintenance Plugs	
MSLA	Masked Stereolithography Apparatus	
NMC	Lithium Nikl Mangan Kobalt battery	
NTC	Negative Thermal Coefficient	
OTH	Ostbayerische Technische Hochschule	
PTC	Positive Thermal Coefficient	
SAE	Society of Automotive Engineers	
SLS	Selective Laser Sintering	
SMT	Surface Mount Technology	
SoC	State of Charge	
SoH	State of Health	
THT	Trouht Hole Technology	
TS	Tractive System	
WET	Způsob ukončení vybíjení článku	

Seznam obrázků

1	Záznam standardního nabíjení článku A a článku B	11
2	Záznam vybíjení článku A různými velikostmi hodnot proudů	12
3	Záznam ohřevu článku A při vybíjení různými velikostmi hodnot proudů	13
4	Znázornění rozdílů vybíjecích charakteristik článků A a B	14
5	Znázornění rozdílů v ohřevech mezi články A a B	14
6	Detail průběhu napětí a proudu při zatížení článku A (odpovídá SoC 100 %) . . .	15
7	Detail průběhu napětí a proudu při zotavení článku A (odpovídá SoC 95,7 %) . .	16
8	Záznam z měření vnitřního odporu článku A	16
9	Měření ohřevu článku A vybíjeného konstantní velikostí proudu 30 A zaznamenané termokamerou	18
10	Topologie trakční baterie elektroformule	24
11	Segmentový koš - nosná část segmentu	29
12	Segmentový koš - nárys a bokorys	29
13	Znázornění elektrické konfigurace segmentu baterie (18S2P)	30
14	Segmentový koš vyplněný články dle přílohy B	30
15	Umístění termistoru pro měření teploty článku - červený bod (na stejném místě byla snímána teplota při měření článků) [5]	31
16	Schéma zapojení silové DPS - část 1	32
17	Schéma zapojení silové DPS - část 2	32
18	Detailní pohled na mosazné spojovače. Vlevo se nachází mosazný spojovač typ 1, uprostřed typ 2 a v pravo typ 3	33
19	Detail 3D modelu silové DPS ze strany TOP	34
20	Detail 3D modelu silové DPS ze strany BOTTOM	34
21	3D model silové DPS	35
22	Použité kontakty od firmy Stäubli - vlevo Plug S5N, uprostřed Socket B5N a vpravo řez kontaktem Socket B5N znázorňující technologie Multilam (více viz [13], [14])	36
23	Maintenance Plugs - spojky, zajišťující elektrické propojení segmentů (poutko zde není vyobrazeno)	37
24	Podpěra vložená mezi segmentový koš a silovou DPS	37
25	Detail navržených distančních sloupků (vlevo se nachází zástupce první řady a vpravo zástupce druhé)	38
26	Znázornění krytky zakrývající segment a chránící elektroniku před neúmyslným poškozením	38

27	Pohled shora na kompletně sestavený segment (krytka je zde z neprůhledného materiálu)	39
28	3D model kompletně sestaveného segmentu obsahujícího všechny součásti	39
29	Krok číslo 4 v postupu kompletace segmentu	43
30	Kroky číslo 8 a 9 v postupu kompletace segmentu	43
31	Krok číslo 12 v postupu kompletace segmentu	44
32	Krok číslo 13 v postupu kompletace segmentu	44
33	Kroky číslo 14 a 15 v postupu kompletace segmentu	45
34	Kroky číslo 18-20 v postupu kompletace segmentu	45
35	Kroky číslo 21 a 22 v postupu kompletace segmentu	46
36	Pojistka chránící trakční baterii před zkratem [17]	47
37	Hlavní relé připojující baterii do trakčního systému vozidla [18]	47
38	Nejhorší varianta přechodového děje vzniklého při nabíjecí kondenzátorů DC linku výkonového měniče	49
39	Hlídač izolačního stavu - model IR155-3204 [21]	50
40	Schéma zapojení napěťového indikátoru	51
41	Navržená deska plošného spoje napěťového indikátoru (rozměry: 82,5x28,5 mm)	53
42	Hlavní část kontejneru trakční baterie sloužící k uložení segmentů	57
43	Hlavní část kontejneru trakční baterie s uloženými segmenty a ventilátory s nana- značením směru toku vzduchu	58
44	Detail spojení jednotlivých segmentů pomocí MP	58
45	Druhá část kontejneru trakční baterie sloužící k uložení doprovodné elektroniky	59
46	Box s umístěnou doprovodnou elektronikou	60
47	Trakční baterie elektroformule s umístěnou doprovodnou elektronikou	61
48	Uzavřená trakční baterie elektroformule	61
49	Uzavřená trakční baterie elektroformule	62
50	Přípravek pro stříhání otvorů do tabů článků	67
51	Přípravek pro stříhání otvorů do tabů článků - pohled v řezech	67
52	Přípravek pro ohýbání mosazných spojovačů	68
53	Segmentový koš obsahující šablony silové DPS a slave BMS, obě řady distančních sloupků a podpěru	69
54	Segmentový koš obsahující všech 36 článků	69
55	Segmentový koš obsahující všech 36 článků - znázornění 5mm mezery pro chlazení	70
56	Segmentový koš obsahující 8 článků a šablony desek plošných spojů	70
57	Segmentový koš obsahující 8 článků a šablony desek plošných spojů - bokorys a půdorys	71
58	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 1 [5]	A
59	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 2 [5]	B
60	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 3 [5]	C
61	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 4 [5]	D
62	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 5 [5]	E
63	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 6 [5]	F

64	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 7 [5]	G
65	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 8 [5]	H
66	Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 9 [5]	I
67	Rozmístění jednotlivých článků v baterii včetně znázornění jejich polaritu (modrou a červenou barvou jsou označeny články na krajích segmentů symbolizující záporný a kladný pól segmentu)	R

Seznam tabulek

1	Katalogové parametry článku SLPBA942126 - detailněji viz příloha A [5]	6
2	Tabulka porovnávající provizorně sestavené baterie ze 6 nejvhodnějších článků s baterií sestavenou z článku vybraného předchozí rešerší	8
3	Shrnutí výsledků měření vybíjení článku A konstantními proudy různých velikostí	13
4	Shrnutí výsledků měření vnitřního odporu článku A	16
5	Velikosti hodnot změřených teplot článku A odpovídající bodům znázorněným v obrázku 9	19
6	Velikosti základních parametrů jednotlivých segmentů baterie (odpovídá velikostem parametrů článků uvedených v Matching listu)	28
7	Základní parametry jednoho segmentu	40
8	Procentuální podíl hmotnosti jednotlivých prvků segmentu	40
9	Výpočet ztrátového výkonu jednotlivých komponent segmentu	54
10	Výpočet ztrátového výkonu jednotlivých komponent elektroniky nacházející se v kontejneru trakční baterie	56
11	Parametry navržené trakční baterie porovnané s parametry trakční baterie navržené v bakalářské práci (viz [1])	63
12	Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 1p	J
13	Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 1z	K
14	Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 2p	L
15	Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 2z	M
16	Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 3p	N
17	Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 3z	O
18	Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 4p	P
19	Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 4z	Q
20	Seznam všech dílů a příslušných materiálů, ze kterých bude vyroben jeden segment trakční baterie	S
21	Seznam součástek, které obsahuje napěťový indikátor trakční baterie	T

Úvod

Cílem této diplomové práce bylo zkonstruovat trakční baterii pro studentskou elektroformuli na základě návrhu vytvořeného v bakalářské práci (viz [1]), která této diplomové práci předchází. Výše zmíněná bakalářská práce se zabývala rešerší pravidel soutěže FSG (Formula Student Germany), pro kterou je elektroformule stavěna, rešerší postupů jiných studentských týmů při řešení tohoto problému, dále pak výpočtem energie trakční baterie, rešerší vhodných Li-Ion článků a jejich měření a následným návrhem mechanické a elektrické koncepce trakční baterie.

Výsledkem bakalářské práce byl kompletní návrh trakční baterie studentské elektroformule, na základě něhož měla být trakční baterie vyrobena. Navržená baterie měla mít kapacitu 6,5 kWh, jmenovité napětí 432 V, konfiguraci 120S5P (8 segmentů každý 15S5P) a měla být složena z celkem 600 článků typu Li-Ion (Samsung INR21700-30T). Důvodem výběru tohoto cylindrického článku byla jeho dostupnost a cena, dále pak množství zkušeností s technologií výroby baterií z těchto článků.

Jelikož se technologie v oblasti elektromobility posouvají rychle dopředu, bylo zapotřebí ověřit, zda-li je návrh výše zmíněné baterie stále aktuální, a zda-li nebude zapotřebí návrh baterie upravit. V důsledku tohoto požadavku bylo zapotřebí znovu přepočítat energii trakční baterie na základě nových údajů a výpočet maximálně zpřesnit. Dále bylo nutné provést novou rešerši dostupných akumulátorových článků a provést měření vybraného článku, o čemž pojednávají následující kapitoly (kapitola 1 a kapitola 2).

1 Dimenzování trakční baterie

1.1 Li-Ion versus Li-Po články

Dnes jsou v oblasti elektromobility nejvíce rozšířené články typu Li-Ion, a to díky svým vynikajícím vlastnostem, na základě čehož jsou tyto články prozatím považovány za nejlepší cestu vývoje akumulátorů. Jejich vývojovým nástupcem jsou články typu Li-Po, které vylepšují některé nedostatky článků typu Li-Ion.

Jelikož jsou oba tyto články velice podobné a často dochází i mezi výrobci k nejasnému označení těchto článků a k jejich zaměňování, věnuje se tato podkapitola formálnímu rozdělení článků Li-Ion a Li-Po, ale nikoliv detailnímu popisu jejich vlastností a parametrů (ani jiných elektrochemických článků, či jejich dělení). Detailní informace o elektrochemických článcích, jejich rozdělení, vlastnostech a aplikaci je možné prostudovat na webové stránce [Battery University](#) (viz [2]), dále je možné prostudovat základní vlastnosti a rozdělení elektrochemických článků shrnuté ve výše zmíněné bakalářské práci (viz [1]), nebo na základě vlastní rešerše.

1.1.1 Shrnutí rozdílů mezi články typu Li-Ion a Li-Po

Termín "polymer" je běžně vnímán jako plast a polymery zahrnují obrovskou skupinu materiálů od syntetických plastů po přírodní biopolymery a proteiny, které tvoří základní biologické struktury. V elektrotechnice se v oblasti elektrochemických článků termín polymer běžně používá k popisu určitého typu lithiové baterie, která může nebo nemusí být na bázi polymeru.

Oba typy článků (Li-Ion a Li-Po) používají identický katodový a anodový materiál a obsahují podobné množství elektrolytu, ale Li-Po článek používá jiný typ elektrolytu (tradiční porézní separátor byl nahrazen mikroporézním elektrolytem). Li-polymer ale může být postaven na mnoha systémech, jako je Li-kobalt, NMC, Li-fosfát a Li-mangan, a není tak považován za jedinečnou chemii baterií. Například níže zmiňovaná firma MELASTA distribuuje Li-Po články pod označením Li-Ion a v závorce je udaná chemie, na které je článek založen - článek tedy nese označení například *Li-Ion (LCO)*, ale obsahuje mikroporézní polymerní elektrolyt, tudíž může být označován jako Li-Po článek.

Zde se nabízí otázka, jestli je nutné vytvářet nově označovanou třídu článků, i když se od svého předchůdce liší jen použitým elektrolytem, ale jejich chemické složení, princip fungování i způsob užívání je stejný. Je důležité dodat, že nový typ elektrolytu umožnil výrobu článků s vyšší měrnou energií, a to i při menších rozměrech článku (ale za cenu daleko vyšších nákladů na výrobu takových článků). Další podstatnou změnou je použití fóliového obalu připomínající obal na potraviny, což způsobilo, že Li-Po články nepotřebují na rozdíl od Li-Ion článků pevný obal, aby docházelo ke stlačování elektrod k sobě, ale používají laminované listy, které nepotřebují kompresi

(tím bylo dosaženo snížení hmotnosti o více než 20% oproti původnímu pevnému cylindrickému obalu).[2]

Technologie výše zmíněných tenkých vrstev (laminované listy) osvobozuje design, protože baterii lze vyrobit v jakémkoli tvaru (doslova ve tvaru libovolného polygonu - například Li-Po články od společnosti MELASTA - [3]), čímž se výrazně zvyšuje užitná hodnota těchto drahých článků. Na závěr je zapotřebí dodat, že z uživatelského hlediska neexistuje mezi Li-Po a Li-Ion články rozdíl, a že je název Li-Po spíše formální, než že by byl založen na fyzikálním opodstatnění (v textu této práce bude pro lepší orientaci čtenáře používán výraz Li-Po z důvodu rozlišení výše zmíněných typů článků).

1.2 Výpočet energie trakční baterie

Detailní odvození výpočtu energie pro trakční baterii elektroformule i s fyzikálním odvozením je možné nalézt v bakalářské práci (viz [1]). Jelikož i při tomto aktualizovaném výpočtu energie trakční baterie platí stejné fyzikální zákony, věnuje se tato podkapitola pouze rozdílům v přístupu k výpočtu. Při výpočtu energie zůstal zachován požadavek, aby měla trakční baterie dostatek energie na zvládnutí disciplíny Endurance (závod na 22 km) a stejně jako při předchozím výpočtu, i zde bylo vycházeno z dat ze závodů z jízd benzínové formule. Tato data poskytli zástupci týmu studentské elektroformule fakulty strojní ZČU, kteří se v minulosti účastnili závodů s formulí se spalovacím motorem. Detaily o výše zmíněném závodu je možné nalézt na stránce FSG. [4]

Na rozdíl od předchozího výpočtu energie, při kterém byla energie trakční baterie vypočtena pouze pro jedno kolo jednoho konkrétního závodu a následně vynásobena počtem kol, byla při novém výpočtu počítána energie pro každé kolo každého závodu, ze kterého byla data dostupná. Vypočtená energie pro každé kolo byla vynásobena počtem kol daného závodu a výsledkem bylo celkem 94 hodnot energií. Při výpočtu nebyla uvažována rekuperace energie, protože během závodu nemusí být vždy k rekuperaci vhodné podmínky (například příliš vysoká teplota článků).

Jelikož má každý závod jiný charakter tratě, i když je délka tratě přibližně stejně dlouhá, byly dále uvažovány jen vypočtené energie pro závody s nejvyššími požadavky na energii (nejdelší tratě s nejčtetnějšími zatáčkami). Těmito ověřovacími výpočty bylo zjištěno, že maximální potřebná energie pro nejnáročnější závody činila přibližně 6,4 kWh při efektivním výkonu formule 16,8 kW. Jelikož tyto hodnoty odpovídají hodnotám získaným při předchozím výpočtu energie, byla tímto ověřena správnost použitého výpočtu i celé úvahy.

Při bližším zkoumání výpočtu energie, výsledků studentského týmu ze ZČU a výsledků nejlepších studentských týmů světa bylo zjištěno, že elektroformule s výše vypočítanou kapacitou by dokázala závod ujet s časem odpovídající dosaženým časům závodů benzínové formule studentského týmu ZČU (to vychází z předpokladu, že čím více energie baterie má, tím po delší dobu dokáže dodávat svůj maximální výkon).

Při detailní analýze výsledků nejlepších studentských týmů bylo vypočteno, že trakční baterie jejich formulí dosahuje efektivního výkonu přibližně 23-24 kW oproti výše zmíněným 16,8 kW. Proto

byl do výpočtu energie zahrnut koeficient výkonu, který tento rozdíl vyvážil (princip zmíněného koeficientu výkonu zde není rozepsán, protože to v kontextu práce není důležité). Výsledkem bylo, že pro dosažení nejlepších časů by byla zapotřebí energie baterie v rozmezí 6,8-7,5 kWh. Na základě toho bylo rozhodnuto, že energie trakční baterie bude **7 kWh** na rozdíl od předchozích 6,5 kWh.

1.3 Rešerše Li-Po článků

Rešerše vhodných Li-Ion článků popsané v bakalářské práci (viz [1]) se zabývala porovnáváním a výběrem článků jen z řady Li-Ion. Důvodem nezahrnutí článků typu Li-Po do výše zmíněné rešerše byla jejich cena, nutnost vymyslet technologii výroby akumulátorů z těchto článků a nulové zkušenosti s tímto typem článků. S tím vším samozřejmě souvisí ještě jeden aspekt, který bude v práci často zmiňován, a který nesmí být v kontextu bateriových článků nikdy opomíjen, a tím je bezpečnost. Je známou věcí, že se při špatném zacházení mohou stát bateriové články více či méně nebezpečné a právě články typu Li-Po, které snadno hoří a explodují, se řadí mezi ty potenciálně nejnebezpečnější (například viz [video](#)). Sekundární články založené na jiné chemii než články typu Li-Ion a Li-Po nebyly vůbec uvažovány, jelikož se již ze své podstaty nehodí pro automotive aplikace.

S příchodem požadavku aktualizace mechanického a elektrického návrhu trakční baterie souviselo i provedení nové rešerše dostupných bateriových článků. Při této rešerši bylo zjištěno, že jsou články typu Li-Ion na ústupu a trendem se naopak stávají články typu Li-Po, a že stále více studentských týmů začíná používat pro své trakční baterie právě články typu Li-Po. Dále bylo zjištěno, že globálním producentem těchto článků je firma MELASTA, která úzce spolupracuje se studentskými týmy a dodává jim články právě typu Li-Po. Na základě tohoto zjištění bylo rozhodnuto, že bude muset být provedena nová rešerše bateriových článků (tentokrát pouze typu Li-Po) s cílem najít co nejvhodnější článek a držet tak tempo se světovými lídry na poli automotive i s nejlepšími studentskými týmy (a to i navzdory nevýhodám, které Li-Po články přinášejí).

1.3.1 Postup rešerše článků

Po následném kontaktování společnosti MELASTA byla zpřístupněna tabulka obsahující veškeré dostupné články ze skupiny Li-Po vyráběné touto společností. Výše zmíněná tabulka zahrnovala 1158 článků založených na technologii Li-Po lišících se chemickým složením, a to podle toho, pro jaký konkrétní účel jsou tyto články vhodné (například vysokoteplotní nebo vysokonapěťové články - pojem vysokonapěťové znamená, že je jmenovité napětí článku 3,8 V a maximální napětí je 4,35 V).

Pro trakční baterii elektrické formule byly nejdůležitější články s vysokou hustotou energie, které dovolují sestavit baterii s vysokou hodnotou energie, a to při zachování vysokého dodávaného výkonu, což má výrazný vliv na velikost a hmotnost baterie, proto byly při rešerši dále uvažovány

jen články tohoto typu (výrobce označovány jako Polymer Li-Ion Cell (LCO Chemistry) - high energy density design).

Jak je zmíněno v bakalářské práci ([1] - kapitola 4), rešerše vhodných bateriových článků byla založena na vyřazovací metodě, kdy byly porovnávány články hodnoceny dle různých kritérií a na základě toho byly postupně vyřazovány ty nejméně vhodné, až zůstal nízký počet článků (řádově jednotky), ze kterých již bylo možné vybrat nejvhodnější článek pro trakční baterii elektroformule. Na rozdíl od rešerše provedené ve výše zmíněné bakalářské práci odpadalo v této rešerši porovnávání článků z hlediska ceny a dostupnosti (protože byly porovnávány články od jednoho výrobce) a také podle skutečných měřených charakteristik článků (jelikož taková data v tomto případě nebyla k dispozici).

Jelikož platí, že velikost hodnoty maximálního odebíraného proudu z článku a velikost hodnoty jmenovité kapacity článku jdou vždy proti sobě a výběr článku dle těchto kritérií je vždy dílem kompromisu, byly v první selekci vyřazeny články, které mají hodnotu maximálního trvalého vybíjecího proudu nižší než 5 C a zároveň ty články, které mají hodnotu jmenovité kapacity nižší než 4000 mAh (tento krok je podložen zkušenostmi, které říkají, že baterie sestavené z článku nesplňující výše zmíněné předpoklady patří do skupiny nejhůře optimalizovaných baterií).

Protože byly porovnávány články od jednoho výrobce a všechny byly založeny na stejné chemii, nebylo možné oddělit vhodné články od těch méně vhodných pomocí metody porovnávání jmenovitých parametrů jednotlivých článků. Namísto toho byla druhá selekce založena na kvalitativním porovnávání provizorně spočítaných baterií, které byly vytvořeny pro každý porovnávaný článek. Každá provizorní baterie byla navržena tak, aby měla maximální napětí 600 V (stanoveno pravidly soutěže - blíže viz kapitola 3), což znamenalo, že vzhledem k tomu, že všechny porovnávané články měly maximální napětí 4,2 V, byl počet sériově spojených článků zvolen 144 a na základě této hodnoty byla dosazován počet paralelních článků tak, aby měla baterie hodnotu jmenovité energie co nejblíže hodnotě 7 kWh (což je požadovaná hodnota energie - viz podkapitola 1.2).

Důvodem výběru maximální velikosti hodnoty napěťové hladiny trakční baterie 600 V byla snaha o maximální snížení proudu odebíraného z baterie, což má své negativní důsledky, jako jsou například požadavky na izolaci a na elektrické komponenty, ale především se jednalo o velkou úsporu z hlediska výkonového dimenzování komponent baterie (to se projevilo zejména v nižších ztrátách na prvcích jako jsou vodivé plechy a kontakty, dále pak v nižším výkonovém namáhání bateriových článků, celkové nižší hmotnosti a velikosti baterie apod.).

Kromě sledované jmenovité energie sestavených baterií byl sledován i výkon, který byly provizorní baterie schopny v průběhu svého vybíjecího cyklu dodávat (podstatné bylo, aby byla baterie schopna dodávat maximální dovolený výkon 80 kW i krátce před svým absolutním vybitím - limit stanoven pravidly soutěže, blíže viz kapitola 3). Na základě těchto dvou požadavků byly vyřazeny články, jejichž baterie měly jmenovitou energii větší nebo rovno než 8 kWh a menší než 7 kWh, a které nedokázaly po celou dobu svého vybíjecího cyklu dodávat výkon 80 kW.

Protože bylo patrné, že jakákoliv baterie sestavená z jakéhokoliv ze zbylých 102 článků bude schopná závod ujet, a to s plným výkonem, zbývalo porovnat provizorní baterie z hlediska jejich

hmotnosti a celkového objemu. Na základě této třetí selekce bylo vybráno 6 článků, které byly dále detailněji zkoumány z důvodu jistoty výběru toho nejvhodnějšího pro sestavení trakční baterie elektroformule. Tabulka níže (tabulka 2) zobrazuje porovnání parametrů výše zmíněných 6 článků a parametrů baterií z nich sestavených a také článku vybraného předchozí rešerší v bakalářské práci ([1]) - Samsung INR21700-30T (výpočty parametrů uvedených ve výše zmíněné tabulce je možné odvodit z výpočtů uvedených v bakalářské práci - viz [1] příloha C.2).

Závěrem z podrobného zkoumání výše zmíněné tabulky (tabulka 2) bylo, že byl pro trakční baterii elektroformule zvolen článek **SLPBA942126**. Důvodem výběru tohoto článku bylo, že i když má baterie sestavená z tohoto článku o 0,46 kWh vyšší hodnotu než je hodnota požadovaná, má tato baterie v porovnání s bateriemi složenými ze zbylých článků přibližně stejnou hmotnost i objem, což znamená další rezervu energie při zachování hmotnosti a objemu. Zároveň tím vznikla rezerva energie, která může pokrýt spotřebu elektroniky, jakou například chladicí ventilátory a dále se tím vykompenzuje úbytek kapacity článků v průběhu jejich životnosti, nedokonalé balancování článků, nebo nižší dosažená kapacita článku při vybíjení vyššími proudy.

Kontrolním výpočtem bylo ověřeno, že průběh odebíraného proudu z baterie odpovídající kolům závodu s nejvyššími požadavky na baterii nepřesahuje ani špičkově maximální dovolený trvale odebíraný proud z článku. Dále bylo výpočty zjištěno, že očekávaná efektivní hodnota proudu odebíraného z každého článku baterie bude při stavu jejího plného nabití 24,5 A a při stavu plného vybití 30,2 A.

Nově vybraný článek (SLPBA942126) má v porovnání se článkem vybraným předchozí rešerší (INR21700-30T) vyšší objem i hmotnost, ale vzhledem k jeho kapacitě má vyšší měrnou hustotu a hustotu energie, což znamená, že výsledná baterie bude při zachování stejného množství energie lehčí a menší. Díky nižšímu vnitřnímu odporu článku SLPBA942126 bude mít baterie nižší ztrátový výkon, což sníží požadavek na chlazení a v neposlední řadě bude baterie složená z článků SLPBA942126 schopná na rozdíl od baterie složené ze článků INR21700-30T dodávat po celou dobu závodu maximální dovolený výkon. Tabulka 1 shrnuje hlavní katalogové parametry článku SLPBA942126.

Parametr	Hodnota
Jmenovitá kapacita	7000 mAh
Jmenovité napětí	3,7 V
Maximální trvalý nabíjecí proud	14 A
Špičkový nabíjecí proud	20 A (≤ 3 s)
Nabíjecí napětí	4,2 V \pm 0,03 V
Maximální trvalý vybíjecí proud	105 A
Špičkový vybíjecí proud	150, A (≤ 3 s)
Cut-off napětí	3,0 V
AC Impedance	$\leq 1,3$ m Ω
Životnost	>100 cyklů
Povolený rozsah teplot při nabíjení	0 °C ~ 45 °C
Povolený rozsah teplot při vybíjení	-20 °C ~ 60 °C
Hmotnost	128 \pm 3 g

Tabulka 1: Katalogové parametry článku SLPBA942126 - detailněji viz příloha A [5]

Rešerší vhodných Li-Po článků pro baterii studentské elektroformule byla zároveň navržena základní elektrická koncepce trakční baterie (viz tabulka 2). Baterie se bude skládat z 8 segmentů, každý segment bude složen z 36 článků o elektrické konfiguraci 18S2P - celá baterie se tedy bude skládat z 288 článků o výsledné konfiguraci 144S2P. Baterie bude mít jmenovité napětí 532,8 V, v plně nabitém stavu bude mít baterie 604,8 V (software battery management systému tuto hodnotu omezí na 600V, aby baterie vyhovovala pravidlům) a v plně vybitém stavu 432,0 V. Celková energie baterie bude 7,46 kWh při čisté hmotnosti článků 37,73 kg.

Tímto bylo možné považovat rešerši za ukončenou, ale před samotným závazným objednáním článků u výrobce bylo napřed zapotřebí výrobcí upřesnit technickou specifikaci poptávaných článků. Výrobce nabízí možnost libovolně si zvolit délku elektrod článku (v rozmezí 10-35 mm) a dále pak jejich materiál (na výběr byly dvě možnosti - čistý hliník a niklovaná měď). Z důvodu lepší práce s články a vyšší volnosti při návrhu mechanické koncepce baterie byla délka elektrod zvolena 35 mm a z důvodu elektrického odporu a obavy ze spojování s mědí byla jako materiál tabů vybrána niklovaná měď. Článků bylo objednáno celkem 306, i když jich bylo zapotřebí jen 288 - některé byly vyčleněné pro účely měření, další pak jako rezerva v případě, že by byly některé články při montáži zničeny.

Závěrem se dá říci, že nová rešerše měla význam, protože baterie z nově vybraného článku bude mít daleko lepší parametry než předchozí baterie složená z klasických cylindrických článků, a to i navzdory tomu, že se tím vývoj baterie pozdržel o více než 2 roky. Neméně významný je také fakt, že nově vybraný článek SLPBA942126 patří do nejnovější vývojové větve bateriových článků, což umožňuje vyvíjet trakční baterii elektroformule spolu s trendy automotive a držet se tak na špičce vývoje. Podstatné je také zmínit, že se potvrdilo, že porovnávání článků pouze z hlediska jejich katalogových parametrů není ani zdaleka dostačující.

Článek	INR21700-30T	SLPBAx42126	SLPB7442126	SLPBBA942126	SLPB9675175	SLPB9143158
Chemie	Li-Ion	Li-Po (LCO)	Li-Po (LCO)	Li-Po (LCO)	Li-Po (LCO)	Li-Po (LCO)
I_{MAX} [A]	35	99	67,5	102	280	108
I_{MAX} [C]	11	15	15	15	20	15
U_{NMIN} [V]	3	3	3	3	3	3
U_N [V]	3,6	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
U_{NMAX} [V]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
C_N [mAh]	3000	6600	4500	6800	14000	7200
R_i [mΩ]	20	1,4	2	1,3	0,8	1,4
E_M [Wh/kg]	158,59	189,30	186,03	197,33	190,44	196,61
E_V [Wh/l]	430,51	423,49	415,23	427,13	408,34	436,89
N_S [-]	120	144	144	144	144	144
N_P [-]	5	2	3	2	1	2
N [-]	600	288	432	288	144	288
E_N [kWh]	6,61	7,03	7,19	7,25	7,46	7,67
U_{MAX} [V]	504,0	604,8	604,8	604,8	604,8	604,8
U_{JM} [V]	432,0	532,8	532,8	532,8	532,8	532,8
U_{MIN} [V]	360,0	432,0	432,0	432,0	432,0	432,0
M [kg]	41,40	37,15	38,66	36,72	39,17	39,02
V [dm ³]	18,55	16,61	17,32	16,96	18,26	17,56
P_{MAXB} [kW]	75,60	105,49	107,89	108,69	149,18	115,08
P_{MINB} [kW]	63,00	85,54	87,48	88,13	120,96	93,31

Tabulka 2: Tabulka porovnávací provizorně sestavené baterie ze 6 nejvhodnějších článků s baterií sestavenou z článku vybraného předchozí řešení

2 Měření vybraného Li-Po článku

Níže popisované měření sice není obsahem zadání této diplomové práce, ale při návrhu baterie je měření bateriových článků (potažmo jednotlivých segmentů a následně i celé baterie) klíčovým krokem, protože je vždy nutné znát přesné hodnoty základních parametrů článků a také chování článku za přesně definovaných podmínek (ať už za standardních podmínek, které mohou běžným užíváním nastat nebo i ve stavech, které se blíží poruše).

Je sice možné měření vynechat a plně se tak spoléhat jen na údaje udané v datasheetu článku, ale tento krok je na úkor bezpečnosti a spolehlivosti celé baterie, přičemž především bezpečnost by nikdy neměla být opomíjena a měly by na ni být kladeny nejvyšší nároky. Měření navíc není samoučelné, protože dává detailní a velmi rozšířené informace o vlastnostech a chování článku Li-Po článků, které mohou, mimo jiné, velmi dobře posloužit při vývoji příští generace trakční baterie.

Měření bylo prováděno na dvou vzorcích, které byly zakoupeny od společnosti MELASTA spolu se zbytkem článků potřebných pro stavbu trakční baterie (měřené vzorky tak přesně odpovídají použitým článkům, jelikož patří do jedné výrobní série). V tabulce 1 jsou shrnuté základní parametry vybraného Li-Po článku SLPBA942126 - kompletní výčet parametrů vybraného článku viz datasheet článku - příloha A ([5]).

Průběh měření se z větší části shoduje s měřením provedeným v bakalářské práci (viz [1]) a z větší části z něho vychází (jelikož ale měření bateriových článků není v rozsahu této práce, nejsou zde popisovány žádné měřicí metody ani detailní postup měření). Cílem tohoto měření bylo mimo jiné maximálně vylepšit již známé měřicí metody a postupy tak, aby bylo možné získat co nejvíce relevantní data, proto byly použité postupy odlišné od těch použitých v bakalářské práci (viz [1]). Z tohoto důvodu bylo napřed provedeno několikátýdenní zkušební měření, při kterém byl i mimo jiné testován měřicí přípravek sloužící pro připojení Li-Po článku do obvodu.

Pro tyto účely byly poskytnuty čtyři články od kolegů z univerzity OTH Amberg-Weiden (Racing Team Running Snail), které byly používány v trakční baterii jejich studentské elektroformule, a které již byly vyčleněny na vyřazení. Jednalo se o Li-Po články taktéž od společnosti MELASTA s kódovým označením LPB042126 (7000 mAh, 15 C) vyrobené v roce 2019. Tyto články se svými parametry (i rozměry či hmotností) téměř shodují s články SLPBA912126, které byly vybrány a následně zakoupeny pro baterii studentské elektroformule. Díky tomu vznikl první kontakt s tímto typem bateriových článků, který byl velmi důležitý nejen z hlediska měření, ale také při návrhu elektrické a mechanické koncepce trakční baterie elektroformule.

Měření tak bylo možné získat informace o chování a vlastnostech jak článku nově zakoupeného, tak článku značně použitého, o čemž bude pojednáváno níže. Aby bylo v textu možné tyto dva články od sebe jednoduše rozlišit, bude nově zakoupený článek SLPBA912126 dále označován jen jako **článek A** a článek LPB042126 poskytnutý kolegy z Running Snail jen jako **článek B**.

2.1 Výsledky měření

Před shrnutím samotných výsledků měření je zapotřebí uvést, jakým způsobem byla snímána teplota článku. Z konstrukce článku vyplývá, že se skládá ze dvou základních částí - svého těla a ze dvou elektrod (ty budou dále v textu nazývány jako "taby" - vychází to z anglické literatury a v praxi se tento termín užívá častěji). Jelikož vlastností těla i tabu článku je elektrický odpor, vzniká na nich při průchodu proudem úbytek napětí a tudíž i ztrátový výkon - čili teplo. V závislosti na protékajícím proudem a konkrétním způsobu zapojení vzniká větší ztrátové teplo buď na těle článku nebo na tabu - to znamená, že tab může navíc svým ztrátovým výkonem ohřívat článek nebo naopak.

V rámci zkušebního měření byl, mimo jiné, testován ohřev samotného tabu při průchodu stejnosměrného proudem bez vlivů okolí, jako je například konvekce vzduchu a přechodový odpor v přípojném místě. Na základě tohoto měření bylo zjištěno, že se tab při průchodu proudem o velikosti 30 A ohřál přibližně o 15 °C (na teplotu cca 36 °C).

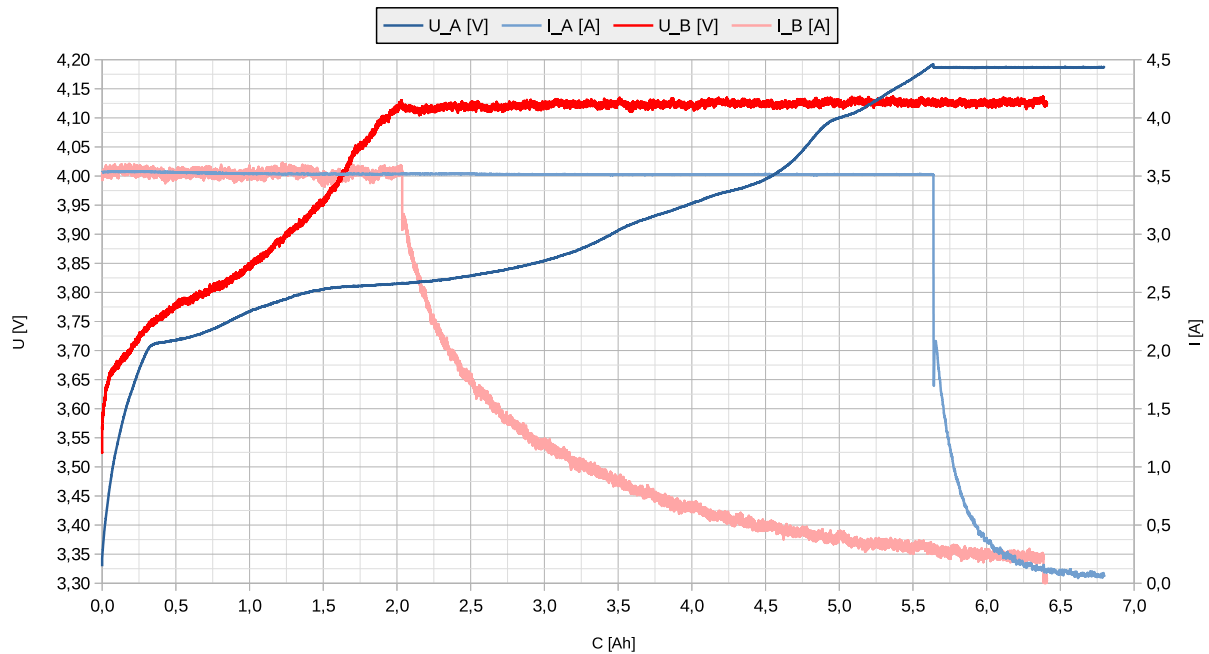
Jak bude vidět níže v textu, článek se při vybíjení konstantním proudem o velikosti 30 A ohřál téměř o 28 °C (na více než 51 °C), což je v porovnání s ohřevem tabu téměř dvojnásobný přírůstek. Dále bylo pomocí termokamery ověřeno, jaká je velikost přechodového odporu v přípravku, do kterého byl článek během měření zapojen a bylo zjištěno, že je přechodový odpor tak veliký, že se tab během měření ohřeje o více než dvojnásobek oproti stavu, kdy přechodový odpor nevzniká.

Vzhledem k tomu, že nebylo možné přechodový odpor vznikající připojením článku do měřicího přípravku efektivně odstranit nebo potlačit, nebyla teplota tabu v průběhu dalších měření snímána (také bylo zjištěno, že se článek ohřívá vždy více než tab, takže se nejednalo o chybu).

2.1.1 Zaznamenání nabíjení článku

Navzdory tomu, že je nabíjecí cyklus článku Li-Po shodný s nabíjecím cyklem článku Li-Ion, bylo zaznamenáváno každé nabíjení a to z důvodu kontroly průběhu nabíjení a stavu článku. V grafu na obrázku 1 je možné vidět zaznamenaný nabíjecí cyklus článku A (modře) i článku B (červeně).

Na první pohled je patrné, že oba články vykazují při nabíjení stejný tvar průběhu proudem i napětím (jediným rozdílem je, že napětí článku B nedosahuje napětí 4,2 V, na které byl nabíjen - v tomto případě se jedná o chybu napěťové sondy). Významný rozdíl mezi články je v tom, jak rychle stoupne jejich napětí na 4,2 V, a jak rychle poté klesá proud, který články odebírají. Článek B má strmější nárůst napětí, a proto dříve začne klesat nabíjecí proud, na rozdíl od článku A, kterému proud klesne velmi rychle a až ke konci nabíjecího cyklu. To je způsobeno rozdílným stářím a opotřebeností obou článků, kdy článek A, který je zcela nový ještě nemá porušenou vnitřní strukturu a chemické děje uvnitř něho probíhají efektivněji.



Obrázek 1: Záznam standardního nabíjení článku A a článku B

Tato skutečnost sice má vliv na ohřev článku při nabíjení (tento ohřev je ale zcela zanedbatelný), především to má vliv na celkovou dobu nabíjení článku. Oba články byly nabíjeny stejným proudem 3,5 A - 0,5 C (což je standardní doporučený nabíjecí proud daný výrobcem), ale článek A má na rozdíl od článku B výrazně vyšší střední hodnotu odebíraného proudu, což ve výsledku znamenalo, že se článek B nabíjel o více než 55 % déle než článek A (pro představu, článek A se nabíjecím proudem 3,5 A nabíjel 2 hodiny a 23 minut, zatímco článek B stejným proudem 3 hodiny a 42 minut).

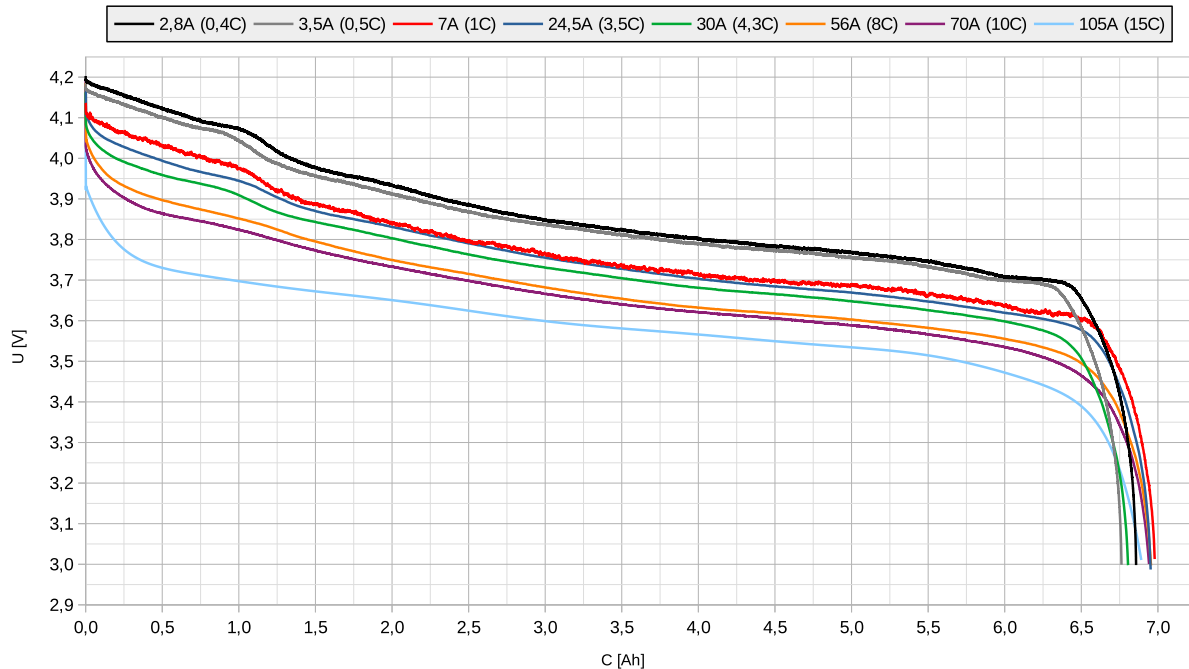
Dále byl článek podroben nabíjením nejvyšším trvalým proudem udaným výrobcem v datasheetu (14 A - 2 C), na základě čehož bylo zjištěno, že nabíjení trvalo téměř polovinu času oproti nabíjení proudem 1 C, ale především, že při nabíjení článek vykazoval významný ohřev (samotný článek se ohřál o 11 °C). To je důležitá informace z hlediska uvažování rekuperace, kdy je zapotřebí mít na paměti, že při okolní teplotě například 40 °C se může stát, že se článek při nabíjení ohřeje natolik, že nebude možné rekuperovat po celou dobu závodu.

2.1.2 Měření kapacity článku vybíjecí metodou

Protože skutečná kapacita článku zpravidla neodpovídá kapacitě udané výrobcem v datasheetu, a protože se skutečná dosažená kapacita liší v závislosti na vybíjecím proudu, bylo zapotřebí tyto závislosti ověřit měřením. Z důvodu správného rozmístění článků v baterii bylo dále zapotřebí ověřit stálost kapacity článku v závislosti na počtu cyklů (rozmístění článků bude podrobněji rozebráno v následující kapitole 4.2).

Na obrázku 2 je znázorněno napětí článku v průběhu vybíjení různými proudy v závislosti na dosažené kapacitě - důležité jsou zejména křivky odpovídající proudu 24,5 A (3,5 C) a 30 A (4,3 C),

kteřé odpovídají předpokládané efektivní hodnotě odebíraného proudu z každého článku baterie ve stavu jejího plného nabití a plného vybití. Z grafu jednoznačně vyplývá, že čím byl článek vybíjen vyšším proudem, tím se článek chová více jako měkký zdroj napětí (s tím souvisí i velikost náhlého poklesu napětí způsobeného zatížením článku).

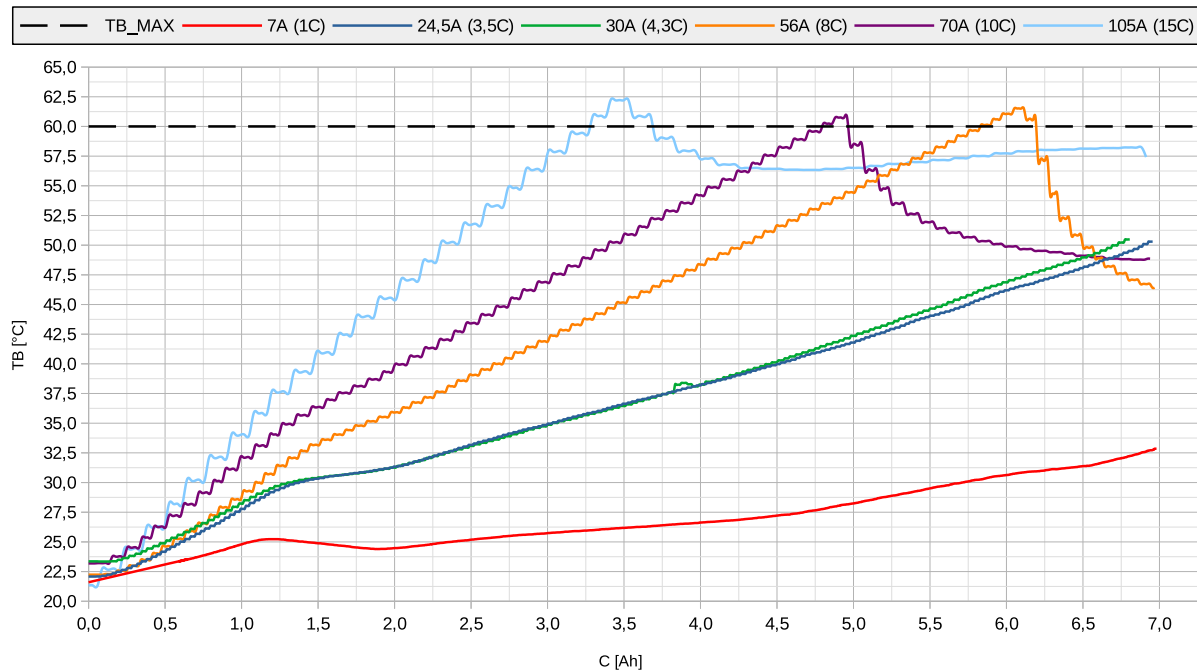


Obrázek 2: Záznam vybíjení článku A různými velikostmi hodnot proudů

Důležitým údajem je především dosažená kapacita, která se sice liší v závislosti na velikosti vybíjecího proudu, ale s rozdílem pouze do 2,8 % od jmenovité hodnoty kapacity. Při detailnějším zkoumání je patrné, že zde neplatí závislost, která říká, že čím vyšším proudem je článek vybíjen, tím nižší kapacity je dosaženo (to je v tomto případě způsobeno nestejným nabitím měřených článků před zahájením vybíjení). Dá se tedy říci, že skutečná změřená hodnota kapacity dodaného Li-Po článku byla **6916,4 mAh**, což sice neodpovídá katalogovému údaji 7000 mAh, ale odchylku $< 1,2\%$ je možné zanedbat.

Daleko zajímavější jsou údaje v Matching listu dodaného výrobcem, který udává hodnoty jmenovitého napětí, kapacity a vnitřního odporu každého článku změřeného přímo výrobcem (podrobněji v podkapitole 4.2). Z Matching listu vyplývá, že se hodnoty kapacity změřené výrobcem jednotlivých článků pohybují v rozmezí 7053-7236 mAh, což znamená odchylku až 6 % od změřených hodnot kapacity. Hodnoty kapacity článku přesahující velikost 7000 mAh nebylo možno dosáhnout ani standardním nabíjením a vybíjením stanoveném výrobcem v datasheetu, ani po konzultaci s výrobcem samotným.

Ohřev článku v průběhu vybíjení je zaznamenán v grafu na obrázku 3, kde veličina T_B reprezentuje skutečnou změřenou teplotu na těle článku a veličina T_{BMAX} znázorňuje maximální přípustnou teplotu článku uváděnou výrobcem ($60\text{ }^\circ\text{C}$).



Obrázek 3: Záznam ohřevu článku A při vybíjení různými velikostmi hodnot proudů

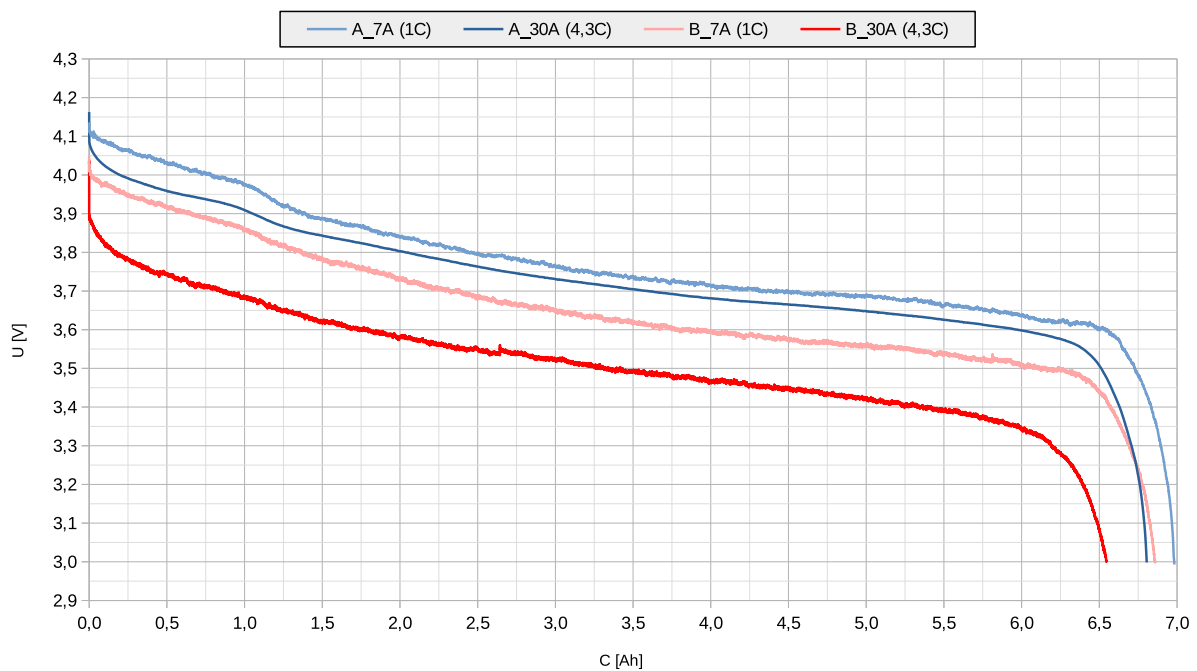
Z grafu je patrné, že do velikosti hodnoty vybíjecího proudu 30 A včetně nebylo zapotřebí článek během vybíjení chladit, neboť jeho teplota nepřesáhla $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (při vybíjení proudu 56 A, 70 A a 105 A bylo zapnuto chlazení vždy, jakmile teplota článku přesáhla kritickou hodnotu teploty $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ - vzhledem k hořlavosti měřených článků bylo chlazení zapínáno především z hlediska bezpečnosti). Na konci svého vybíjecího cyklu článek vykazuje zvýšení vnitřního odporu, což má zpravidla za následek rychlejší ohřev článku - tento jev zde není možné pozorovat, jelikož k onomu náhlému nárůstu vnitřního odporu ke konci SoC nedochází (viz podkapitola 2.1.3). "Schodovitost" změřených průběhů je dána vysokým nárůstem či poklesem teploty a současně dlouhou vzorkovací periodou měřicí ústředny, která činila 1 s. Tabulka 3 shrnuje výsledky vybíjení článku A různými velikostmi hodnot vybíjecích proudů.

T_{B0} [°C]	23,40	21,91	23,36	22,24	23,19	20,99
T_{O} [°C]	21,53	21,42	21,80	21,38	21,88	20,72
I_{VYB} [A] [(C)]	7 (1)	24,5 (3,5)	30 (4,3)	56 (8)	70 (10)	105 (15)
T_{Bmax} [°C]	32,85	50,57	51,16	61,52	60,75	60,85
Chlazení článku	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO
C_V [mAh]	6982,9	6952,6	6805,0	6954,9	6942,2	6891,5
t_{VYB} [mm:ss]	56:52	17:02	13:37	7:27	5:57	3:56
WET	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím

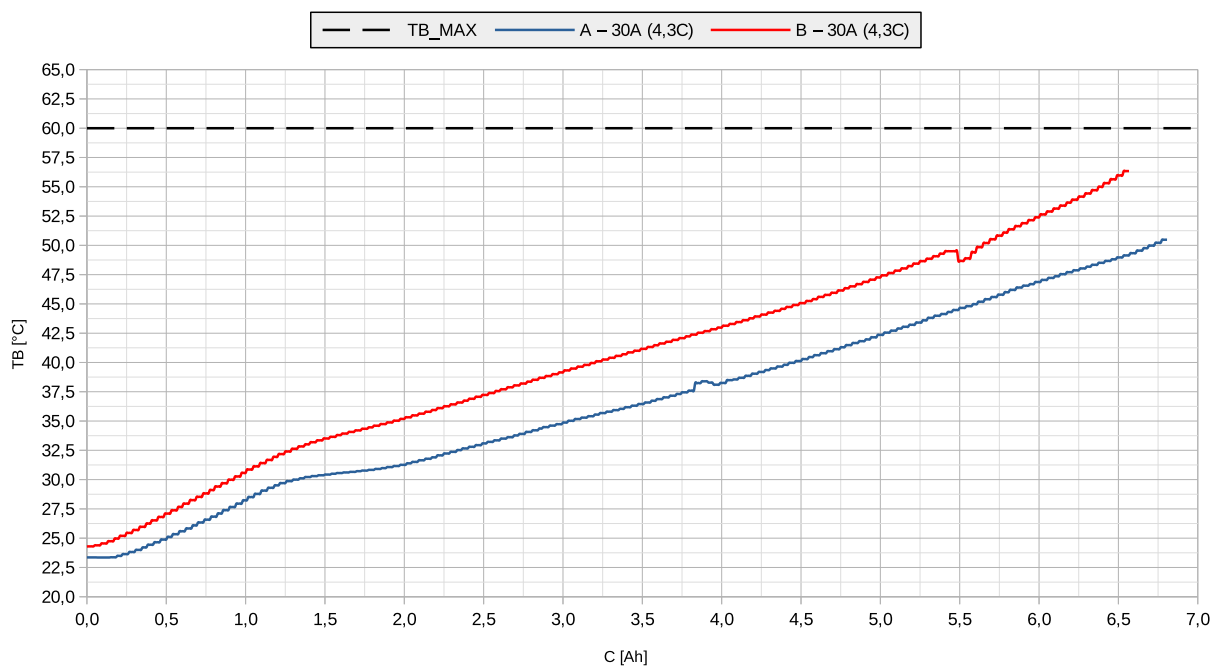
Tabulka 3: Shrnutí výsledků měření vybíjení článku A konstantními proudy různých velikostí

Grafy níže znázorňují porovnání rozdílů vybíjecích charakteristik článku A a B (obrázek 4) a rozdílů v ohřevěch mezi články A a B při vybíjení konstantními proudy (obrázek 5). Při pohledu na oba grafy je hned na první pohled patrné, že je článek B výrazně starší a opotřebovanější - projevuje se to zejména měkčí vybíjecí charakteristikou, nižší dosaženou kapacitou při vybíjení a

dále pak vyšším oteplením článku při vybíjení z důvodu nárůstu vnitřního odporu článku vlivem jeho degradace.



Obrázek 4: Znázornění rozdílů vybíjecích charakteristik článků A a B

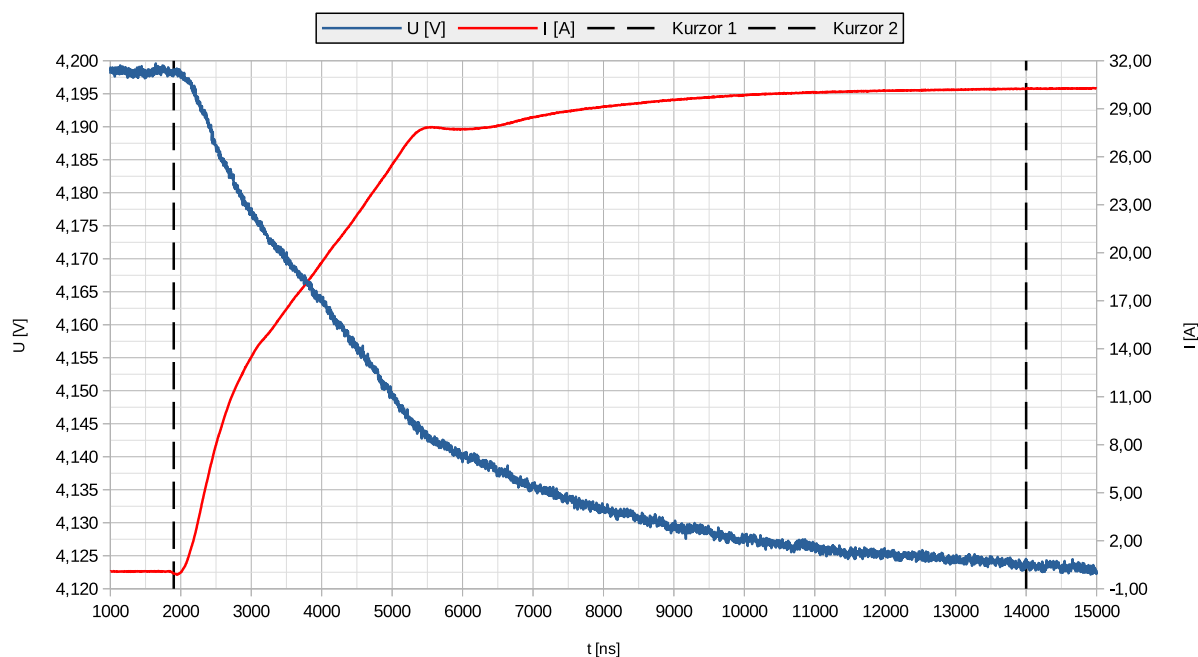


Obrázek 5: Znázornění rozdílů v ohřevech mezi články A a B

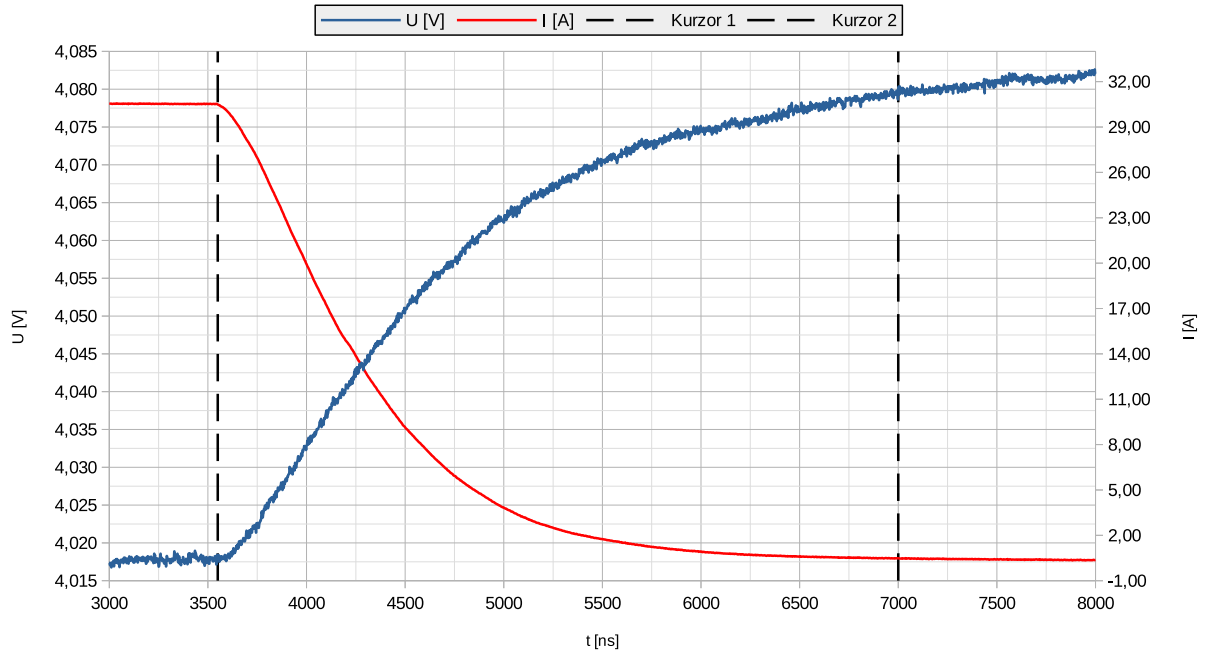
2.1.3 Měření vnitřního odporu článku

Vnitřní odpor je velmi důležitým parametrem bateriového článku, který se dá použít jako ukazatel životnosti článku, v této aplikaci ale především k výpočtu ztrátového výkonu baterie, který jejím provozem vznikne, na základě něhož bude poté počítáno a dimenzováno chlazení baterie. V grafech níže je možné vidět detailní průběhy napětí a proudu při zatížení článku konstantním proudem (obrázek 6) a následném zotavení článku (obrázek 7). Kurzory v grafech ohraničují začátek a konec přechodového děje, kterého bylo využito k výpočtu vnitřního odporu článku (detailněji viz bakalářská práce kapitola 5 - [1]).

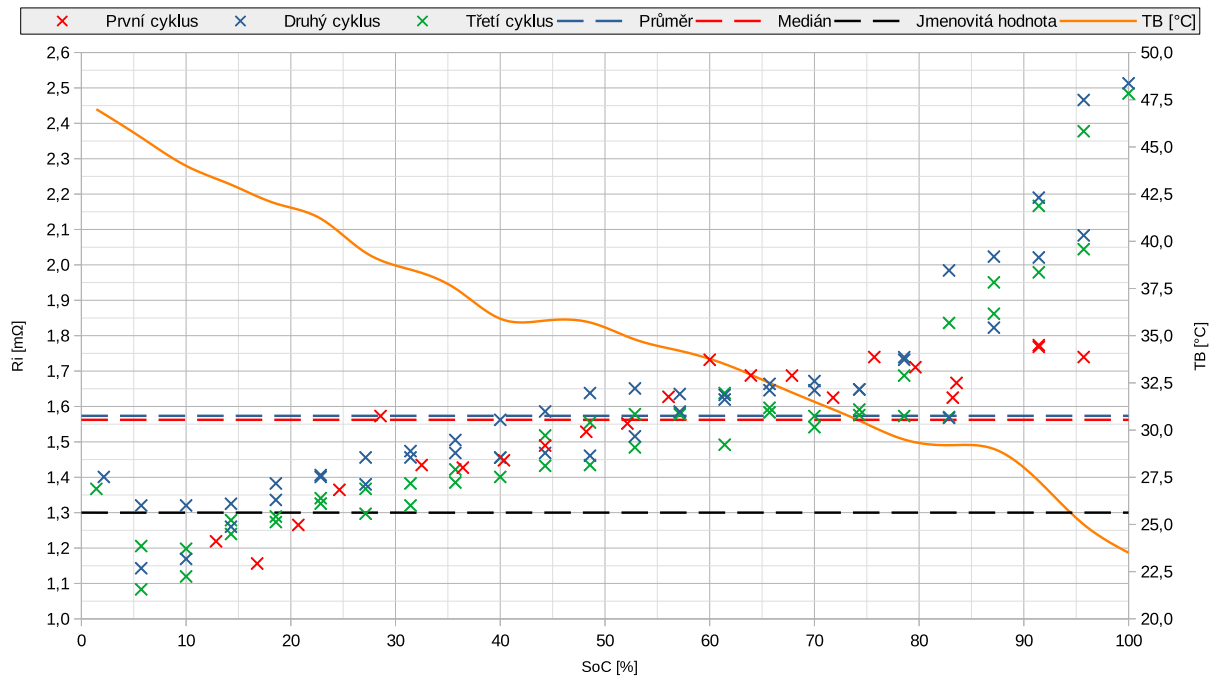
Protože se vnitřní odpor článku mění s teplotou článku a s SoC článku, byl článek střídavě zatěžován a zotavován proudem 30 A s krokem 300 mAh v celé škále SoC a současně s tím byla zaznamenávána teplota na těle článku. Graf níže (obrázek 8) shrnuje měření vnitřního odporu článku A při současném zaznamenávání teploty článku. Měření vnitřního odporu bylo provedeno ve třech cyklech z důvodu ověření stálosti tohoto parametru. V grafu je patrné, že je na počátku SoC velikost hodnoty vnitřního odporu nejvyšší stejně jako je tomu u Li-Ion článků, ale na rozdíl od nich vnitřní odpor měřeného Li-Po článku ke konci SoC neroste (což dokládají i křivky znázorňující ohřev článku v průběhu vybíjení - viz obrázek 3 a 8). Shrnutí výsledků z měření vnitřního odporu článku A se nachází v tabulce 4.



Obrázek 6: Detail průběhu napětí a proudu při zatížení článku A (odpovídá SoC 100%)



Obrázek 7: Detail průběhu napětí a proudu při zotavení článku A (odpovídá SoC 95,7%)



Obrázek 8: Záznam z měření vnitřního odporu článku A

	První cyklus	Druhý cyklus	Třetí cyklus	Výsledná hodnota
Průměr [$m\Omega$]	1,558	1,611	1,544	1,574
Medián [$m\Omega$]	1,625	1,577	1,505	1,562

Tabulka 4: Shrnutí výsledků měření vnitřního odporu článku A

Na první pohled je patrné, že se změřený vnitřní odpor liší od své katalogové hodnoty (přibližně o $270 \mu\Omega$), což může být způsobeno použitím odlišné metody k měření vnitřního odporu než jak udává výrobce a dále pak použitím jiných přístrojů, zapojení obvodu apod. Důležité ale je, že se změřené hodnoty vnitřního odporu článku v průběhu cyklů měnily maximálně o pár desítek $\mu\Omega$ a to s lehkou klesající tendencí, čímž lze považovat tento parametr článku za stálý. Dále je zapotřebí zmínit, že byl vnitřní odpor článku měřen tak, aby výsledek nebyl zkreslen odporem tabů (ten je počítán v kapitole 4.4.6).

Velikost hodnoty změřeného vnitřního odporu článku B byla necelých $8,5 m\Omega$, což je přibližně 5,4 krát vyšší hodnota, než jaká byla změřena u článku A. I toto je ukazatel toho, jak moc je již článek B opotřebovaný a jak moc zdegradoval. Změřená velikost vnitřního odporu Li-Ion článku vybraného v předchozí rešerši shrnuté v bakalářské práci (viz [1] - kapitola 4) - Samsung INR21700-30T vyšla $20 m\Omega$. Porovnáme-li tuto hodnotu s velikostmi hodnot vnitřního odporu změřených u článku A, je možné dospět k závěru, že nově vybraný článek má oproti předchozímu téměř 13 krát nižší velikost vnitřního odporu, což je z hlediska chlazení velká úspora.

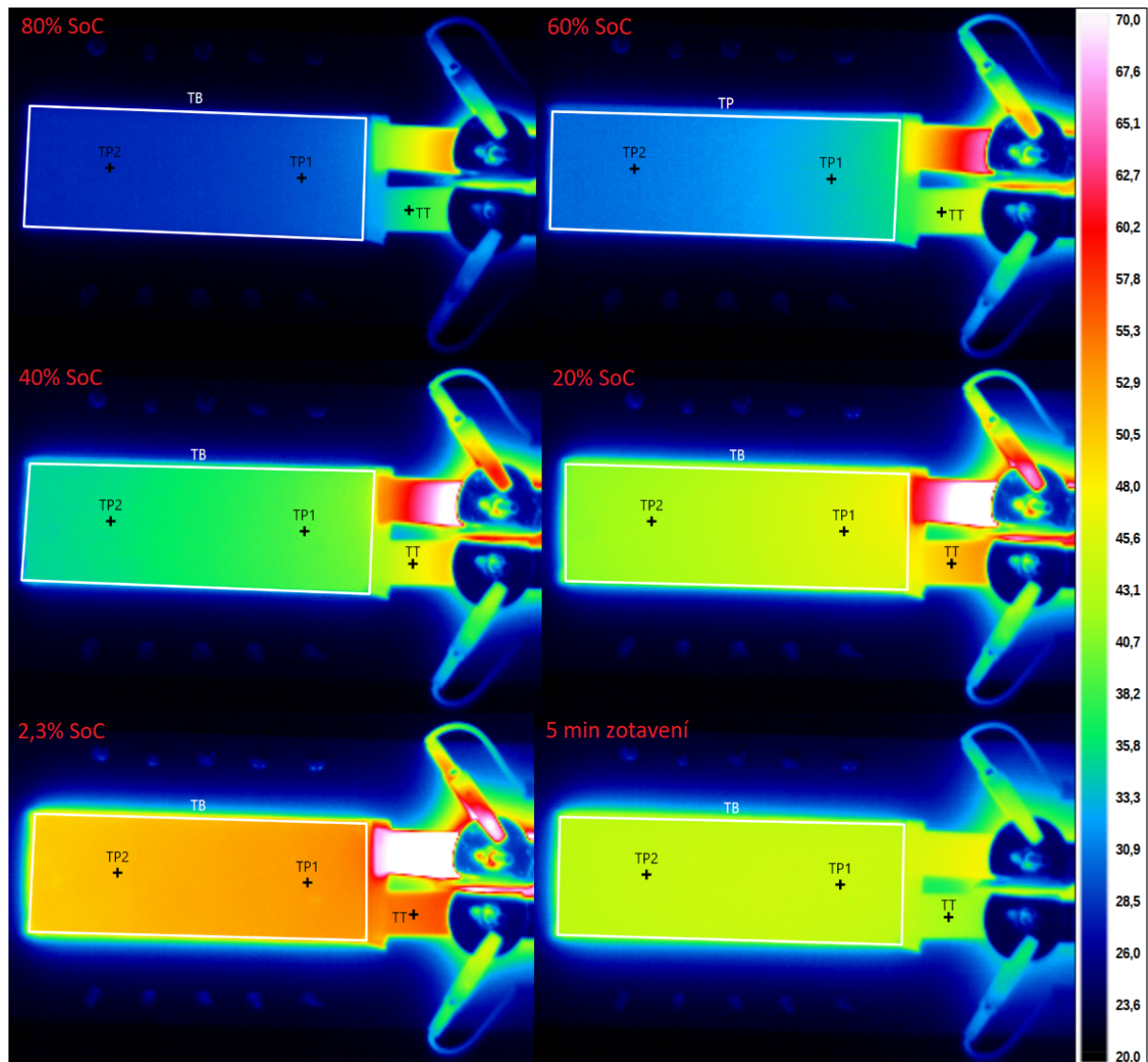
2.1.4 Měření termokamerou

Teplotní sonda použitá pro měření teploty článku zmíněná v předchozích bodech měření sice dává relativně jasnou představu o tom, jak se článek během svého pracovního cyklu ohřívá a ochlazuje, ale tímto způsobem není možné zaznamenat rozložení teploty uvnitř článku. Proto byl článek podroben jednomu vybíjecímu cyklu a během celého vybíjení byl článek snímán termokamerou, která zaznamenávala průběh teploty článku v čase. Pro lepší přesnost měření byla na povrch měřené strany článku nanášena speciální barva určená pro homogenizaci povrchu měřeného objektu pro zajištění stejné emisivity povrchu (konkrétně byla nanášena bílá barva s emisivitou 0,97), na základě čehož byla termokamera zkalibrována.

Obrázek 9 představuje záznam z měření ohřevu článku A při vybíjení proudem 30 A pomocí termokamery v 5 různých stavech vybití a také 5 minut po konci vybíjení (například 2,3 % SoC znamená, že je článek plně vybit - článek nedodal plných 7000 mAh).

Článek byl v přípravku zapojen tak, že tab ležící z tohoto pohledu výše, je vždy tab kladný. Z obrázku je hned na první pohled patrné, že se právě kladný tab hřál daleko více než tab záporný (teplota kladného tabu dosáhla během vybíjení téměř 93°C). To bylo způsobeno velmi vysokým přechodovým odporem, který vznikl nedokonalým vodivým propojením článku s přípravkem. Důsledkem nadměrného ohřevu kladného tabu docházelo k přenosu tepla z tabu do článku (jak je ale na obrázku vidět, článek má velmi vysokou teplotní časovou konstantu, tudíž zde není možné pozorovat, jak teplo z tabu prostupuje tělem článku). Tento jev je možné pozorovat i u záporného tabu, i když jen ve velmi zmenšené míře.

V pravé části jednotlivých obrázků se nachází místo připojení článku k přípravku (šrouby s podložkami) Jelikož na povrch této části přípravku nebyla nanášena speciální barva určená pro homogenizaci povrchu měřeného objektu (to znamená, že povrch byl lesklý), byla na této části naměřena téměř po celou dobu měření teplota okolí.



Obrázek 9: Měření ohřevu článku A vybitého konstantní velikostí proudu 30 A zaznamenané termokamerou

Tabulka 5 pojednává o velikostech hodnot změřených teplot v jednotlivých bodech znázorněných v obrázku 9, kde T_B je teplota celého těla článku, T_T je teplota záporného tabu, T_{P1} je bod odpovídající umístění termistoru pro měření teploty článku (viz podkapitola 4.3) a T_{P2} udává velikost hodnoty teploty ve spodní třetině článku. Z výše uvedené tabulky vyplývá, že průměrná teplota článku ve stavu jeho úplného vybití je při vybíjení proudem 30 A 51,52 °C, což odpovídá hodnotě změřené pomocí termistoru PT100 v tabulce 3, která vyšla 51,16 °C.

Po provedení výše zmíněného měření byly k dispozici všechny nutné a postačující znalosti o skutečných vlastnostech a chování vybraného a nakoupeného Li-Po článku.

	T_T [°C]	T_{P1} [°C]	T_{P2} [°C]	T_B [°C]		
	Typ.	Typ.	Typ.	Min	Průměr	Max
80 % SoC	35,45	28,37	27,04	24,38	27,90	37,78
60 % SoC	41,27	33,37	29,62	28,51	31,17	38,76
40 % SoC	45,56	38,16	34,66	29,22	36,25	48,44
20 % SoC	50,62	45,42	41,68	36,15	43,16	55,88
2,3 % SoC	55,43	53,01	50,61	41,52	51,52	56,08
5 min zotavení	41,82	44,21	43,54	38,62	43,54	44,60

Tabulka 5: Velikosti hodnot změřených teplot článku A odpovídající bodům znázorněným v obrázku 9

2.2 Shrnutí výsledků měření

Prvním důležitým poznatkem, který byl při analýze výsledků měření zkoumán, byla stálost měřených parametrů, a to především dosažené kapacity získané vybíjením článku proudem o konstantní velikosti a vnitřního odporu článku. Oba tyto parametry je možné považovat jako ustálené, což je důležitý faktor pro rozdělování článků do baterie (viz podkapitola 4.2). Změřená kapacita vybraného Li-Po článku SLPBA942126 vyšla 6916,4 mAh, což je vzhledem k rozdílu od jmenovité kapacity udané výrobcem v datasheetu možné zanedbat, a tudíž je možné říci, že je skutečná kapacita článku **7000 mAh**. Velikost hodnoty vnitřního odporu vybraného článku byla stanovena na **1,57 mΩ**, což je skoro o 21 % více, než je jmenovitá hodnota udaná výrobcem v datasheetu. Velikost této hodnoty už není možné zanedbat a je zapotřebí s touto hodnotou počítat i v dalších úvahách.

Co se týče nabíjení vybraného Li-Po článku, tak je možné článek nabíjet trvalým proudem 14 A, ale je nutné počítat s ohřevem článku o 11 °C (během závodu je tedy možné rekuperovat energii přibližně polovičním proudem, než jaká je předpokládaná efektivní hodnota odebíraného proudu z baterie během závodu). A právě pro tuto předpokládanou efektivní hodnotu odebíraného proudu z baterie je důležité sledovat ohřev článku - článek se ohřál nejvíce o přibližně 31 °C. Měření termokamerou dále prokázalo, že se teplo v článku rozlévá přibližně rovnoměrně, a že velmi záleží na kvalitě elektrického připojení článku do obvodu (především je důležité zajistit co nejlepší elektrický kontakt v přípojném místě, aby nedocházelo k zbytečnému navyšování ztrátového výkonu v důsledku nárůstu přechodového odporu v místě spojení).

V konečném důsledku měření prokázalo, že je nutné investovat nemalé finanční prostředky do zařízení zajišťující bezpečné skladování a měření článků a do dalšího vybavení s tímto spojené, dále pak do zařízení sloužící k likvidaci vyřazených článků nebo k likvidaci požáru a k ošetření jiných podobných stavů, které mohou v důsledku špatné manipulace s bateriovými články vzniknout.

3 Hlavní pravidla pro návrh trakční baterie elektroformule

Návrh trakční baterie stejně jako celé formule je podřízen pravidlům soutěže, pro kterou je formule stavěna. Soutěž samotná se nazývá Formula SAE a je zřizována organizací SAE International. Soutěž vznikla s cílem vytvořit příležitost pro studenty bakalářských a magisterských studijních programů ukázat svoje schopnosti na reálném interdisciplinárním mezinárodním projektu. Každá univerzita má možnost sestavit studentský tým, navrhnout a postavit vozidlo, zapojit se do soutěže a změřit tak svoje schopnosti s ostatními studentskými týmy z celého světa.

Aby byly zachovány stejné podmínky pro všechny soutěžící (protože každá univerzita má jiné finanční a personální možnosti), vytvořili pořadatelé soutěže soubor pravidel upravující možnosti návrhu vozidla. Pravidla definují především požadavky na konstrukci vozidla, použité materiály, elektrické komponenty a bezpečnost, dále pak pravidla stanovují koncepční řešení jednotlivých komponent formule (jako je například trakční baterie, motory, výkonový měnič, komunikace apod.). Celá pravidla jsou velice obsáhlým a komplexním dokumentem a jejich znalost je velmi důležitá pro splnění veškerých požadavků (přitom je důležité mít na paměti, že nesplnění pravidel soutěže vede k diskvalifikaci celého týmu ze soutěže).

Dále je zapotřebí zmínit, že se soutěž skládá z jednotlivých divizí, které se nacházejí v různých částech světa, a to z důvodu možnosti zapojení univerzit z celého světa. Trakční baterie, o které je řeč v této diplomové práci, je navrhována do formule, která se bude účastnit především závodů divize FSG (Formula Student Germany). Každá výše zmíněná divize má definován vlastní soubor pravidel, která doplňují nebo upravují původní znění pravidel soutěže Formula SAE, proto je nutné provádět návrh v souladu s oběma dokumenty.

Tato kapitola se zabývá pouze **shrnutím základních pravidel návrhu trakční baterie**, tak aby čtenář pochopil příčiny některých rozhodnutí a aby bylo zřejmé, jakým směrem je návrh baterie směřován, proto v této práci nebudou pravidla doslova citována (ani zdaleka se nejedná o jejich kompletní výčet). **Pravidla SAE** je možné prostudovat viz [6] a **pravidla FSG** viz [7] - z těchto pravidel vychází jejich shrnutí níže a již na ně s ohledem na přehlednost nebude níže v textu odkazováno.

Veškeré dokumenty poskytované pořadatelí soutěže (včetně pravidel) jsou psány v anglickém jazyce, to znamená, že níže uvedený výčet pravidel je překlad originálu a může se tak od originálu lišit - pro zachování správnosti výkladu pravidel soutěže je vždy zapotřebí vycházet z originálního znění pravidel. V důsledku překladu také může dojít a často dochází k nejasnostem v terminologii, proto bude pro přehlednost velká část odborných výrazů a termínů v textu používána v originální podobě (čili v anglickém znění - v praxi se používají častěji).

3.1 Definice

Mezi základní pojmy, které je zapotřebí definovat, jsou:

- **Trakční systém (TS)** – jedná se o jakoukoliv elektrickou část připojenou k akumulátoru/ům nebo k motoru/ům.
- **Uzemněné nízké napětí (GLV)** - zahrnuje jakoukoliv elektrickou část, která není součástí trakčního systému.
- **Akumulátor trakčního systému (trakční baterie)** - jedná se o jakýkoliv suprakondenzátor nebo bateriový článek sloužící k ukládání energie pro trakční systém (= trakční baterie).

3.2 Výkonová omezení

- Maximální povolené napětí mezi jakýmkoliv dvěma body trakčního systému nesmí nikdy přesáhnout **600 V DC**.
- Dále je stanoveno, že maximální okamžitý výkon, který je akumulátor schopen dodat, nesmí nikdy přesáhnout **80 kW**.

3.3 Základní požadavky

- Veškeré elektrické komponenty náležící trakčnímu systému musí být dimenzovány na maximální napětí trakčního systému.
- Veškeré komponenty musí být dimenzované na maximální možnou teplotu, která může v důsledku jejich používání nastat.
- Trakční systém musí být od uzemněného systému nízkého napětí (GLV) galvanicky oddělen.

3.4 Požadavky na trakční baterii

3.4.1 Obecné požadavky

- Je povoleno používat jakékoliv bateriové články vyjma palivových.
- Všechny články trakční baterie musí být uzavřeny v kontejneru baterie.
- Trakční baterie musí být dělena do dílčích částí (takzvaných segmentů). Každý segment nesmí přesáhnout napětí **120 V DC**, energii **6 MJ (cca 1,67 kWh)** a hmotnost **12 kg**.

- Je povoleno trakční baterii rozdělit do více kontejnerů, avšak všechny části musí být identické (každý kontejner pak musí být označen symbolem dle normy ISO 7010-W012 spolu s dalšími informacemi o soutěžním týmu).

3.4.2 Požadavky na elektrickou konfiguraci trakční baterie

- V kontejneru trakční baterie se nesmí nacházet žádné části GLV s výjimkou hlavních stykačů baterie (AIRs), DC/DC měniče, battery management systému (BMS), hlídače izolačního stavu (IMD) a ventilátorů určených ke chlazení.
- Pokud je kontejner trakční baterie vyroben z elektricky vodivého materiálu, musí být segmenty baterie chráněny proti vodivým průrazům.
- Jednotlivé segmenty trakční baterie musí být od sebe odděleny pevnou nevodivou a nehořlavou přepážkou.
- Jednotlivé segmenty trakční baterie musí být propojeny pomocí takzvaných "Maintenance plugs" (MP). Ty musí mít elektricky nevodivý povrch, musí být navrženy tak, aby je nebylo možné aplikovat nesprávným způsobem, při jejich instalaci nesmí být použito žádných nástrojů a na první pohled musí být jasně patrné, jestli jsou segmenty propojené nebo nikoliv.
- Kontejner trakční baterie musí obsahovat indikátor napětí, který upozorňuje na napětí baterie vyšší než 60 V DC. Tento indikátor musí být vždy jasně a zřetelně viditelný a musí být patřičně označen.
- Dále musí kontejner obsahovat jednu pojistku a dvě hlavní relé (AIRs). Tato relé musí být typu "Normally open" a každé musí být na jednom pólu akumulátoru.
- V kontejneru akumulátoru se musí nacházet přednabíjecí obvod, který zajišťuje nabití kondenzátoru/ů DC linku výkonového měniče před uzavřením hlavních relé.
- Je zakázáno používat pájené spoje, jimiž teče proud z baterie (takzvaný vysoký proud).
- Jakákoliv elektronika musí být od segmentů oddělena pevnou nevodivou a nehořlavou přepážkou.
- Trakční baterie musí obsahovat BMS, který mimo jiné měří napětí a teplotu článků baterie. Musí být měřeno napětí všech článků trakční baterie, měření teploty postačuje u 30% článků.
- Trakční baterie musí obsahovat hlídač izolačního stavu (IMD).

3.4.3 Požadavky na mechanickou konfiguraci trakční baterie

- Kontejner trakční baterie musí být možno vyjmout z formule.

- Kontejner trakční baterie musí být uchycen k hlavní (primární) konstrukci vozidla.
- Kontejner trakční baterie musí být plně uzavřen. Jediné povolené otvory v kontejneru jsou otvory použité pro chlazení, vedení kabelů a šroubové spoje.
- Pro výrobu kontejneru musí být použit hliník nebo ocel. Je možné použít i alternativní materiály (jako jsou například kompozitní materiály), ale musí být doložena ekvivalentnost jejich parametrů.

Na závěr je nutné zmínit, že organizátoři soutěže pravidla každým rokem aktualizují a tyto změny je nutné neustále sledovat, stále se studiu pravidlům věnovat, a to v každé fázi návrhu i při samotné konstrukci jakékoliv součásti vozidla. V konečném důsledku nestačí znát a chápat jen pravidla jedné konkrétní části, kterou se daný projektant zabývá, ale je nutné rozumět pravidlům jako celku a znát i souvislosti mezi jednotlivými komponenty.

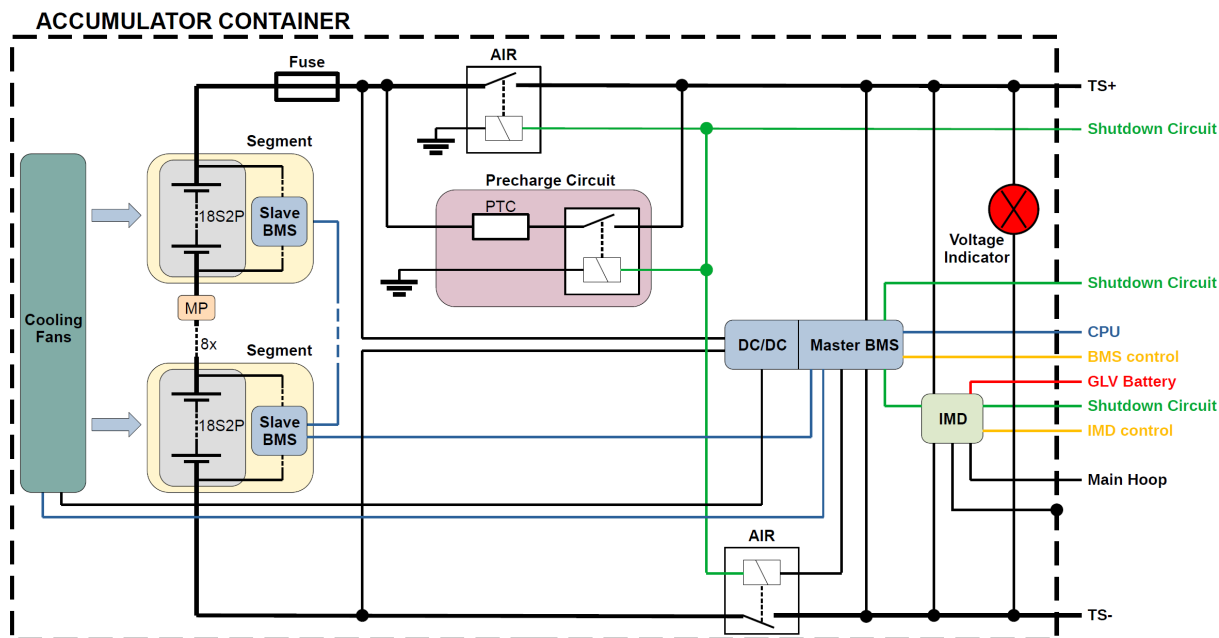
K tomu je zapotřebí připočítat i fakt, že je výklad pravidel mnohdy nejasný, a že se svým charakterem mnohdy přibližuje právním předpisům, u kterých hraje roli i takzvané "slovíčkaření". Aby bylo možné pravidlům zcela porozumět, bylo často nutné s organizátory ohledně pravidel komunikovat. Bude-li brán v potaz i fakt, že je z hlediska bezpečnosti věnováno trakční baterii v pravidlech nejvíce pozornosti, stává se z velmi precizní rešerše pravidel nejsložitější část celého návrhu trakční baterie.

4 Návrh trakční baterie

4.1 Topologie trakční baterie

Po důkladné rešerši a analýze pravidel soutěže bylo zapotřebí vytvořit topologii vozidla elektroformule, čili sestavit blokové schéma znázorňující propojení veškerých komponent, které musí vozidlo obsahovat. Vytvoření závazného a schváleného dokumentu obsahující topologii vozidla elektroformule bylo nezbytným krokem před započítím jakéhokoliv návrhu kterékoliv komponenty a správnost takového dokumentu je z hlediska úspěšnosti projektu studentské elektroformule zcela klíčová.

Z důvodu přehlednosti a rozsahu této práce je níže uvedeno pouze blokové schéma trakční baterie - viz obrázek 10. V obrázku jsou použity anglické názvy v takové podobě, v jaké jsou uváděny v pravidlech soutěže, a to z důvodu jednoznačného definování použité terminologie a vyhnutí se tak nesrovnalostem v textu. Dalším důvodem použití anglických výrazů je za prvé vstřípení obecně zažitá terminologie, která se v praxi používá výhradně v anglickém jazyce, a za druhé protože soutěžící tým musí organizátorům soutěže odevzdat před soutěží rozsáhlou technickou dokumentaci k vozidlu psanou taktéž v anglickém jazyce.



Obrázek 10: Topologie trakční baterie elektroformule

V levé části výše zmíněného obrázku jsou znázorněny dva segmenty, které tvoří jádro celé baterie, obsahující bateriové články a řídicí battery management systém označovaný jako "Slave BMS", jehož obvody jsou zároveň ze segmentu napájeny. Takovýchto segmentů bude v baterii celkem 8 a všechny budou spojené pomocí takzvaných "Maintenance Plugs", o nichž bude blíže pojedná-

váno níže. Slave BMS má za úkol sbírat informace z měření napětí a teplot článků v segmentu, balancovat články během nabíjení a vybíjení a všechny tyto informace posílat řídicí jednotce v baterii, takzvané "Master BMS".

Master BMS je řídicí jednotka baterie, která sbírá informace z jednotlivých Slave BMS, vyhodnocuje je a přeposílá dál přes rozhraní CAN centrální řídicí jednotce vozidla, což je procesor ve výkonovém měniči (zde označeném jako "CPU" - Central Processor Unit). Tento centrální procesor vyhodnocuje informace získané z baterie i z jiných částí vozidla (jako jsou například motory nebo pedály) a na základě toho rozhoduje o toku energie a celkovém chování vozidla. Další funkcí Master BMS je schopnost jednou za přesně definovaný časový úsek zkontrolovat stav baterie, zaznamenat teploty a napětí článků, spočítat SoC a SoH baterie, z čehož je možné provádět statistické záznamy a ukládat je do paměti (to vše z důvodu bezpečnosti).

Trakční baterie musí mimo jiné obsahovat i přednabíjecí obvod (zde označený jako "Precharge Circuit"), který slouží k nabití kondenzátorů v DC linku výkonového měniče před samotným připojením baterie do trakčního systému. Přednabíjecí obvod je součástí Master BSM, který měří napětí před a za hlavními stykači baterie, čímž kontroluje správnost přednabití kondenzátorů v DC linku výkonového měniče a přednabíjecí obvod ovládá (až když jsou kondenzátory umístěné v DC linku měniče nabity, uzavře Master BMS druhý z hlavních stykačů baterie). Součástí DPS obsahující Master BMS je i DC/DC zdroj, který vytváří napájecí hladinu 12 V, čímž je zajištěno napájení elektroniky Master BMS a ventilátorů chladících segmenty trakční baterie (ventilátory budou také pomocí obvodů Master BMS řízeny).

Na oba póly baterie musí být umístěny hlavní stykače baterie, takzvané "AIRs", které slouží k zajištění elektrického propojení mezi baterií a zbytkem elektroniky ve vozidle, a které zajišťují možnost přerušit dodávku elektrické energie do trakčního systému vozidla. Dále musí baterie obsahovat pojistku, která se zákonitě musí nacházet na kladném pólu baterie zapojená bezprostředně za segmenty.

Dalším důležitým prvkem baterie je hlídač izolačního stavu (zde označován jako "IMD" - Insulation Monitoring Device), který má za úkol kontrolovat, zda-li nedošlo k porušení galvanického oddělení mezi trakčním systémem a zbytkem vozidla za pomoci měření izolačního odporu mezi kostrou vozidla a vývody trakčního systému. První dvojice měřicích vývodů je připojena na konektory baterie a na primární kostru vozidla zde označenou jako "Main Hoop". Druhá dvojice pak měří napětí baterie za hlavními stykači.

V případě porušení výše uvedeného galvanického oddělení musí IMD reagovat okamžitým odpojením baterie od zbytku vozidla vypnutím obou hlavních stykačů baterie. Podobnou funkci má i Master BMS, který musí stykače vypnout v případě, že alespoň jedna z hodnot měřených veličin vychýlí ze svého povoleného rozsahu. Zároveň musí oba obvody tento stav okamžitě hlásit řídicí jednotce a také řidiči v kokpitu (signalizace LED diodami - zde označenými jako "BMS control" a "IMD control"). K tomuto účelu slouží takzvaný "Shutdown Circuit", což je v podstatě kontrolní linka, která hlídá stav trakční baterie a zajišťuje její připojení a odpojení (linka obsahuje i mechanické vypínače v případě, že selže řídicí elektronika), zároveň jsou z této linky napájené cívky výše zmíněných stykačů.

Nakonec musí baterie obsahovat i napěťový indikátor (v obrázku označený jako "Voltage Indicator"), který slouží k signalizování možnosti výskytu napětí baterie mimo kontejner baterie - to znamená, že je baterie připojena, proto je tento obvod zapojen těsně před vyvedením silových vývodů z kontejneru baterie. Veškerá výše popsaná elektronika je umístěna v kontejneru trakční baterie, který je na obrázku výše znázorněn čárkovanou čarou.

Na základě výše popsané topologie trakční baterie byl z rozsahu této práce vyjmut Master BMS s DC/DC měničem a dále i Slave BMS, protože se jedná o dostatečně složité obvody, aby svým rozsahem dokázaly pokrýt samostatnou diplomovou práci. Veškeré ostatní komponenty, které kontejner trakční baterie obsahuje, jsou v rozsahu této práce a bude o nich pojednáváno níže.

Na závěr je zapotřebí zmínit, že se topologie v průběhu celého návrhu mnohokrát upravovala společně s tím, jak byla prohlubována znalost pravidel soutěže, což značně zpomalovalo nejenom návrh baterie, ale i celého vozidla. Výše uvedené blokové schéma je platné k datu odevzdání diplomové práce a je možné, že se bude v průběhu dalšího vývoje vozidla měnit.

4.2 Rozmístění článků v baterii

I když jsou dodané články stejného typu, od stejného výrobce a i ze stejné výrobní série, není možné je považovat za zcela identické, a proto záleží na jejich rozmístění v trakční baterii. Platí, že čím lépe jsou články v baterii rozmístěny, tím lepší jsou konečné vlastnosti trakční baterie jako celku, proto bylo tomuto tématu věnováno nemálo pozornosti. Výchozím dokumentem pro určování přesné pozice článků v baterii se stal takzvaný "Matching List" obsahující přesně změřené parametry všech jednotlivých článků (konkrétně jmenovité napětí, vnitřní odpor a kapacitu) a jedná se o standardní dokument, který by měl výrobce vždy zpřístupnit.

Naprostým základním pravidlem pro skládání bateriových článků do větších celků je vždy používat články stejného typu od stejného výrobce, který může garantovat kvalitu článků - to je v tomto případě splněno. Dále je možné články třídit podle velikosti hodnoty jejich napětí, kapacity a vnitřního odporu (podle jiných parametrů se články netřídí - detailněji viz [2]). V prvním kroku bylo zapotřebí vyřadit ty články, na kterých bylo prováděno měření (viz kapitola 2).

Dále bylo zapotřebí určit prioritu tří výše zmíněných parametrů článku při jejich třídění. Prvním důležitým předpokladem bylo uvažování stálosti těchto parametrů, což bylo ověřeno měřením popsaným v kapitole 2. V případě, že by parametry nebyly stále s pracovními cykly článků, muselo by být provedeno další experimentální měření, na základě něhož by muselo být vyhodnoceno, jakým způsobem se parametry článků mění, což by rozmísťování článků výrazně ztížilo.

Aby se maximálně zamezilo nežádoucím přetokům mezi paralelně spojenými články, je důležité, aby měly paralelně spojené články pokud možno co nejbližší velikosti hodnot napětí, proto byly všechny články roztrženy do 5 skupin podle velikosti hodnot napětí článků (3,820 V, 3,819 V, 3,818 V, 3,817 V, 3,816 V). Článků s velikostí napětí 3,820 V a 3,819 V byl lichý počet a zároveň bylo článků s napětím 3,820 V pouze tři kusy, proto byly tyto dvě skupiny spojeny v jednu jedinou.

Tím tedy tříděním později vznikne jedna paralelní skupina (dvojice), kde budou mít články rozdílné velikosti hodnot napětí, ale to je možné zanedbat vzhledem k tomu, jak moc to ulehčilo třídění v dalších krocích. Po konzultaci s kolegy z firmy Bech Akku Power bylo zjištěno, že rozdíly v napětí mezi paralelně spojenými články v řádu ± 3 mV jsou naprosto zanedbatelné, jelikož je v praxi běžné, že se rozdíly pohybují v řádu desítek mV.

Dále bylo zapotřebí v každé skupině rozdělit články podle kapacity a vnitřního odporu. Obecně se doporučuje, aby se paralelně skládaly články s rozdíly ve velikostech hodnot jmenovitých kapacit do 2,5 % (u baterií pracujících s vysokým napětím by měly být odchylky ještě daleko menší). Čím budou rozdíly v kapacitách mezi články v paralelní kombinaci vyšší, tím se budou články s nižší kapacitou v průběhu cyklů více opotřebovávat a bude postupně docházet k ještě většímu poklesu jejich kapacity atd. (zároveň se budou tyto články více ohřívat), což má negativní důsledek na celkovou kapacitu baterie i na její životnost.

Z tohoto důvodu byly v následujícím kroku hledány takové dvojice článků, které by měly v dané kombinaci co nejvíce shodné velikosti kapacity a vnitřního odporu s vyšší prioritou na velikost kapacity, a to v každé ze čtyř výše uvedených skupin zvlášť. Výsledkem tohoto třídění bylo 152 dvojic článků, které mají v rámci dané dvojice přibližně shodnou velikost kapacity a vnitřního odporu, ale jednotlivé dvojice se od sebe těmito velikostmi liší, což sice znamená, že kapacita některých článků nebude využita naplno, ale část z toho pokryje balancování článků a zbytek je nutné zanedbat.

Jelikož budou výše popsané dvojice článků v baterii zapojené do série, bylo v předposledním kroku zapotřebí určit, kde bude mít každá dvojice své místo. V tuto chvíli začal hrát velkou roli vnitřní odpor článku, na základě něhož byly články dále tříděny. Jelikož budou tvořit bateriové segmenty v baterii pole 4x2, přičemž ve směru jízdy budou umístěné 2 segmenty za sebou a 4 vedle sebe, bude chlazení realizováno nuceným prouděním vzduchu skrz celou baterii (vzduch bude nasáván ventilátory v přední části baterie, projde oběma segmenty umístěnými za sebou a následně bude z baterie odveden ventilátory umístěnými v zadní části baterie) - detailněji viz podkapitola 4.4.

To znamená, že články umístěné v přední části baterie budou mít zajištěné lepší chlazení než ty, které budou umístěné v zadní části baterie. Proto byly vytvořené paralelní dvojice článků seřazeny podle velikosti hodnoty vnitřního odporu a podle toho umístovány do baterie - paralelní kombinace s nejvyšší hodnotou vnitřního odporu byly umístěné do přední části kontejneru a naopak. Ze 304 článků, které byly tříděny do baterie muselo být vybráno jen 288, proto bylo 16 paralelních dvojic s nejhoršími parametry vyřazeno jako rezervní.

V posledním kroku byla určena přesná pozice článku v rámci dvojice jako takové. Protože platí, že se články s vyšší velikostí hodnoty vnitřního odporu v průběhu vybíjení a nabíjení ohřívají více, než články s velikostí nižší, byly tyto články umístěny blíže termistoru měřícímu teplotu článků - viz kapitola 4.3. Tabulka 6 shrnuje základní vlastnosti všech vytvořených segmentů a při jejím detailním zkoumání je možné ověřit, že jsou všechny segmenty z hlediska svých parametrů téměř totožné a třídění tak bylo provedeno správně. Druhou kontrolou je, že mají segmenty umístěné v přední části baterie (označené písmenem "p") vyšší vnitřní odpor na rozdíl od těch

umístěných v zadní části (označené písmenem "z"). Detailní rozmístění jednotlivých článků v baterii včetně velikostí hodnot jejich klíčových parametrů viz příloha B.

Segment	$U_{JM}[V]$	$R_i[m\Omega]$	$E_N[kWh]$
1p	68,726	46,749	0,956
1z	68,729	45,076	0,956
2p	68,723	46,817	0,955
2z	68,721	45,288	0,957
3p	68,729	46,771	0,955
3z	68,725	45,119	0,955
4p	68,721	46,832	0,958
4z	68,721	45,339	0,955

Tabulka 6: Velikosti základních parametrů jednotlivých segmentů baterie (odpovídá velikostem parametrů článků uvedených v Matching listu)

Celý postup třídění článků do baterie byl realizován v tabulkovém editoru, což znamená, že by se pro větší počet článků a složitější konfiguraci (například 8 segmentů s konfigurací 19S12P) stala metoda naprosto nepřehlednou a nepoužitelnou. S velkou výhodou by se zde dalo užít například neuronové sítě, která by testovala nejrůznější kombinace, až by našla optimální rozmístění článků. Vzhledem k tomu, jak málo se od sebe liší segmenty vytvořené metodou v tabulkovém editoru, je možné konstatovat, že by použití neuronové sítě nepřineslo o moc lepší výsledek - nicméně pro budoucí generace baterií by bylo užitečné v rámci optimalizace vozidla neuronovou síť využít například i pro řešení vhodných bateriových článků.

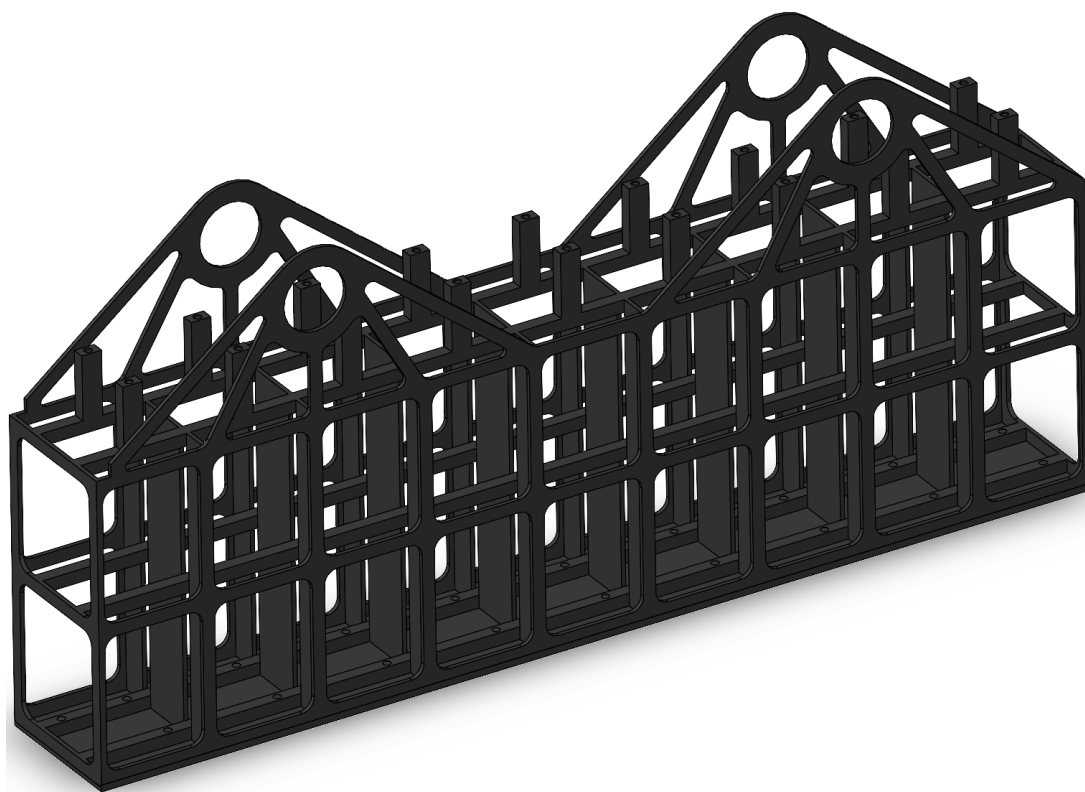
4.3 Návrh segmentu trakční baterie

Jak bylo popsáno v kapitole 1, na základě nově provedených řešení byla vypočítána jiná velikost hodnoty energie trakční baterie a byl vybrán jiný bateriový článek, ze kterého se bude baterie skládat. Z toho vyplývá, že bylo zapotřebí navrhnout zcela novou mechanickou a elektrickou konfiguraci celé trakční baterie včetně segmentů a doprovodné elektroniky.

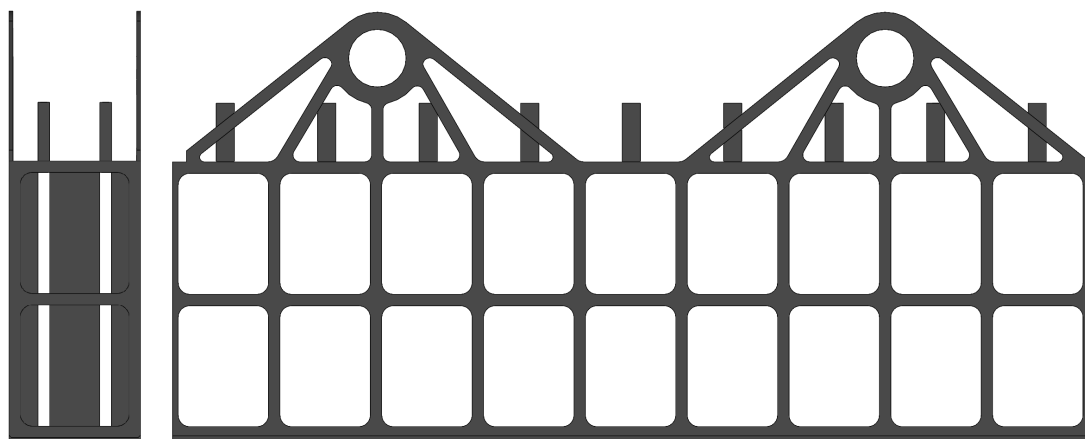
V této podkapitole bude postupně podrobně popsán jeden segment baterie tak, jak byl navrhován. Je zapotřebí zmínit, že segment procházel v průběhu návrhu četnými změnami tak, jak se měnily jednotlivé komponenty segmentu nebo jak byl postupně segment optimalizován a vylepšován. Pro snazší pochopení čtenáře bude text prokládán obrázky 3D modelů jednotlivých komponent vytvořených v programu Solidworks. Každý 3D model má definovaný vzhled a barvu dle materiálu, který bude použit pro jeho výrobu (výjimku tvoří taby článků - ty jsou označeny červeně a modře, aby byla i ve 3D modelu jasně patrná polarita článků tak, jak budou umístěny v segmentovém koši).

4.3.1 Segmentový koš

Nejdůležitější součástí a zároveň nosným prvkem segmentu je takzvaný "segmentový koš" (viz obrázek 11 a 12), který slouží k uložení 36 bateriových článků a tím zajišťuje kompaktnost celého segmentu. Segmentový koš obsahuje vnitřní dělicí přepážky, čímž je zajištěna jednoznačně definovaná pozice všech článků a nemůže tak dojít k jejich pohybu uvnitř koše. Segmentový koš se skládá ze dvou částí - ze svého těla a dna - dno je odnímatelné a zajišťuje možnost nasouvat články spodní částí segmentu, což je důležitá podmínka, aby bylo možné segment zkompletovat (blíže viz podkapitola 4.3.7).



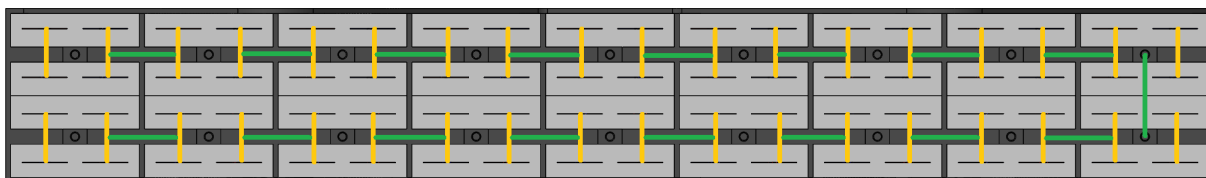
Obrázek 11: Segmentový koš - nosná část segmentu



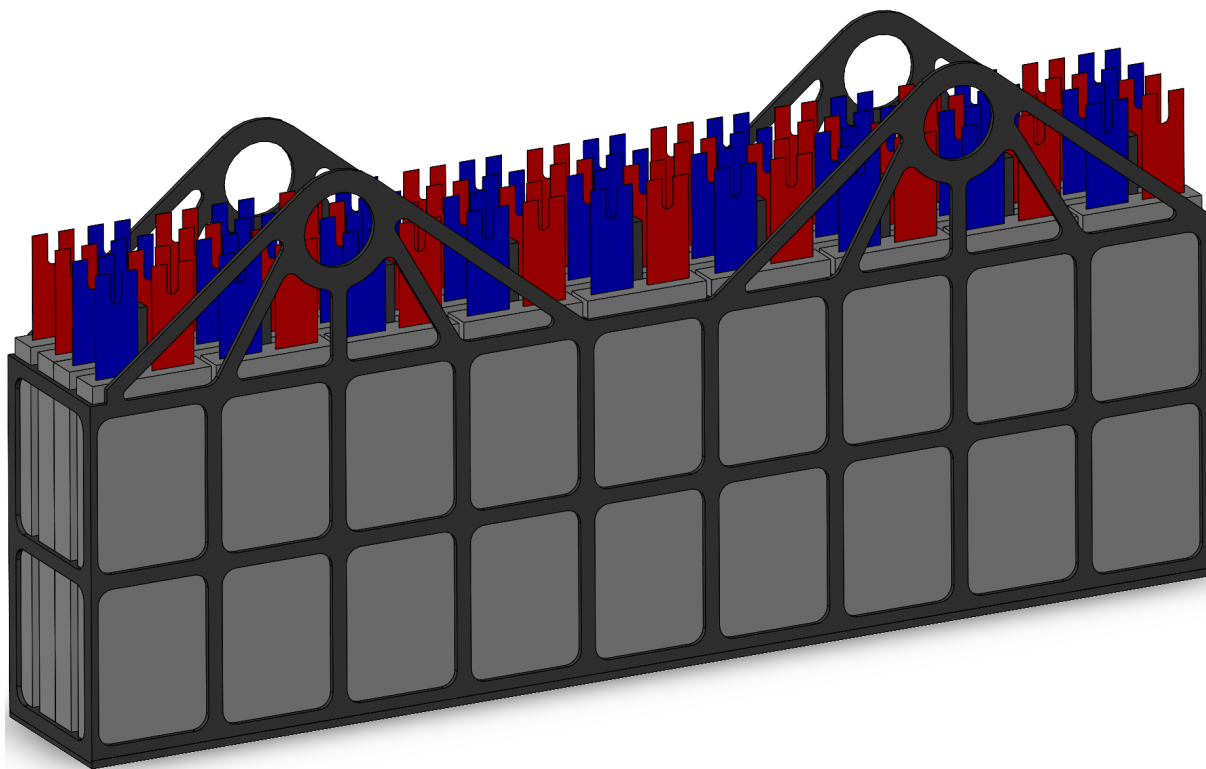
Obrázek 12: Segmentový koš - nárys a bokorys

Na obrázku 13 je znázorněný pohled shora na segmentový koš vyplněný články (přesné umístění jednotlivých článků včetně znázornění polarit viz příloha B). Oranžovou čarou je v obrázku znázorněno paralelní spojení článků a čarou zelenou sériové spojení. Z výše zmíněného obrázku je patrné, že články nacházející se v prostředních dvou řadách sdílejí stejný prostor mezi přepážkami a jsou od článků v krajních řadách odděleny mezerou širokou 5 mm. Tato mezera umožňuje tok vzduchu zajišťující chlazení všech článků.

Z výše uvedeného propojení článků dále vyplývá, že články, které se uprostřed dotýkají svými těly jsou vždy každý na jiném potenciálu (v krajním případě je rozdíl téměř 76 V), z čehož vyplývá riziko elektrického průrazu fóliového obalu článku. Proto je zapotřebí prostřední dva články v místě dotyku oblepit kaptonovou páskou, která výrazně posílí odolnost proti elektrickým průrazům. Ze stejného důvodu obsahuje segmentový koš rozšířené přepážky mezi jednotlivými paralelními dvojicemi článků - řešení této problematiky je opodstatněné, protože výrobce nedokáže garantovat elektrickou pevnost fóliového obalu článku. Na obrázku 14 je možné pozorovat 3D pohled na segmentový koš vyplněný články.



Obrázek 13: Znázornění elektrické konfigurace segmentu baterie (18S2P)



Obrázek 14: Segmentový koš vyplněný články dle přílohy B

Tloušťka materiálu segmentového koše je ve všech jeho částech 1,7 mm a celý koš obsahuje z důvodu maximálního snížení hmotnosti velké množství otvorů. Zároveň se v horní části segmentového koše nachází 4 ucha, která slouží ke snadnější manipulaci se segmentem (především k vytahování a zasouvání segmentu do baterie). Každé ucho obsahuje 5 ramen vedoucích ke koši kvůli rovnoměrnému rozložení mechanického namáhání, které bude na koš působit při jeho manipulaci. Dále se v prostřední části segmentového koše nachází dvě řady distančních sloupků, s otvorem pro závit, které budou sloužit k uchycení elektroniky, kterou bude segment obsahovat. Segmentový koš je na základě studií a analýz provedených kolegy z fakulty strojní z hlediska svých mechanických vlastností a rozměrů optimalizován.

Výroba takto složitěho tvaru segmentového koše bude realizována pomocí 3D tiskárny založené na principu SLS (selektivní laserové slinování - technologie na bázi prášku, při které laserový paprsek spojuje zrna prášku). Touto tiskárnou s takto velkým plotrem disponují kolegové z fakulty strojní, kteří se podílí na vývoji studentské elektroformule. Jako materiál bude použit takzvaný PA12, který má ve slinuté podobě obdobné mechanické a elektroizolační vlastnosti jako nylon. [8]

4.3.2 Silová DPS

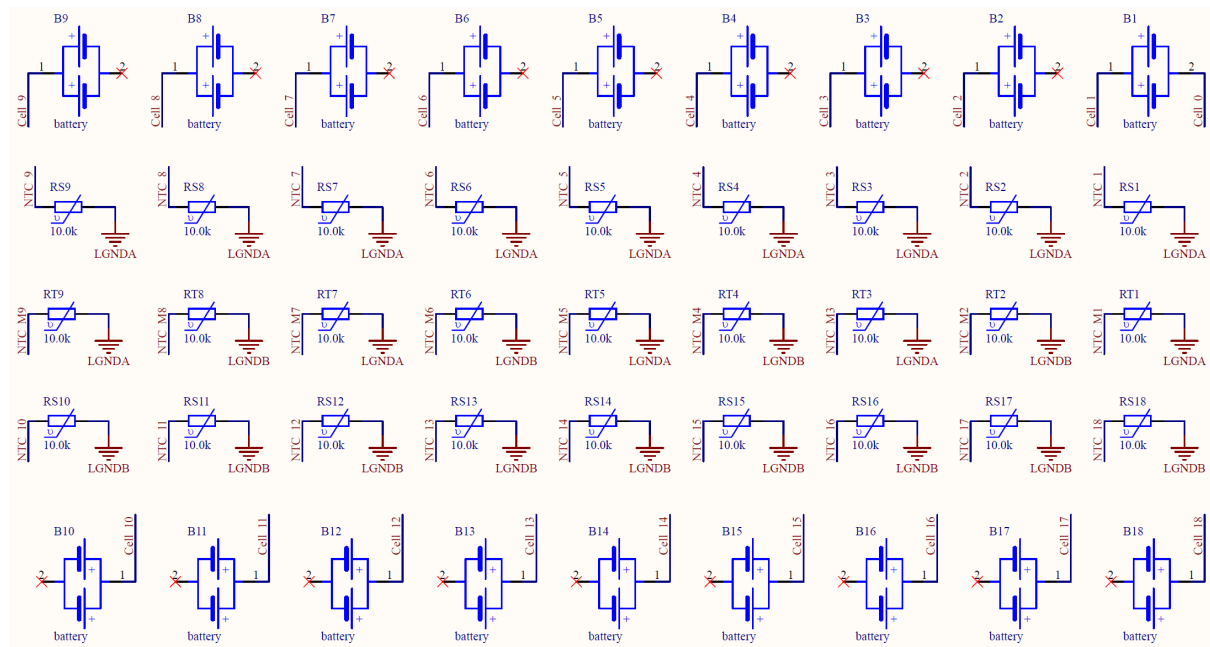
Elektrické propojení všech článků v segmentu zajišťuje takzvaná "silová DPS". Kromě toho bude silová DPS sloužit ke sběru dat z měření teploty a napětí jednotlivých článků. Proto bude vybavena 18 kusy **SMT termistorů** (viz [9]), které budou umístěny v těsné blízkosti přípojného místa záporného tabu článku na straně TOP a dále 9 kusy **THT termistorů** (viz [10]) osázených ze strany BOTTOM, které budou snímat teplotu těla článků - každý THT termistor bude vložen mezi každé dva články v prostřední řadě segmentového koše, které se svým tělem navzájem dotýkají, čímž bude zajištěno měření teploty přesně 50 % článků (přibližné umístění termistoru v rámci těla článku viz obrázek 15).



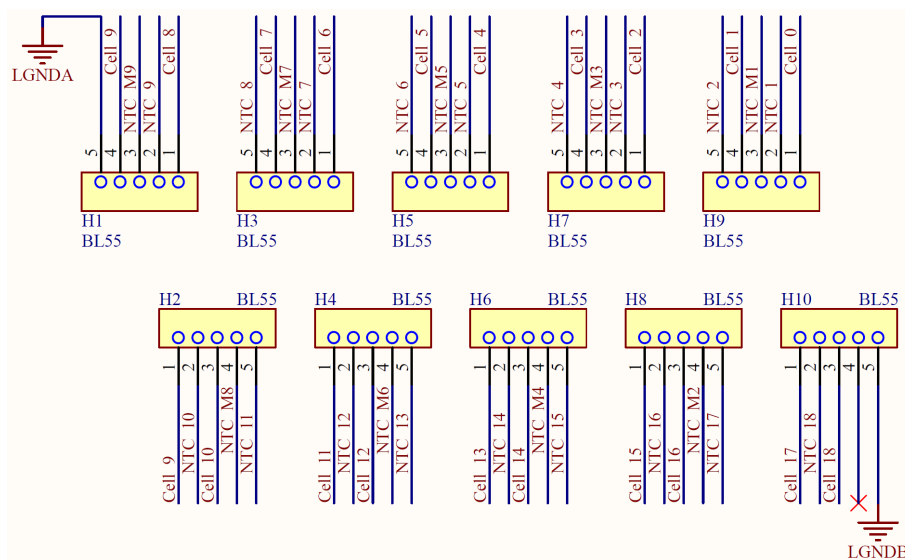
Obrázek 15: Umístění termistoru pro měření teploty článku - červený bod (na stejném místě byla snímána teplota při měření článků) [5]

Oba výše uvedené termistory jsou typu NTC (Negative Thermal Coefficient) a pro snazší vyhodnocování disponují oba termistory stejnými parametry (především stejným odporem a parametrem B - což je vlastně směrnice přímky závislosti odporu na teplotě, oba termistory mají také stejnou toleranci 1%). Aby bylo možné měřené veličiny předat battery management systému, bude silová DPS obsahovat 10 konektorů, kterými bude spojena přímo bez použití kabelů s DPS

battery management systému (v této práci označovanou jako "Slave BMS"). Schéma zapojení silové DPS viz obrázky 16 a 17. Rozmístění konektorů na silové DPS pro spojení obou DPS musí být provedeno v souladu s rozmístěním konektorů na Slave BMS, aby byl systém kompatibilní, a jelikož není DPS Slave BMS plně hotová, je možné, že se bude rozmístění konektorů ještě měnit.



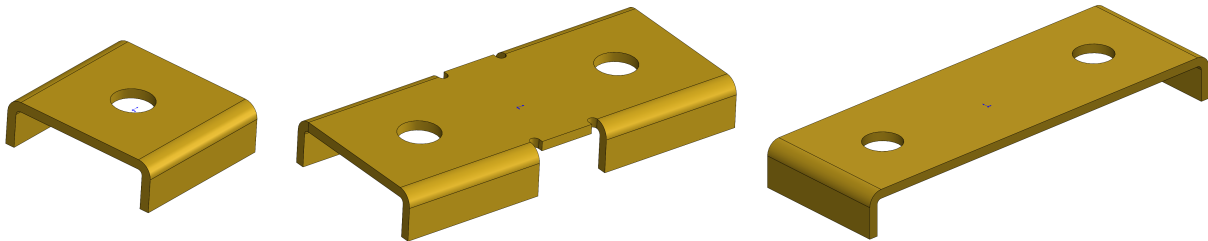
Obrázek 16: Schéma zapojení silové DPS - část 1



Obrázek 17: Schéma zapojení silové DPS - část 2

Jeden vývod každého termistoru je přiveden na příslušný vývod balančního obvodu a druhý vývod termistorů je vždy přiveden na zem. Pro zajištění balancování všech 18 paralelních dvojic článků v segmentu bude Slave BMS obsahovat dva balanční obvody, přičemž na každý z nich bude přivedena polovina termistorů. Proto jsou ve schématu rozlišovány dva typy zemí - LGNDA (Local GrouND A) a LGNDB (Local GrouND B), které představují zemní svorku příslušného balančního obvodu.

Kvůli příliš velkému teplotnímu a proudovému namáhání DPS nebude proud veden pouze cestami v DPS, ale především pomocí takzvaných mosazných spojovačů přišroubovaných společně s taby článků na silovou DPS (viz obrázek 18). Celé spojení bude realizováno následovně: Silová DPS bude mít v otvorech ze strany BOTTOM osazené takzvané **SMT pájecí matice** viz [11], do kterých bude taktéž ze strany BOTTOM zašroubován šroub. Jak je možné vidět na obrázku 14, taby všech článků budou mít v sobě vystřížené otvory, které budou přesně sedět s pozicí a průměrem šroubu, na ně bude umístěn mosazný spojovač a celý spoj bude zajištěn pojistnou maticí. Přesný popis realizace výše popsaného spoje včetně obrázků viz podkapitola 4.3.7.



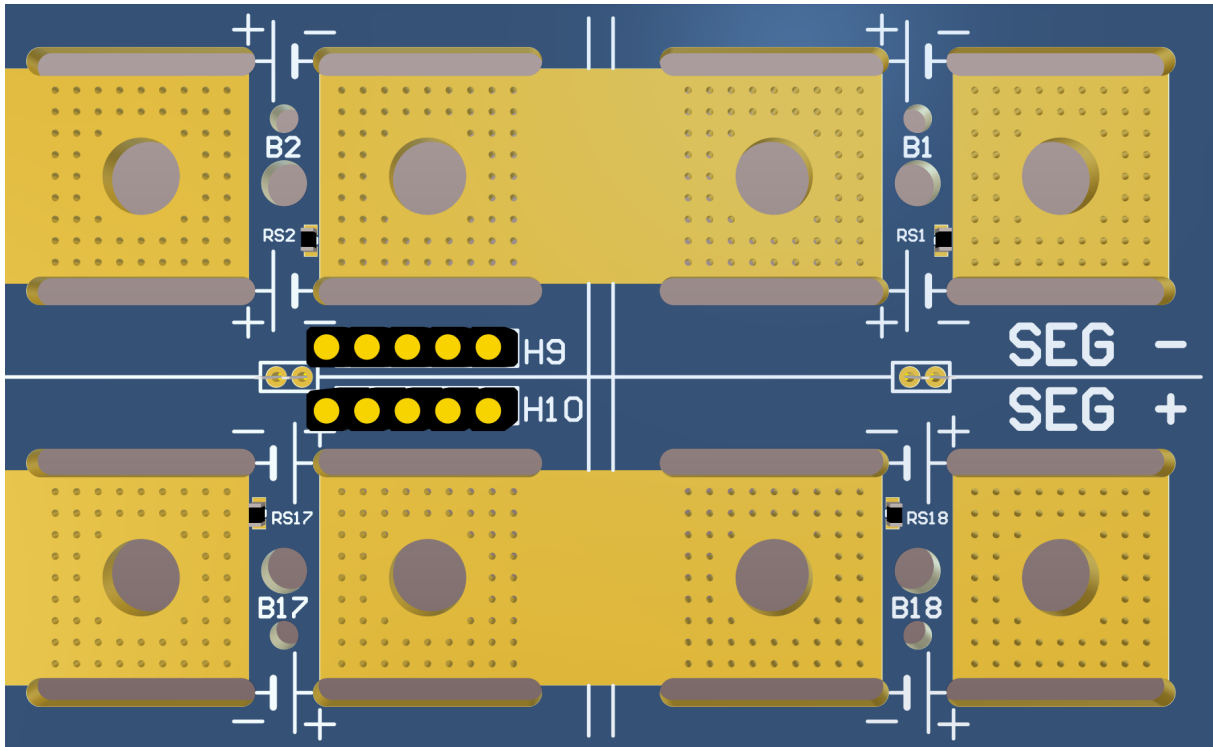
Obrázek 18: Detailní pohled na mosazné spojovače. Vlevo se nachází mosazný spojovač typ 1, uprostřed typ 2 a v pravo typ 3

Mosaz byla vybrána jednak z důvodu její poměrně vysoké elektrické vodivosti v poměru s mědí a dále z důvodu její nižší ceny v porovnání s mědí (například hliník nebyl uvažován vůbec, jelikož není vhodný pro spojování s mědí).

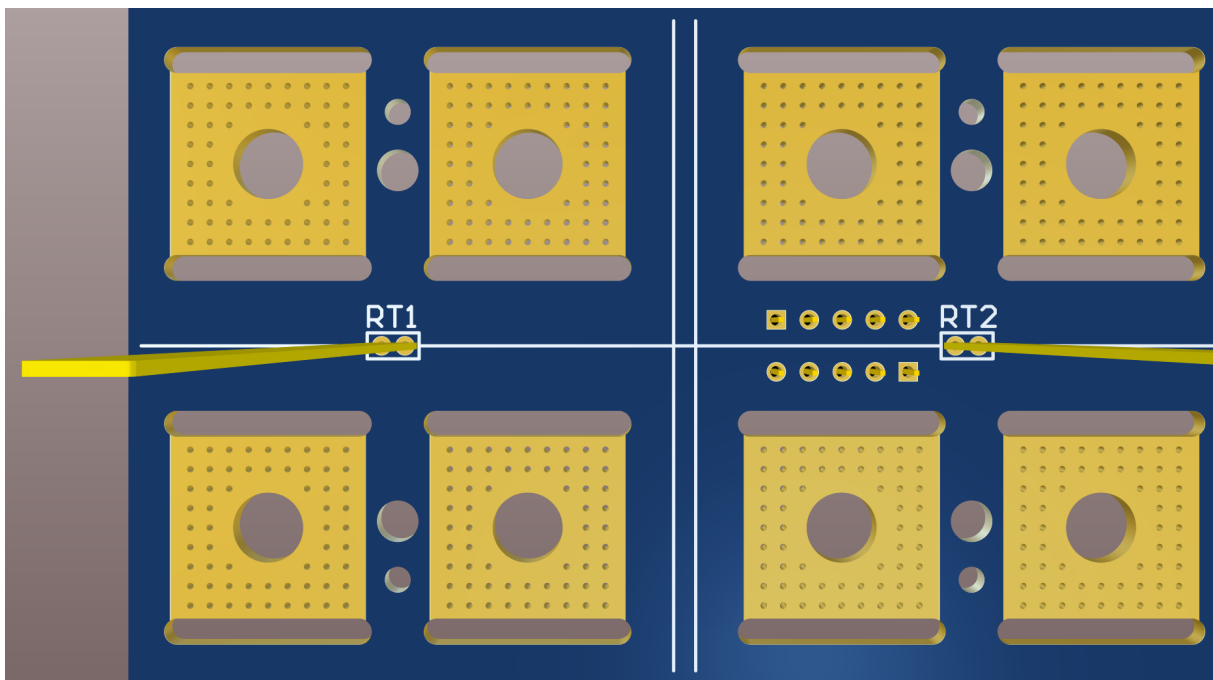
Z důvodu maximálního snížení ztrát a tím vyzařovaného tepla je nutné zajistit pokud možno co nejmenší přechodový odpor spoje tab-mosazný spojovač. Vyzářené teplo by mohlo, mimo jiné, poškodit samotnou DPS, ale také vnáší do celého systému úbytky napětí (je zapotřebí si uvědomit, že velikost přechodového odporu spoje řádově stovky $\mu\Omega$ je vzhledem k velikost vnitřního odporu článku nezanedbatelná velikost).

Jak je vidět na obrázcích 3D modelu silové DPS (viz obrázky 19, 20 a 21), místo, kde bude tab dosedat na DPS, je vytvořen pad s četnými prokovy. Celá silová DPS bude během výroby pocínována, což jednak znamená, že cín vyplní prokovy a zvýší tak pevnost celé DPS a navíc také vytvoří měkkou vodivou vrstvu, která při dotahování spoje umožní zajistit vyšší styčnou plochu kontaktu. Pro další nárůst styčné plochy budou prokoveny i otvory, kterými budou provlečeny taby článků. Pad se bude nacházet z obou stran DPS, aby bylo možné z druhé strany připájet SMT pájecí matice.

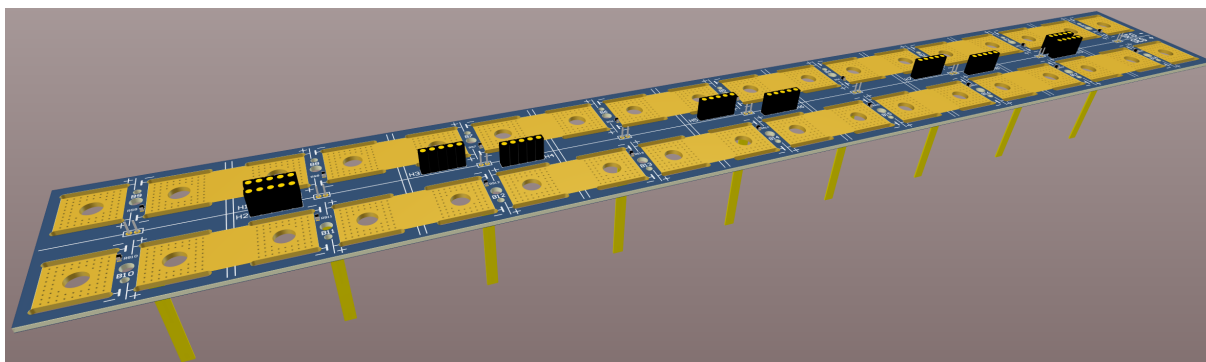
Důležitá je také výroba samotných mosazných spojovačů, která bude realizována řezáním na CO₂ laseru, kterým disponují kolegové na fakultě strojní, následně budou spojovače ohýbány do patřičného tvaru (pro tyto účely bude na ohýbání vyroben speciální přípravek - viz kapitola 5). Před samotným ohýbáním budou plechy ještě galvanicky pokoveny niklem, což přechodový odpor ještě sníží. Aby se mosazné spojovače nedotýkaly nepájivé masky DPS, bude mezi příslušnými sériově spojovanými články vytvořena odhalená a pocínovaná vodivá cesta, která se bude nacházet ve všech vrstvách DPS.



Obrázek 19: Detail 3D modelu silové DPS ze strany TOP



Obrázek 20: Detail 3D modelu silové DPS ze strany BOTTOM



Obrázek 21: 3D model silové DPS

4.3.3 Ostatní elektronika

Každý segment musí dále obsahovat i battery management systém (zde označovaný jako "Slave BMS"), který slouží, jak už bylo zmíněno výše, k vyhodnocování teplot a napětí a k balancování jednotlivých článků během nabíjení a vybíjení. Výše bylo také zmíněno, že tyto dvě DPS budou spolu spojeny přímo pomocí konektorů, které se do sebe zasunou, přičemž kontakt typu "zásuvka" se bude nacházet na silové DPS a kontakt typu "zástrčka" na Slave BMS (to odpovídá bezpečnostním požadavkům, protože silová DPS bude neustále pod napětím).

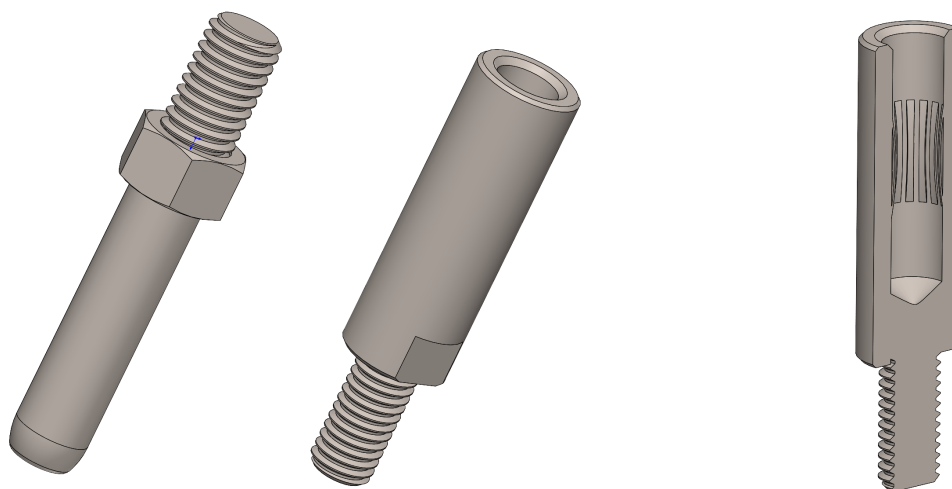
Aby se konektory nestaly zároveň nosným prvkem, bude mezi silovou DPS a Slave BMS vložena první řada speciálně navržených distančních sloupeků (viz obrázek 25), které budou vyráběné pomocí 3D tiskárny [SL1S Speed](#) založené na principu MSLA (tiskárna využívá monochromatický osvitový displej s vysokým rozlišením a UV LED pole, s pomocí kterých vytvrzuje tenké vrstvy resinu, díky kterým lze dosáhnout špičkové úrovně detailů). [12]

Návrh a realizace DPS Slave BMS a tvorba kódu pro Slave BMS není v rozsahu této práce, a proto zde není Slave BMS podrobně rozebrán. Vzhledem k nedokončenému návrhu Slave BMS bude pro účely návrhu mechanické koncepce segmentu použit náhradní 3D model DPS Slave BMS, který je v obrázcích níže znázorněn světle zelenou barvou (velikost DPS Slave BMS je ve 3D modelu znázorněna jako maximální možná - také stojí za zmínku, že je snaha DPS Slave BMS maximálně zmenšit).

Na straně segmentu, kde dvě krajní dvojice paralelně spojených článků dosahují nejvyššího rozdílu potenciálů, budou namísto SMT pájecích matic umístěny v silové DPS kontakty od firmy Stäubli - konkrétně se bude jednat o kontakt typu Socket B5N (viz obrázek 22 - [13]). Tyto kontakty jsou vyrobené z postříbřené mosazi a díky unikátní Multilam technologii zajišťují z hlediska pevnosti, přechodového odporu a stálosti těchto parametrů v čase a s teplotou velmi kvalitní kontakt, který je pro spojování segmentů velice důležitý.

Dalším důvodem výběru těchto kontaktů byla jejich teplotní odolnost, proudová zatížitelnost a velice snadná aplikace. Dva kontakty typu "zásuvka" budou umístěny v silové DPS a budou zajištěny standardní podložkou a pojistnou maticí (pro lepší spojení bude mezi kontaktem a taby použit mosazný plech). Oba dva kontakty nacházející se na silové DPS budou uloženy v izolačním

pouzdrě vyrobeného z jednoho kusu materiálu na 3D tiskárně technologií SLS (popsáno výše) obsahující můstek, který zajišťuje nemožnost zkratovat segment při spojování segmentů. Detailní popis včetně obrázků viz kapitola 4.3.7.

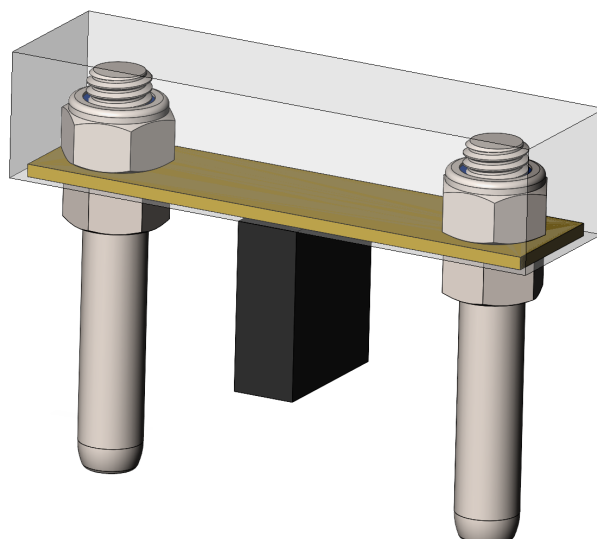


Obrázek 22: Použité kontakty od firmy Stäubli - vlevo Plug S5N, uprostřed Socket B5N a vpravo řez kontaktem Socket B5N znázorňující technologie Multilam (více viz [13], [14])

4.3.4 Propojky segmentu

Propojky segmentu, neboli "Maintenance Plugs" (dále jen MP), je termín používaný v pravidlech soutěže, který představuje zařízení, jež slouží k elektrickému propojování jednotlivých segmentů bez pomoci náradí (blíže viz kapitola 3). MP jsou zde tvořeny protikusem výše uvedeného kontaktu Socket B5N, takzvaným Plug S5N taktéž od firmy Stäubli - dva kontakty typu "zásuvka" budou umístěny v silové DPS a dva kontakty typu "zástrčka" budou tvořit MP. Tyto dva kontakty budou propojeny pomocí mosazného plechu příslušné délky a celý spoj bude zajištěn pojistnou maticí.

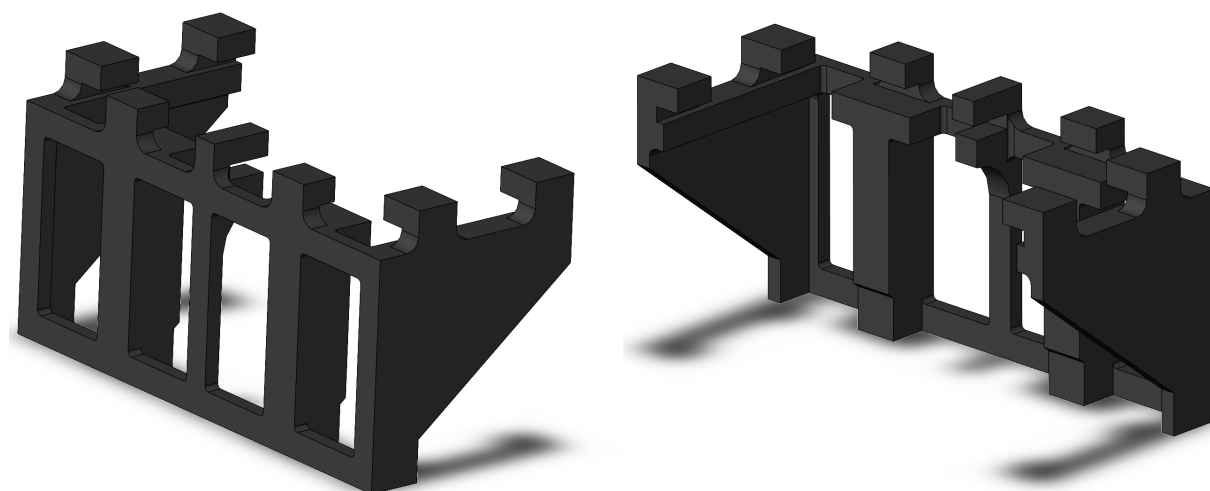
Vrchní část MP bude zalita v epoxidové pryskyřici určené k izolaci v elektrických strojích a transformátorech, čímž bude zajištěna bezpečnost při montáži MP (současně s tím bude do vrchní části MP zalito i látkové poutko, které bude zajišťovat pohodlné odpojení MP). Na spodní části MP bude přilepen profil (vytištěn na 3D tiskárně založené na technologii SLS), který bude zamezovat nesprávnému zapojení MP (to znamená zkratování segmentů).



Obrázek 23: Maintenance Plugs - spojky, zajišťující elektrické propojení segmentů (poutko zde není vyobrazeno)

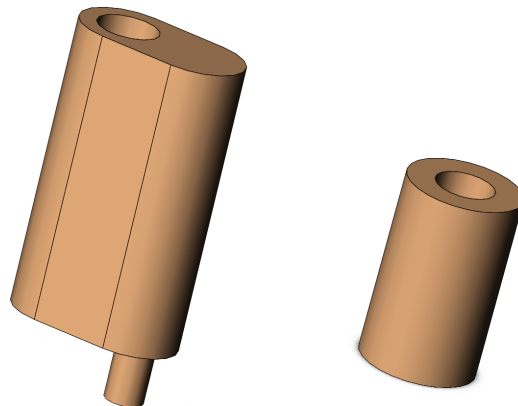
4.3.5 Ostatní mechanické prvky

Z výše uvedeného odstavce vyplývá, že při propojování segmentů budou MP zasunuty do příslušných kontaktů umístěných na silové DPS (popsaných o dva odstavce výše), čímž vznikne síla negativně působící na silovou DPS, taby článků a celou sestavu elektroniky. Proto bude mezi segmentový koš a silovou DPS vložena v místě spojení podpěra (viz obrázek 24), která bude zamezovat nežádoucímu ohybu silové DPS a tabů při připojování a odpojování MP (síly potřebné pro spojení a rozpojení výše uvedených kontaktů jsou uvedené v datasheetu kontaktů - viz [13]). Celá sestava byla podrobena statickým i dynamickým zatěžovacím studiím kolegy z fakulty strojní.



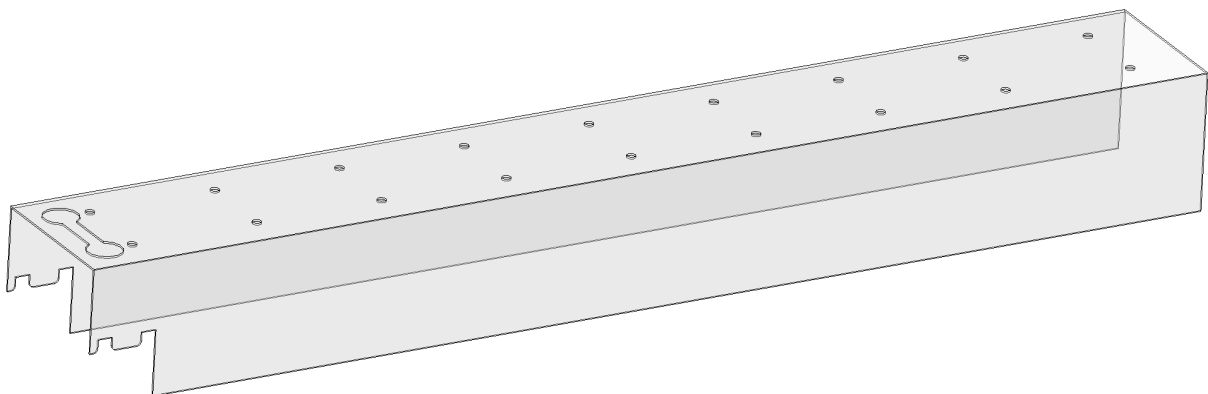
Obrázek 24: Podpěra vložená mezi segmentový koš a silovou DPS

Aby byla ještě zvýšena bezpečnost při manipulaci se segmentem a životnost elektroniky segmentu, bude na Slave BMS umístěna druhá řada speciálně vyrobených distančních sloupků (stejnou technologií výroby - viz obrázek 25), na kterých bude umístěn kryt z elektroizolačního materiálu (viz obrázek 26). Jelikož v tomto případě nejsou kladeny vysoké požadavky na izolování elektrického potenciálu a spíše se jedná o krytku, která má zamezit poškození elektroniky vlivem nesprávné manipulace a nechtěnému dotyku, bude vyrobena z plastů nižší kategorie (použit bude průhledný plast, aby byl ihned vidět stav elektroniky a signalizační LED diody umístěné na Slave BMS znázorňující balancování článků).



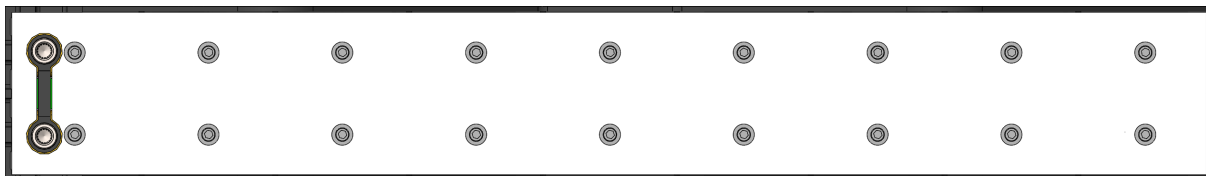
Obrázek 25: Detail navržených distančních sloupků (vlevo se nachází zástupce první řady a vpravo zástupce druhé)

Krytka bude přišroubována pomocí [plastových šroubů](#) (viz [15]), které budou prostupovat skrze obě řady distančních sloupků, Slave BMS a silovou DPS a zajistí tak ukotvení elektroniky k segmentovému koši (k tomuto účelu slouží závit v distančních sloupcích zabudovaných v koši). Protože k ukotvení dojde až v posledním kroku při kompletování segmentu, má první řada distančních sloupků kolík, který fixuje jejich přesné umístění a výrazně tak kompletování segmentu usnadní. Plastové šrouby sice mají na rozdíl od kovových výrazně nižší pevnost, ale vzhledem k jejich kritickému umístění mezi taby článků byly plastové šrouby vhodnější (snižuje se tak riziko zkratování článků - navíc jsou plastové šrouby vzhledem k jejich počtu a potřebě čelit nízkým silám v segmentu naprosto dostačující a dojde tak k úspoře hmotnosti).

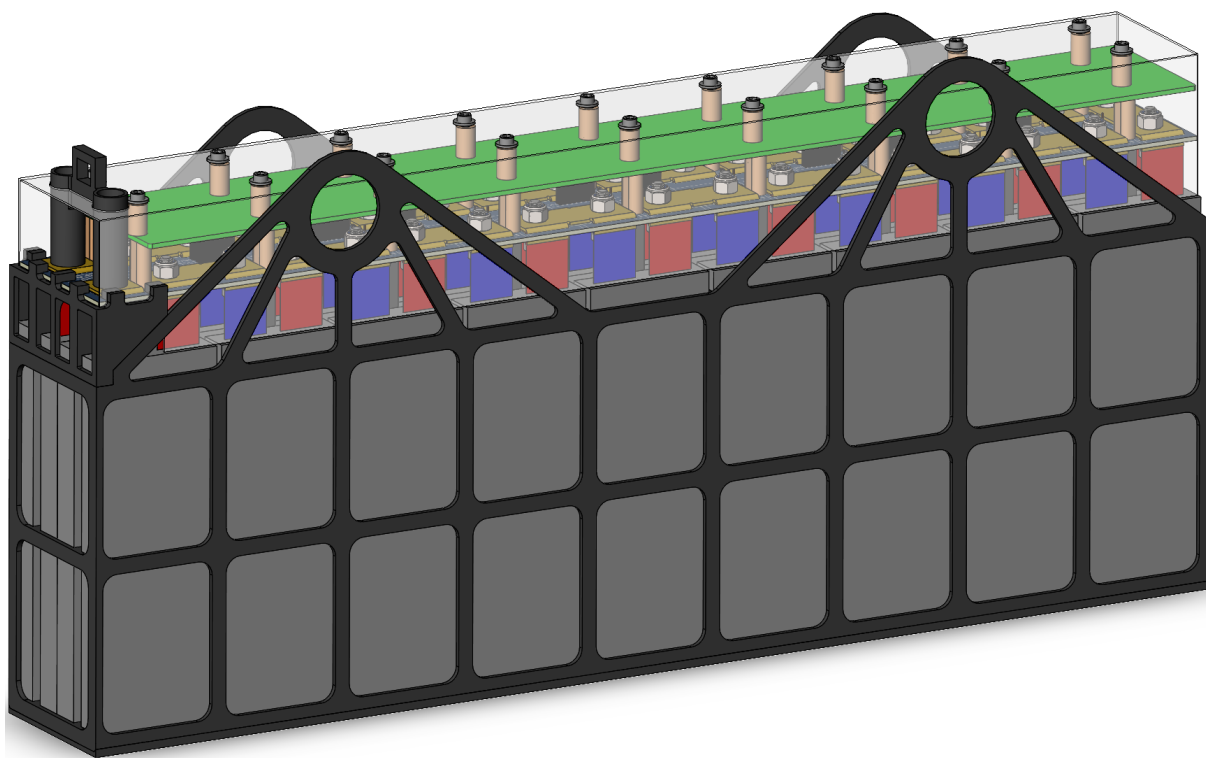


Obrázek 26: Znárodnění krytky zakrývající segment a chránící elektroniku před neúmyslným poškozením

Výroba krytky bude probíhat pálením na laseru z jednoho kusu materiálu a následném ohnutí do požadovaného tvaru. Na obrázku 27 je možné vidět kompletní segment při pohledu shora - krytka je speciálně pro tento pohled vytvořena z neprůhledného materiálu, aby bylo na první pohled patrné, jak přesně zakrývá celý segment včetně elektroniky, kterou chrání. Na obrázku 28 je možné vidět 3D model kompletně sestaveného segmentu.



Obrázek 27: Pohled shora na kompletně sestavený segment (krytka je zde z neprůhledného materiálu)



Obrázek 28: 3D model kompletně sestaveného segmentu obsahujícího všechny součásti

4.3.6 Parametry segmentu

Elektrické parametry segmentu byly známy již při rešerši vhodných bateriových článků, ale pro lepší přehlednost budou níže ještě jednou uvedeny (viz tabulka 7). Parametry uvedené v této tabulce jsou vztažené ke katalogovým parametrům vybraného článku. Výkon, který je segment schopen dodat, je podmíněn schopností odebírat z článku trvale danou velikost hodnoty proudu (to především znamená, že bude segment dostatečně chlazen).

Vyšší hodnota v uvedených rozsazích dodávaného výkonu odpovídá maximálnímu napětí segmentu (to znamená v okamžiku, kdy je na článku napětí 4,2 V) a naopak nižší hodnota v uvede-

ných rozsazích dodávaného výkonu odpovídá stavu kdy se článek pohybuje na hranici úplného vybití (napětí článku je 3 V). Z toho vyplývá, že krajní meze rozsahů dodávaného výkonu jsou spíše teoretické a nebo přesněji řečeno velmi krátkodobého charakteru. Daleko zajímavější jsou ale parametry mechanické uvedené v tabulce 8, které velmi přehledně znázorňují, jak veliký podíl mají jednotlivé komponenty na celkové hmotnosti segmentu.

Maximální napětí	75,6 V
Jmenovité napětí	66,6 V
Minimální napětí	54 V
Maximální trvalý odebíraný proud	210 A
Maximální špičkový odebíraný proud	300 A
Jmenovitá energie	932,4 Wh
Jmenovitá kapacita	252 Ah
Maximální trvalý výkon	11,3-15,9 kW
Maximální špičkový výkon	16,2-22,7 kW
Počet článků v segmentu	36
Elektrická konfigurace	18S2P
Rozměry	399,5x57,4x186,7 mm
Předpokládaná hmotnost	5616 g

Tabulka 7: Základní parametry jednoho segmentu

Prvek segmentu	Předpokládaná hmotnost [g]	Procentuální podíl hmotnosti [%]
Články	4716	82,68
Segmentový koš	318	5,58
Spojovací materiál	200	3,51
Slave BMS	150	2,63
Mosazné spojovače	73	1,28
Silová DPS	70	1,23
Ostatní	89	1,58

Tabulka 8: Procentuální podíl hmotnosti jednotlivých prvků segmentu

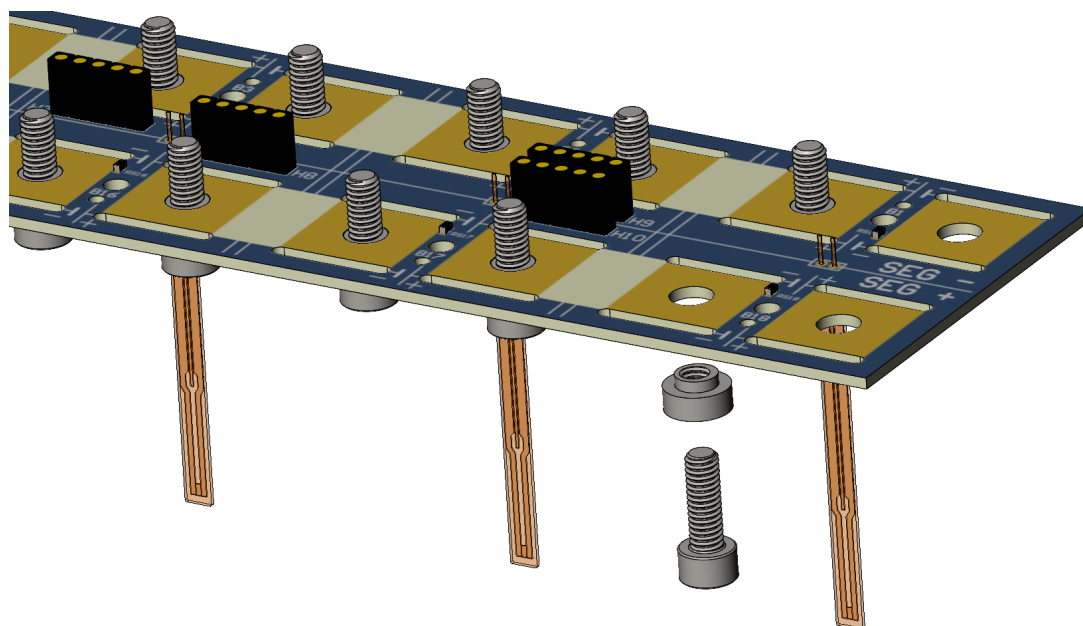
Hmotnosti jednotlivých prvků segmentu uvedených v tabulce 8 vyplývají z navrženého 3D modelu vytvořeného v programu Solidworks, a i když je ve většině případů známa technologie výroby i použité materiály, ze kterých budou jednotlivé prvky vyrobeny, jsou výše uvedené hmotnosti spíše orientační. Je naprosto očekávatelné, že majoritní podíl na hmotnosti segmentu budou mít právě bateriové články (v tomto případě téměř 83 %). Zajímavý je ale podíl hmotnosti segmentového koše, jakožto nosného prvku segmentu, a nebo třeba použitého spojovacího materiálu. Tato tabulka je pouze přehledová, ale její informační hodnota nabývá významu v případě vývoje nové generace trakční baterie, kdy bude možné na základě této tabulky stanovit, na jakých prvcích se vyplatí ušetřit hmotnost, a kde to naopak ztrácí význam.

4.3.7 Postup kompletace segmentu baterie

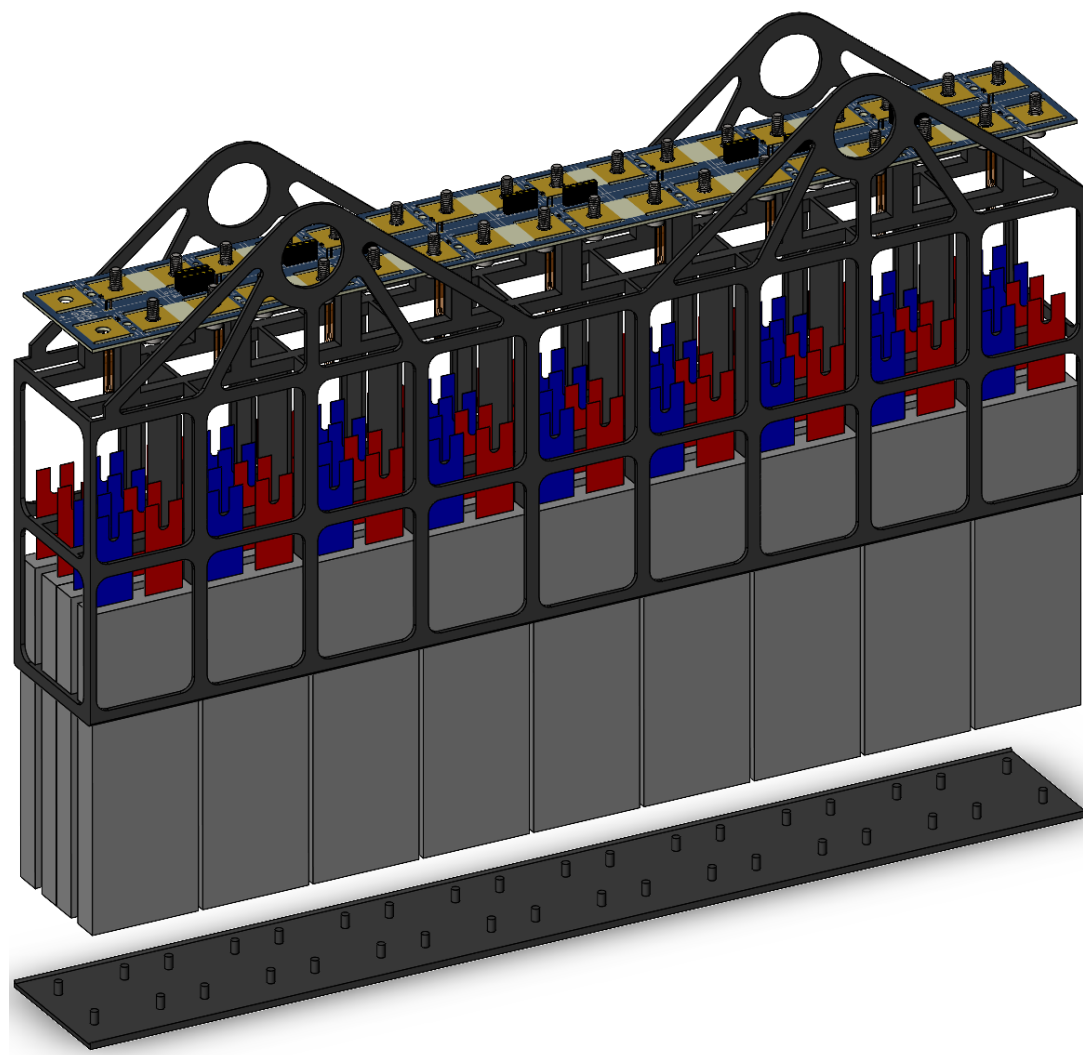
Jelikož jsou na konstrukci segmentu kladeny vysoké požadavky z hlediska hmotnosti a velikosti, je segment navržen tak, aby neobsahoval příliš vysoké množství redundantních prvků (jako je například spojovací materiál, který je nahrazován lepením apod.). Z toho vyplývá, že po kompletování složení segmentu již nebude možné segment zpět plně rozložit na elementární díly a ty pak například v rámci údržby vyměnit nebo nahradit za nové. Proto je níže uveden postup kompletace segmentu, aby bylo eliminováno riziko vzniku chyb při kompletaci. Zároveň je níže uvedený postup doplněný na konci kapitoly o obrázky, což dává čtenáři úplnou informaci o mechanickém a elektrickém řešení celého segmentu. V neposlední řadě slouží tento postup jako pomůcka při fyzické kompletaci segmentu. V příloze C je možné nalézt kusovník k segmentu obsahující seznam všech dílů a příslušných materiálů, ze kterých bude segment vyroben.

- **Krok č. 1** → Po vybalení článků napsat na všechny články z obou stran lihovým fixem jejich polaritu (na tělo článku do blízkosti tabů napsat čitelně a tučně "+" a "-").
- **Krok č. 2** → Polepit článkům, které se budou v segmentu navzájem dotýkat, plochu dotyku pomocí kaptonové pásky (důležité je, aby měla nalepená páska přesah do bočních ploch článku).
- **Krok č. 3** → Do otvorů v distančních sloupcích zabudovaných do segmentového koše vyvrtat závitníkem závit M3 do hloubky minimálně 15 mm.
- **Krok č. 4** → Osadit na příslušně označenou silovou DPS THT a SMT termistory, konektory, SMT pájecí matice a do matic zašroubovat s pomocí momentového klíče šroub (M4x12 mm) dle normy DIN 912 a šroub zalepit lepidlem na šrouby (velikost momentu utažení viz [11]) - viz obrázek 29.
- **Krok č. 5** → Osazenou silovou DPS umístit do segmentového koše a provizorně ji ke koši přišroubovat.
- **Krok č. 6** → Vystříhnout do obou tabů všech článků otvor pro montáž.
- **Krok č. 7** → Bezprostředně před umísťováním článků do segmentového koše sundat z tabů izolaci a taby očistit isopropylenem.
- **Krok č. 8** → Dle obrázku 67 v příloze B zasouvat postupně články do segmentového koše tak, aby taby článků prošly skrze silovou DPS, a aby bylo zajištěno správné umístění THT termistorů mezi články (pečlivě zkontrolovat pomocí voltmetru správnou polaritu všech článků).
- **Krok č. 9** → Po osazení všech článků umístit na spodní část segmentového koše jeho dno a zalepit jej, aby nedošlo k jeho uvolnění.
- **Krok č. 10** → Umístit na přední část segmentového koše popisek s označením příslušného segmentu a s určením polarity segmentu na základě umístění článků.

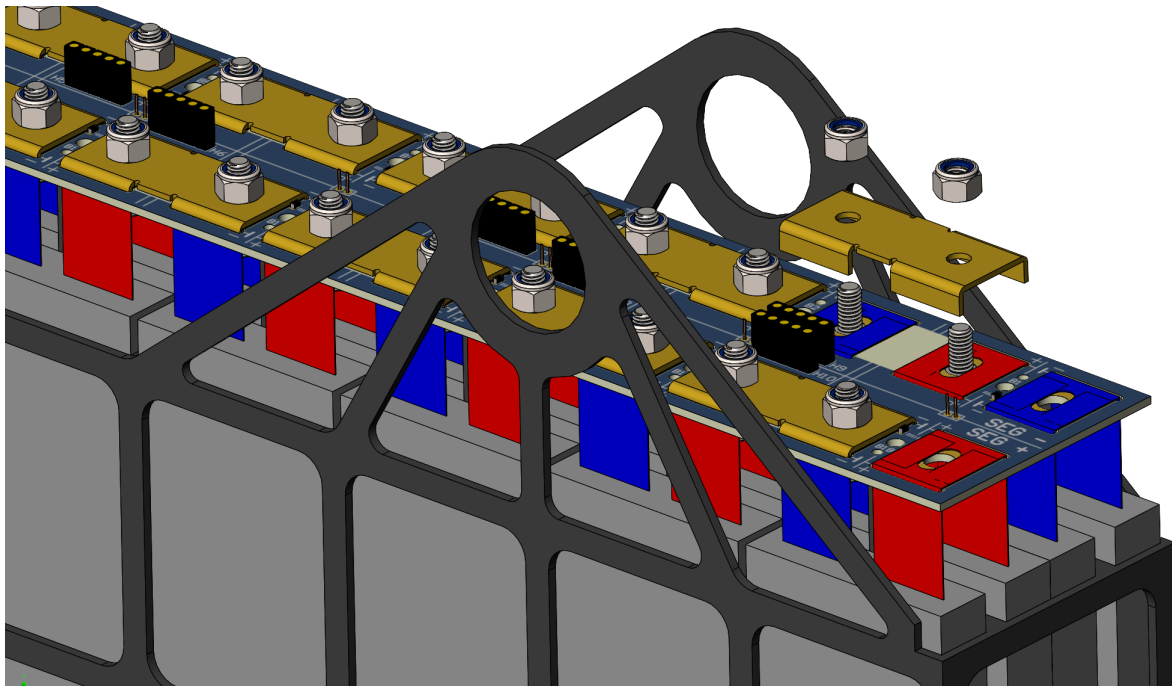
- **Krok č. 11** → Vyřezané a poniklované mosazné spojovače ohnout pomocí přípravku do patričného tvaru a očistit je pomocí isopropylenu.
- **Krok č. 12** → Ohnout taby příslušné paralelní dvojice ke šroubu zašroubovaného do SMT pájecí matice, přes ně nasadit připravené mosazné spojovače typ 2 a celou sestavu upevnit pomocí pojistné matice M4 dle normy DIN 985 (k utažení využít momentový klíč - nastavit nižší hodnotu, než jakou byl zašroubován šroub do SMT pájecí matice) - viz obrázek 31.
- **Krok č. 13** → Na zbývající dvě pozice v silové DPS umístit mosazné spojovače typ 1, kontakty Socket B5N se zkráceným závitem na 10 mm a ze spodní strany umístit podložku M5 dle normy DIN 125A, šroub M5 dle normy DIN 985 a celou sestavu dotáhnout - viz obrázek 32.
- **Krok č. 14** → Umístit vytištěný izolační prvek na výše uvedené kontakty a přilepit jej, aby nedošlo k jeho uvolnění - viz obrázek 33.
- **Krok č. 15** → Mezi silovou DPS a segmentový koš umístit podpěru a důkladně ji ke koši přilepit, aby nedošlo k jejímu uvolnění - viz obrázek 33.
- **Krok č. 16** → Pomocí voltmetru zkontrolovat správný potenciál na vývodech segmentů (na kontaktech Socket B5N).
- **Krok č. 17** → Odšroubovat šrouby, které do této chvíle sloužily jako provizorní ukotvení silové DPS k segmentovému koši.
- **Krok č. 18** → Umístit na silovou DPS první řadu distančních sloupků - viz obrázek 34.
- **Krok č. 19** → Na první řadu distančních sloupků umístit osazenou a příslušně označenou DPS Slave BMS a ujistit se, že došlo ke správnému propojení konektorů mezi silovou DPS a DPS Slave BMS - viz obrázek 34.
- **Krok č. 20** → Na Slave BMS umístit druhou řadu distančních sloupků - viz obrázek 34.
- **Krok č. 21** → Na druhou řadu sloupků umístit kryt segmentu - viz obrázek 35.
- **Krok č. 22** → Celou sestavu ukotvit a dotáhnout pomocí plastových podložek dle normy DIN 125 (001) a šroubů M3x40 mm dle normy DIN 85 - viz obrázek 35.
- **Krok č. 23** → Důkladně zkontrolovat výslednou sestavu.



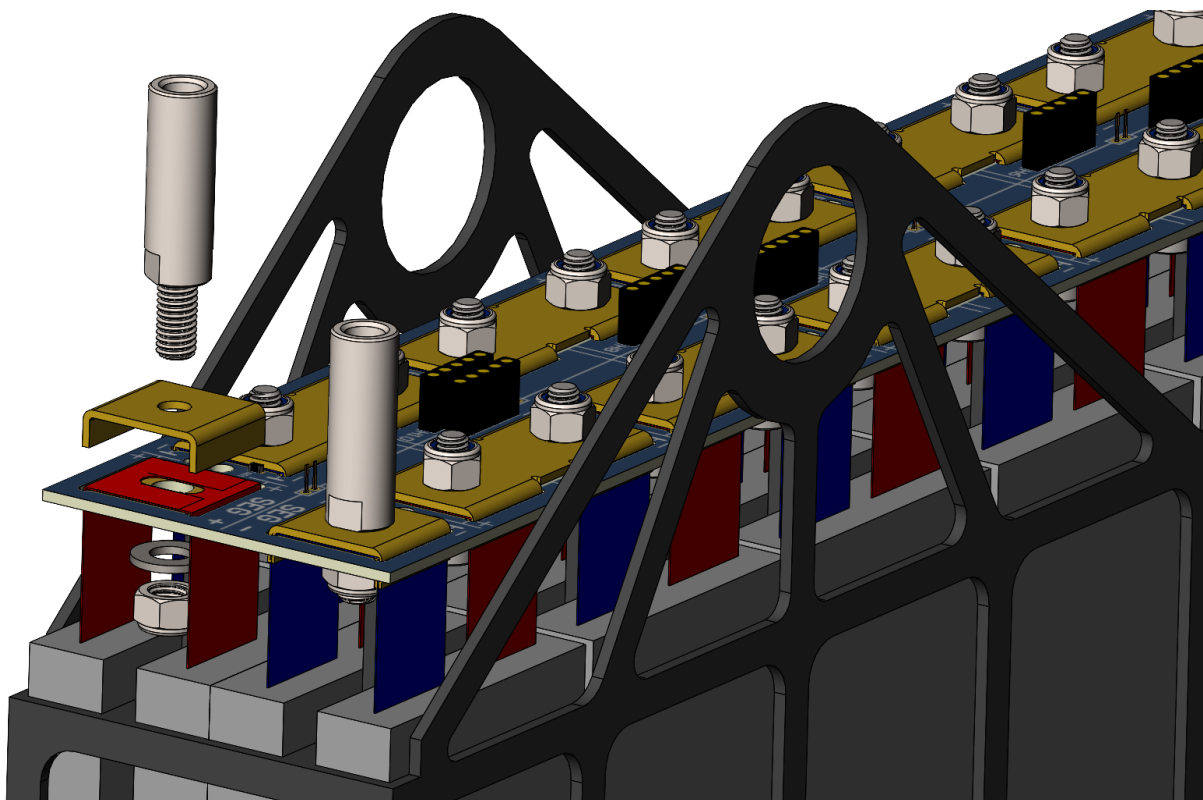
Obrázek 29: Krok číslo 4 v postupu kompletace segmentu



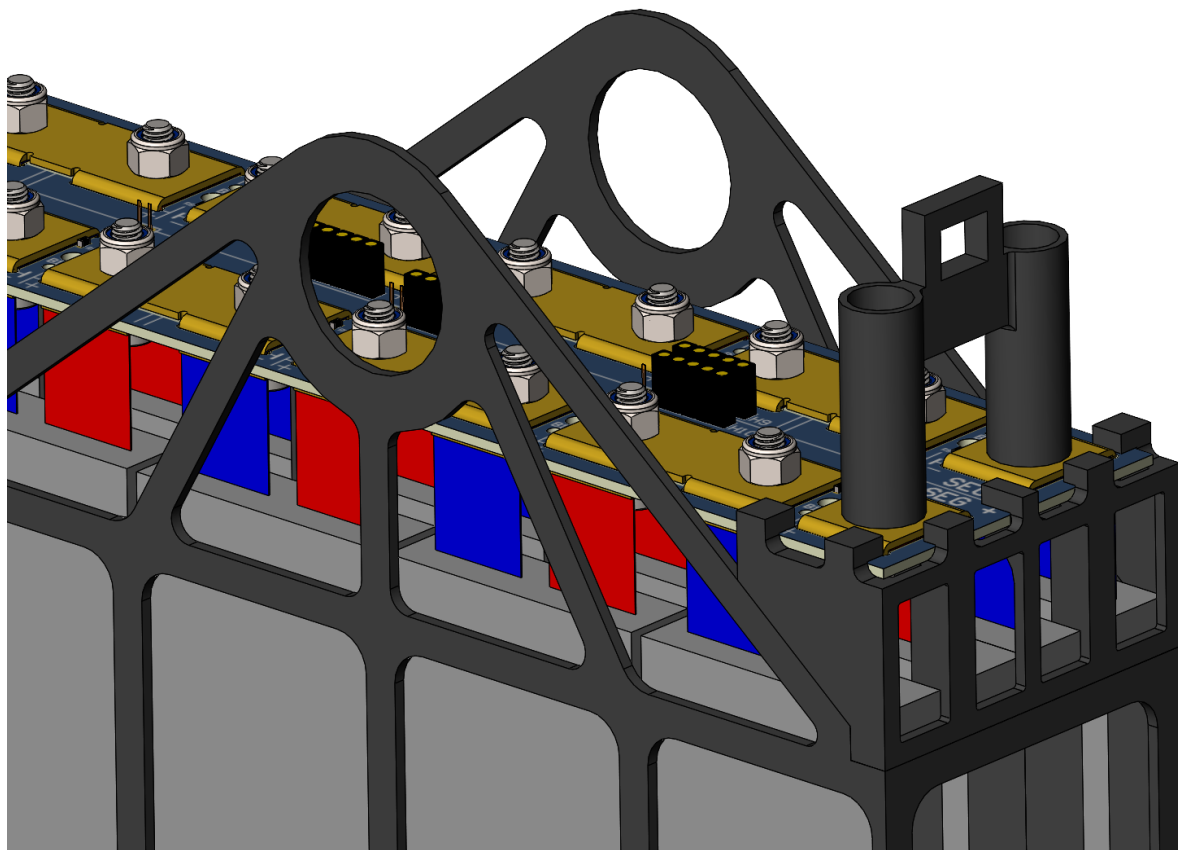
Obrázek 30: Kroky číslo 8 a 9 v postupu kompletace segmentu



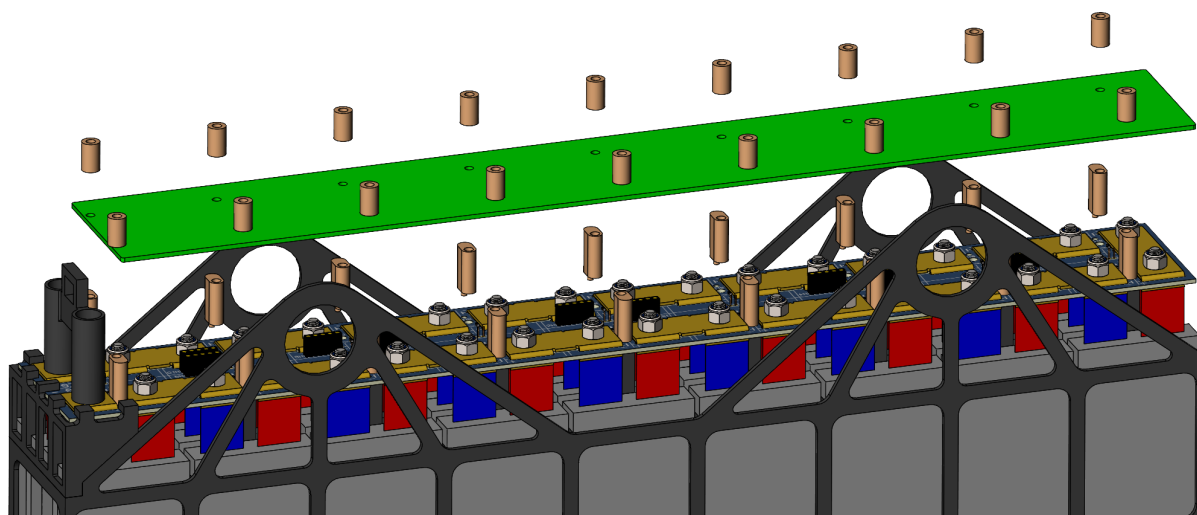
Obrázek 31: Krok číslo 12 v postupu kompletace segmentu



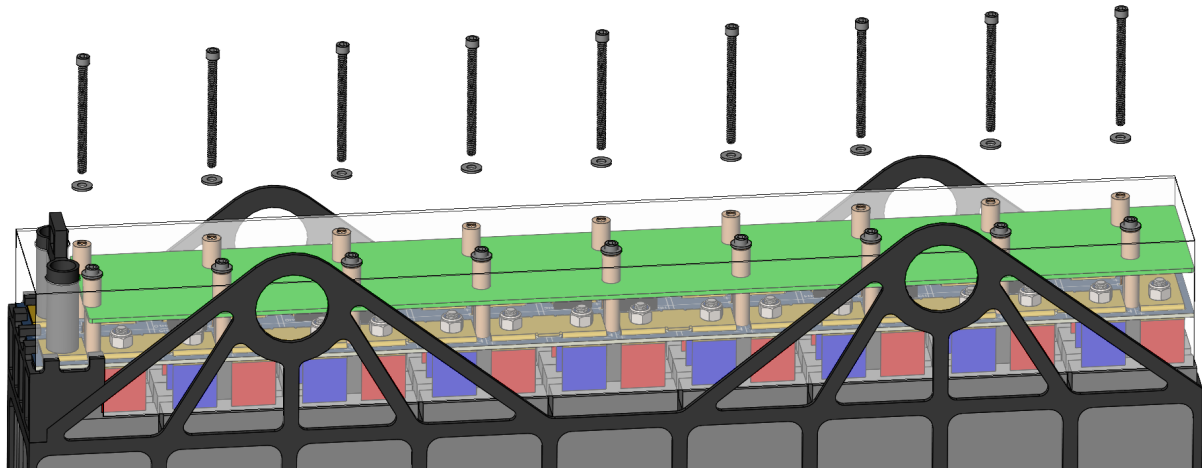
Obrázek 32: Krok číslo 13 v postupu kompletace segmentu



Obrázek 33: Kroky číslo 14 a 15 v postupu kompletace segmentu



Obrázek 34: Kroky číslo 18-20 v postupu kompletace segmentu



Obrázek 35: Kroky číslo 21 a 22 v postupu kompletace segmentu

4.4 Návrh baterie

Návrh elektrické a mechanické koncepce celé trakční baterie studentské elektroformule musel být již od začátku prováděn společně s návrhem jednotlivých segmentů baterie popsáním v podkapitole výše. Kromě výše zmíněných segmentů bude trakční baterie obsahovat i další komponenty, které budou zajišťovat plnou funkčnost baterie (takzvaná doprovodná elektronika). Výběr, návrh a dimenzování jednotlivých komponent doprovodné elektroniky bude popsán níže.

4.4.1 Pojistka

Prvním prvkem zapojeným bezprostředně za segmenty je pojistka, která trakční baterii chrání proti zkratu. Pojistka byla vybírána z řady PSR Flush End Series od společnosti Littelfuse, která se výrobou pojistek specializuje - viz [16]. Tato pojistka patří do skupiny průmyslových polovodičových velmi rychlých pojistek, které jsou speciálně určené pro ochranu výkonových zařízení jako jsou například měniče, či baterie. I když se pojistky z této skupiny příliš nehodí do automotive aplikací, protože jsou určené pro montáže na sběrnice do rozvaděčů, byla pojistka vybrána z této skupiny z důvodu velikosti a hmotnosti vzhledem k jiným nabízeným pojistkám. Vybraná pojistka PSR030FL0200 (viz obrázek 36) je dimenzovaná na 600 V DC, 200 A (jelikož může odebíraný proud z baterie dosáhnout špičkově hodnoty téměř 190 A), její odpor je 0,588 mΩ a hmotnost přibližně 260 g.

Aby bylo možné pojistku pevně a stabilně ukotvit do kontejneru, bude v prostoru pro doprovodnou elektroniku integrován box s víkem, do kterého se pojistka vloží, poté bude možné připojit pojistku do obvodu a následně se víko uzavře a zašroubuje, čímž bude pojistka izolovaná od zbytku elektroniky. Fyzické připojení pojistky bude realizováno šrouby s pružinovými podložkami proti samovolnému uvolnění spoje a kabely s kabelovými oky na jejich koncích. Vybraná pojistka má na svém těle ještě dva vývody, na které se dá připojit zařízení, které jednoznačně symbolizuje stav pojistky (jestli došlo k jejímu "přepálení", nebo nikoliv) - z důvodu ušetření

hmotnosti a prostoru nebude pojistka tento prvek obsahovat, proto bude nutné vývody zaizolovat například elektroizolační páskou.



Obrázek 36: Pojistka chránící trakční baterii před zkratem [17]

4.4.2 Hlavní stykače

Připojení baterie do trakčního systému budou zajišťovat dva stykače (výše označované jako "hlavní" nebo jako "AIRs"), které byly vybírány z řady vysokonapěťových stykačů a relé ze série EV200 vyráběných společnostmi TE Connectivity - konkrétně EV200HAANA viz [18]. Vybraný stykač (viz obrázek 37) dokáže pracovat v rozsahu napětí 12-900 V DC, trvalý protékající proud může být až 500 A, jeho odpor je 0,2 mΩ, napětí potřebné k sepnutí napěťové cívky se pohybuje v rozsahu 9-36 V DC a stykač je typu "Normally Open" (v neaktivním stavu je rozepnutý). Celý stykač je poměrně veliký, což bude v kombinaci s jeho tvarem působit potíže při montáži elektroniky, a jeho hmotnost včetně potřebného spojovacího materiálu činí téměř 420 g, což v žádném případě není zanedbatelná velikost.

Dle parametrů uvedených v datasheetu stykače (viz [18]) se dá usoudit, že je vybraný stykač příliš dimenzován z hlediska jeho účelu použití. Je ale zapotřebí zdůraznit, že vzhledem k požadovaným parametrům stykače téměř nebyla jiná možnost. Stykač obsahuje dva montážní otvory, takže bude přišroubován přímo ke kontejneru na příslušném místě.



Obrázek 37: Hlavní relé připojující baterii do trakčního systému vozidla [18]

4.4.3 Master BMS - Přednabíjecí obvod

Jak již bylo popsáno v podkapitole 4.1, návrh a realizace obvodů Master BMS nejsou v rozsahu této práce, ale součástí DPS, na které se bude Master BMS nacházet, bude i přednabíjecí obvod (taktéž popsáný v podkapitole 4.1), který ale do rozsahu této diplomové práce spadá. Funkce přednabíjecího obvodu spočívá v zajištění nabití kondenzátorů v DC linku výkonového měniče před uzavřením hlavních stykačů baterie (před připojením baterie do trakčního systému vozidla). Přednabíjecí obvod je řízen a napájen linkou Shutdown Circuit a připojení stykačů ovládá Master BMS, který musí snímat napětí před stykači (ze strany baterie) i za stykači (ze strany DC linku).

Při sepnutí stykače přednabíjecího obvodu dojde ke známému přechodovému ději probíhajícímu při nabíjení kondenzátoru. Pro tento děj je charakteristický exponenciální nárůst napětí na kondenzátoru se současnou skokovou změnou nabíjecího proudu, který postupně s rostoucím napětím exponenciálně klesá k nule. Aby byl počáteční skok proudu omezen, zapojuje se před stykač rezistor, který musí být z výkonového hlediska dimenzován tak, aby dokázal uchladit teplo vzniklé výkonovou ztrátou při průchodu nejvyšší hodnotou proudu.

To ale znamená, že bude rezistor z výkonového hlediska velmi špatně optimalizovaný. Při počátečním skoku proudu při sepnutí stykače přednabíjecího obvodu dojde ke krátkodobému zatížení rezistoru, ale ve zbylém čase bude zcela nevyužit a jedná se tak o zbytečnou zátěž navíc. Z tohoto důvodu se běžně v praxi využívá namísto klasického rezistoru PTC termistor, pro který je charakteristická změna elektrického odporu se změnou teploty (s rostoucí teplotou roste jeho odpor).

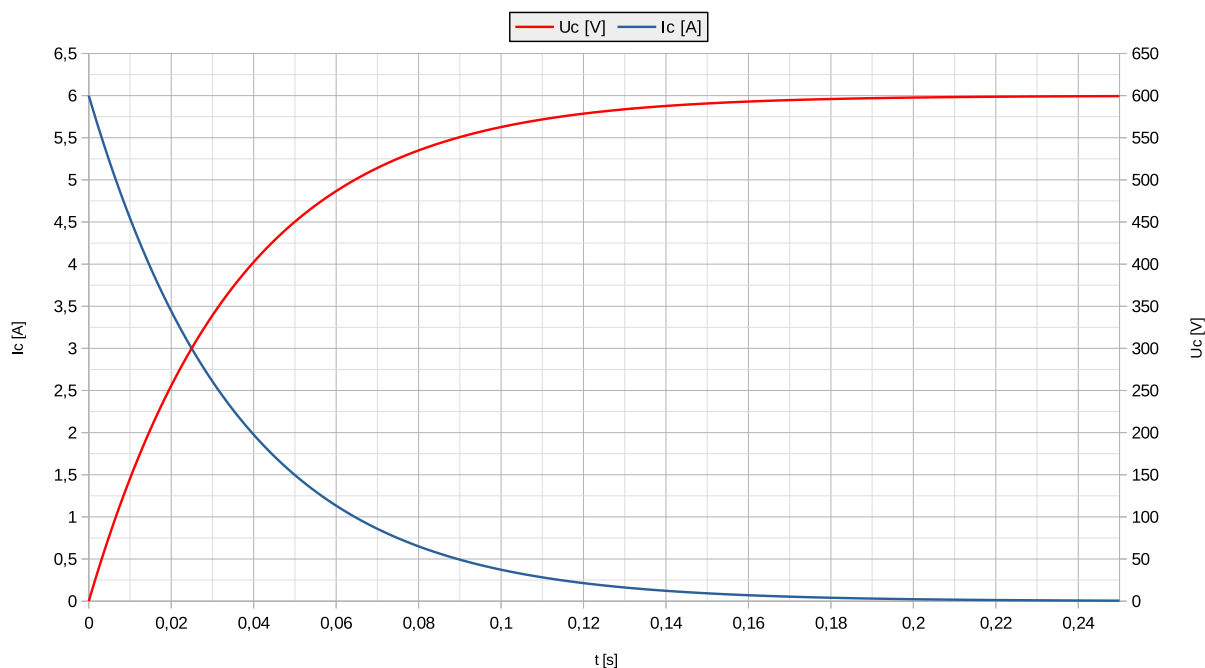
Znamená to tedy, že před sepnutím stykače má PTC termistor přibližně pokojovou teplotu, čemuž odpovídá odpor řádově nízké desítky Ω . Následně sepnutím stykače přednabíjecího obvodu, skokem vzroste proud protékající termistorem, v důsledku čehož se začne ohřívat. Současně s tím ale roste odpor termistoru, čímž dochází k omezení protékajícího proudu a sníží se tak ohřev termistoru - termistor tak dokáže regulovat výkonovou ztrátu, která na něm vzniká, a je tedy z tohoto hlediska daleko lépe optimalizovaný.

Vzhledem k tomu, že musí být všechny komponenty nacházející se v kontejneru baterie dimenzovány na maximální napětí trakčního systému 600 V, byl výběr vhodných součástí přednabíjecího obvodu značně omezen. Stykač přednabíjecího obvodu byl vybrán od společnosti Fujitsu - konkrétně typ FTR-J2AK012W (spínací napětí 600 V DC, napětí cívky 12 V DC, jmenovitý proud kontaktu 10 A - viz [19]). Tento stykač je sice dlouhodobě nedostupný, ale jedná se o jediný prakticky použitelný stykač na trhu.

Obdobná situace byla při výběru vhodného termistoru, kdy se jako jedinou vhodnou variantou jeví PTC termistor od firmy EPCOS/TDK - konkrétně produkt B59753C0120A070. Tento termistor má při pokojové teplotě odpor 120 Ω a jeho jmenovité napětí je 620 V DC - viz [20].

Následně bylo zapotřebí ověřit, zda-li jsou vybrané součástky dostatečně výkonově dimenzované a zda budou schopny pracovat při přechodovém ději, který vznikne. Z datasheetu vybraného termistoru (viz [20]) bylo zjištěno, že nejnižší hodnotu odporu má termistor přibližně při teplotě

75 °C a to 100 Ω. Graf na obrázku níže (obrázek 38) znázorňuje nejhorší variantu přechodového děje, který může při výběru výše uvedených součástí nastat (varianta počítá s nejnižší velikostí odporu termistoru právě 100 Ω, při které bude nejvyšší nárůst proudu).



Obrázek 38: Nejhorší varianta přechodového děje vzniklého při nabíjení kondenzátorů DC linku výkonového měniče

Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že bude přechodový děj ukončen za 0,18 s (to odpovídá pětinásobku časové konstanty RC obvodu) a nejvyšší hodnota proudu při sepnutí stykače bude 6 A. Na základě toho je možné konstatovat, že je vybraný stykač dostatečně dimenzovaný, jelikož je jeho jmenovitý proud 10 A. Pro ověření dostatečného dimenzování PTC termistoru bylo zapotřebí využít vzorce uvedeného v datasheetu termistoru (vzorec 1 - viz [20]), který říká, kolik je zapotřebí použít PTC termistorů pro dostatečné výkonové dimenzování a zajištění tak bezproblémového průběhu přednabití kondenzátorů DC linku.

$$N \geq \frac{K \cdot C \cdot U^2}{2 \cdot C_{th} \cdot (T_{ref} - T_{A,max})} [-] \quad (1)$$

Veličina $K[-]$ je faktor, který je pro stejnosměrný obvod roven hodnotě 1, $C[F]$ je velikost kapacity v DC linku výkonového měniče, $U[V]$ je napětí, na které je potřeba kondenzátory nabít, $C_{th} [J/K]$ je tepelná kapacita termistoru, $T_{ref} [^{\circ}C]$ je referenční teplota termistoru a $T_{A,max} [^{\circ}C]$ je maximální očekávaná teplota okolí.

Kapacita všech kondenzátorů v DC linku výkonového měniče je 12x30 μF, napětí je 600 V a maximální očekávaná teplota okolí byla se zahrnutím určité rezervy zvolena 60 °C. Velikosti hodnot zbylých veličin je možné najít v datasheetu PTC termistoru (viz [20]). Po dosazení hodnot všech parametrů bylo zjištěno, že je zapotřebí 0,771 PTC termistorů - to znamená, že jeden PTC termistor bude naprosto dostačující.

4.4.4 Hlídač izolačního stavu - IMD

Vzhledem k funkci, kterou má hlídač izolačního stavu vykonávat, a která byla popsána v podkapitole 4.1, je možné usuzovat, že se jedná o velmi složité zařízení, které by svým rozsahem pokrylo samostatnou diplomovou práci, stejně jako například již mnohokrát zmíněný BMS. Z důvodu bezpečnosti pravidla soutěže doporučují, že je nutné použít IMD od firmy Bender (konkrétně model A-ISOMETER IE155-3203 nebo 3204 dle normy iso-F1 - viz [21]). Pravidla taktéž umožňují použít IMD od jiného výrobce, ale IMD musí vždy splňovat všechny standardy automotive, z čehož vyplývá, časová a finanční náročnost vývoje takového zařízení, a proto bylo rozhodnuto, že bude IMD zakoupen od výše zmíněné firmy Bender.

Po následném kontaktování společnosti Bender byla domluvena spolupráce zahrnující mimo jiné i sponzorský dar v podobě výše uvedeného IMD včetně asistence jejich techniků přímo na soutěži v celkové hodnotě 1600 euro. Před samotnou koupí bylo zapotřebí upřesnit technickou specifikaci IMD, aby bylo možné IMD provozovat v systému vyvíjeného vozidla. Výrobce dodává IMD ve dvou variantách, z nichž varianta 3204 obsahuje dva HS výstupy, a proto je výrobcem doporučována častěji (proto byla také vybrána - pro ilustraci viz 39).



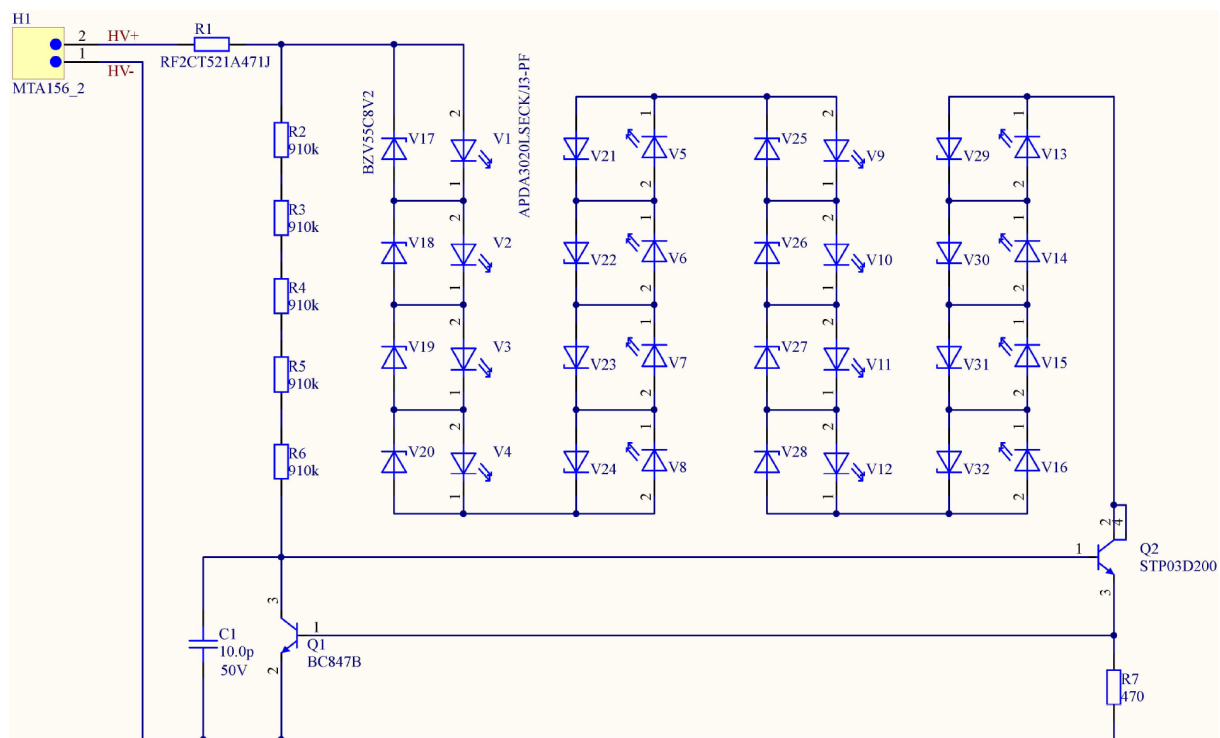
Obrázek 39: Hlídač izolačního stavu - model IR155-3204 [21]

Pravidla soutěže stanovují, že hodnota izolačního odporu mezi trakčním systémem a zbytkem vozidla musí být minimálně 500Ω na každý 1 V napětí trakčního systému (to znamená, že hodnota izolačního odporu musí být minimálně $300 \text{ k}\Omega$). Jelikož není známo, s jakou rezervou má být tato hodnota volena, je vhodnou alternativou zadat výrobcovi pouze napětí trakčního systému a volbu přesné hodnoty izolačního odporu přenechat jemu. Výrobce poté opatří IMD patřičným SW, který zajistí správnou funkci IMD. Tento proces je stále ve stádiu komunikace s výrobcem a k jeho dokončení dojde až po dokončení elektroniky trakční baterie, aby nedošlo ke špatnému nakonfigurování IMD.

4.4.5 Napěťový indikátor

Napěťový indikátor poprvé zmiňovaný v podkapitole 4.1 je jednoduchý obvod, jehož funkcí je detekovat a vizuálně předávat informaci o přítomnosti napětí za hlavními stykači trakční baterie. To znamená, že kdykoliv je možné na výstupním konektoru baterie naměřit vyšší napětí než 60 V DC, musí se rozsvítit příslušná LED dioda. Druhou možností je využití voltmetru, ale z důvodu úspory prostoru a zajištění jednoznačnosti signalizace byla zvolena varianta s LED diodou (protože má být signalizace vždy viditelná a to i za jasného denního světla, bude napěťový indikátor obsahovat LED diod více).

Na obrázku 40 je znázorněno schéma obvodu napěťového indikátoru. Připojení napěťového indikátoru do obvodu bude zajišťovat konektor *H1*, jehož protikus bude pomocí kabelu připojen na měřicí vývody hlavních stykačů, čímž bude snímat napětí baterie (v DPS bude osazen kontakt typu "zástrčka", protože připojovaný vývod bude neustále pod napětím). Konektor obsahuje zámeček, aby nedošlo k nesprávnému zapojení konektoru, což by vedlo ke zničení napěťového indikátoru.



Obrázek 40: Schéma zapojení napěťového indikátoru

Celý obvod se prakticky chová jako proudový zdroj. Proud přes odpory otevírá *Q2*, tím začne protékat proud přes LED diody a na rezistoru *R7* způsobí úbytek, který umožní tok proudu do báze tranzistoru *Q1*, čímž převezme část proudu tekoucího do báze tranzistoru *Q2* a tím ho zavírá. Takto je proud stabilizován a je možné jej měnit velikostí rezistoru *R7*. Kondenzátor *C1* slouží k omezení zákmitů, které mohou v důsledku výše popsaného děje vzniknout.

Vybraná LED dioda má propustný proud pouze 2 mA a svítivost 1000 mcd, což znamená zachování relativně vysoké svítivosti při velmi malé spotřebě. Pro zajištění ještě větší svítivosti bude

napěťový indikátor obsahovat 16 LED diod ($V1-V16$) zapojených do série. Do série je možné zapojit takové množství LED diod, aby úbytek na nich nepřekročil hodnotu napětí 60 V (což v tomto případě znamená až 33 LED diod - 16 LED diod bude ale naprosto dostačující).

Diody zapojené do série zvyšují kromě svítivosti indikátoru zároveň jeho poruchovost. V případě, že by jedna LED dioda přestala fungovat, přeruší se tok proudu celým řetězcem a napěťový indikátor přestane fungovat (pravděpodobnost selhání jedné ze 16 diod je větší než v případě použití jen jedné diody). Proto byly do obvodu vloženy zenerovy diody ($V17-V32$) připojené paralelně v závěrném směru vzhledem k LED diodám. V případě, že by jakákoliv LED dioda přestala fungovat, způsobí úbytek napětí vzniklý na nefunkční LED diodě otevření zenerovy diody paralelně k ní připojené a tím bude zachován tok proudu obvodem (zbylé funkční LED diody svítit budou).

Na tranzistoru $Q1$ vzniká úbytek napětí, který je roven napětí 600 V mínus úbytek napětí na LED diodách (čili 571,2 V - to je stabilní a žádoucí stav), proto je nazýván výkonový a kvůli tomu je i patřičně dimenzován. Kvůli vysokému úbytku se tranzistor značně ohřívá, proto je velká šance, že by došlo k přehřátí tranzistoru a k jeho zničení.

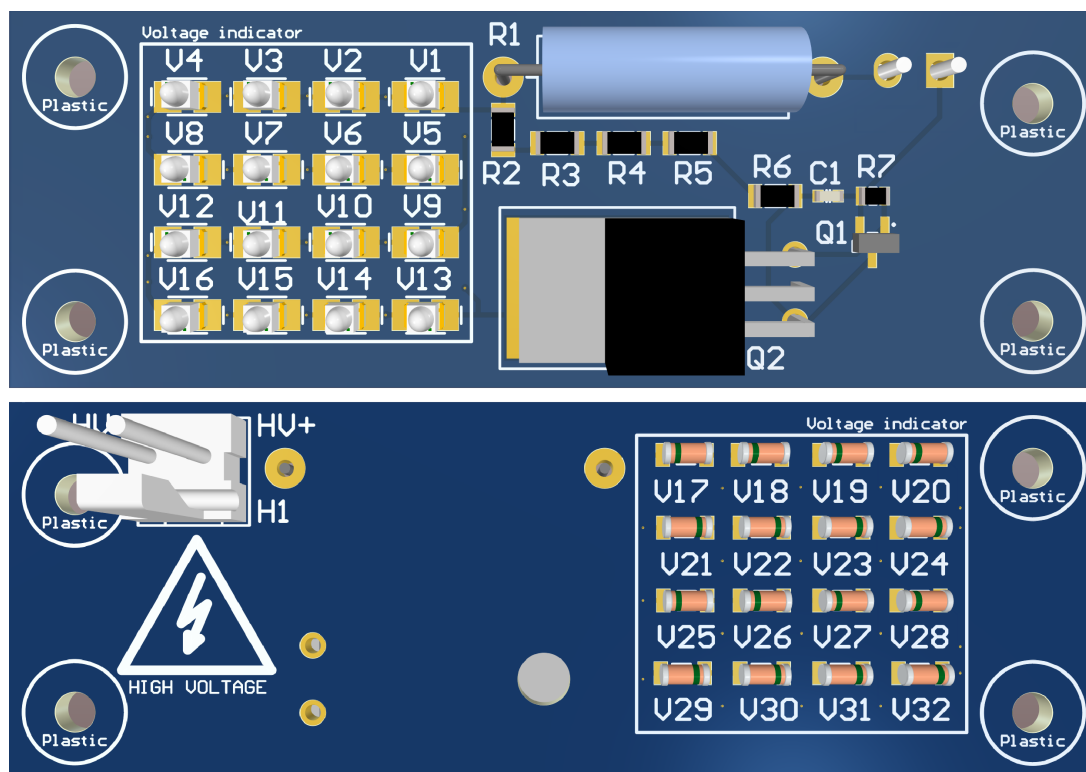
V případě, že by se tranzistor $Q1$ zničil, objevilo by se napětí 600 V na diodách, následně dojde k nárůstu proudu obvodem skrze přechod báze-kolektor tranzistoru $Q1$, což by poškodilo řadu součástek, ale také by mohlo dojít ke vzniku požáru. Proto se bezprostředně za konektorem nachází pojistkový rezistor $R1$, jež má tomuto ději zamezit. Neznačená to, že by byl obvod nadále funkční, ale v případě poruchy tranzistoru $Q1$ by se vlivem nadproudu zničil rezistor $R1$ a tím se přeruší tok proudu a zamezí se tak dalším škodám.

Pojistkový rezistor $R1$ je navržen tak, aby na něm za normálního stavu vznikala minimální výkonová ztráta, ale aby při poruše tranzistoru $Q1$ vzrostla vzniklá výkonová ztráta na pojistkovém rezistoru na několika set násobek jmenovitého výkonu a rezistor se tak velice rychle přepálil.

Na obrázku 41 je možné vidět navrženou desku plošných spojů napěťového indikátoru (v horní části stranu TOP obsahující LED diody a ve spodní části stranu BOTTOM obsahující konektor). Vzhledem ke značně rozdílným potenciálům jednotlivých součástek muselo být při návrhu desky plošných spojů respektováno správné umístění součástek, aby se zamezilo nechtěným přeskokům nebo průrazům.

Mezi součástkami zapojenými blíže k zápornému potenciálu baterie od těch zapojených blíže ke kladnému potenciálu musí být vzdálenost minimálně 3 mm. Z tohoto důvodu má tranzistor $Q1$ odstraněný prostřední vývod - kolektor (ve 3D modelu na obrázku 41 ale odstraněn není) - a pro připojení kolektoru je použito zadní části součástky, což zároveň slouží jako chlazení do DPS.

V příloze D je možné nalézt tabulku obsahující veškeré součástky, ze kterých se napěťový indikátor skládá. K použitým součástkám je zapotřebí připočítat i distanční sloupky, pomocí kterých bude napěťový indikátor připevněn z vnitřní strany víka kontejneru tak, aby LED diody směřovaly směrem ven z kontejneru. Dále pak světelné trubice zabudované ve stěně víka kontejneru skrze které bude světlo emitované LED diodami vystupovat z kontejneru ven do prostoru.



Obrázek 41: Navržená deska plošného spoje napěťového indikátoru (rozměry: 82,5x28,5 mm)

4.4.6 Dimenzování chlazení baterie

Velmi důležitou úlohou při návrhu trakční baterie je určit ztrátový výkon jednotlivých prvků a na základě toho vhodně dimenzovat chlazení baterie. V úvahu je zapotřebí vzít nejenom ztrátový výkon, který vzniká na bateriových článcích (a na jejich tabech), ale také na všech komponentách, kterými protéká proud - konektory, spojení článků, veškerá elektronika apod. Výběrem vhodných ventilátorů a jejich parametrů se dále budou zabývat kolegové z fakulty strojní, kteří mají v této oblasti nemalé zkušenosti.

Jak bylo zmíněno výše, nejdříve bylo zapotřebí určit ztrátový výkon jednotlivých prvků, kterými protéká proud. Již na začátku této kapitoly bylo zmíněno, že budou jednotlivé segmenty chlazeny vzduchem proudícím skrz baterii. Dále bylo zmíněno, že doprovodná elektronika, kterou bude kontejner baterie obsahovat, bude v samostatné části kontejneru, tudíž ji nebude možné těmito ventilátory chladit. Z tohoto důvodu je nutné výpočet ztrátového výkonu rozdělit na dvě části a zvlášť určit ztrátový výkon segmentů a zvlášť zbylé elektroniky v kontejneru.

Pro výpočet ztrátového výkonu segmentu bylo nutné uvažovat následující prvky (viz tabulka 9): bateriové články, jejich taby, mosazné spojovače (+ výstupní kontakty), elektronika (Slave BMS a součástky na silové DPS) a přechodový odpor vznikající vlivem nedokonalého spojení mosazných spojovačů a tabů článků. Pro výpočet ztrátového výkonu bylo použito známého vzorce (2), do nějž byla za proud ($I_{ef} [A]$) dosazena efektivní očekávaná hodnota proudu tekoucí daným prvkem a za odpor ($R [\Omega]$) elektrický odpor daného prvku.

$$P_Z = R \cdot I_{ef}^2 \text{ [W]} \quad (2)$$

Prvek	R [mΩ]	I [A]	P _Z /ks [W]	P _Z [W]
Článek	2,513	30,206	2,293	82,55
Taby	0,310	30,206	0,282	20,34
Mosazné spojovače	cca 0,022	60,412	—	12,00
Elektronika	—	—	—	3,00
Přechodový odpor	—	—	—	24,00
Celkem				141,89 W
+ 10% rezerva				156,08 W
8 segmentů				1250,00 W

Tabulka 9: Výpočet ztrátového výkonu jednotlivých komponent segmentu

Vnitřní odpor článku byl zkoumán měřením uvedeným v kapitole 2, v rámci kterého bylo zjištěno, že je vnitřní odpor článku 1,57 mΩ, ale maximální změřená hodnota vnitřního odporu článku se pohybovala okolo 2,5 mΩ, proto je nutné v rámci dimenzování uvažovat maximální, nikoliv průměrnou hodnotu vnitřního odporu.

Odpor tabů článku byl měřen na zkušební vzorku, který zdarma poskytla firma MELASTA společně se zakoupenými články. Měření bylo prováděno čtyřvodičovou metodou měření odporu za pomoci přesného milivoltmetru na více než čtyřech metrech materiálu průřezem odpovídajícího tabům článku. Díky tomu bylo měření podstatně zpřesněno a na základě tohoto měření bylo zjištěno, že elektrický odpor tabu článku o délce 35 mm je 0,241 mΩ.

Získaná hodnota elektrického odporu odpovídá pokojové teplotě, ale je zapotřebí počítat s tím, že vlivem průchodu proudu dojde k ohřevu tabu a tím k nárůstu jeho elektrického odporu a tudíž i ztrátového výkonu. Proto bylo zapotřebí při výpočtu ztrátového výkonu uvažovat s elektrickým odporem ohřátého tabu. Tato hodnota byla získána dle známého vztahu (3), kde R_0 [Ω] je odpor tabu při pokojové teplotě, α [°C⁻¹] je teplotní součinitel elektrického odporu a ΔT [°C] je rozdíl teploty, pro kterou je elektrický odpor počítán, a teploty okolí.

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \text{ [Ω]} \quad (3)$$

Elektrický odpor mosazných spojovačů byl získán výpočtem pomocí známého vzorce (4), kde ρ [Ω/m] je měrný odpor, l [m] je délka spojovače a S [m²] je průřez spojovače. Jelikož jsou v segmentu použity 3 typy mosazných spojovačů, byl pro výpočet ztrátového výkonu použit spojovač s nejvyšším elektrickým odporem. K tomu byla připočítána určitá rezerva i pro kontakty na vývodu segmentu. I v případě mosazných spojovačů muselo být uvažováno se změnou elektrického odporu vlivem ohřevu spojovačů a i zde byl aplikován vzorec 3.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \text{ [Ω]} \quad (4)$$

Určování ztrátového výkonu elektroniky, kterou segment obsahuje bylo provedeno pomocí kvalifikovaného odhadu, na základě něhož bylo stanoveno, že Slave BMS bude produkovat ztrátový výkon o velikosti 2 W a zbylý 1 W bude stanoven jako rezerva a pro součástky nacházející se na Silové DPS.

Posledním prvkem tvořící ztrátový výkon segmentu je očekávaný přechodový odpor vzniklý v důsledku nedokonalého vodivého spojení mezi taby článků a mosaznými spojovacími. Tento přechodový odpor je velice složité určit, a proto byl taktéž určen kvalifikovaným odhadem jako dvojnásobek ztrátového výkonu mosazných spojovačů.

Na základě výše uvedených výpočtů byla k celkovému ztrátovému výkonu připočítána ještě 10% rezerva, na základě čehož vyšlo, že během provozu vznikne na všech 8 segmentech ztrátový výkon o velikosti 1,25 kW. Nemusí to nutně znamenat, že musí být do baterie dodáno takové množství vzduchu o takové teplotě, aby byl pokryt celý ztrátový výkon 1,25 kW, protože se připouští určité oteplení baterie (konečná teplota nesmí nikdy přesáhnout 60 °C).

Je ale důležité vzít v úvahu fakt, že okolní teplota vzduchu bude v létě na asfaltovém povrchu trati dosahovat 40 °C i více, proto je nutné s touto hodnotou při dimenzování ventilátorů počítat. Dále je nutné počítat s tím, že není žádoucí chladit články, které budou mít na začátku vybíjení nízkou teplotu, vzduchem o teplotě 40 °C, proto by mělo být možné ventilátory regulovat.

Vhodné by bylo definovat například 3 stavy ventilátorů (vypnuto, poloviční výkon, maximální výkon), které budou voleny na základě porovnání teploty okolí a teploty baterie - ventilátory musí být ovládány pomocí Master BMS, který musí navíc vyhodnocovat ještě teplotu okolí, a to ideálně v blízkosti místa vstupu vzduchu do baterie.

Zároveň se tím otevírá otázka ohledně spotřeby ventilátorů. Díky možnosti ventilátory vypínat i v průběhu jízdy (za předpokladu nepřekročení kritických teplot baterie) je možné ušetřit energii potřebnou na napájení ventilátorů.

Na druhou stranu, i za předpokladu, že bude vybrán ventilátor o výkonu 10 W (což je relativně výkonný ventilátor), bude celková spotřeba například 24 ventilátorů při délce trvání závodu 30 min přesně 120 Wh, což je z celkové energie trakční baterie 7460 Wh jen 1,6 % (viz podkapitola 4.4.7). Samozřejmě i v případě takto nízké spotřeby ventilátorů je vhodné mít určitou rezervu energie v trakční baterii tak, jako je tomu v případě tohoto návrhu.

Pro výpočet ztrátového výkonu doprovodné elektroniky nacházející se v odděleném prostoru od segmentů musely být brány v úvahu následující komponenty: pojistka, stykače a elektronika (Master BMS včetně DC/DC zdroje a přednabíjecího obvodu, napěťový indikátor, hlídač izolačního stavu, kabely) - viz tabulka 10.

Prvek	R [mΩ]	I [A]	P _Z /ks [W]	P _Z [W]
Pojistka	0,748	60,412	2,730	—
Stykače	0,254	60,412	0,927	1,854
Cívka stykače	—	—	—	1,7
Elektronika	—	—	—	10
Celkem				16,28 W
+ 10% rezerva				18 W

Tabulka 10: Výpočet ztrátového výkonu jednotlivých komponent elektroniky nacházející se v kontejneru trakční baterie

Ztrátový výkon pojistky a stykačů byl vypočítán dle vzorce 2 a 3. Určení ztrátového výkonu elektroniky a použité kabeláže bylo provedeno opět kvalifikovaným odhadem. Z tabulky uvedené výše vyplývá, že je ztrátový výkon relativně nízký a bude-li brán v úvahu i fakt, že se teplota, kterou nesmí jednotlivé komponenty překročit, pohybuje až okolo 80-100 °C, nebude zapotřebí tuto část baterie chladit pomocí ventilátorů.

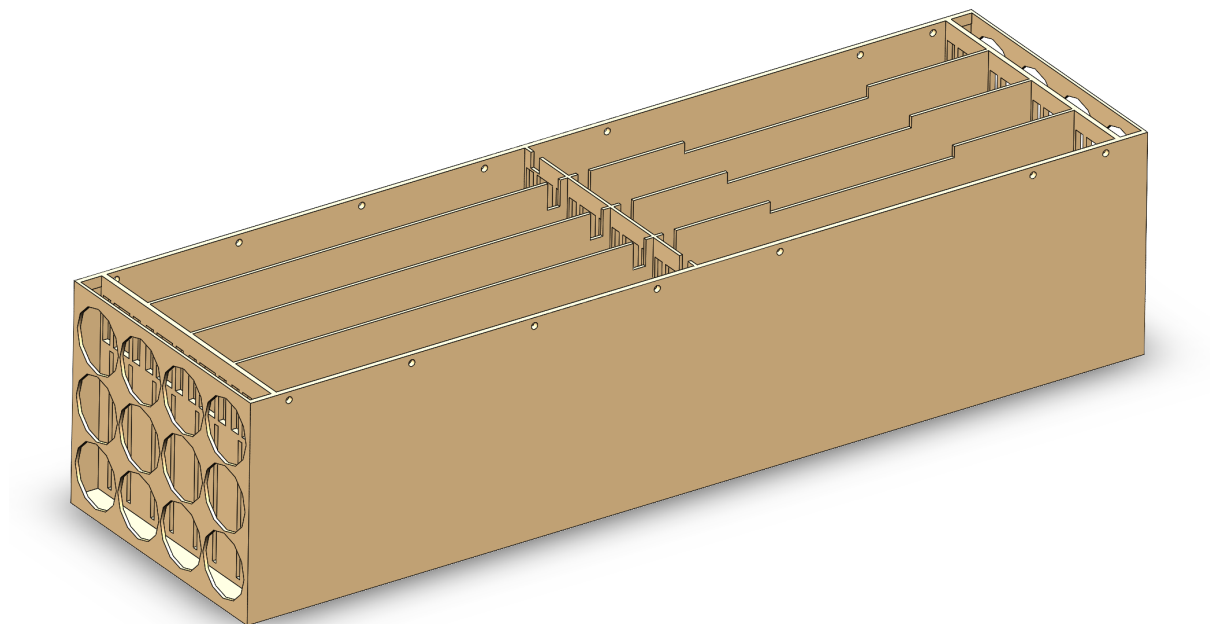
Jako naprosto dostačující chlazení se jeví vytvoření otvorů ve víku kontejneru trakční baterie v takových místech, aby mohl teplý vzduch volně unikat z prostoru kontejneru. Případně se dá uvažovat s tím, že v prostoru, kde se budou výše uvedené komponenty nacházet, bude docházet k drobné konvekci vzduchu vlivem pohybu vozidla.

4.4.7 Výsledné uspořádání trakční baterie

Kontejner trakční baterie, ve kterém se budou nacházet veškeré komponenty, které trakční baterii náleží, bude rozdělen do dvou částí. Obě části kontejneru včetně vík (o kterých bude pojednááno níže) budou vyrobeny z kompozitního materiálu, jehož výztuží budou aramidová vlákna (tkanina) a výplň pryskyřice a bude vyráběn na fakultě strojní (použitý materiál zajišťuje nehořlavost a elektrickou nevodivost kontejneru).

V první (hlavní) části kontejneru se bude nacházet všech 8 segmentů, které bude baterie obsahovat (viz obrázek 42). Jednotlivé segmenty budou od sebe v této části kontejneru odděleny vnitřními stěnami kontejneru (přepážkami), které budou sahát až k víku kontejneru. Přepážky, které budou mezi segmenty umístěny za sebou ve směru jízdy, budou obsahovat otvory, aby byl zajištěn tok vzduchu napříč celou baterií. V místech, kde budou segmenty spojené pomocí MP (viz podkapitola 4.3), bude mít přepážka ve své horní části na patřičném místě výřez.

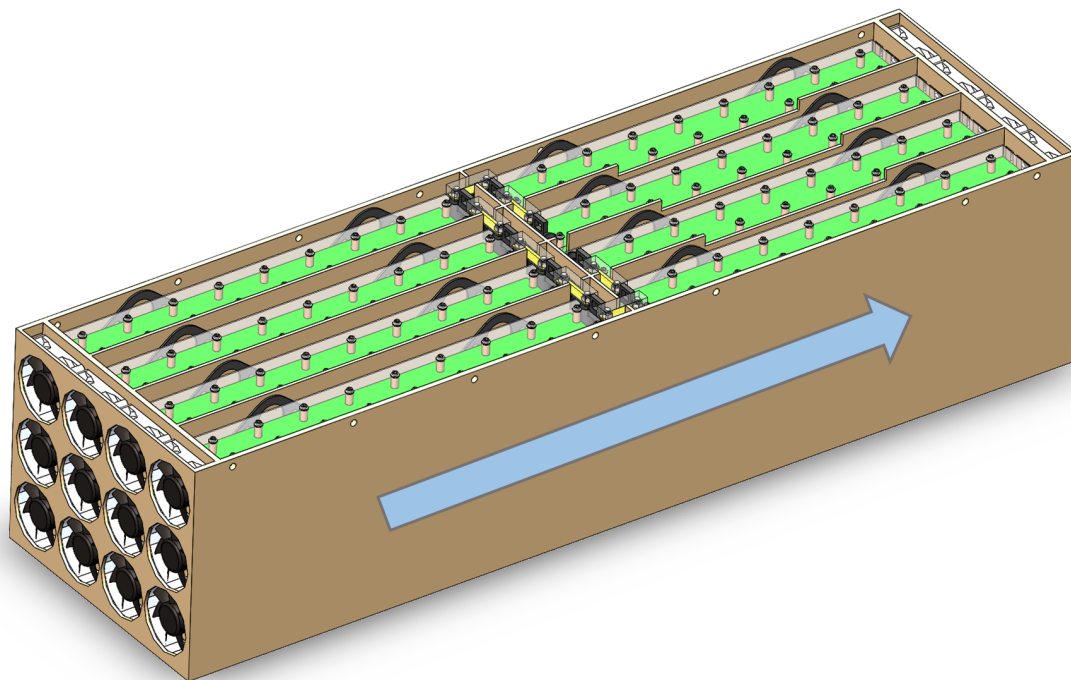
Tím budou přepážky tvořit pevnou bariéru, která (obdobně jako je tomu u segmentového koše) zamezuje volnému pohybu segmentů v baterii a jasně definuje jejich pozici v kontejneru, čímž se zvyšuje mechanická odolnost celé baterie. Tloušťky vnitřních stěn (3 mm), vnějších stěn (5 mm) a dna kontejneru (8 mm) vychází z dimenzování kontejneru trakční baterie pro baterii navrženou v bakalářské práci (viz [1]). Na základě rozměrů vnitřních stěn kontejneru byl dokončen návrh MP (především byla zafixována délka spojovacího mosazného plechu), čímž získala hlavní část trakční baterie svoji konečnou podobu.



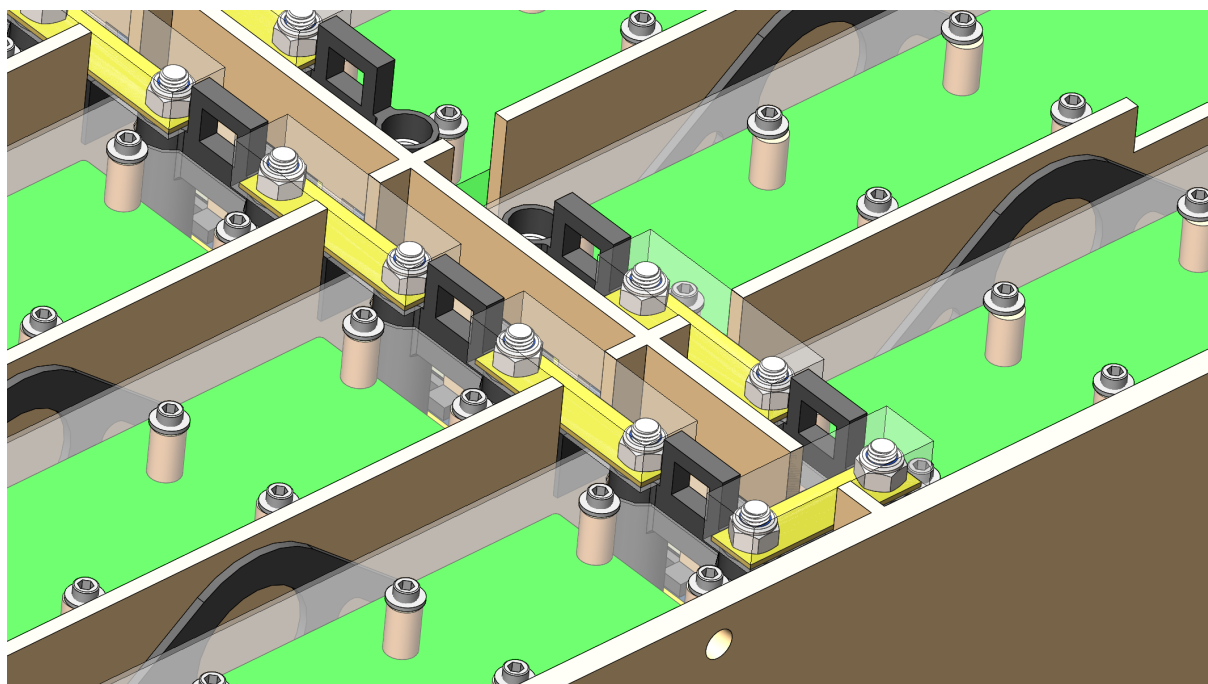
Obrázek 42: Hlavní část kontejneru trakční baterie sloužící k uložení segmentů

Na obrázku 43 je možné vidět hlavní část kontejneru trakční baterie obsahující všech 8 segmentů (jejich přesné rozmístění viz příloha B). Segmenty jsou umístěny tak, aby byly jejich vývody co nejbližší u sebe a MP tak byly co nejkratší, čímž jednak vzniká snazší a elegantnější připojení, ale také se výrazně zmenšuje velikost proudové smyčky. Detail spojení segmentů pomocí MP viz obrázek 44. Ze dvou výše zmíněných obrázků je patrné, že jsou všechny segmenty spojeny pomocí MP do série a dva vývody dvou prostředních segmentů jsou ponechány rozpojeny. Důvodem je zamezení zkratování celé baterie a také jsou tyto dva volné vývody zároveň místem, odkud bude vyvedeno napětí k pojistce a stykačům a dále ven z baterie.

Vyvedení napětí z krajních segmentů bude realizováno obdobně jako je tomu u MP - výše zmíněný kontakt Plug S5N (viz obrázek 22), který MP obsahují, bude přišroubován ke kabelu pomocí kabelového oka a pojistné matice a kabely budou dále vedeny do prostoru doprovodné elektroniky, kde bude kabel představující kladný pól baterie připojen opět pomocí kabelového oka k pojistce a kabel představující záporný pól baterie bude připojen k jednomu ze stykačů (viz obrázek 10).



Obrázek 43: Hlavní část kontejneru trakční baterie s uloženými segmenty a ventilátory s označením směru toku vzduchu

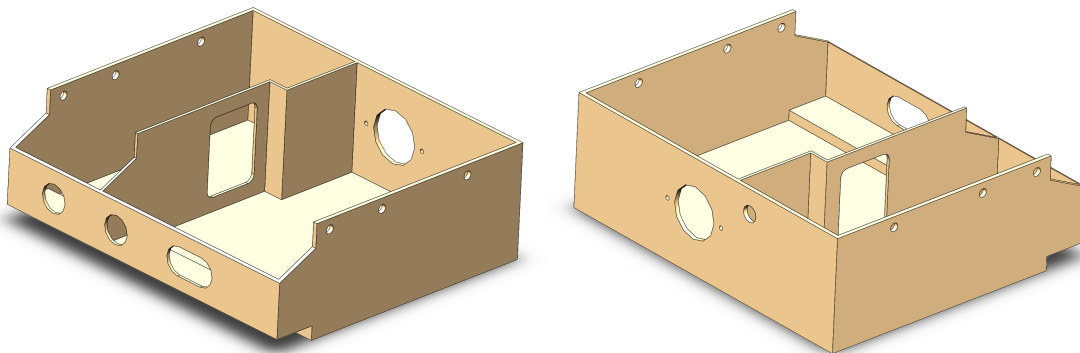


Obrázek 44: Detail spojení jednotlivých segmentů pomocí MP

Na výše uvedeném obrázku 43 je možné dále vidět ventilátory zajišťující chlazení všech segmentů trakční baterie. Ventilátory, které jsou umístěné v levé části obrázku, jsou ventilátory přední a zajišťují nasávání vzduchu do baterie a v pravé části obrázku se nacházejí ventilátory zadní a ty slouží k vysávání vzduchu z baterie, čímž je zajištěn nepřetržitý tok vzduchu jedním směrem skrz celou baterii.

Je zapotřebí zmínit, že návrh a výběr vhodných ventilátorů pro chlazení trakční baterie zajistí kolegové z fakulty strojní, kteří o parametrech a počtu ventilátorů rozhodnou na základě výpočtů ztrátového výkonu a tepelných simulací, které bude zapotřebí provést. Protože návrh chlazení baterie ještě není zcela dokončen, pojednávají výše zmíněné obrázky jen o přibližném rozvržení předběžně vytipovaných ventilátorů. Zároveň také není pevně stanoven ani počet ventilátorů a jedna z variant návrhu počítá s nižším počtem ventilátorů z důvodu snížení spotřeby elektrické energie a následně vytvoření tunelu, který vzduch rozvede do celého čela baterie.

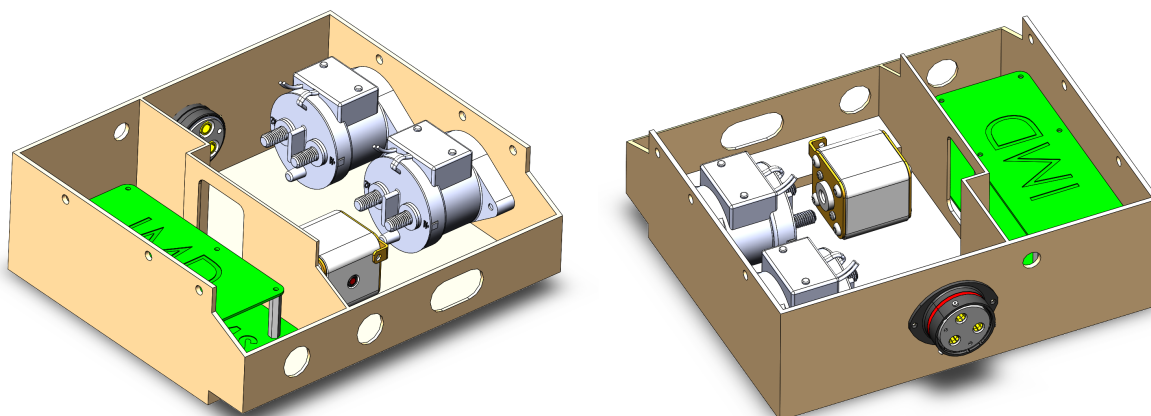
Druhou částí kontejneru je box pro doprovodnou elektroniku, který se bude nacházet na hlavní části kontejneru v jeho zadní části ve směru jízdy a bude do něj částečně zapuštěn (viz obrázek 45). Box pro doprovodnou elektroniku bude rozdělen na dvě části, z nichž v první se bude nacházet slaboproudá elektronika (hlídač izolačního stavu, Master BMS, napěťový indikátor a CAN konektor) a ve druhé části se budou nacházet silové obvody (pojistka, oba stykače, výkonový konektor). Oba prostory budou odděleny přepážkou, ve které bude otvor pro kabelovou průchodku pro případnou kabeláž. V zadní části boxu se budou nacházet dva otvory pro konektory a v přední části boxu bude přepážka, ve které bude několik otvorů opět pro kabelové průchodky, skrze které budou přivedeny silové kabely a vývody z obvodů Slave BMS.



Obrázek 45: Druhá část kontejneru trakční baterie sloužící k uložení doprovodné elektroniky

Na obrázku 46 je znázorněn box se všemi komponenty doprovodné elektroniky umístěnými tak, jak to nejlépe umožnil vymezený prostor. Zde je opět zapotřebí zmínit, že umístění komponent uvnitř boxu a jeho podoba ještě není finální a stále dochází k úpravám a optimalizování. To je způsobeno zejména zpožděním návrhu obvodů Master BMS a výběrem konektorů vedoucích z baterie (návrh ani jedné z těchto komponent není v rozsahu této práce), v důsledku toho není ani dokončen návrh vedení kabeláže uvnitř trakční baterie, ani její konkrétní vytipování.

Silový konektor, který slouží k připojení baterie do trakčního systému vozidla, bude použit od společnosti Deutsch, a to konkrétně model ASHD024-34220SN-016. Tento konektor je přímo určen pro autosport, je hojně používán i jinými studentskými týmy a byl tak společně se svými vlastnostmi jednoznačnou volbou, a to i navzdory jeho ceně (detailní parametry viz [22]). Dále je důležité zmínit, že v celém trakčním systému vozidla budou pro připojení motorů, baterie a měniče použity konektory výhradně z této výrobní série. Komunikační konektor, který zajišťuje připojení baterie na sběrnici CAN vozidla, bude použit od společnosti Binder (konkrétně 99 0413 00 05) - viz [23].

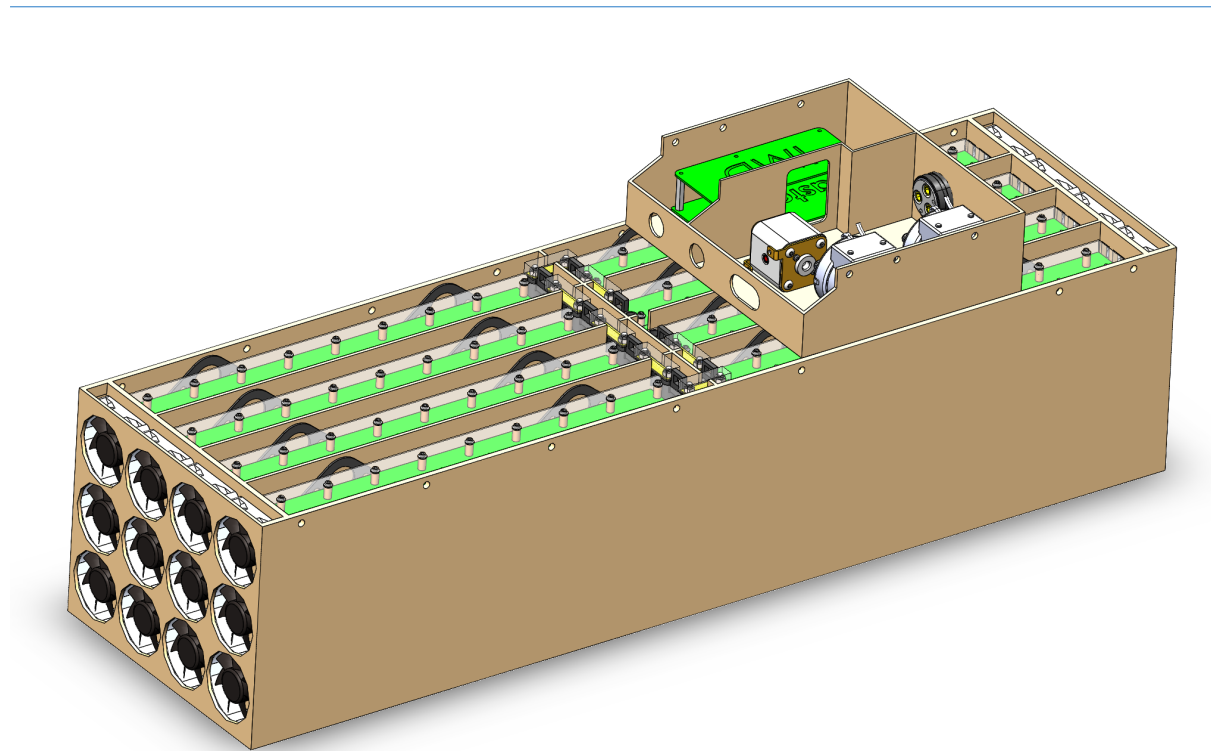


Obrázek 46: Box s umístěnou doprovodnou elektronikou

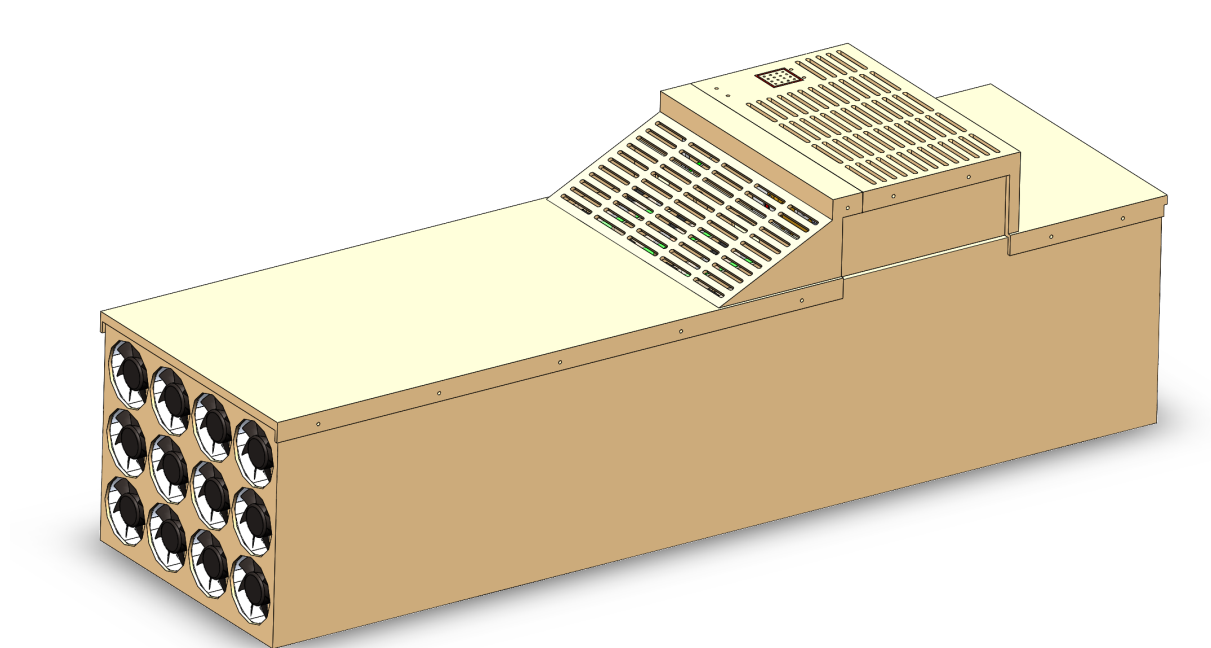
Na obrázku 47 je možné vidět navrženou baterii. Box obsahující doprovodnou elektroniku je na hlavní části kontejneru umístěn v drážkách, které zamezují jeho pohybu a jeho konečné ukotvení zajistí víka kontejneru. Víka budou rozdělena na přední a zadní část, jak znázorňují obrázky 48 a 49. V hlavní části kontejneru baterie a v boxu pro doprovodnou elektroniku budou na několika místech umístěny lisovací matice, pomocí kterých budou obě víka ke kontejneru přišroubována.

Přední část víka má zkosenou stranu, čímž pod víkem vznikl prostor pro vedení kabeláže ze segmentů do boxu s doprovodnou elektronikou a zároveň se na zkosené straně víka nacházejí otvory pro ventilaci. Tyto otvory jsou na straně ve směru jízdy a zajišťují tak spolu s otvory pro ventilaci v zadní části víka přirozenou konvekci vzduchu v boxu s doprovodnou elektronikou (zde se předpokládá tok vzduchu vlivem pohybu vozidla).

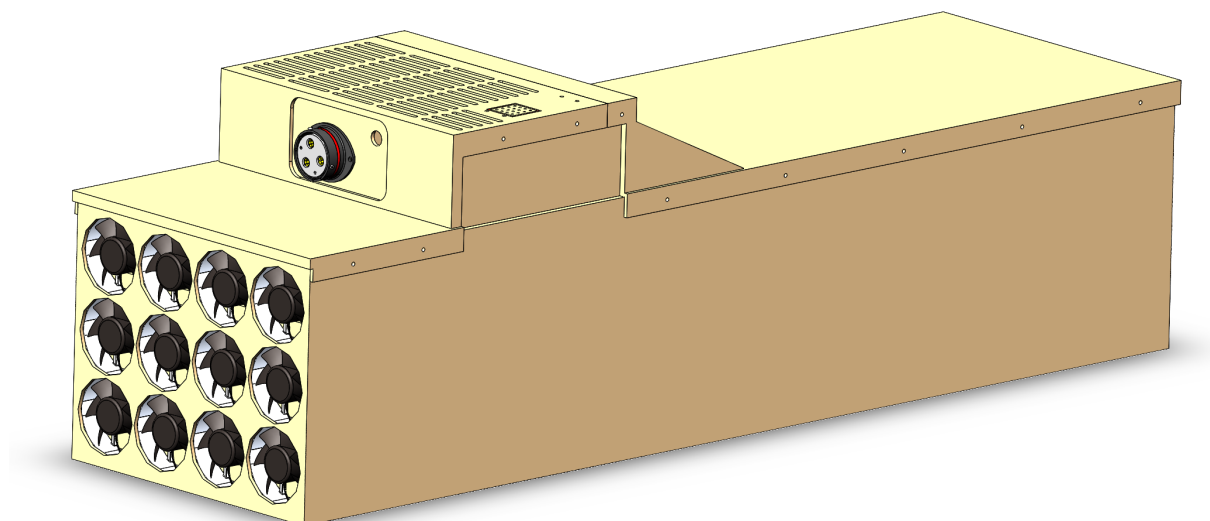
Víka musela být rozdělena do dvou částí, aby bylo vůbec možné baterii zkompletovat. K zadní části víka je přimontován napěťový indikátor, který tak bude na dostatečně přístupném a viditelném místě. Celý kontejner se nachází v monokokové konstrukci vozidla a tím je celá trakční baterie chráněna proti dešti a vodě, která by se mohla do baterie dostat vlivem pohybu vozidla po mokré vozovce.



Obrázek 47: Trakční baterie elektroformule s umístěnou doprovodnou elektronikou



Obrázek 48: Uzavřená trakční baterie elektroformule



Obrázek 49: Uzavřená trakční baterie elektroformule

Za zmínku také stojí, jakým způsobem bude celá trakční baterie kompletována, protože i to je v pravidlech soutěže definováno, aby byla vždy zajištěna bezpečnost při práci s trakční baterií.

- **Krok č. 1** → Do prázdné hlavní části kontejneru trakční baterie umístit a upevnit všechny ventilátory, které budou sloužit k chlazení segmentů.
- **Krok č. 2** → Umístit do hlavní části kontejneru trakční baterie všech 8 zkompletovaných segmentů dle přílohy B.
- **Krok č. 3** → Na hlavní část kontejneru trakční baterie umístit box s veškerou doprovodnou elektronikou, kterou baterie obsahuje.
- **Krok č. 4** → Připojit k doprovodné elektronice veškeré kabely jdoucí ze všech Slave BMS a z ventilátorů.
- **Krok č. 5** → Umístit na kontejner trakční baterie zadní část víka kontejneru s namontovaným napěťovým indikátorem.
- **Krok č. 6** → Připojit napěťový indikátor.
- **Krok č. 7** → Zkontrolovat, zda jsou všechny vodiče zapojené a jestli jsou zapojené správně.
- **Krok č. 8** → Přišroubovat zadní část víka ke kontejneru.
- **Krok č. 9** → Připojit všechny segmenty pomocí MP a ujistit se, že jsou segmenty propojeny správně.
- **Krok č. 10** → Po poslední kontrole trakční baterie připojit silové vývody segmentů k doprovodné elektronice.
- **Krok č. 11** → Umístit na kontejner přední část víka a víko ke kontejneru přišroubovat.

Nejdůležitějšími kroky celé kompletace trakční baterie jsou kroky 9 a 10, protože v tu chvíli je už baterie trvale pod vysokým životu nebezpečným napětím. Propojení jednotlivých segmentů pomocí MP a jejich připojení na výstup baterie je záměrně provedeno až těsně před uzavřením druhého víka baterie, a to z důvodu bezpečnosti.

Jednak není vhodné manipulovat a pracovat s otevřenou trakční baterií při jejím plném napětí, ale také je tento požadavek definován pravidly soutěže. V pravidlech je totiž jednoznačně stanoveno, že po otevření víka kontejneru musí bezprostředně následovat odstranění MP a odpojení segmentů od výstupu trakční baterie. To je ochrana v případě selhání řídicí elektroniky, která by tak mohla například neočekávaně sepnout hlavní stykače.

Z tohoto důvodu byl návrh trakční baterie proveden tak, jak je uvedeno výše - elektronika se nachází nad segmenty v samostatném boxu, víka jsou dvě, aby bylo možné definovat pořadí propojení kabelů dle potřeby apod.

4.5 Shrnutí návrhu trakční baterie studentské elektroformule

Na závěr je zapotřebí shrnout nově provedený návrh trakční baterie studentské elektroformule, o kterém tato práce pojednávala a porovnat ho s předchozím návrhem trakční baterie, který byl již několikrát zmiňován. Tabulka 11 shrnuje základní elektrické a mechanické parametry nově navržené trakční baterie studentské elektroformule (v tabulce označována jako "Baterie_v2") a porovnává je s parametry trakční baterie navržené v bakalářské práci (v tabulce označována jako "Baterie_v1" - viz [1]).

	Baterie_v2	Baterie_v1
Použitý článek	Li-Po – SLPBA942126	Li-Ion – INR21700-30T
Konfigurace baterie	144S2P	120S5P
Počet segmentů	8	8
Počet článků	288	600
Jmenovitá energie [Wh]	7459,2	6480
Jmenovitá kapacita [Ah]	14	15
Maximální napětí [V]	600	504
Jmenovité napětí [V]	532,8	432
Minimální napětí [V]	432	300
Max trvalý odebíraný proud [A]	210	175
Max špičkový odebíraný proud [A]	300	—
Maximální trvalý výkon [kW]	90,72-126	52,5-88,2
Maximální špičkový výkon [kW]	129,6-180	—
Ztrátový výkon článků [W]	413	1200
Rozměry [mm]	864x255x271	984x330x178
Předpokládaná hmotnost [kg]	57,3	60
Cena článků [Kč]	251.436	165.000

Tabulka 11: Parametry navržené trakční baterie porovnané s parametry trakční baterie navržené v bakalářské práci (viz [1])

Zeleně jsou v tabulce označeny ty parametry, ve kterých je daná baterie v porovnání s tou druhou lepší (pro červeně označené parametry to platí naopak). Jak je z tabulky uvedené výše patrné, tak nově navržená trakční baterie dosahuje oproti trakční baterii navržené v bakalářské práci lepších výsledků téměř ve všech elektrických parametrech (má vyšší hladinu napětí, vyšší energii, dokáže dodávat vyšší výkon,...) - výjimku tvoří jmenovitá kapacita baterie. Za zmínku stojí především výrazně nižší ztrátový výkon, který budou bateriové články produkovat, což je velmi významná úspora z hlediska chlazení baterie.

I když mají obě navržené baterie rozdílné rozměry a je tak těžké jejich velikost porovnat, je ale možné říct, že nově navržená baterie svým tvarem hůře vyplňuje daný prostor ve vozidle a také má celkově vyšší objem. Na druhou stranu má nově navržená baterie nižší celkovou hmotnost, i když je rozdíl oproti původní baterii pouze o 4,5 % (hmotnost je stanovena dostatečně přesně, ale jelikož zatím ani jedna baterie nebyla vyrobena, není tak velikost konečná, proto je v tabulce uveden přívlástek "předpokládaná").

Co se týče ceny, tak ta je v tabulce výše uvedená jen pro články samotné, bez zahrnutí dopravy a případné slevy pro studentské týmy, aby měl čtenář představu o tom, jak drahé jsou Li-Po články, a také, protože v tuto chvíli není možné určit ani přibližnou cenu obou baterií, jelikož ani jedna z navržených baterií nebyla dosud zkonstruována. Jak je již na první pohled patrné, tak cena vybraných Li-Po článků potřebných pro stavbu baterie je vyšší přibližně o 86.000 Kč než cena vybraných článků Li-Ion potřebných pro stavbu té samé baterie. To je dáno především tím, že konkrétně u výše zmiňovaných článků Li-Ion platí zákazník za 1 Wh energie 25,5 Kč, zatímco u výše zmiňovaných článků Li-Po platí 32,4 Kč za 1 Wh.

Z výše tří zmíněných odstavců je možné usuzovat, že nově navržená trakční baterie sice nepřináší žádné výrazné zlepšení z hlediska hmotnosti nebo velikosti, ale zato má nově navržená baterie daleko lepší elektrické parametry, které především rozhodují o schopnosti vozidla konkurovat jiným studentským týmům.

Na základě výše uvedeného shrnutí parametrů obou navržených trakčních baterií je možné konstatovat, že je nově navržená baterie skutečně novým vývojovým stupněm trakční baterie studentské elektroformule a je tak možné mluvit o nové generaci a díky zkušenostem získaným při návrhu má nově navržená také vyšší stupeň optimalizace nejenom z hlediska elektrických, ale také z hlediska mechanických parametrů (například způsob montáže a modularita). Na základě těchto tvrzení je možné vyhodnotit nově provedený návrh jako nanejvýš přínosný pro celkový budoucí vývoj vozidla a to i s ohledem na vyšší cenu celé trakční baterie i na časové zpoždění, které vývojem nové trakční baterie vzniklo.

Je nutné ještě zmínit, že je trakční baterie vozidla obecně velice složitým a komplexním systémem, který je přímo či nepřímo propojen téměř se všemi komponentami vozidla a jeho návrh je tím pádem velice náročný. Aby se dalo hovořit o tom, že je návrh trakční baterie skutečně dokončen a je možné naplno spustit výrobu, musí již být dokončen návrh i všech ostatních komponent vozidla a přitom musí být tyto návrhy navzájem provázané, aby mohl systém fungovat jako celek.

Protože ale stále není dokončen návrh některých komponent vozidla, je nutné počítat s tím, že se bude výsledné mechanické nebo z části i elektrické uspořádání trakční baterie lehce měnit tak, jako tomu bylo v průběhu celého vývoje vozidla (to se ale nevztahuje například na segmenty baterie, které už svoji finální podobu mají).

5 Prototypová výroba trakční baterie

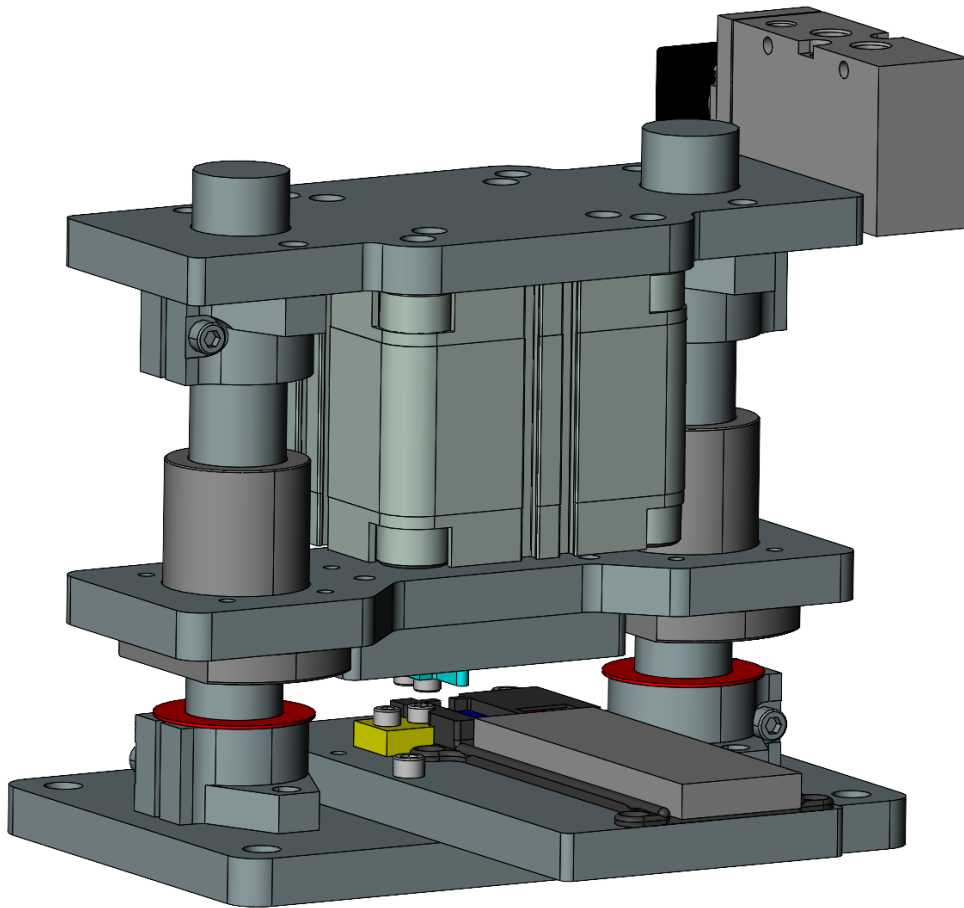
Na základě návrhu segmentu trakční baterie popsaného v podkapitole 4.3 byla spuštěna prototypová výroba jednoho segmentu trakční baterie, jejíž cílem bylo otestovat technologii výroby segmentů. Zároveň byl během prototypové výroby odladěn postup kompletace segmentů, který byl popsán v kapitole 4.3.7 tak, aby odpovídal skutečnosti.

Prototypová výroba zahrnovala vyrobení všech klíčových mechanických komponent segmentu tak, aby mohl být segment sestaven - jednalo se o tyto komponenty: segmentový koš, podpěra, distanční sloupky a šablony desek plošných spojů silové DPS a slave BMS (tyto dvě desky byly vyrobeny z plexiskla pomocí laseru). Pro otestování technologie výroby segmentu a jeho kompletace nebylo zapotřebí sestavit segment ze všech komponent, které obsahuje, proto zbylé díly nebyly vyráběny.

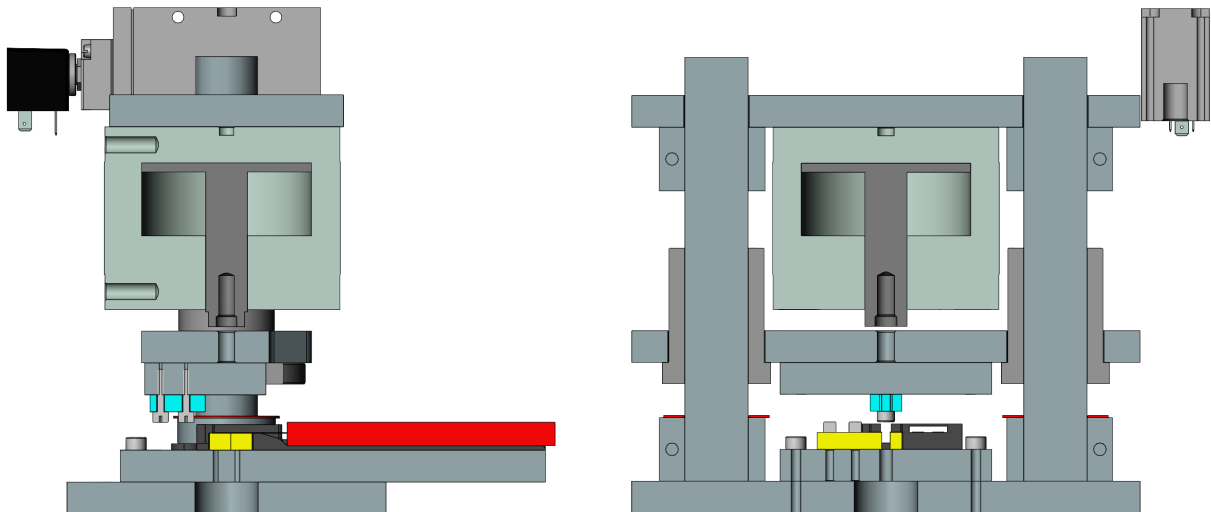
Při výrobě musel být brán zřetel především na tolerance, které při výrobě vznikají (například u 3D tisku) a tyto tolerance musely být odladěny a zavedeny do návrhu. Dále muselo být během prototypové výroby ověřeno, jestli je možné vyřezat závit do vytištěného výrobku na 3D tiskárně z materiálu PA12, a dále ověřit, jakou má tento závit pevnost.

V rámci prototypové výroby byly také vyrobeny přípravky pro vystřihování otvorů do tabů článků (viz obrázek 50) a také přípravky pro ohýbání mosazných spojovačů (viz obrázek 52). Oba tyto přípravky byly navrženy a vyrobeny kolegy na fakultě strojní, kteří se na vývoji vozidla podílejí.

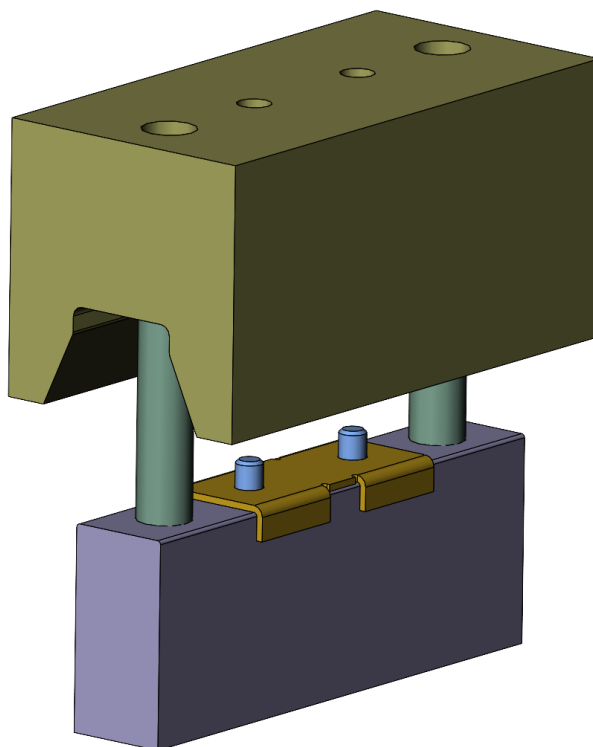
Mosazné spojovače vyřezané na laseru budou umístěny do formy a pomocí hydraulického lisu budou ohnuty do patřičného tvaru. Na obdobném principu bude fungovat vystřihování otvorů do tabů článků - pomocí hydraulického lisu se speciálním nožem se na patřičném místě tabu vystřihne otvor. Článek musí být v přípravku velmi dobře zafixovaný, aby nedošlo k jeho poškození (například vytržení tabu z těla článku), proto musí být článek umístěn do formy. Na obrázku 51 je poté vidět přípravek pro vystřihování otvorů do tabů článků v řezech, kde je světle modrou barvou znázorněn speciálně tvarovaný nůž a tmavě šedou barvou forma, ve které je článek umístěn.



Obrázek 50: Přípravek pro stříhání otvorů do tabů článků



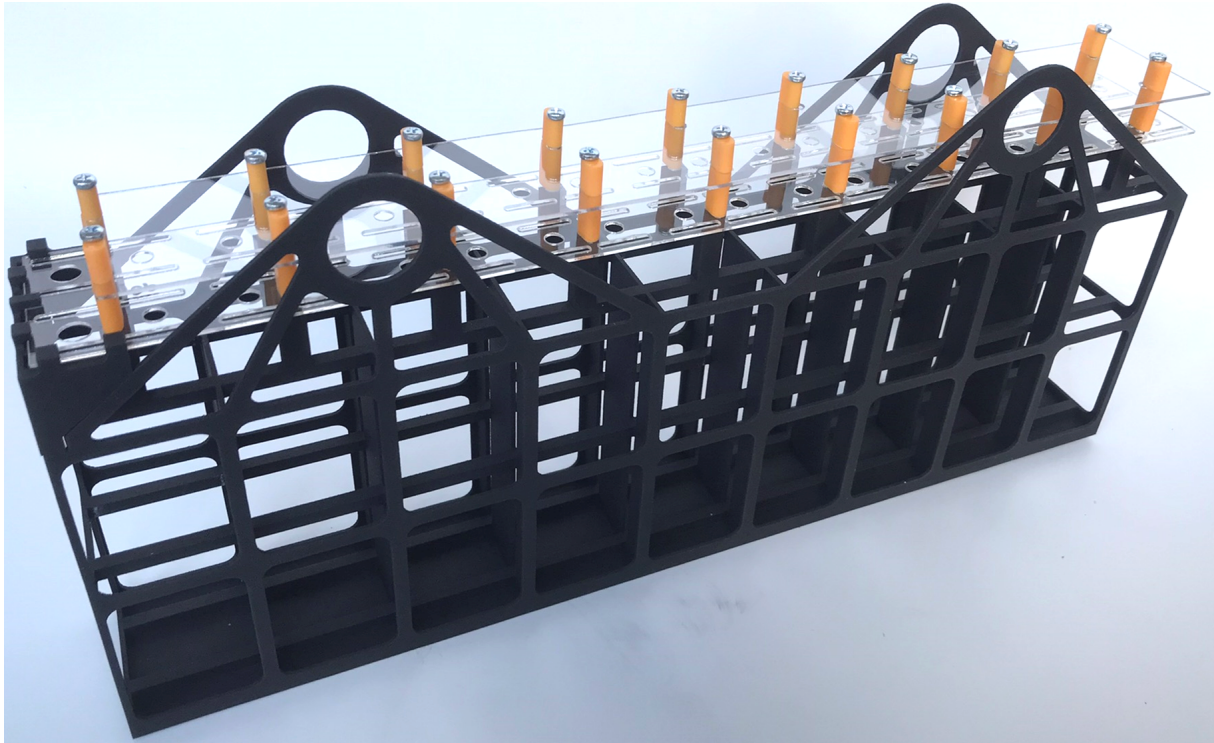
Obrázek 51: Přípravek pro stříhání otvorů do tabů článků - pohled v řezech



Obrázek 52: Přípravek pro ohýbání mosazných spojovačů

Na obrázcích 53-56 je možné vidět sestavený prototyp jednoho segmentu trakční baterie. Při fyzickém kompletování segmentu baterie byl potvrzen fakt, že bez odnímatelného dna by nebylo možné přes taby článků nasadit silovou DPS, a že je nezbytné jednotlivé články postupně nasouvat do segmentového koše ze spodní strany. Dále bylo potvrzeno, že je nutné, aby alespoň první řada distančních sloupků obsahovala kolík pro vymezení jejich pozice při montáži, jinak je velice obtížné segment zkompletovat. Samozřejmě se také potvrdilo, že je nutné klást veliký důraz na započítávání tolerancí, jež při výrobě vznikají.

Po naplnění segmentového koše všemi 36 články bylo měřením zjištěno, že má takto vyplněný segmentový koš hmotnost **5010 g**, přičemž 3D model totožné sestavy má hmotnost **5034 g**. Z toho lze usuzovat relativně vysokou přesnost odhadu výsledné hmotnosti jednoho segmentu i celé trakční baterie. Tato sestava byla také testována mechanicky a bylo ověřeno, že je segmentový koš po mechanické stránce dostatečně dimenzován, aby udržel zátěž, pro kterou byl určen. Na základě závěrů získaných z prototypové výroby jednoho segmentu je možné prohlásit, že je návrh segmentu odladěn a je možné započít výrobu jednoho plně funkčního segmentu trakční baterie.



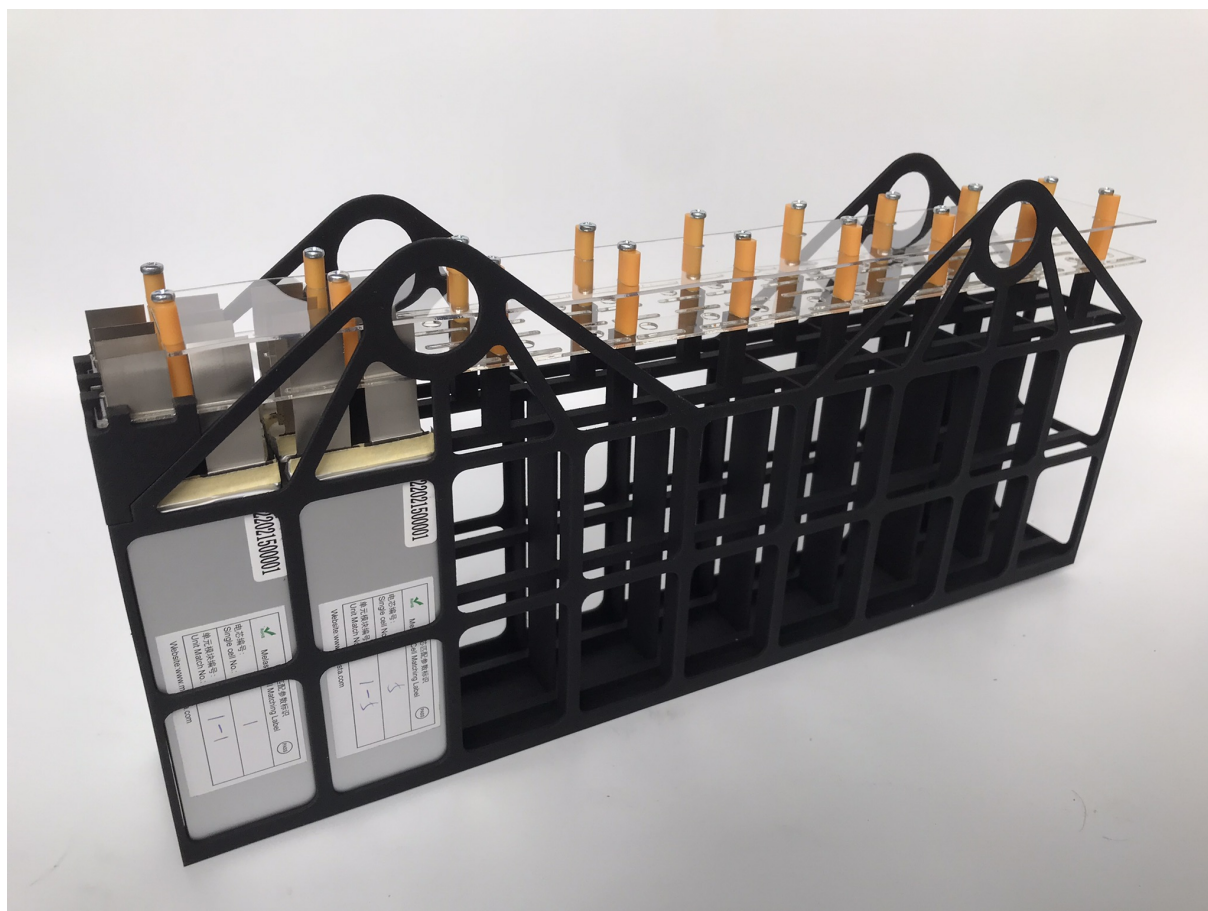
Obrázek 53: Segmentový koš obsahující šablony silové DPS a slave BMS, obě řady distančních sloupků a podpěru



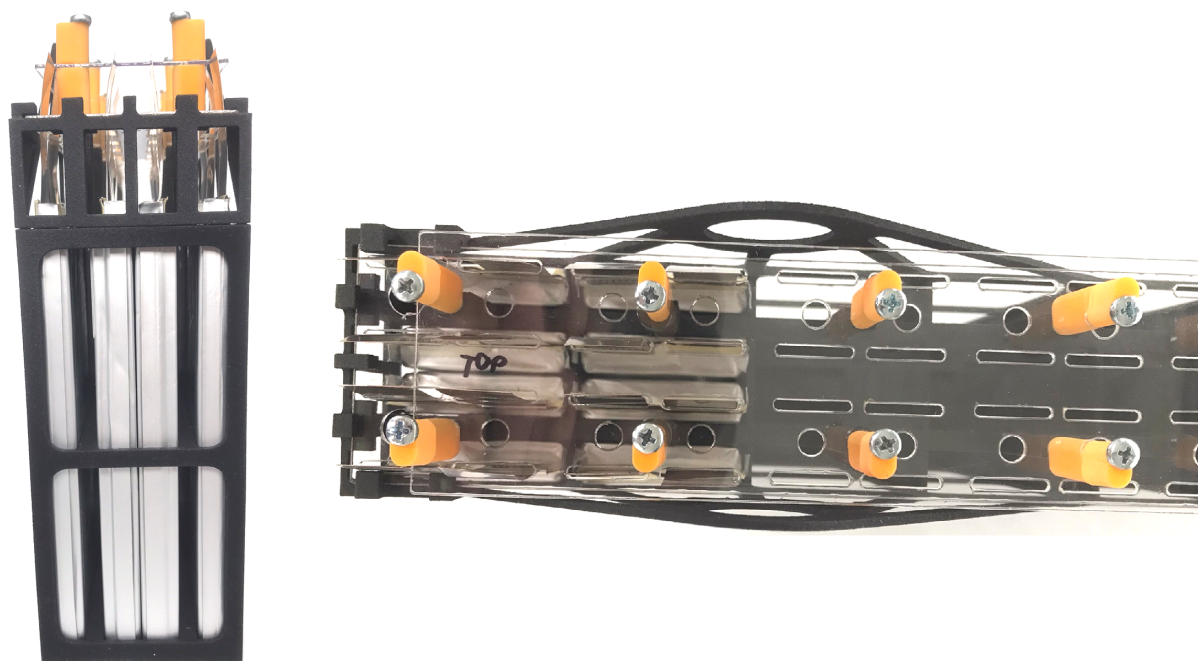
Obrázek 54: Segmentový koš obsahující všech 36 článků



Obrázek 55: Segmentový koš obsahující všech 36 článků - znázornění 5mm mezery pro chlazení



Obrázek 56: Segmentový koš obsahující 8 článků a šablony desek plošných spojů



Obrázek 57: Segmentový koš obsahující 8 článků a šablony desek plošných spojů - bokorys a půdorys

6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo dokončit návrh elektrického a mechanického uspořádání trakční baterie studentské elektroformule popsaného v autorově bakalářské práci (viz [1]) a zkonstruovat a otestovat nejprve jeden segment trakční baterie a poté i celou trakční baterii.

Nejprve bylo zapotřebí ujistit se, zda návrh trakční baterie odpovídá pravidlům soutěže a technickým požadavkům a zda je stále aktuální. Na základě této kontroly vznikla potřeba kompletně celý návrh trakční baterie aktualizovat. To na počátku zahrnovalo přepočítat energii trakční baterie, kterou vozidlo potřebuje pro ujetí závodu a provést novou rešerši bateriových článků, a to z důvodu kontroly správnosti výběru článku pro trakční baterii.

Jelikož na základě nového výpočtu energie trakční baterie vyšla jiná hodnota energie, než při předchozím výpočtu, a protože byl při nové rešerši vybrán jiný bateriový článek založený na jiné chemii, bylo zapotřebí provést zcela nový návrh elektrické a mechanické koncepce trakční baterie, čímž byly výsledky a závěry získané ve výše zmíněné bakalářské práci nepoužitelné. Výběr nového článku samozřejmě znamenal i provedení nového měření s cílem získání detailních informací o jeho chování a vlastnostech. Provedené měření bylo daleko rozsáhlejší než měření provedené v bakalářské práci, jelikož bylo možné sledovat větší škálu parametrů a závislostí.

Poté byl proveden velice precizní a detailní návrh jednotlivých segmentů trakční baterie a stejným způsobem byla navrhována i mechanická a elektrická koncepce celé trakční baterie. Před samotným návrhem i v průběhu něho musela být neustále prováděna rešerše pravidel závodu, aby bylo možné garantovat splnění všech předepsaných požadavků. Po dokončení návrhu trakční baterie byla spuštěna prototypová výroba jednoho segmentu baterie, která měla za cíl otestovat technologii výroby segmentů a jejich kompletaci. Současně s tím byly odladěny i výrobní tolerance a byly navrženy pomocné přípravky, které budou pro výrobu trakční baterie zapotřebí. Na základě prototypové výroby jednoho segmentu trakční baterie bylo po drobných úpravách segmentu rozhodnuto, že je možné začít s výrobou jednoho plně funkčního segmentu.

Nově navržená trakční baterie studentské elektroformule bude složená ze 288 článků typu **Li-Po - SLPBA942126** a bude rozdělená do 8 segmentů s konfigurací 36S2P (celkově tak bude mít trakční baterie konfiguraci **144S2P**). Díky nově vybranému článku se jmenovité napětí baterie zvýšilo na 532,8 V (maximální na rovných **600 V**), baterie dokáže dodávat po celý svůj vybíjecí cyklus maximální dovolený výkon 80 kW, její jmenovitá energie bude **7,46 kWh** a předpokládaná hmotnost trakční baterie by neměla přesáhnout 57,5 kg.

Na základě parametrů nově navržené trakční baterie je důležité konstatovat, že i když vývoj úplně nové mechanické a elektrické koncepce celé trakční baterie elektroformule zbrzdil její vývoj o 2 roky, vyplatilo se tento čas do vývoje investovat, jelikož má nově navržená baterie daleko lepší vlastnosti a parametry než baterie předchozí generace navržená ve výše zmíněné bakalářské práci.

Tím ale vývoj trakční baterie nekončí. Dále bude zapotřebí sestavit a otestovat jeden segment baterie a poté celou trakční baterii. Následovat bude testování sestavy trakčního systému vozidla (čili sestavy trakční baterie - výkonový měnič - motory) a až po odladění této sestavy bude možné všechny tyto komponenty umístit do vozidla a testovat vozidlo jako celek. Až v této fázi bude možné považovat vývoj trakční baterie za ukončený, přičemž bude zapotřebí vývoj ukončit do závodní sezóny v létě 2023.

Očekává se, že na základě testování samotné trakční baterie a vozidla samotného vzniknou četné podněty k vylepšování jednotlivých komponent včetně trakční baterie. Na základě rozsahu těchto podnětů a finančních možností bude rozhodnuto buď o vývoji zcela nové trakční baterie nebo dojde pouze k jejímu vylepšení a drobným úpravám.

Některé tyto podněty pro zlepšení se objevily již při samotném návrhu trakční baterie - například rešerše vhodných bateriových článků nebo jejich rozmístění v baterii může být v rámci optimalizace návrhu trakční baterie provedeno za použitím složitějších metod jako je například využití neuronových sítí.

Stejně tak by mohly být v rámci optimalizace veškeré komponenty a celé sestavy podrobovány nejrůznějším simulacím a studiím či fyzickým testům, ale v rámci výše popisovaného návrhu (až na některé kritické součásti či jejich klíčové parametry - například segmentový koš) by tento postup nebyl příliš přínosný a znamenal by výrazné prodloužení doby návrhu a také spotřebování většího množství finančních prostředků.

Na základě tohoto tvrzení je možné konstatovat, jak veliký posun představuje tato diplomová práce z hlediska vývoje trakční baterie studentské elektroformule a jak je pro vývoj celého vozidla důležitá. Jednak tato diplomová práce velice dobře poslouží jako pomocný materiál při výrobě trakční baterie a také jako výchozí literatura pro optimalizaci a vývoj budoucí generace studentské elektroformule. V neposlední řadě je možné z této diplomové práce vycházet při návrhu jiných trakčních baterií (například vývoj nové generace trakční baterie motokáry NeoFELis vyvíjené na katedře KEV na Fakultě elektrotechnické).

Seznam použité literatury

- [1] D. Sonntag, „Dimenzování baterie studentské elektroformule,“ 2020.
- [2] I. Buchmann, *Learn About Batteries*. WWW: <https://batteryuniversity.com/articles> (cit. 07. 11. 2021).
- [3] *Lithium Polymer (Li-Po) Batteries/Cells*, Tongfuyu Industrial Zone, Dalang, BaoAn District, Shenzhen, 518109, China. WWW: <https://www.melasta.com/cells/lithium-polymer-li-po-batteries-cells-.html> (cit. 07. 11. 2021).
- [4] *Formula Student Germany - International Design Competition*. WWW: <https://www.formulastudent.de/fsg/> (cit. 29. 04. 2022).
- [5] „Product Specification Polymer Li-Ion Cell 3.7 V, 7000 mAh, 15 C (Model No.: SLPBA942126),“ *SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD.*, Tongfuyu Industrial Zone, Dalang, BaoAn District, Shenzhen, 518109, China. WWW: <http://www.melasta.com> (cit. 07. 11. 2021).
- [6] „Formula SAE Rules,“ 2022, <https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>.
- [7] „FORMULA STUDEN GERMANY, Rules and important documents (FS-Rules 2022 V0.9),“ 2022, <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>.
- [8] *HP Jet Fusion 4200*. WWW: <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-4200.html> (cit. 04. 05. 2022).
- [9] *TDK NTC Thermistor NTCG163JF103FT1 - datasheet*. WWW: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/chip-ntc-thermistor/catalog/tpd%5C_commercial%5C_ntc-thermistor%5C_ntcg%5C_en.pdf (cit. 12/2017).
- [10] *Semitec NTC Thermistor 103JT-025 - datasheet*. WWW: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/362/P9-JT-Thermistor-1621687.pdf> (cit. 29. 04. 2022).
- [11] „WA-SMSI Steel Spacer with internal Thread M4 - datasheet,“ 2022-04-27, <https://www.we-online.com/catalog/datasheet/9774040482.pdf>.
- [12] *Original Prusa SL1S SPEED*. WWW: <https://www.prusa3d.com/cs/kategorie/original-prusa-sl1s-speed/> (cit. 29. 04. 2022).
- [13] *Round Connectors 1-pole, uninsulated - datasheet*. WWW: <https://www.staubli.com/content/dam/spot/PL-Main-Uninsulated-11013980-en.pdf> (cit. 29. 04. 2022).
- [14] *Multilam Technology and Products*. WWW: <https://www.staubli.com/cz/en/electrical-connectors/products/multilam-products-and-technology.html> (cit. 04. 05. 2022).
- [15] *Šrouby DIN 85 PA (050)*. WWW: <https://www.plastovesoucastky.cz/cs/c/srouby/srouby-din-85-050?rozmerA=M+3&rozmerB=40> (cit. 29. 04. 2022).
- [16] *PSR Flush End Series - High-Speed Square Body Fuses*. WWW: <https://www.littelfuse.com/products/fuses/industrial-power-fuses/semiconductor-fuses/psr> (cit. 04. 05. 2022).

-
- [17] *PSR030FL0200Z*. WWW: <https://www.digikey.com/en/products/detail/littelfuse-inc/PSR030FL0200Z/8474047> (cit. 04. 05. 2022).
- [18] *High Voltage Relays - EV200HAANA*. WWW: <https://www.te.com/global-en/product-1-1618002-8.html> (cit. 04. 05. 2022).
- [19] *Univerzální relé - FTR-J2AK012W*. WWW: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Fujitsu/FTR-J2AK012W?qs=EvTR%5C%252B%5C%2FkpER9cjG7hKs6Mbg%5C%3D%5C%3D> (cit. 07. 05. 2022).
- [20] *Termistory PTC - B59753C0120A070*. WWW: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/EPCOS-TDK/B59753C0120A070?qs=xhbEVWpZdWdkqrALJs1aNQ%5C%3D%5C%3D> (cit. 07. 05. 2022).
- [21] *Insulation monitoring - ISOMETER IR155-3203/IR155-3204*. WWW: https://www.bender.de/en/products/insulation-monitoring/isometer%5C_ir155-3203ir155-3204 (cit. 07. 05. 2022).
- [22] „Deutsch Autosport - Interconnection Solutions for Professional Motor Sports,“ 2019-09, http://s-motorsport.com/docs/Deutsch_Autosport_connector.pdf.
- [23] *Kruhový průmyslový konektor - Binder 99 0413 00 05*. WWW: <https://cz.farnell.com/binder/99-0413-00-05/circular-connector-plug-5-way/dp/1122553> (cit. 13. 05. 2022).

Příloha A

Product Specification

Polymer Li-Ion Cell

3.7V 7000mAh 15C

(Model No.: SLPBA942126)



Shenzhen Melasta Battery Co.,Ltd

Tongfuyu Industrial Zone,Dalang,BaoAn District,Shenzhen,518109,China

Tel:+86-755-83693563

Fax:+86-755-28120114

E-mail:sales@melasta.com

Http://www.melasta.com

MELASTA

锂聚合物电池 LIPO BATTERIES

Aug 1st,2020

This information is generally descriptive only and is not intended to make or imply any representation, guarantee or warranty with respect to any cells and batteries. Cell and battery designs/specifications are subject to modification without notice. Contact MELASTA for the latest information.

All 8 sheets

Obrázek 58: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 1 [5]

深圳市风云电池有限公司
产品规格书 (Product Specification)

SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD
型号 (Model No.) SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V

日期 (DATE) :2020-08-01

Content

目录

1. 序言	3
Preface	
2. 型号: SLPBA942126	3
Model: SLPBA942126	
3. 产品规格	3
Specification	
4. 电芯性能检查及测试	4
Battery Cell Performance Criteria	
5. 贮存及其它事项	5
Storage and Others	
6. 聚合物锂离子充电电芯操作指示及注意事项	5- 8
Handling Precautions and Guideline	
6.1. 充电	5- 6
Charging	
6.2. 放电	6- 7
Discharging	
6.3. 贮存	7
Storage	
6.4. 电芯操作注意事项	7
Handling of Cells	
6.5. 电池外壳设计注意事项	7
Notice for Designing Battery Pack	
6.6. 电池与外壳组装注意事项	7-8
Notice for Assembling Battery Pack	
7. 其它事项	8-9
Others	

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力

Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

1

Obrázek 59: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 2 [5]

深圳市风云电池有限公司
产品规格书 (Product Specification)

SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD
型号 (Model No.) SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V

1. 序言 PREFACE

此规格书适用于深圳市风云电池有限公司的锂聚合物可充电电池产品

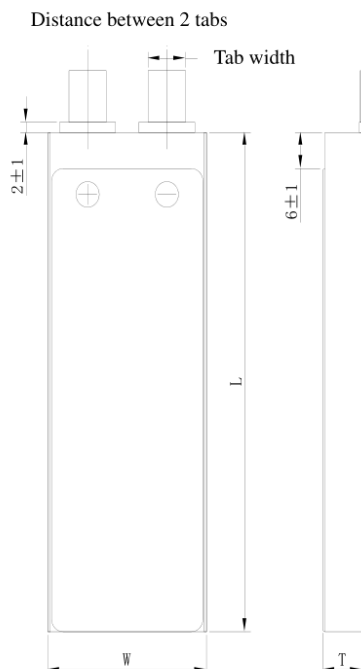
The specification is suitable for the performance of Lithium-Polymer (LIP) rechargeable battery produced by the SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD.

2. 型号 MODEL

SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V

3. 产品规格 SPECIFICATION

单颗电池规格 Specifications of single cell



◆电芯正极材料 Cell Cathode Material	LiCoO2	
◆标称容量 Typical Capacity①	7000mAh	
◆标称电压 Nominal Voltage	3.7V	
◆ 充电条件 Charge Condition	最大电流 Max. Continuous charge Current	14A
	峰值充电 Peak charge current	20A(≤3sec)
	电压 Voltage	4.2V±0.03V
◆ 放电条件 Discharge Condition	Max Continuous Discharge Current	105A
	Peak Discharge Current	150A(≤3sec)
	Cut-off Voltage	3.0V
◆交流内阻 AC Impedance(mΩ)	≤1.3	
◆循环寿命【充电:0.5C,放电:15C】 Cycle Life【CHA:0.5C,DCH:15C】	>100cycles	
◆使用温度 Operating Temp.	充电 Charge	0℃~45℃
	放电 Discharge	-20℃~60℃
◆ 电芯尺寸 Cell Dimensions	厚度 Thickness(T)	10.7±0.3mm
	宽度 Width(W)	42.0±0.5mm
	长度 Length(L)	127.5±0.5mm
	极耳间距 Distance between 2 tabs	21±1mm
◆ 极耳尺寸 Dimensions of Cell tabs	极耳材料 Tab Material	Nickel-plated Copper
	极耳宽度 Tab Width	15mm
	极耳厚度 Tab Thickness	0.2mm
	极耳长度 Tab Length	10.0±1.0mm
◆重量 Weight(g)	128±3g	
①标称容量: 0.2C,4.2V~3.0V@23℃±2℃ Typical Capacity:0.2C,4.2V~3.0V@23℃±2℃		

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力
Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

Obrázek 60: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 3 [5]

深圳市风云电池有限公司
产品规格书 (Product Specification)

SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD
型号 (Model No.) SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V

4.电芯性能检查及测试 BATTERY CELL PERFORMANCE CRITERIA

在进行下列各项测试前每颗电池应用 0.5C 放至 3.0V。如果没有特别规定，测试应在电池交付 1 个月内按以下各项条件进行：

Before proceed the following tests, the cells should be discharged at 0.5C to 3.0V cut off. Unless otherwise stated, tests should be done within one month of delivery under the following conditions:

环境温度 Ambient temperature: 20°C±5°C

相对湿度 Relative Humidity: 65±20%RH

注意标准充放电为 Note Standard Charge/Discharge Conditions:

充电 Charge: 以 0.5C 电流恒流充电至限制电压 4.2V 时,改为恒压充电,直到截止电流为 0.05C 时停止充电;The battery will be charged to 4.2V with 0.5C from constant current to constant voltage, when the current is 0.05C, stop to charge.;

放电 Discharge: 0.5C to 3.0V/cell

测试项目 Test	单位 Unit	规格 Specification	条件 Condition	备注 Remarks
容量 Capacity	mAh	≥7000	标准充放电 Standard Charge / Discharge	允许循环 3 次 Up to 3 cycles are allowed
开路电压 Open Circuit Voltage (OCV)	V	≥4.15	标准充电后 1 个小时内 Within 1 hr after standard charge	单位颗 Unit cell
内阻 Internal Impedance (IR)	mΩ	≤1.3	充满电后用 1kHz 测试 Upon fully charge at 1kHz	*
高倍率放电 High Rate Discharge (15C)	min	≥3.6	标准充电/休息 5 分钟 用 15C 放电至 3.0V Standard Charge/rest 5min discharge at 15C to 3.0V	允许循环 3 次 Up to 3 cycles are allowed
低温放电 Low Temperature Discharge	min	≥210	标准充电后存储在 -20±2°C 环境中 2 小时 然后用 0.2C 放电 Standard Charge, Storage:2hrs at -2 0±2°C 0.2C discharge at 0±2°C	3.0V/cell Cut-off
自放电 Charge Reserve	min	≥85% (初始容量 First Capacity)	标准充满电后 20 度贮藏 30 天, 标准 0.5C 放电 Standard charge Storage at 20 degree: 30days Standard discharge (0.5C)	3.0V/cell Cut-off
寿命测试 Cycle Life Test	Cycle times	≥100	充电:0.5C 充电至 4.2V, 放电, 15C 放电至 3.0V, 当放电容量降至初始容量的 80%时, 所完成的 循环次数定义为该电芯的循环寿命 Charge:0.5C to 4.2V ,Discharge: 15C to 3.0V, 80% or more of 1 st cycle capacity at 15C discharge of Operation	Retention capacity 容量保持 ≥80% of initial capacity

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力

Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

3

Obrázek 61: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 4 [5]

深圳市风云电池有限公司 产品规格书 (Product Specification)		SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD 型号 (Model No.) SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V		
短路测试 External Short Circuit	N/A	不着火不爆炸 No Fire and No Explosion	标准充电后, 在 20°C±5 环境中用超过 0.75mm ² 金属丝将单颗电池短路至电池恢复到常温。 After standard charge, short-circuit the cell at 20°C±5°C until the cell temperature returns to ambient temperature.(cross section of the wire or connector should be more than 0.75mm ²)	*
自由跌落测试 Free Falling(drop)	N/A	不着火不爆炸 No Fire and No Explosion	跌标准充电后, 搁置 2 小时。从 1.2M 高任意方向自由跌落 30MM 厚木板 3 次 Standard Charge, and then leave for 2hrs, check battery before / after drop Height: 1.2m Thickness of wooden board: 30mm Direction is not specified Test for 3 times	*

5. 贮存及其它事项 STORAGE AND OTHERS

5.1 环境温度 Ambient temperature: 20°C±5°C

相对湿度 Relative Humidity: 65±20%RH

5.2 请每隔 3 个月按下面方法激活电池一次:

Please activate the battery once every 3 months according to the following method:

0.2C 充电至 4.2V, 休息 5 分钟, 然后用 0.2C 放电至每颗电池 3.0V, 休息 5 分钟, 0.2C 充电 3.9V。

Charge at 0.2C to 4.2V, rest 5 min, then discharge with 0.2C to 3.0V/cell, rest 5 min, then charge at 0.2C to 3.9V.

6. 聚合物锂离子充电电芯操作指示及注意事项 HANDLING PRECAUTIONS AND GUIDELINE

声明一:

客户若需要将电芯用于超出文件规定以外的设备, 或在文件规定以外的使用条件下使用电芯, 应事先联系风云公司, 因为需要进行特定的实验测试以核实电芯在该使用条件下的性能及安全性。

Note(1):

The customer is requested to contact MELASTA in advance, if and when the customer needs other applications or operating conditions than those described in this document. Additional experimentation may be required to verify performance and safety under such conditions.

声明二:

对于在超出文件规定以外的条件下使用电芯而造成的任何意外事故, 风云公司概不负责

Note (2):

MELASTA will take no responsibility for any accident when the cell is used under other conditions than those described in this Document.

声明三:

如有必要, 风云公司会以书面形式告之客户有关正确操作使用电芯的改进措施。

MELASTA will inform, in a written form, the customer of improvement(s) regarding proper use and handing of the cell, if it is deemed necessary.

6.1. 充电 Charging

6.1.1 充电电流 Charging current:

充电电流不得超过本标准书中规定的最大充电电流。使用高于推荐值电流充电将可能引起电芯的充放电性能、机械性能和安全性能的问题, 并可能会导致发热或泄漏。

Charging current should be less than maximum charge current specified in the Product Specification.

Charging with higher current than recommended value may cause damage to cell electrical, mechanical and safety performance and could lead to heat generation or leakage.

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力

Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

Obrázek 62: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 5 [5]

深圳市风云电池有限公司
产品规格书 (Product Specification)

SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD
型号 (Model No.) SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V

6.1.2. 充电电压 Charging voltage:

充电电压不得超过本标准中规定的额定电压 (4.2V/电芯)。4.25V 为充电电压最高极限, 充电器的设计应满足此条件; 电芯电压高于额定电压值时, 将可能引起电芯的充放电性能、机械性能和安全性能的问题, 可能会导致发热或泄漏。

Charging shall be done by voltage less than that specified in the Product Specification (4.2V/cell).

Charging beyond 4.25V, which is the absolute maximum voltage, must be strictly prohibited. The charger shall be designed to comply with this condition. It is very dangerous that charging with higher voltage than maximum voltage may cause damage to the cell electrical, mechanical safety performance and could lead to heat generation or leakage.

6.1.3. 充电温度 Charging temperature:

电芯必须在 0°C~45°C 的环境温度范围内进行充电

The cell shall be charged within 0°C~45°C range in the Product Specification.

6.1.4. 禁止反向充电 Prohibition of reverse charging:

正确连接电池的正负极, 严禁反向充电。若电池正负极接反, 将无法对电芯进行充电。同时, 反向充电会降低电芯的充放电性能、安全性, 并会导致发热、泄漏。

Reverse charging is prohibited. The cell shall be connected correctly. The polarity has to be confirmed before wiring. In case of the cell is connected improperly, the cell cannot be charged. Simultaneously, the reverse charging may cause damaging to the cell which may lead to degradation of cell performance and damage the cell safety, and could cause heat generation or leakage.

6.2. 放电 Discharging

6.2.1. 放电电流 Discharging current

放电电流不得超过本标准规定的最大放电电流, 大电流放电会导致电芯容量剧减并导致过热。

The cell shall be discharged at less than the maximum discharge current specified in the Product Specification. High discharging current may reduce the discharging capacity significantly or cause over-heat.

6.2.2. 放电温度 Discharging temperature

电芯必须在 -20°C~60°C 的环境温度范围内进行放电。

The cell shall be discharged within -20°C~60°C range specified in the Product Specification.

6.2.3. 过放电 Over-discharging:

需要注意的是, 在电芯长期未使用期间, 它可能会用其它自放电特性而处于某种过放电状态。为防止放电的发生, 电芯应定期充电, 将其电压维持在 3.6V 至 3.9V 之间。

过放电会导致电芯性能、电池功能的丧失。

充电器应有装置来防止电池放电至低于本标准规定的截止电压。此外, 充电器还应有装置以防止重复充电, 步骤如下:

电池在快速充电之前, 应先以一小电流 (0.01C) 预充电 15~30 分钟, 以使 (每个) 电芯的电压达到 3V 以上, 再进行快速充电。可用一计时器来实现该预充电步骤。如果在预充电规定时间内, (个别) 电芯的电压仍未升到 3.0V 以上, 充电器应能够停止下一步快速充电, 并显示该电芯/电池正处于非正常状态。

It should be noted that the cell would be at over-discharged state by its self-discharge characteristics in case the cell is not used for long time. In order to prevent over-discharging, the cell shall be charged periodically to maintain between 3.6V and 3.9V.

Over-discharging may causes loss of cell performance, characteristics, or battery functions.

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力
Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

5

Obrázek 63: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 6 [5]

深圳市风云电池有限公司
产品规格书 (Product Specification)

SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD
型号 (Model No.) SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V

The charger shall be equipped with a device to prevent further discharging exceeding a cut-off voyage specified in the Product Specification. Also the charger shall be equipped with a device to control the recharging procedures as follows:

The cell battery pack shall start with a low current (0.01C) for 15-30 minutes, i.e.-charging, before rapid charging starts. The rapid charging shall be started after the (individual) cell voltage has been reached above 3V within 15-30 minutes that can be determined with the use of an appropriate timer for pre-charging. In case the (individual) cell voltage does not rise to 3V within the pre-charging time, then the charger shall have functions to stop further charging and display the cell/pack is at abnormal state.

6.3. 贮存 Storage:

电芯储存温度必须在-10℃~45℃的范围内,长期存储电池(超过3个月)须置于温度为23±5℃、湿度为65±20%RH的环境中,贮存电压为3.6V~3.9V

The cell shall be storied within -10℃~45℃ range environmental condition, If the cell has to be storied for a long time (Over 3 months),the environmental condition should be; Temperature: 23±5℃

Humidity: 65±20%RH, The voltage for a long time storage shall be 3.6V~3.9V range.

6.4. 电芯操作注意事项 Handling of Cells:

由于电芯属于软包装, 为保证电芯的性能不受损害, 必须小心对电芯进行操作。

Since the battery is packed in soft package, to ensure its better performance, it's very important to carefully handle the battery;

6.4.1. 铝箔包装材料易被尖锐部件损伤, 诸如镍片, 尖针。

The soft aluminum packing foil is very easily damaged by sharp edge parts such as Ni-tabs, pins and needles.

·禁止用尖锐部件碰撞电池;

Don't strike battery with any sharp edge parts;

·取放电芯时, 请修短指甲或戴上手套;

Trim your nail or wear glove before taking battery;

·应清洁工作环境, 避免有尖锐物体存在;

Clean work table to make sure no any sharp particle;

6.4.2. 禁止弯折顶封边;

Don't bend or fold sealing edge;

6.4.3. 禁止打开或破坏折边;

Don't open or deform folding edge;

6.4.4. 禁止弯折极片;

Don't bend tab ;

6.4.5. 禁止坠落、冲击、弯折电芯;

Don't Fall, hit, bend battery body;

6.4.6. 任何时候禁止短路电芯, 它会导致电芯严重损坏;

Short circuit terminals of battery is strictly prohibited, it may damage battery;

6.5. 电池外壳设计 Notice Designing Battery Pack;

·电池外壳应有足够的机械强度以保证其内部电芯免受机械撞击;

Battery pack should have sufficient strength and battery should be protected from mechanical shock;

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力

Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

6

Obrázek 64: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 7 [5]

深圳市风云电池有限公司
产品规格书 (Product Specification)

SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD
型号 (Model No.) SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V

·外壳内安装电芯的部位不应有锋利的边角;

No Sharp edge components should be inside the pack containing the battery;

6.6. 电芯与外壳组装注意事项 Notice for Assembling Battery Pack

6.6.1. 电芯的连接 Tab connection

建议使用超声波焊接或点焊技术来连接电芯与保护电路模块或其它部分。如使用手工锡焊, 须注意以下事项, 以保证电芯的功能:

Ultrasonic welding or spot welding is recommended to connect battery with PCM or other parts. If apply manual solder method to connect tab with PCM, below notice is very important to ensure battery performance.

a) 烙铁的温度可控能防静电;

The solder iron should be temperature controlled and ESD safe

b) 烙铁温度不能超过 350°C

Soldering temperature should not exceed 350°C

c) 锡焊时间不能超过 3 秒;

Soldering time should not be longer than 3s

d) 锡焊次数不能超过 5 次;

Soldering time should not exceed 5 times Keep battery tab cold down before next time soldering

e) 必须在极片冷却后再进行二次焊接; 禁止直接加热电芯, 高于 100°C 会导致电芯损坏。

Directly heat cell body is strictly prohibited, Battery may be damaged by heat above approx. 100°C

6.6.2. 电芯的安装 Cell fixing

·应将电芯的宽面安装在外壳内;

The battery should be fixed to the battery pack by its large surface area

·电芯不得在壳内活动。

No cell movement in the battery pack should be allowed

7. 其它事项 OTHERS

7.1. 防止电池内短路 Prevention of short circuit within a battery pack

使用足够的绝缘材料对线路进行保护

Enough insulation layers between wiring and the cells shall be used to maintain extra safety protection.

7.2. 严禁拆卸电芯 Prohibition of disassembly

7.2.1. 拆卸电芯可能会导致内部短路, 进而引起鼓气、着火及其它问题

The disassembling may generate internal short circuit in the cell, which may cause gassing, firing, or other problems.

7.2.2. 聚合物锂电池理论上不存在流动的电解液, 但万一有电解液泄漏而接触到皮肤、眼睛或身体其它部位, 应立即用清水冲洗电解液并就医

LIP battery should not have liquid from electrolyte flowing, but in case the electrolyte come into contact with the skin, or eyes, physicians shall flush the electrolyte immediately with fresh water and medical advice is to be sought.

7.3. 在任何情况下, 不得燃烧电芯或将电芯投入火中, 否则会引起电芯燃烧, 这是非常危险的, 应绝对禁止

Never incinerate nor dispose the cells in fire. These may cause firing of the cells, which is very dangerous and is prohibited.

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力
Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

7

Obrázek 65: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 8 [5]

深圳市风云电池有限公司
产品规格书 (Product Specification)

SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD
型号 (Model No.) SLPBA942126 7000mAh 15C 3.7V

7.4 不得将电芯浸泡液体，如淡水、海水、饮料(果汁、咖啡)等

The cells shall never be soaked with liquids such as water, seawater drinks such as soft drinks, juices coffee or others.

7.5 更换电芯应由电芯供应商或设备供应商完成，用户不得自行更换

The battery replacement shall be done only by either cells supplier or device supplier and never be done by the user.

7.6 禁止使用已损坏的电芯 Prohibition of use of damaged cells

电芯在运输过程中可能因撞击等原因而损坏，若发现电芯有任何异常特征，如电芯塑料封边损坏，外壳破损，闻到电解液气体，电解液泄漏等，该电芯不得使用。

有电解液泄漏或散发电解液气味的电池应远离火源以避免着火。

The cells might be damaged during shipping by shock. If any abnormal features of the cells are found such as damages in a plastic envelop of the cell, deformation of the cell package, smelling of electrolyte, electrolyte leakage and others, the cells shall never be used any more.

The cells with a smell of the electrolyte or a leakage shall be placed away from fire to avoid firing.

Edition (版本)	Description (记述)	Prepared by (编制)	Checked (审核)	Date (日期)
A0	First Publish (首次编写)	沈阳	吴行保	2020-08-01

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力
Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

8

Obrázek 66: Datasheet vybraného článku SLPBA942126 - strana 9 [5]

Příloha B

Segment 1p				
Číslo článku	$U_N[V]$	$R_i[m\Omega]$	$C_N[mAh]$	Umístění
4-5	3,818	1,311	7181	1-B
4-9	3,818	1,310	7178	1-A
15-5	3,818	1,307	7156	2-A
15-11	3,818	1,308	7155	2-B
3-17	3,818	1,306	7090	3-B
3-9	3,818	1,304	7089	3-A
14-4	3,817	1,305	7127	4-B
5-15	3,817	1,300	7123	4-A
12-2	3,818	1,302	7167	5-B
15-15	3,818	1,298	7166	5-A
5-8	3,818	1,292	7117	6-A
13-13	3,818	1,299	7109	6-B
12-18	3,818	1,291	7163	7-A
12-15	3,818	1,294	7161	7-B
15-6	3,818	1,286	7163	8-A
12-11	3,818	1,287	7163	8-B
9-14	3,818	1,282	7168	9-A
2-2	3,818	1,288	7168	9-B
12-7	3,818	1,311	7171	1-C
12-6	3,818	1,308	7170	1-D
14-15	3,818	1,316	7131	2-C
14-3	3,818	1,300	7128	2-D
9-18	3,818	1,309	7148	3-C
10-12	3,818	1,302	7147	3-D
9-1	3,819	1,300	7146	4-D
1-11	3,819	1,305	7146	4-C
9-11	3,818	1,302	7163	5-C
15-9	3,818	1,299	7162	5-D
16-11	3,818	1,297	7154	6-C
16-6	3,818	1,295	7151	6-D
1-15	3,819	1,296	7156	7-C
10-4	3,819	1,292	7151	7-D
12-4	3,818	1,288	7158	8-C
10-5	3,818	1,288	7158	8-D
6-18	3,819	1,291	7212	9-C
1-5	3,819	1,280	7184	9-D

Tabulka 12: Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 1p

Segment 1z				
Číslo článku	$U_N[V]$	$R_i[m\Omega]$	$C_N[mAh]$	Umístění
16-9	3,818	1,288	7163	10-B
15-13	3,818	1,276	7163	10-A
11-10	3,818	1,284	7213	11-B
11-12	3,818	1,270	7211	11-A
12-10	3,818	1,279	7145	12-B
17-1	3,818	1,267	7143	12-A
11-8	3,819	1,288	7215	13-B
6-17	3,819	1,253	7212	13-A
14-14	3,819	1,267	7136	14-B
14-9	3,819	1,265	7136	14-A
10-17	3,818	1,276	7153	15-B
15-1	3,818	1,244	7149	15-A
15-8	3,818	1,240	7158	16-B
15-4	3,818	1,225	7156	16-A
16-8	3,819	1,219	7162	17-B
16-17	3,819	1,193	7159	17-A
17-10	3,817	1,180	7140	18-A
8-15	3,817	1,200	7139	18-B
16-10	3,819	1,278	7159	10-D
12-17	3,819	1,289	7156	10-C
7-14	3,818	1,283	7229	11-C
6-9	3,818	1,275	7220	11-D
3-8	3,818	1,275	7117	12-C
3-11	3,818	1,272	7113	12-D
1-10	3,819	1,278	7153	13-C
1-16	3,819	1,264	7152	13-D
16-3	3,818	1,276	7165	14-C
16-18	3,818	1,258	7163	14-D
13-5	3,817	1,262	7082	15-C
13-4	3,817	1,261	7079	15-D
4-18	3,819	1,217	7183	16-D
1-4	3,819	1,257	7182	16-C
13-15	3,819	1,213	7113	17-D
5-3	3,819	1,214	7108	17-C
16-5	3,818	1,199	7164	18-C
10-7	3,818	1,191	7162	18-D

Tabulka 13: Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 1z

Segment 2p				
Číslo článku	U_N [V]	R_i [m Ω]	C_N [mAh]	Umístění
4-11	3,819	1,317	7185	1-F
4-13	3,819	1,309	7180	1-E
17-17	3,818	1,311	7139	2-F
8-1	3,818	1,305	7139	2-E
1-12	3,819	1,300	7179	3-E
1-1	3,819	1,312	7178	3-F
9-15	3,818	1,299	7165	4-E
10-18	3,818	1,308	7163	4-F
5-9	3,818	1,295	7075	5-E
3-15	3,818	1,307	7053	5-F
2-4	3,817	1,299	7164	6-F
10-14	3,817	1,296	7160	6-E
8-17	3,818	1,294	7126	7-E
8-7	3,818	1,295	7124	7-F
2-5	3,818	1,288	7158	8-E
15-7	3,818	1,291	7156	8-F
4-14	3,819	1,284	7180	9-E
1-7	3,819	1,287	7180	9-F
5-12	3,818	1,308	7095	1-H
3-3	3,818	1,321	7095	1-G
15-10	3,817	1,308	7166	2-H
2-10	3,817	1,311	7166	2-G
11-11	3,819	1,314	7218	3-G
11-16	3,819	1,299	7207	3-H
17-18	3,818	1,304	7134	4-G
17-16	3,818	1,304	7133	4-H
14-6	3,817	1,307	7143	5-G
17-12	3,817	1,296	7136	5-H
5-13	3,817	1,306	7112	6-G
5-4	3,817	1,294	7102	6-H
6-11	3,818	1,299	7202	7-G
4-15	3,818	1,292	7183	7-H
5-7	3,817	1,297	7066	8-G
5-5	3,817	1,288	7058	8-H
4-12	3,818	1,285	7184	9-H
4-7	3,818	1,287	7181	9-G

Tabulka 14: Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 2p

Segment 2z				
Číslo článku	U_N [V]	R_i [m Ω]	C_N [mAh]	Umístění
7-11	3,817	1,285	7176	10-J
2-16	3,817	1,279	7169	10-I
10-9	3,818	1,278	7160	11-J
9-5	3,818	1,277	7159	11-I
13-3	3,818	1,264	7123	12-I
5-18	3,818	1,283	7122	12-J
13-6	3,819	1,275	7117	13-J
3-6	3,819	1,266	7111	13-I
3-16	3,818	1,286	7109	14-J
13-1	3,818	1,247	7105	14-I
9-2	3,818	1,242	7128	15-I
8-16	3,818	1,279	7128	15-J
14-13	3,817	1,240	7133	16-J
13-14	3,817	1,231	7118	16-I
11-14	3,818	1,237	7216	17-J
11-6	3,818	1,186	7216	17-I
17-8	3,818	1,212	7141	18-J
17-5	3,818	1,170	7139	18-I
3-5	3,818	1,266	7086	10-L
5-6	3,818	1,302	7084	10-K
2-18	3,819	1,278	7151	11-L
1-8	3,819	1,280	7151	11-K
4-1	3,818	1,276	7182	12-K
4-10	3,818	1,273	7178	12-L
1-6	3,819	1,273	7177	13-K
1-9	3,819	1,269	7174	13-L
15-18	3,818	1,274	7168	14-K
2-12	3,818	1,261	7168	14-L
8-9	3,817	1,274	7139	15-K
17-11	3,817	1,253	7136	15-L
2-8	3,819	1,237	7146	16-L
14-16	3,819	1,242	7136	16-K
6-2	3,818	1,177	7203	17-L
4-16	3,818	1,256	7185	17-K
10-2	3,818	1,169	7162	18-L
12-13	3,818	1,222	7160	18-K

Tabulka 15: Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 2z

Segment 3p				
Číslo článku	$U_N[V]$	$R_i[m\Omega]$	$C_N[mAh]$	Umístění
15-14	3,817	1,311	7148	1-I
17-13	3,817	1,311	7140	1-J
4-4	3,818	1,296	7183	2-I
4-8	3,818	1,320	7182	2-J
17-7	3,818	1,299	7136	3-I
8-12	3,818	1,312	7136	3-J
9-6	3,819	1,305	7159	4-J
9-8	3,82	1,300	7156	4-I
15-16	3,818	1,298	7171	5-J
9-9	3,818	1,303	7169	5-I
16-4	3,819	1,294	7148	6-I
16-14	3,819	1,298	7147	6-J
5-2	3,818	1,287	7096	7-I
3-18	3,818	1,300	7095	7-J
10-3	3,817	1,293	7167	8-J
16-1	3,817	1,282	7165	8-I
10-8	3,818	1,287	7163	9-J
12-14	3,818	1,283	7158	9-I
16-13	3,82	1,320	7147	1-K
16-16	3,819	1,306	7146	1-L
8-18	3,819	1,313	7127	2-K
8-2	3,819	1,303	7127	2-L
6-7	3,818	1,313	7204	3-K
11-13	3,818	1,299	7203	3-L
3-7	3,818	1,300	7114	4-L
5-10	3,818	1,305	7105	4-K
12-1	3,818	1,294	7166	5-L
16-15	3,818	1,308	7165	5-K
17-6	3,818	1,295	7135	6-L
14-12	3,818	1,299	7135	6-K
2-7	3,818	1,293	7149	7-L
10-6	3,818	1,295	7148	7-K
8-10	3,819	1,294	7133	8-K
8-8	3,819	1,284	7132	8-L
4-2	3,819	1,288	7176	9-L
1-17	3,819	1,283	7173	9-K

Tabulka 16: Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 3p

Segment 3z				
Číslo článku	U_N [V]	R_i [mΩ]	C_N [mAh]	Umístění
7-11	3,817	1,285	7176	10-J
2-16	3,817	1,279	7169	10-I
10-9	3,818	1,278	7160	11-J
9-5	3,818	1,277	7159	11-I
13-3	3,818	1,264	7123	12-I
5-18	3,818	1,283	7122	12-J
13-6	3,819	1,275	7117	13-J
3-6	3,819	1,266	7111	13-I
3-16	3,818	1,286	7109	14-J
13-1	3,818	1,247	7105	14-I
9-2	3,818	1,242	7128	15-I
8-16	3,818	1,279	7128	15-J
14-13	3,817	1,240	7133	16-J
13-14	3,817	1,231	7118	16-I
11-14	3,818	1,237	7216	17-J
11-6	3,818	1,186	7216	17-I
17-8	3,818	1,212	7141	18-J
17-5	3,818	1,170	7139	18-I
3-5	3,818	1,266	7086	10-L
5-6	3,818	1,302	7084	10-K
2-18	3,819	1,278	7151	11-L
1-8	3,819	1,280	7151	11-K
4-1	3,818	1,276	7182	12-K
4-10	3,818	1,273	7178	12-L
1-6	3,819	1,273	7177	13-K
1-9	3,819	1,269	7174	13-L
15-18	3,818	1,274	7168	14-K
2-12	3,818	1,261	7168	14-L
8-9	3,817	1,274	7139	15-K
17-11	3,817	1,253	7136	15-L
2-8	3,819	1,237	7146	16-L
14-16	3,819	1,242	7136	16-K
6-2	3,818	1,177	7203	17-L
4-16	3,818	1,256	7185	17-K
10-2	3,818	1,169	7162	18-L
12-13	3,818	1,222	7160	18-K

Tabulka 17: Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 3z

Segment 4p				
Číslo článku	$U_N[V]$	$R_i[m\Omega]$	$C_N[mAh]$	Umístění
9-16	3,819	1,323	7161	1-N
2-15	3,819	1,306	7158	1-M
13-7	3,817	1,311	7117	2-N
5-13	3,817	1,306	7112	2-M
11-17	3,817	1,301	7215	3-M
6-13	3,817	1,311	7208	3-N
9-4	3,818	1,306	7123	4-N
3-4	3,818	1,302	7117	4-M
6-8	3,817	1,300	7204	5-M
15-12	3,817	1,302	7169	5-N
2-9	3,819	1,301	7168	6-N
2-11	3,819	1,296	7164	6-M
8-3	3,819	1,297	7142	7-N
1-13	3,819	1,293	7138	7-M
15-2	3,818	1,292	7160	8-M
2-13	3,818	1,292	7160	8-N
7-6	3,816	1,293	7228	9-N
7-3	3,816	1,279	7231	9-M
15-3	3,819	1,304	7170	1-P
16-2	3,819	1,326	7166	1-O
12-7	3,818	1,311	7171	2-O
12-6	3,818	1,308	7170	2-P
7-15	3,817	1,307	7236	3-O
7-4	3,817	1,302	7231	3-P
17-14	3,818	1,306	7126	4-O
17-15	3,818	1,304	7124	4-P
6-12	3,818	1,290	7217	5-P
11-15	3,818	1,314	7215	5-O
17-3	3,818	1,297	7143	6-P
14-1	3,818	1,303	7143	6-O
17-2	3,818	1,299	7131	7-O
8-13	3,818	1,292	7130	7-P
10-15	3,818	1,294	7172	8-O
9-3	3,818	1,291	7172	8-P
6-1	3,817	1,289	7209	9-O
6-4	3,817	1,284	7203	9-P

Tabulka 18: Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 4p

Segment 4z				
Číslo článku	U_N [V]	R_i [mΩ]	C_N [mAh]	Umístění
14-8	3,818	1,284	7130	10-M
8-5	3,818	1,284	7129	10-N
16-12	3,818	1,277	7167	11-M
9-10	3,818	1,284	7166	11-N
12-5	3,818	1,266	7170	12-M
9-17	3,818	1,285	7169	12-N
8-6	3,818	1,282	7135	13-N
17-4	3,818	1,262	7134	13-M
5-1	3,819	1,274	7105	14-N
3-13	3,819	1,265	7098	14-M
3-12	3,818	1,266	7100	15-N
13-16	3,818	1,262	7098	15-M
2-6	3,818	1,241	7148	16-M
10-10	3,818	1,248	7144	16-N
7-18	3,818	1,260	7232	17-N
7-16	3,818	1,201	7230	17-M
13-9	3,818	1,170	7113	18-M
13-12	3,818	1,235	7106	18-N
4-3	3,818	1,283	7178	10-P
10-11	3,818	1,286	7173	10-O
14-7	3,818	1,278	7141	11-P
9-12	3,818	1,284	7141	11-O
11-5	3,816	1,277	7204	12-O
7-1	3,816	1,276	7224	12-P
13-18	3,817	1,260	7117	13-P
9-7	3,817	1,285	7105	13-O
12-9	3,817	1,268	7160	14-P
12-12	3,817	1,272	7148	14-O
6-15	3,818	1,270	7203	15-O
4-6	3,818	1,260	7184	15-P
3-14	3,819	1,266	7109	16-O
3-1	3,819	1,253	7109	16-P
5-16	3,818	1,223	7123	17-P
13-10	3,818	1,242	7122	17-O
7-12	3,817	1,196	7229	18-P
11-4	3,817	1,214	7216	18-O

Tabulka 19: Velikosti základních parametrů jednotlivých článků a jejich umístění v segmentu 4z

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Seg 1p	A	4-9	15-5	3-9	5-15	15-15	5-8	12-18	15-6	9-14	11-12	17-1	6-17	14-9	15-1	15-4	16-17	17-10
	B	4-5	15-11	3-17	14-4	12-2	13-13	12-15	12-11	2-2	11-10	12-10	11-8	14-14	10-17	15-8	16-8	8-15
	C	12-7	14-15	9-18	1-11	9-11	16-11	1-15	12-4	6-18	7-14	3-8	1-10	16-3	13-5	1-4	5-3	16-5
	D	12-6	14-3	10-12	9-1	15-9	16-6	10-4	10-5	1-5	16-10	3-11	1-16	16-18	13-4	4-18	13-15	10-7
Seg 2p	E	4-13	8-1	1-12	9-15	5-9	10-14	8-17	2-5	4-14	6-14	13-2	1-3	14-11	7-17	8-4	4-17	7-13
	F	4-11	17-17	1-1	10-18	3-15	2-4	8-7	15-7	1-7	11-2	5-11	12-16	14-18	7-5	14-10	10-13	2-14
	G	3-3	2-10	11-11	17-18	14-6	5-13	6-11	5-7	4-7	3-2	12-8	5-14	1-14	6-5	7-2	10-13	2-17
	H	5-12	15-10	11-16	17-16	17-12	5-4	4-15	5-5	4-12	3-10	15-17	13-11	8-11	11-3	11-7	7-7	10-16
Seg 3p	I	15-14	4-4	17-7	9-8	9-9	16-4	5-2	16-1	2-16	9-5	13-3	3-6	13-1	9-2	13-14	11-6	17-5
	J	17-13	4-8	8-12	9-6	15-16	16-14	3-18	10-3	7-11	10-9	5-18	13-6	3-16	8-16	14-13	11-14	17-8
	K	16-13	8-18	6-7	5-10	16-15	14-12	10-6	8-10	1-17	5-6	4-1	1-6	15-18	8-9	14-16	4-16	12-13
	L	16-16	8-2	11-13	3-7	12-1	17-6	2-7	8-8	4-2	3-5	2-18	4-10	1-9	2-12	17-11	2-8	10-2
Seg 4p	M	2-15	5-13	11-17	3-4	6-8	2-11	1-13	15-2	14-8	16-12	12-5	17-4	3-13	13-16	2-6	7-16	13-9
	N	9-16	13-7	6-13	9-4	15-12	2-9	8-3	2-13	8-5	9-10	9-17	8-6	5-1	3-12	10-10	7-18	13-12
	O	16-2	12-7	7-15	17-14	11-15	14-1	17-2	10-15	6-18	10-11	11-5	9-7	12-12	6-15	3-14	13-10	11-4
	P	15-3	12-6	7-4	17-15	6-12	17-3	8-13	9-3	6-4	4-3	14-7	7-1	13-18	12-9	4-6	3-1	5-16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Seg 1z	A	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	B	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Seg 2z	E	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	F	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Seg 3z	I	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	J	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Seg 4z	M	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	N	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Obrázek 67: Rozmístění jednotlivých článků v baterii včetně znázornění jejich polarit (modrou a červenou barvou jsou označeny články na krajích segmentů symbolizující záporný a kladný pól segmentu)

Příloha C

Prvek segmentu	Popis / vlastnost / materiál	Počet ks
Bateriový článek	Li-Po – SLPBA942126 (7000 mAh, 15 C, 3,7 V)	36
Košíček	3D tisk – SLS technologie, materiál PA12	1
Podpěra	3D tisk – SLS technologie, materiál PA12	1
Elektronika typ 1	Osazená DPS Slave BMS	1
Elektronika typ 2	Osazená DPS silové DPS	1
SMT pájecí matice	M4x4, 9774040482 – Würth Elektronik	34
THT termistory	103JT-025 – Semitec	9
Kontakt	Stäubli – Socket B5N (01.0004)	2
Izolace kontaktů	3D tisk – SLS technologie, materiál PA12	1
Distanční sloupek typ 1	3D tisk – technologie MSLA - Prusament Resin	18
Distanční sloupek typ 2	3D tisk – technologie MSLA - Prusament Resin	18
Pojistná matice	M5 – DIN 985 (ocel 8, zinek bílý)	2
Pojistná matice	M5 – DIN 985 (ocel 8, zinek bílý)	34
Podložka	M5 – DIN 125A (ocel, zinek bílý)	2
Podložka	Plastová – M3 – DIN 125 (001)	18
Šroub	M4x12 – DIN 912 (ocel 8.8, zinek bílý)	34
Šroub	Plastový M3x40 – DIN 85	18
Mosazný spojovač typ 1	Mosaz – 1 mm tloušťka, CO2 laser	2
Mosazný spojovač typ 2	Mosaz – 1 mm tloušťka, CO2 laser	16
Mosazný spojovač typ 3	Mosaz – 1 mm tloušťka, CO2 laser	1
Kryt	Infračervený laser, materiál PET	1

Tabulka 20: Seznam všech dílů a příslušných materiálů, ze kterých bude vyroben jeden segment trakční baterie

Příloha D

Součástka	Výrobní číslo	Obchod - obchodní číslo	Počet kusů
C1	C0603C100J5GAC	80-C0603C100J5GAC	1
H1 - "zástrčka"	640388-2	571-6403882	1
H1 - "zásuvka"	3-643817-2	571-3-643817-2	1
Q1	STP03D200	511-STP03D200	1
Q2	BC847B	637-BC847B	1
R1	RF2CT521A471J	660-RF2CT521A471J	1
R2-R6	ERJ-8ENF9103V	667-ERJ-8ENF9103V	5
R7	CRG0805F470R	279-CRG0805F470R	1
V1-V16	APDA3020LSECK/J3-PF	604-APDA3020LSECKJ3F	16
V17-V32	BZV55C8V2	821-BZV55C8V2	16
Distanční sloupek	8G509V40696	DR8G509V40696	4
Světelná trubice	LFB012CTP	593-LFB012CTP	16

Tabulka 21: Seznam součástek, které obsahuje napěťový indikátor trakční baterie