



## **Bakalářská práce**

# **Návrh trakční baterie pro hybridní pohon vozu Formula Student**

*Studijní program:*

B0714A270001 Mechatronika

*Autor práce:*

**Vítek Hanzlík**

*Vedoucí práce:*

Ing. Pavel Jandura, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Návrh trakční baterie pro hybridní pohon vozu Formula Student

*Jméno a příjmení:*

**Vítek Hanzlík**

*Osobní číslo:*

M20000106

*Studijní program:*

B0714A270001 Mechatronika

*Zadávající katedra:*

Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Akademický rok:*

2022/2023

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu poznání technologií lithiových akumulátorů se zaměřením na trakční aplikace.
2. Proveďte průzkum trhu a vytipujte vzorky elektrochemických článků vhodných pro danou aplikaci.
3. Ověřte parametry vybraných článků na bateriových testerech a proveďte vzájemné srovnání.
4. Navrhněte a realizujte funkční vzorek trakční baterie včetně BMS, respektující aktuálně platná pravidla Formula Student.
5. Funkční vzorek trakční baterie podrobte zkouškám na bateriovém testeru, dle možností i ve voze.

*Rozsah grafických prací:* dle potřeby dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* 30-40 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] XIONG, Rui. *Battery management algorithm for electric vehicles*. [Beijing]: China Machine Press, [2020]. ISBN 978-7-111-60864-6.
- [2] RAHN, Christopher D. a Chao-Yang WANG. *Battery systems engineering*. Chichester: Wiley, 2013. ISBN 978-1-119-97950-0.
- [3] ANDREA, Davide. *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston: Artech House, [2010], xi, 290 p. ISBN 16-080-7104-9.
- [4] WEICKER, Phillip. *A systems approach to lithium-ion battery management*. Boston: Artech House, [2010], 299 pages. ISBN 16-080-7659-8.

*Vedoucí práce:* Ing. Pavel Jandura, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Datum zadání práce:* 12. října 2022  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 15. května 2023

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 12. října 2022

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

# Návrh trakční baterie pro hybridní pohon vozu Formula Student

## Abstrakt

V rámci práce je čtenáři uvedena problematika lithiových článků a baterií, vztažená hlavně na návrh a konstrukci baterie pro hybridní elektrický vůz soutěže Formula Student. Rozebrány jsou aspekty jako chlazení, bezpečnost, uspořádání článků a odhadování jejich stavů, nebo například spolehlivost. Popsán je dále stav trhu lithiových článků a problematika testování článků pro volbu nejvhodnějších možných pro danou aplikaci. Rozebráno je jak testovací za-pojení, tak proveditelné druhy testů a jejich význam. Detailně rozebrán je potom návrh baterie s přihlédnutím k požadavkům a omezením vyplývajícím ze soutěže a z konstrukce konkrétního vozu. Rozebrány jsou jak mechanické aspekty vnitřní konfigurace a utěsnění baterie, tak dimenzování komponent a návrh BMS. Diskutovány jsou nakonec problémy spojené s konstrukcí tohoto návrhu.

## Klíčová slova

Formula Student, Baterie, Články, Hybrid, BMS

# Design of a Traction Battery for the Hybrid Drive of the Formula Student Car

## Abstract

In this thesis, the reader is introduced to the issues associated with lithium cells and batteries related mainly to the design and construction of Formula Student hybrid electric vehicle battery. Aspects such as cooling, safety, the arrangement of cells, and the estimation of their states, as well as reliability are addressed. Next, the condition of the lithium cell market is evaluated along with the issues associated with lithium cell testing for determining the most suitable candidate. Both the test setup as well as the different kinds of tests that can be performed are addressed. Next, the design of a battery constrained by the requirements and limitations given by both the competition and the specific vehicle is described in detail. Mechanical aspects of construction such as the internal configuration and sealing of the battery, but also component dimensioning and BMS design are included. Lastly, problems associated with the construction of the created design are discussed.

## Keywords

Formula Student, Batteries, Cells, Hybrid, BMS

## Poděkování

Tato práce by nemohla vzniknout bez univerzitního týmu FS TUL Racing a jeho členů. Chtěl bych tak poděkovat vedoucímu sekce elektroniky Tadeáši Březskému za jeho spolupráci při diskusi návrhu hybridního systému formule, vedoucí marketingové sekce Sáře Čelišové za její rychlé řešení objednávek a s nimi spojených problémů, jakož i kapitánu Ondřeji Macháčkovi, vedoucímu rámu Ondřeji Polívkovi, Jozefovi Jaroslavovi Fekiačovi a vedoucímu podvozku a řízení Ladislavovi Horálkovi za jejich spolupráci při integrování baterie do vozu a její výrobě.

Rovněž bych chtěl poděkovat Technické univerzitě v Liberci, obzvláště pak Fakultě strojní a Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií za jejich podporu našeho týmu v mnoha formách, neboť by se bez ní tým neobešel.

Dále bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, Ing. Pavlu Jandurovi, Ph.D., za jeho rozsáhlou podporu při testování článků a tvorbě bakalářské práce nad rámec jeho povinností a Ing. Lukáši Krčmářovi za seznámení s obsluhou a používáním technologie micro TIG.

Konečně bych chtěl poděkovat své rodině za jejich podporu.

# Obsah

Úvod.....	13
<b>1 Lithiové akumulátory .....</b>	<b>14</b>
1.1 Terminologie.....	14
1.2 Parametry článků .....	14
1.3 Stav článků.....	15
1.3.1 Stav nabití .....	15
1.3.2 Zdraví článku .....	15
1.3.3 Dostupný výkon.....	16
1.4 Vliv teploty .....	16
1.4.1 Mechanismy oteplování článků .....	16
1.5 Srovnání s alternativními články .....	16
1.6 Druhy článků .....	17
1.6.1 Dle parametrů.....	17
1.6.2 Dle chemického složení .....	17
1.6.3 Dle pouzdra.....	18
1.7 Pracovní oblast článků.....	19
1.7.1 Riziko katastrofického selhání.....	19
1.8 Životnost.....	19
1.8.1 Mechanismy stárnutí.....	19
1.8.2 Projevy stárnutí .....	20
1.9 Modelování baterií.....	20
1.9.1 Metody odhadu SOC.....	20
1.9.2 Metody odhadu SOP .....	21
1.10 Nabíjení článků.....	21
1.11 Pulzní zatěžování baterie .....	22
<b>2 Lithiové baterie.....</b>	<b>23</b>
2.1 Volba článku .....	23
2.1.1 Testovací standardy.....	23
2.1.2 Testovací vybavení.....	23
2.1.3 Metody testování parametrů článků.....	23
2.2 Uspořádání článků v baterii .....	24
2.2.1 Z pohledu spolehlivosti.....	25
2.2.2 Z pohledu bezpečnosti .....	25
2.2.3 Z pohledu kapacity.....	25

2.3	Teplotní regulace baterie.....	25
2.3.1	Chlazení vzduchem.....	25
2.3.2	Chlazení kapalinou.....	26
2.3.3	PCM chlazení.....	26
2.3.4	HP technologie.....	26
2.4	BMS.....	26
2.4.1	Balancování.....	26
2.4.2	Dle topologie.....	27
2.5	HEV.....	27
2.5.1	Rozdělení HEV.....	27
2.5.2	Závodní HEV.....	27
2.5.3	Sportovní HEV.....	28
2.6	Formula student.....	28
2.6.1	Pravidla pro baterii vozu Formula student.....	29
<b>3</b>	<b>Rešerše trhu.....</b>	<b>31</b>
3.1	Stanovení požadavků na články.....	31
3.1.1	Požadavky vycházející z pravidel.....	31
3.1.2	Vlastní požadavky.....	31
3.1.3	Požadavky alternativní strategie.....	32
3.2	Dostupné články.....	32
3.2.1	Články pro modelářské účely.....	33
3.2.2	Články na míru.....	34
3.2.3	Články určené pro konstrukci baterií.....	34
3.3	Zvolené články.....	34
<b>4</b>	<b>Testování článků.....</b>	<b>36</b>
4.1	Testovací zapojení.....	36
4.2	Úvodní testy.....	37
4.2.1	Poznátky z úvodních testů.....	38
4.3	Analýza dat telemetrie pro stanovení parametrů testu.....	39
4.4	Srovnávací testy.....	40
4.4.1	Specifikace testů.....	40
4.4.2	Výsledky testů.....	41
4.4.3	Výběr článku.....	42
<b>5</b>	<b>Návrh funkčního vzorku baterie.....</b>	<b>44</b>
5.1	Testování limitů zvoleného článku.....	44
5.2	Základní parametry baterie.....	44



5.2.1	Uspořádání článků .....	44
5.2.2	Rozměry a umístění .....	44
5.2.3	Metoda chlazení .....	45
5.2.4	Chladicí médium .....	46
5.3	Výběr elektroniky .....	46
5.3.1	Proudové čidlo .....	46
5.3.2	Pojistka .....	46
5.3.3	Stykač .....	47
5.3.4	Konektory .....	47
5.4	Precharge .....	48
5.5	Návrh BMS .....	48
5.5.1	Výběr BMS čipu .....	49
5.5.2	Měření teploty .....	49
5.5.3	Výběr mikropočítače .....	51
5.5.4	Napájecí obvod .....	51
5.5.5	Další součástky .....	52
5.6	Dimenzování vodičů .....	53
5.6.1	Měřicí vodiče .....	53
5.6.2	Přípojnice .....	53
5.6.3	Ostatní vodiče .....	54
5.7	Návrh pouzdra baterie .....	54
5.7.1	Tlaková výpusť .....	56
5.7.2	Uchycení k rámu .....	56
5.7.3	Průchodky pro kontakty .....	57
5.7.4	Spojovací materiál .....	58
5.8	Úpravy na základě HSD .....	58
5.9	Problémy v konstrukci .....	58
5.10	Problémy při realizaci funkčního vzorku .....	58
	<b>Závěr .....</b>	<b>60</b>
	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>61</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>64</b>
A	Články vybrané pro testování .....	64
B	Další pohledy na návrh baterie .....	66
C	Schéma, PCB a BOM precharge obvodu .....	68
D	Schéma, PCB a BOM BMS .....	71
E	Schéma, PCB a BOM napěťového zdroje .....	77

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Ilustrace zapojení xPyS a ySxP .....	24
Obrázek 4.1: Demonstrace přivařování vývodů k článku technologií micro TIG .....	36
Obrázek 4.4.2: Článek Sony VTC5D s termočlánkem v testovací komoře připojený přes pomocné kontakty. ....	37
Obrázek 5.1: Předběžné umístění baterie v úvodním návrhu rámu .....	45
Obrázek 5.2: Osazený obvod precharge.....	48
Obrázek 5.3: Detail uchycení teplotního čidla k přípojnici .....	49
Obrázek 5.4: Osazený napájecí obvod .....	52
Obrázek 5.5: Jednotlivé verze rozvržení hlavních komponent baterie .....	54
Obrázek 5.6: Finální návrh baterie s odejmutými kryty.....	55
Obrázek 5.7: Detail uchycení baterie pomocí hliníkového pásu přivařeného k baterii (zelená) a ocelového plátu přivařeného k rámu (modrá) .....	56
Obrázek 5.8: Řez průchodkou kladného pólu baterie .....	57

## Seznam grafů

Graf 4.1: Nabíjení článku 1 C se znázorněním hranice proudu 1/20 C .....	39
Graf 4.2: Naměřená data z telemetrie a jejich FFT analýza.....	40
Graf 5.1: Výpočet napětí na napěťovém děliči při nominálních hodnotách .....	50

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Srovnání typických hodnot parametrů běžných technologií článků [1] [3] [4] [7] [8] [9] [10] [11] [12].....	17
Tabulka 3.1: Dostupnost technických listů u výrobců modelářských baterií .....	33
Tabulka 3.2: Dostupnost technických listů u vybraných prodejců modelářských baterií.....	33
Tabulka 3.3: Porovnání baterie vyrobitelné z reprezentativního LFP a ternárního článku.....	35
Tabulka 4.1: Parametry použité pro srovnání jednotlivých článků.....	42

## Seznam zkratek

HEV	Hybrid Electric Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Vehicle
BEV	Battery Electric Vehicle
SOC	State of Charge
SOP	State of Power
SOH	State of Health
LCO	Lithium Cobalt Oxide
LMO	Lithium Manganese Oxide
LFP	Lithium Iron Phosphate
LNO	Lithium Nickel Oxide
NCM	Nickel-cobalt-manganese
NCA	Nickel-cobalt-aluminium
Li-Ion	Lithium iontové články
LiPo	Lithium polymerové články
PCM	Phase Change Material
HP	Heat Pipe
CC	Constant Current
CV	Constant Voltage
OCV	Open Circuit Voltage
DOD	Depth of Discharge
DCIR	Direct Current Internal Resistance
ACIR	Alternating Current Internal Resistance
FS	Formula Student
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
SOP	State of Power
EOL	End of Life
RUL	Remaining Useful Life
Ni-MH	Nickel Metal Hydride Cell
SEI	Solid Electrolyte Interphase
MCD	Multi-Constrained Dynamic
HPPC	Hybrid Pulse Power Characterisation
EIS	Electrical Impedance Spectroscopy
HSD	Hybrid System Description
TIG	Tungsten Inert Gas
TXL	Thin-Wall Cross-Linked
NBR	Butadien-akrylonitrilový kaučuk
PE-UHMW	Ultra-vysoko-molekulární polyethylen
NO	Normally Open
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
CMMR	Common-Mode Rejection Ratio
ADC	Analog-To-Digital Converter
NTC	Negative Temperature Coefficient
TVS	Transient Voltage Suppressor
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
CAN	Controller Area Network
IP	Ingress Protection

SOE	State of Energy
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
ESR	Equivalent Series Resistance
TWAI	Two-Wire Automotive Interface
BOM	Bill of Materials

## Úvod

Tato práce si dává za cíl sloužit jako úvod do problematiky lithiových článků, jakož i do tématu návrhu trakční baterie s nízkým napětím pro napájení elektrické části pohonu hybridního monopostu FS. Hlavní zaměření je potom na samotné bateriové články, neboť jejich výběr a vlastnosti jsou nejvíce specifickým problémem spojeným s konstrukcí trakční baterie.

V první části bude popsán stav poznání v oblasti lithiových bateriových článků co do jejich druhů, parametrů a vlastností. Rozebrána rovněž budou některá specifika konstrukce baterií z těchto článků, uvedeny budou i příklady baterií reálných sportovních a závodních vozů.

V druhé části budou stanoveny požadavky na baterii a články vycházející z pravidel soutěže FS a zvolené strategie používání hybridního pohonu. S přihlédnutím k těmto požadavkům pak bude rozebrán skutečný stav trhu, přičemž bude posouzena hlavně vhodnost variant článků pro konkrétní aplikaci v baterii hybridní formule FS. Z dostupných článků pak budou zvoleny vzorky, které jsou svými parametry těmto požadavkům dostatečně blízké, a o kterých lze tedy uvažovat pro použití v monopostu.

Ve třetí části bude nejprve na základě úvodních experimentů s několika články vytvořena metoda pro testování, jenž dovolí články mezi sebou co nejlépe porovnat z hlediska požadavků stanovených v části druhé. Všechny vybrané články pak budou podrobeny řadě testů dle této metody, nejen však pro jejich srovnání, ale i pro ověření a doplnění jejich vybraných parametrů, především pak parametrů výkonových a kapacity.

Ve čtvrté části pak bude navržena vhodná baterie využívající zvolené články při respektování pravidel FS. Návrh bude kompletní, včetně elektroniky pro ochranu a monitorování stavu baterie. Prioritou přitom bude relativní jednoduchost, nízká váha a optimalizace cenové náročnosti, jakož i další požadavky vyplývající z předchozích částí. Konečně bude diskutována konstrukce baterie a s ní spojené problémy.

# 1 Lithiové akumulátory

Lithiové akumulátory jsou již několik let nejperspektivnějším zdrojem energie pro elektrická vozidla, neboť disponují vysokou energetickou i výkonovou hustotou, účinností, životností a nízkou cenou za kWh. Jejich mechanické, teplotní a elektrické parametry však vykazují značnou svázanost, což vede na nelineární, v čase proměnné a na teplotě závislé vlastnosti [1] [2].

## 1.1 Terminologie

Terminologie elektrochemických zdrojů energie je v běžné řeči do jisté míry smíchaná. Lze se setkat například s termínem „baterie“ jak pro jednotlivé jednorázové „tužkové“ články, tak pro 12 V autobaterie, skládající se z šesti článků. Proto je důležité jednoznačně stanovit terminologii, která bude dále v práci používána:

- **Článek** či **akumulátor** je základní ucelený elektrochemický prvek baterie skládající se z elektrod, separátoru, elektrolytu, pouzdra a dalších elementů.
- **Blok** je čistě paralelní kombinace článků.
- **Modul** je prvek, který obsahuje několik propojených článků v pouzdře, typicky s elektronikou monitorující stav těchto článků.
- **Baterie** je samostatný celek skládající se z vícera článků, případně modulů.

## 1.2 Parametry článků

Jako parametry článků chápeme veličiny, jejichž hodnoty je možné změřit či vypočítat bez předem známých specifikací článků či jejich minulosti.

Pro popis vybíjecích a nabíjecích proudů je používána zkratka C, jenž indikuje, kolikrát vyšší je proud protékající baterií než její vlastní kapacita v ampérhodinách. Například proud 10 C odebíraný z baterie s kapacitou 4,5 Ah odpovídá proudu 45 A.

- **OCV** je svorkové napětí na prázdko čili napětí, které lze naměřit na nezátženém článku. Díky dynamice článků však před měřením musí být ponechán čas pro ustálení, což může trvat řádově sekundy až hodiny. Napětí klesá s klesajícím SOC a lze pozorovat hysterezi napětí podle toho, zda článek byl naposledy nabíjen, nebo vybíjen. Při zahřátí článku OCV roste.
- **Minimální a maximální mezní napětí** jsou jedny z mezních hodnot pracovní oblasti článku a jsou dány jeho konstrukcí a složením.
- **DCIR** (také dynamický odpor) určuje napěťový pokles při zatížení článku určitým stejnosměrným proudem dle Ohmova zákona. Velikost tohoto odporu závisí na hladině SOC, nejnížší bývá při stavu zhruba polovičního napětí. Roste s klesající teplotou, vysokým proudem, při nabíjení a s opotřebením článku.
- **ACIR** je měřen přivedením proudové či napěťové sinusoidy na článek. Běžně je hodnota tohoto odporu udávána při frekvenci 1 kHz.
- **Gravimetrická výkonová hustota** (jednotka W/kg) a **volumetrická výkonová hustota** (jednotka W/l) jsou veličiny popisující výkonové parametry článku vztahované k jeho hmotnosti, respektive objemu.

- **Gravimetrická hustota energie** (jednotka Wh/kg) a **volumetrická hustota energie** (jednotka Wh/l) obdobně popisují kapacitu článku vztahenou k váze, respektive objemu článku.
- **Nominální kapacita článku** odpovídá množství náboje či energie, které lze z článku za pokojové teploty odebrat. Je udávána jak v ampérhodinách, tak ve watthodinách. Může ji snížit rychlé vybíjení, nízké teploty či například stárnutí. V literatuře se lze setkat s jejím určením vybíjením plně nabitého článku rychlostí 1/30 C, v technických listech výrobců však lze najít nominální kapacitu uvedenou při vybíjení proudem 0,2 C s různými minimálními napětími pro tento test.
- **Kapacita článku** není statická veličina, kvůli omezené prostupnosti vnitřního prostředí článku pro ionty a vnitřnímu odporu závisí na proudovém vytížení článku [1] [3].

### 1.3 Stav článku

Stavy na rozdíl od parametrů není běžně možné změřit a obvykle ani není možné jejich přesné stanovení. Vyžadují typicky apriori znalost charakteristické vlastnosti článku (např. SOC-OCV křivka) nebo znalost historie článku (např. počet cyklů, které absolvoval).

#### 1.3.1 Stav nabití

SOC popisuje zbývající kapacitu článku jako její podíl ku kapacitě nominální (analogie palivoměru). Jelikož vychází z kapacit v ampérhodinách nezohledňujících napětí článku, nepopisuje přímo energii v článku uloženou. SOC-OCV křivka představuje nelineární vztah SOC a OCV, který lze využít pro vysoce opakovatelný (i když na teplotě závislý) odhad SOC.

Veličina SOE je analogem SOC, avšak vycházející z energie namísto kapacity v ampérhodinách, pro elektrické vozy je tedy výhodnější.

Přesný odhad SOC je při dynamických podmínkách obtížný, pro elektromobilitu však žádoucí, neboť ho lze použít například pro stanovení dynamických limitů nabíjecích a vybíjecích proudů.

Hodnota DOD je pouze opakem SOC, určuje míru vybití článku. Lze ji stanovit jako  $100\% - SOC$  [3] [4] [5].

#### 1.3.2 Zdraví článku

SOH je kvantitativní index stanovený jako podíl stávající a původní nominální kapacity článku. Se stárnutím článku klesá a umožňuje tak posouzení stupně jeho opotřebení. Článek je označován za nepoužitelný, když dosáhne hranice konce životnosti (EOL). V elektromobilitě tato hranice obvykle SOH 80 %. Přesný a robustní odhad SOH je spolu s odhadem SOC složitý a je předmětem akademického i průmyslového zájmu.

RUL je hodnota s SOH úzce spojená, neboť udává počet cyklů zbývajících do dosažení EOL při daných provozních podmínkách. Její stanovení je však extrémně náročné [1] [3].

### 1.3.3 Dostupný výkon

SOP popisuje dostupný špičkový výkon článku za stávajících podmínek po daný časový okamžik [5]. Závisí jak na SOC, tak na napětí, stávajícím vytížení a teplotě článku [1].

## 1.4 Vliv teploty

Pracovní teplota lithiových článků je omezená, typicky je přijatelné rozmezí  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přičemž za optimální lze považovat  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Opuštění této oblasti vede k urychlení ztráty životnosti a snížené bezpečnosti.

Při nízkých teplotách klesá iontová vodivost elektrolytu a difuzivita lithiových iontů v elektrodách. Roste tedy vnitřní odpor, což zapříčiňuje nižší kapacitu a výkon článku. Navíc se na anodě mohou vylučovat dendrity z kovového lithia, které mohou prorazit separátor a zapříčinit tak zkrat.

Mechanismy ovlivňující články při vysokých teplotách jsou složité. Kapacita a výkon jsou rovněž ovlivněny, což je spojeno s nárůstem vnitřního odporu a ztrátou volných lithiových iontů [6].

### 1.4.1 Mechanismy oteplování článků

Články se při provozu ohřívají hlavně skrze následující čtyři děje:

- **Reakční teplo** – elektrochemická reakce při nabíjení a vybití uvolňuje teplo přímo úměrné proudu. Množství tepla je ovlivněné vlastnostmi materiálu elektrody.
- **Joulovo teplo** – ohmický vnitřní odpor článku generuje teplo odpovídající kvadrátu proudu skrze něj. Tento odpor zahrnuje odpor kontaktů, elektrod a elektrolytu. Joulovo teplo je zodpovědné za většinu ztrátového tepla při nabíjení a vybití článku.
- **Polarizační teplo** – protékající proud vede ke změně elektrodového potenciálu článku oproti rovnovážnému stavu, přičemž teplo odpovídá kvadrátu proudu.
- **Teplo vedlejších reakcí** – je uvolněno rozkladem elektrolytu, samovybitím a při překročení mezních napětí. Jeho velikost je při běžných provozních podmínkách zanedbatelná [1].

## 1.5 Srovnání s alternativními články

Nejstaršími dobíjecími články jsou články olovené. Vynalezl je v roce 1859 Francouz Gaston Planté. Dodnes jsou používány díky jejich dobré účinnosti, nízké ceně a jednoduchosti například jako startovací baterie v automobilech či jako úložiště energie.

V roce 1899 je pak následovaly články Ni-Cd. I když přinesly oproti Pb bateriím vyšší výkonové hustoty, vyšší životnost a disponují navíc odolností proti přílišnému vybití i přepólování, díky toxicitě Cd jsou dnes zavrhovány. Mohou navíc trpět paměťovým efektem, což je jev, kdy velmi pravidelné neúplné vybití článku vede za specifických podmínek k dočasné ztrátě kapacity.

Ni-MH články byly prvními které nabízely kombinaci bezpečnosti, dobré kapacity při širokém rozpětí teplot, recyklovatelnosti a ekologičnosti, byly i používány v jedněch z prvních HEV.



Paměťový efekt se stále může vyskytovat, avšak jen v menší míře. Trpí ale na poměrně velké tempo samovybití.

Lithiové články netrpí paměťovým efektem a jsou nejučinnější dostupnou bateriovou chemií. Disponují nejvyšší životností, jsou ekologičtější a mají jen pomalé tempo samovybití, hlavně však nabízejí větší hustoty výkonu a energie, staly se proto pro elektrická vozidla preferovanými [2] [3] [7].

Tabulka 1.1: Srovnání typických hodnot parametrů běžných technologií článků [1] [3] [4] [7] [8] [9] [10] [11] [12]

Parametr	Olověná (Pb)	Ni-Cd	Ni-MH	Li
<b>Nominální napětí</b>	2 V	1,2 V	1,2 V	1,9 až 3,8 V
<b>Gravimetrická hustota energie</b>	26 až 44 Wh/kg	20 až 56 Wh/kg	42 až 80 Wh/kg	100 až 300 Wh/kg
<b>Volumetrická hustota energie</b>	70 až 111 Wh/l	40 až 110 Wh/l	160 až 240 Wh/l	245 až 800 Wh/l
<b>Gravimetrická hustota výkonu</b>	Až 200 W/kg	Až 460 W/kg	Až 800 W/kg	Až 4000 W/kg
<b>Volumetrická hustota výkonu</b>	Až 500 W/l (dopočteno z max. hodnot)	Až 1250 W/l	Až 1400 W/l	Až 7000 W/l
<b>Životnost</b>	50 až 5000 cyklů	300 až 10000 cyklů	300 až 1200 cyklů	1000 až 20000 cyklů
<b>Samovybití</b>	4 až 30 % za měsíc	5 až 20 % za měsíc	15 až 25 % za měsíc	0,5 až 10 % za měsíc

## 1.6 Druhy článků

### 1.6.1 Dle parametrů

Obecně lze výkonové parametry článku vylepšit na úkor kapacity a naopak. Články proto lze rozdělit na dvě skupiny lišící se obzvláště v materiálu elektrod a jejich spojení s vývody článku. Tyto skupiny jsou high power (density) a high energy (density). Články high power disponují vysokými výkonovými hustotami, jejich konstrukce optimalizuje snížení vnitřního odporu a zpřístupnění aktivního materiálu. Články high energy zase disponují vysokými hustotami energie hlavně díky optimalizaci množství dostupného aktivního materiálu. Reálné články pak svými parametry mohou být mezi těmito dvěma extrémami [13].

### 1.6.2 Dle chemického složení

Z pohledu rozdělení baterií je nejvýznamnější složení kladné a záporné elektrody, jakož i složení elektrolytu.

Elektrolytem je roztok lithiových solí smíšených s organickými rozpouštědly. Lithiové články s tekutým elektrolytem jsou běžně označovány jako Li-Ion. LiPo články se pak liší pouze v použití elektrolytu gelového.

Složení kladné elektrody ovlivňuje vlastnosti baterie nejvýrazněji. Dále jsou uvedeny nejobvyklejší materiály:

- LCO ( $\text{LiCoO}_2$ ) nabízí dobrou životnost za cenu nízké teplotní stability a potenciální nebezpečnosti.
- LMO ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) oproti LCO nabízí lepší teplotní stabilitu, avšak za cenu nižší kapacity a životnosti
- LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ) je dostupný materiál disponující vysokou teplotní stabilitou a dlouhou životností. Dosahuje však jen nižších napětí, typicky je nominální 3,2 V, maximální 3,6 V a minimální 2,0 V. Má navíc nízkou energetickou hustotu a je náchylný na nízké teploty. Díky své výborné bezpečnosti však přesto nachází využití v elektromobilech.
- LNO ( $\text{LiNiO}_2$ ) disponuje energetickou hustotou mezi LCO a LMO a nedosahuje příliš velké životnosti.
- NMC ( $\text{Li}(\text{Ni}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y)\text{O}_2$ ) je jedním z takzvaných ternárních složení. Kombinuje v podstatě LCO, LMO a LNO pro dosažení lepších výsledných vlastností. Vlastnosti ternárních elektrod jsou dány poměrem jednotlivých složek, ze kterých jsou tvořeny. Mezi časté poměry patří 333, 523 a 811, přičemž každá cifra reprezentuje poměrný podíl dané složky. Jeho výhody jsou vysoká energetická hustota, životnost a vysoké napětí, díky nimž je jedním z nejpoužívanějších složení na poli elektromobility.
- NCA ( $\text{Li}(\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Al}_y)\text{O}_2$ ) je dalším z ternárních složení. Rovněž nachází uplatnění v elektromobilech, parametry je podobný NMC [2] [4].

Aktivní materiál záporné elektrody je obvykle uhlík, případně s příměsí křemíku ve formě  $\text{SiO}_x$ . Křemíková příměs umožňuje dosáhnout vyšší energetické hustoty [7]. Uhlík ve formě grafenu rovněž dosahuje vyšších energetických hustot. LTO ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) dosahuje velké popularity na trhu elektrických vozidel díky vysoké životnosti a výkonové hustotě i přes nižší kapacity a napětí [14].

### 1.6.3 Dle pouzdra

K dispozici jsou baterie ve třech různých pouzdech:

- **Válcové** nebo **cylindrické** články mají tvar válce. Jejich obsah je tvořen z několika kontinuálních pásů navinutých do role. Zatímco ostatní pouzdra vyžadují v současnosti mechanické sevření, které brání jejich deformaci způsobené vnitřním rozpínáním, válcové články tomuto problému nepodléhají. Je možné je dále dělit na velké či malé.
  - **Malé** mají kovové pouzdro. Na jejich svorky je nutno přivařit kovové pláty (např. niklové či měděné), což znemožňuje je v baterii vyměnit. Obsahují PTC element určený pro omezení abnormálně vysokých proudů a bezpečnostní ventil pro uvolnění vnitřního tlaku a zabránění puknutí článku
  - **Velké** mohou mít pouzdro i z tvrdého plastu. Jejich svorky jsou šroubovací.
- **Prizmatické** (také „hard-case“) mají tvar hranolu, vnitřní konstrukcí ale odpovídají článkům cylindrickým čili jsou tvořeny z kontinuálních pásů navinutých do role. Jejich kryt je pevný a svorky obsahují závitovou díru. Mají přetlakový ventil.
- **Pouch** články se vnitřně skládají ze samostatných na plocho vrstvených elektrod. Jejich kryt je pouze lehký „pytlík“ tvořený hliníkovou fólií, teoreticky tak mohou mít nejvyšší energetickou hustotu. Jsou však náchylné na mechanické poškození a aktuálně komerčně dostupným chemickým složením vyžadují sevření. K jejich vývodům se lze

připojit pomocí přivaření, sevření nebo připájení, není tedy obecně možné tyto články v případě selhání vyměnit [4] [15].

## 1.7 Pracovní oblast článků

Bezpečná pracovní oblast článků je určena mezním proudem, napětím a teplotou, případně SOH a SOC. Přílišné nabití článek poškodí, může dojít až k jeho vzplanutí. Přílišné vybití obvykle pouze zhorší jeho parametry. Mimo pracovní oblast a na jejích krajích je životnost článku snižena.

Pro zabránění přehřátí baterie je možné pracovní oblast omezit i maximálním výkonem. Nejjednodušší je stanovení limitů na základě nejhorších předpokládaných pracovních podmínek. Složitějším přístupem je využití stavového modelu pro určování dynamických limitů, tento přístup však vyžaduje přesný odhad parametrů a stavů baterie. [3]

Článek dodá nejvyšší výkon, když je jeho vnitřní odpor stejný jako odpor zátěže. Například článek M1 26650 od společnosti A123 je takto schopný dodat 500 W při 150 A, avšak po méně než 10 s. Tento pracovní režim lze přesto uvažovat pro závodní vozidla, kde životnost není důležitá a snížená bezpečnost je přijatelná [4].

### 1.7.1 Riziko katastrického selhání

Při hrubém vyvedení článku z bezpečné pracovní oblasti může dojít k samovolnému růstu jeho teploty způsobenému exotermickou reakcí uvnitř něj. Tento jev je známý jako thermal runaway. Může vést k úniku hořlavé směsi plynů, kapalin a pevných částic z článku, jakož i k jeho požáru či explozi.

Thermal runaway může být způsoben nabitím článku na více než 150-200 % jeho nominální kapacity. Vnější zkrat naopak v závislosti na vnitřní konstrukci článku tento jev způsobit nemusí. Mechanismem mechanického a tepelného způsobení thermal runaway je pak nejčastěji porušení separátoru, které má za následek vnitřní zkrat baterie. Jakmile nastane v jednom článku, existuje riziko jeho rozšíření po celé baterii. Nabízí se několik strategií, jak zmírnit případné následky, například omezení styku vypuzených plynů s kyslíkem, zastavení reakce způsobující hoření, oddělení vypuzených plynů od oblasti možného vznícení, snížení teploty plynů nebo odvedení plynů z výrazně teplých oblastí. Za tímto účelem lze využít hašení vodou, pěnou, CO<sub>2</sub>, práškem či plynem [16].

## 1.8 Životnost

### 1.8.1 Mechanismy stárnutí

Po prvním nabití vzniká mezi elektrolytem a zápornou elektrodou tenká vrstva SEI chránící elektrodu před korozí. Ta však s časem a využíváním baterie narůstá, což vede k poklesu koncentrace aktivních iontů v elektrolytu a dostupnosti aktivního materiálu elektrod. Růst této vrstvy je navíc zrychlen vyšší teplotou, což vysvětluje její vliv na životnost. Změny objemu a struktury aktivního materiálu během cyklování baterie pak vedou k jeho ztrátě odpadáváním do elektrolytu, což elektrolyt znečišťuje. Tyto dva mechanismy jsou hlavní příčinou ztráty vlastností článků [1] [3] [4].

## 1.8.2 Projevy stárnutí

Jedním z projevů stárnutí článku je změna tvaru OCV-SOC křivky, která se projevuje obzvláště v oblasti nízkého SOC. Dále roste hodnota vnitřního odporu s počtem uplynulých cyklů, což lze považovat za hlavní příčinu poklesu životnosti baterie.

Růst vnitřního odporu vede k většímu poklesu napětí na baterii při zátěži, což ponechává část kapacity nevyužitou předčasným dosažením dolního mezního napětí. Tento jev lze kompenzovat pomocí aplikace Ohmova zákona – nabíjecí mezní napětí se zvýší a vybíjecí sníží o pokles napětí na vnitřním ohmickém odporu baterie.

V úvodním stádiu života může kapacita baterie paradoxně vzrůst (baterie by tedy měla SOH > 100 %). Tento jev lze pozorovat jako úvodní pokles DCIR a nárůst kapacity článku, trvající cca. 100 cyklů. [1] [3] [4]

## 1.9 Modelování baterií

Návrh baterií může být uskutečněn empiricky nebo na základě modelů. Tvorba matematických modelů baterií je obtížným problémem díky hysterezi, nelinearitě a silné proměnlivosti v čase. Hlavními přístupy k tvorbě modelů je elektrochemický, pomocí ekvivalentních obvodů a jako černé skříňky [3].

- Elektrochemické modely jsou spojené s fyzikální realitou článků. Umožňují simulovat i vnitřní stavy baterie, jsou však velice výpočetně náročné díky své složitosti. Zjednodušený model obsahuje až 23 vnitřních parametrů, přičemž některé je obtížné nebo nemožné změřit a jiné se mění se stárnutím článku.
- Ekvivalentní obvody vycházejí z vnějších parametrů baterie pro sestavení obvodů popisujících jejich chování. Jsou dobře použitelné za různých provozních podmínek a nejsou výpočetně náročné, což vede k jejich častému využití v BMS elektrických vozidel. Svorkové napětí je reprezentováno napěťovým zdrojem, rezistorem pak je reprezentován ohmický vnitřní odpor materiálu elektrod, elektrolytu a dalších prvků. Lze přidat i jeden a více RC členů reprezentujících dynamické vlastnosti baterie. Nejpoužívanějšími ekvivalentními obvody jsou Rintův (bez RC členu), Theveninův (jeden RC člen) a s dvojitou polarizací známý jako dual polarization (dva RC členy). Rintův model vede na výrazně méně přesné výsledky oproti ostatním.
- Modelování baterie jako černé skříňky vychází z Theveninova modelu. Vede k přesnějším výsledkům (zvláště ACIR) než modely z ekvivalentních obvodů za cenu o něco vyšší výpočetní náročnosti.

Při modelování kompletní baterie je také nutné zohlednit nevyrovnanost článků. Jedna ze dvou hlavních metod uvažuje baterii jako model článku vysoké kapacity za předpokladu výborné vyrovnanosti článků, druhá pak vyžaduje výběr článku, kterým lze reprezentovat parametry baterie [1].

### 1.9.1 Metody odhadu SOC

Předpokladem všech metod odhadu uplatněných v bateriích obecně je, že BMS neprovádí vybíjení nebo nabíjení baterie a neumožňuje podrobit baterii pulzům či sinusoidám proudu. Takový systém by byl složitý a drahý. Navíc by nebylo možné jeho univerzální využití pro různé

baterie. Dále platí předpoklad konečné vzorkovací frekvence senzorů, typicky 10 Hz, díky kterému není třeba modelovat rychlé dynamické děje. Nepoužívanější odhady jsou následující:

- Odhad z charakteristických parametrů využívá stabilní, snadno měřitelné charakteristické parametry článků pro stanovení SOC (např. dostupná kapacita, impedanční spektrum nebo OCV). Tato metoda je jednoduchá a výpočetně nenáročná, je však náchylná na velké nepřesnosti a vyžaduje pravidelnou kalibraci.
- Metoda integrace, rovněž známá jako počítání coulombů (coulomb counting) nebo počítání proudu (current counting) vychází přímo z definice SOC. Je široce používaná pro svoji jednoduchou implementaci, nenáročný výpočet a přijatelnou přesnost, je však citlivá na šum a přesnost proudového čidla, vyžaduje přesnou znalost úvodního SOC a její přesnost klesá s ubývajícím životností baterie. Vyžaduje proto periodickou kalibraci aktuálního stavu SOC, což vede k její časté kombinaci s dalšími metodami jako odhad pomocí SOC-OCV křivky. Rovněž je možné kalibrovat SOC při dosažení jeho známého stavu, což však u HEV může trvat velmi dlouho.
- Odhad z modelu využívá simulaci stavového modelu baterie. Vyžadován je spolehlivý model, stanovení parametrů modelu je však díky složitosti měření některých parametrů a jejich nedostupnosti u výrobců obtížné až nemožné. Stavový model navíc musí být poměrně jednoduchý, zvláště pro složité baterie s mnoha články, neboť musí být implementován na mikropočítači, který je navíc napájen z této baterie. Nejpoužívanějším algoritmem je Kálmánův filtr a jeho upravené verze. Odhady jsou obvykle přesné, metoda je silně adaptabilní, ale výpočetně náročná.
- Takzvané data-driven metody vyžadují rozsáhlé množství naměřených dat, pomocí kterých lze natrénovat mapující vztah mezi proudem, napětím, teplotou a SOC baterie. Metody vykazují velkou přesnost odhadu, jejich náročnost na množství experimentálních dat je však velká a jsou výpočetně náročné. Navíc nejsou příliš robustní [1] [3].

## 1.9.2 Metody odhadu SOP

Hlavní používané metody pro odhad SOP jsou následující:

- HPPC metoda vychází z Rintova modelu a z horního a spodního mezního napětí baterie. Je jednoduchá a široce používaná na poli elektromobility.
- Metoda založená na SOC spočívá ve vypočtení okamžitého špičkového proudu a výkonu na základě omezení maximálním a minimálním stavem SOC. Tato metoda často doplňuje ostatní, neboť dobré výsledky má pouze u mezních hodnot SOC.
- Napěťová metoda vychází z metody HPPC. Bere navíc v úvahu změnu OCV při cyklu špičkového výkonu pro spolehlivější výsledky predikce a možnost predikování dlouhodobého SOP.
- Dynamická metoda s vícero omezeními MCD počítá SOP v reálném čase ze svorkového napětí, proudu a SOC, přičemž přihlíží i k vnitřnímu stavu baterie, jako její elektrochemické dynamice, termodynamice a hysterezi. Její výpočet je však komplikovaný. Vychází z Theveninova modelu [1].

## 1.10 Nabíjení článků

Následující čtyři metody nabíjení patří mezi nejčastější:

- CC-CV v první fázi spočívá v nabíjení konstantním proudem až do dosažení maximálního nastaveného napětí. V druhé fázi je pak baterie nabíjena konstantním napětím do poklesnutí proudu na nastavenou hodnotu. Jedná se o hlavní metodu nabíjení baterií.
- Vícestádiové CC nabíjení se skládá z několika po sobě jdoucích kroků CC, přičemž podmínkou ukončení každého z nich je dosažení určité napěťové úrovně. Hodnota proudu v po sobě jdoucích krocích klesá, přičemž velikost těchto kroků je nutné stanovit optimalizačním algoritmem. Použití nachází obzvláště v rozsahu SOC 0 až 80 %.
- Pulzní nabíjení bylo původně vyvinuto pro olověné akumulátory. Jeho výhody pro lithiové baterie jsou snížení polarizačního napětí a umožnění ustálení vnitřní koncentrace iontů. To dovoluje zrychlit nabíjení vyššími výkony, snížit uvolňované teplo a zvýšit tak účinnost nabíjení. Dobré výsledky dává metoda konstantní amplitudy při proměnlivé frekvenci a metoda konstantní frekvence při proměnlivé amplitudě.
- Konečně lze nabíjecí proud určit z modelu. Typicky je mířeno na konstantní uvolňované teplo, aby špička ve ztrátovém teple nepřehřála baterii, nabití je obvykle o něco rychlejší než metoda CC-CV [1] [3].

### 1.11 Pulzní zatěžování baterie

Baterii je možné zatěžovat pulzně, velikost pulzů je však nutné omezit. Nejjednodušší přístup je pomocí stanovení maximálního a minimálního napětí a proudu, které jsou vztaženy k teplotě baterie. Za tímto účelem výrobci baterií někdy uvádějí různé napěťové a proudové limity podle délky pulzů, jimž jsou vystaveny, jejich implementace do BMS je však obtížná, neboť musí být předem známa délka těchto pulzů. Pevně nastavené limity navíc mají tendenci být příliš omezující, zvláště pro krátké pulzy. Přesněji je možné maximální velikost pulzu určit pomocí stavového modelu [3].

## 2 Lithiové baterie

Lithiové baterie z dostupných technologií nejlépe naplňují požadavky na bateriový systém běžného elektrického vozidla, které jsou:

- 1 vysoká specifická energie;
- 2 vysoký specifický výkon;
- 3 dlouhá životnost;
- 4 vysoká bezpečnost;
- 5 vysoká spolehlivost;
- 6 výborné vlastnosti při vysokých/nízkých teplotách;
- 7 nízké tempo samovybíjení;
- 8 nízká cena;
- 9 environmentální nezávadnost [1].

### 2.1 Volba článku

Vývoj baterie vyžaduje nejprve vybrat články a následně provést sérii testů jejich parametrů. Pro úplné stanovení vlastností baterie během její životnosti je pak nutné provést několik oddělených testů při různých teplotách a stárnutí [1].

#### 2.1.1 Testovací standardy

Existuje vícero převážně zahraničních standardů pro testování baterií jako americké PNGV Battery Test Manual, USABC Electric Vehicle Test Manual, Freedom CAR Battery Lifetime Test Manual, japonský JIS-C-8711 či čínské GB/T 18385 a GB/T 18386. Evropským standardem pak je IEC 61690 [1].

#### 2.1.2 Testovací vybavení

Na trhu jsou dostupná zařízení specializovaná na testování článků a baterií. Prizmatické a pouch články vyžadují uchopení do svorky pro zabránění změny objemu, cylindrické zase vyžadují přípravek umožňující připojení na jejich svorky. Vzhledem k vlivu okolní teploty na charakteristiky článků je nutné testovací prostředí stabilizovat, nejčastěji pomocí testovací komory s nastavitelnou teplotou [1].

#### 2.1.3 Metody testování parametrů článků

Test kapacity lze provést například opakováním standardního vybíjení CC tempem 0,3 C a nabíjením CC-CV tempem 0,3 C s ukončením při 1/20 C, dokud tři po sobě naměřené kapacity při vybíjení nebudou mít odchylku nižší než 2 %.

Pro stanovení SOC-OCV křivky doporučuje Rui [1] metodu, kdy je článek vybit na 0 % SOC proudem 1 C a poté nabíjen po 5 % krocích v SOC, pokaždé s pauzou 5 hodin pro zaznamenání hodnoty OCV. Obdobně je po úplném nabití článek i vybíjen.

U článků lze dále sledovat jejich charakteristickou impedanci ve frekvenční doméně. Jedná se vlastně o měření ACIR pro různé frekvence. Tento test nazýváme EIS. Výsledek se zakresluje

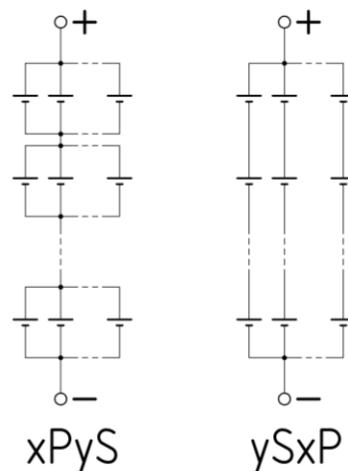
do Nyquistova grafu s otočenou imaginární osou. Výsledky lze použít například pro analýzu degradace článku a charakterizaci jeho parametrů při stárnutí.

HPPC data mohou být použita například pro identifikování parametrů pro model článků. Jedná se o standardizovaný test stanovený americkým výzkumným programem Partnership for a New Generation of Vehicles. Test spočívá v sekvenci nabíjecích a vybíjecích pulzů pro dynamické charakterizování baterie při různých hladinách SOC [1] [3].

## 2.2 Uspořádání článků v baterii

Zapojení článků je označováno dle uspořádání. První možností je xPyS, což odpovídá paralelně-sériovému zapojení, kde je  $x$  článků zařazených paralelně v bloku, přičemž je dále  $y$  bloků řazeno za sebou. Druhou možností je ySxP, kde je ve skupině  $y$  článků v sérii, přičemž je baterie tvořena z  $x$  skupin paralelně.

Mezi články jsou výrobní rozdíly co do jejich parametrů, které mohou být dále prohloubeny rozdíly v provozních podmínkách či metodou správy baterie. Rozdělení proudu skrze články v paralelní větvi odpovídá převráceným hodnotám jejich vnitřních odporů, což dále prohlubuje rozdíly ve stavu nabití, vybití a snižuje životnost. U sériového zapojení mají články s nižší kapacitou tendenci být vybité/nabitě jako první. Lze říct, že článek s nejnižší zbývající kapacitou určuje kapacitu celé baterie. U paralelního zapojení pak při vybíjení může dojít k nabíjení článku s nejnižší hodnotou OCV. Naopak při nabíjení se může článek s nejvyšším OCV vybit [1] [3].



Obrázek 2.1: Ilustrace zapojení xPyS a ySxP

Paralelně-sériová konfigurace vyžaduje snímat jen jedno napětí na modul, neboť články v modulu mají stejné svorkové napětí. Pokud je však žádoucí snímat proudy jednotlivými články, je nutné mít pro každý článek samostatné proudové čidlo. Sério-paralelní zapojení vyžaduje pro získání proudů jednotlivými články pouze monitorovat proudy do sériových větví, zato je však nutné monitorovat napětí všech článků jednotlivě, což vede na vysokou cenu, neboť balancování napětí všech článků je nutné [1].



## 2.2.1 Z pohledu spolehlivosti

Pravděpodobnost bezproblémového provozu těchto uspořádání lze posoudit pomocí následujících vzorců:

$$P_{xPyS} = [1 - (1 - r)^x]^y \quad (2.1)$$

$$P_{ySxP} = 1 - (1 - r^y)^x \quad (2.2)$$

Z těchto vztahů lze vyvodit, že paralelně-sériová konfigurace poskytne pro libovolnou spolehlivost článku  $r$  vyšší pravděpodobnost bezproblémového provozu, než sério-paralelní [1].

## 2.2.2 Z pohledu bezpečnosti

Rozpojení článku v sério-paralelním zapojení vede ke ztrátě celé skupiny článků, zatímco v paralelně-sériovém zapojení ovlivní jen blok, ve které došlo k přerušení. Zkrat na článku v sério-paralelním zapojení vede k zvýšení proudu skrze zasaženou sériovou větev, v paralelně-sériovém však vede k vyzkratování všechny ostatních článků ve bloku, což zvýší zátěž ostatních článků a je bezpečnostním rizikem [1].

## 2.2.3 Z pohledu kapacity

U článků lze rozlišit dostupnou nabíjecí kapacitu čili kolik energie je článek schopen pojmout z aktuálního stavu nabíjením CC-CV a dostupnou vybíjecí kapacitu, která odpovídá energii dostupné pro vybití po bezpečnou hranici. Dostupná kapacita sériového zapojení odpovídá součtu minimální dostupné nabíjecí a minimální dostupné vybíjecí kapacity, u paralelního zapojení je to pak součet dostupných kapacit všech článků. Při různých kapacitách článků pak paralelně-sériové zapojení poskytne vždy baterii s vyšší, nebo alespoň stejnou celkovou dostupnou kapacitou, než sério-paralelní [1].

## 2.3 Teplotní regulace baterie

Způsoby regulace teploty baterie se liší hlavně dle použitého média. Může být využito i snižování teploty pod teplotu okolí například tepelným čerpadlem nebo využitím termoelektrického jevu [17] [18].

### 2.3.1 Chlazení vzduchem

Tato metoda je jednou z nejčastějších. Pro nenáročné aplikace postačuje pasivní chlazení využívající přirozenou konvekci, v automobilech však nachází užití hlavně aktivní chlazení nuceným oběhem vzduchu. Vzhledem k jeho nízké tepelné vodivosti a kapacitě vzduch není příliš dobré médium pro chlazení baterií. S jeho vyššími rychlostmi navíc rapidně roste spotřeba ventilátorů, proto vyžaduje velké roury, vstupy a výstupy, aby bylo dosaženo velkého průtoku při nižší rychlosti. To ovšem vede na velký zastavěný objem. Tato metoda chlazení navíc může zanést baterii prachem a nečistotami [17].

## 2.3.2 Chlazení kapalinou

Díky lepším teplotním vodivostem a kapacitám kapalin tato metoda nabízí efektivnější a rovnoměrnější chlazení a nachází tak širší uplatnění. Existují dva hlavní typy – přímé a nepřímé chlazení.

- Přímé chlazení spočívá v ponoření samotných článků do kapaliny, obvykle silikonového nebo minerálního oleje. Hlavní předností je zvýšení rovnoměrnosti rozložení teplot v baterii, problémy však nastávají, pokud jsou nutné vysoké průtoky kvůli viskozitě těchto olejů. Jsou vhodné pro systémy s požadavky na vysoký okamžitý výkon.
- Nepřímé chlazení využívá chladičí pláty či obdobné chladičí elementy, v nichž proudí kapalně médium. Je tak sníženo riziko úniku kapaliny. Použit lze cokoliv od vody po tekuté slitiny galia. Systémy jsou výrazně komplexní a jejich vlastnosti závisí na mnoha parametrech jejich konstrukce, jako tvar a délka kanálků či jejich počet nebo styčná plocha s články [17].

## 2.3.3 PCM chlazení

PCM jsou materiály jenž mění své skupenství v pracovní oblasti článků, přičemž se pro chlazení využívá velkého skupenského tepla těchto materiálů. Materiály jsou většinou v přímém kontaktu s články. PCM jsou většinou využívány v systémech pasivního chlazení. Mezi nejpožívanější médium patří organické materiály přecházející ze skupenství pevného na kapalně, například parafin. Bývají modifikovány pro zlepšení tepelné vodivosti. Principem není teplo odevzdávat do okolí, ale pohltit do chladičího média, PCM tak o samotě není vhodné pro systém podrobený trvalé zátěži, neboť dojde k nasycení tepelné kapacity materiálu. Takový systém je lehký, neboť nepotřebuje mnoho komponentů, a je ekologický [17].

## 2.3.4 HP technologie

HP je v podstatě uzavřená komora obsahující (tekuté) PCM s nízkým bodem varu, může mít například tvar trubičky. V zahřívané části se toto médium odpařuje a znovu kondenzuje v chlazené části. Jedná se spíše o způsob přemístění tepla, pro jeho odstranění je nutno použít dalšího aktivního či pasivního chlazení. Je efektivní a pasivní, spolehlivé a bez pohyblivých součástí, má však malé styčné plochy [17].

## 2.4 BMS

Úkol BMS je řízení či správa baterie za účelem bezpečného a spolehlivého provozu ve vymezené pracovní oblasti, jakož i poskytování informací nutných pro ovládání vozidla a správu dostupné energie. V případě abnormálního stavu baterie je schopen zasáhnout například odpojením. Za těmito účely zaznamenává obvykle všechna svorková napětí, celkový proud baterií a několik teplot [1] [3] [4].

### 2.4.1 Balancování

Mezi články jsou vždy rozdíly v parametrech. Pro jejich plné využití a bezpečnost baterie musí BMS obvod implementovat aktivní či pasivní metodu balancování. Pasivní balancování

přebytečnou energii změni na teplo pomocí odporů, aktivní však pomocí rychlého spínání a prvků schopných akumulovat energii (cívky, kondenzátory) energii přelévá mezi články. Vyšší účinnost aktivního přístupu je vykoupena vyšší složitostí [1] [3].

## 2.4.2 Dle topologie

Rozlišujeme centralizovanou, decentralizovanou a distribuovanou topologii BMS dle umístění řídicího části obvodu:

- Centralizovaná topologie má pouze jednu hlavní část, která snímá všechny články.
- V decentralizované topologii má každý článek či modul vlastní jednotku, přičemž tyto jednotky komunikují s jednotkou hlavní. Tato topologie je vhodná pro velké baterie, kde se snáze implementuje. Oproti ostatním však jsou články řízeny pouze lokálně a není tedy dosažen plný potenciál baterie.
- Distribuovaná topologie pak jako decentralizovaná spočívá v několika jednotkách, avšak na místo řídicí jednotky zde všechny mají stejnou úroveň [19].

## 2.5 HEV

HEV jsou vozidla se spalovacím motorem doplněným o dodatečný elektrický pohon, který jako důsledek nevyžaduje vysokou kapacitu baterie, avšak musí být schopna podat vysoký špičkový výkon. SOC by měl být držen mezi 50 – 85 % pokud možno [1].

### 2.5.1 Rozdělení HEV

Rozlišují se tři druhy dle spojení elektrického a spalovacího motoru:

- 1 Sériový hybrid napájí elektromotor jak z baterie, tak ze spalovacího motoru
- 2 Paralelní hybrid odděluje elektrické a spalovací části pohonu, přičemž obě mohou samostatně pohánět vůz.
- 3 Sério-paralelní hybrid je kombinací obou zmíněných variant [1].

Hybridní pohonné systémy umožňují spořit energii skrze zastavení spalovacího motoru, když není využíván, rekuperací brzděné energie, zvýšení výkonu ve spolupráci se spalovacím motorem a umožnění práce spalovacího motoru v oblasti jeho nejvyšší účinnosti. Dále je rozlišováno několik výkonových a kapacitních variant [1] [3].

### 2.5.2 Závodní HEV

Vozy závodů Formule 1 od roku 2014 povinně využívají hybridní pohony. Spalovací motor kombinují s dvěma elektrickými, přičemž oba sdílí lithiovou baterii s vysokou výkonovou hustotou. Baterie je chlazena nevodivou kapalinou (nikoliv vodou).

První elektrický pohon je motor-generátor pomáhající spalovacímu motoru. Elektrická část systému je omezena maximálním výkonem 120 kW a limity na kolo závodu spočívajícími v maximální odevzdané energii z baterie 4 MJ a maximální pohlcené energii 2 MJ, což znamená, že motor může být v provozu průměrně jen zhruba 33 s za každé ujeté kolo závodu.

Druhý elektrický pohon je přímo spojen s turbodmychadlem. Může být používán pro jeho roztáčení, nebo naopak při přebytečném tlaku může turbodmychadlo brzdit a dobíjet tak baterii, čímž dovoluje překročit zmíněný limit 33 s. [20]

Jako příklad lze uvést formuli z roku 2019 týmu Mercedes Benz. Uvedená váha baterie odpovídá hranici 20 kg dle pravidel, přičemž použité napětí se blíží hranici 1000 V a baterie dosahuje účinnosti 96 % [21]. Používané články ani specifikace baterií závodů Formule 1 (ani vybraných jiných závodů) nelze volně dohledat, běžně dostupné jsou pouze omezení pravidly jednotlivých soutěží, parametry tedy nezbyvá než odhadovat.

Za předpokladu, že tým využívá maximální výkon dostupný dle pravidel, zanedbání účinnosti a zjednodušení, že hmotnost 20 kg zahrnuje pouze články, je minimální gravimetrická hustota výkonu použitých článků 6 kW/kg. Za přidaného předpokladu kapacity baterie 4 MJ pak gravimetrická hustota energie odpovídá minimálně 55,6 Wh/kg. Články s tímto poměrem výkonu a kapacity by musely být schopny podat vybíjecí proudy až 108 C.

### 2.5.3 Sportovní HEV

Jako první příklad byl zvolen automobil Porsche 918 Spyder z roku 2013. Jeho lithiová baterie má kapacitu 6,8 kWh a maximální výkon 220 kW. Je chlazená kapalinou a složená z 312 článků [22]. I tato dnes již starší baterie je tedy schopná dodat vybíjecí proud cca. 32 C.

Dalším příkladem budiž McLaren Speedtail z roku 2020. Tento výrazně novější HEV disponuje baterií o kapacitě 1,647 kWh. Chlazení článků je zajištěno ponořením do oleje. Maximální výkon, který je schopna baterie poskytnout, je 270 kW. Výkonová hustota baterie je 5,2 kW/kg, oproti staršímu vozu McLaren P1 z roku 2013 je čtyřnásobná [23]. Tento poměr výkonu a kapacity odpovídá vybíjecím proudům cca. 164 C. Z výkonu a výkonové gravimetrické hustoty lze zároveň vyvodit váhu baterie – zhruba 52 kg, což odpovídá gravimetrické hustotě energie pouze 31,7 Wh/kg.

Bližší detaily o člancích, podobně jako u vozů Formule 1, nejsou volně dostupné jak pro uvedené vozy, tak pro většinu ostatních sportovních HEV včetně značek jako Ferrari či BMW.

## 2.6 Formula student

FS je mezinárodní soutěž spočívající v návrhu a závodění s monoposty ve stylu vozů formule, určená pro studenty bakalářského a inženýrského studia. Oficiálním jazykem soutěže je angličtina. Soutěž se pro vozy s řidičem skládá z 8 disciplín:

- **Statické**
  - **Business Plan** – až 150 bodů – tým prezentuje svoji formuli jako prototyp fiktivní firmě, přičemž musí obhájit, proč je právě jejich formule vhodným produktem pro zvolenou cílovou skupinu.
  - **Cost and Manufacturing** – až 100 bodů – tým musí sepsat cenové, výrobní a časové nároky na formuli co nejpřesněji, přičemž je posouzeno porozumění výrobním procesům a jejich celková cena.
  - **Engineering Design** – až 75 bodů – Tým odevzdá technický popis jejich formule o rozsahu osmi stránek, v němž musí být popsán návrh a jak byl aplikován

pro konstrukci formule. Souzeno je rozvržení, technický návrh, konstrukce a implementace výroby skutečného vozu.

- **Dynamické**

- **Acceleration** – až 50 bodů – měřeno je zrychlení vozu na rovince o délce 75 m. Disciplína nejlépe charakterizuje přilnavost a volbu pohonu.
- **Skid Pad** – až 50 bodů – tato disciplína spočívá v jízdě na okruhu ve tvaru čísla 8 s délkou dvou kol v obou směrech. Je takto prověřena schopnost vozidla ustát laterální zrychlení, což lze ovlivnit například konstrukcí rámu a zavěšení, aerodynamickými prvky.
- **Autocross** – až 100 bodů – zde je již formule vyzkoušena na klasickém okruhu délky 1 km s rovinkami, zatáčkami a šikanami. Testovány jsou především dynamické vlastnosti vozu, zrychlení, brzdy a ovladatelnost.
- **Endurance** – až 250 bodů – tato disciplína je nejvíce hodnocena a spočívá v jízdě na několik kol v celkové délce 22 km. Vůz je testován pod dlouhodobější zátěží, závisí na zrychlení, rychlosti, ovladatelnosti, dynamice vozu a jeho spolehlivosti, ale i na jeho účinnosti.
- **Efficiency** – až 75 bodů – během endurance je měřena spotřeba vozu, přičemž je hodnoceno množství spotřebovaného paliva v poměru s rychlostí jízdy [24].

Tým studentské formule Technické univerzity v Liberci má název FS TUL Racing. Je zaštitěn univerzitou jako takovou, nikoliv jednotlivou fakultou, čemuž odpovídá i složení týmu. Aktuální monopost bude již pátý, jedná se však o první hybridní.

### 2.6.1 Pravidla pro baterii vozu Formula student

Hybridní formule jsou rozšířením kategorie spalovacích formulí. Konceptem je vůz kombinující elektrický a spalovací pohon, přičemž elektrická část má bezpečné napětí menší než 60 VDC a 50 VACRMS a baterie obsahuje maximálně 3 kg materiálu uchovávajícího energii, ať už jím jsou klasické články, nebo například kondenzátory. Pravidla cílí na kapacitu 500 Wh a maximálním průměrný výkon 5 kW. Níže jsou shrnuta další omezení baterie vyplývající z pravidel:

- Baterie musí být pevně připevněné k šasi, umístěné v oblasti ochráněné před přetočením vozu a mít pevné pouzdro. Úplně uzavřené baterie musí mít přetlakový ventil, který musí být od řidiče odstíněn nehořlavou přepážkou.
- Neuzemněné svorky baterie musí být ochráněny před zkratem.
- Baterie musí obsahovat proudovou ochranu dle nabíjecích a vybíjecích proudů článků.
- Pouzdro baterie musí zpomalovat hoření.
- Musí být implementována teplotní ochrana alespoň 30 % článků, která odpojí baterii, pokud kterýkoliv článek překročí výrobcem daný rozsah teplot nebo 60 °C po více než 1 s.
- Teplota musí být snímána na záporném pólu baterie nebo na přípojnicí, ne však dále než 10 mm od záporného pólu po cestě proudu skrze přípojnicí.
- Napětí musí být monitorováno na každém článku a pokud opustí výrobcem udaný rozsah po více než 500 ms, baterie musí být odpojena.
- Teploty a napětí musí být možné zobrazit například připojením notebooku, musí být možné individuálně odpojit jedno proudové čidlo, jedno teplotní čidlo a jeden vodič snímající napětí článků pro inspekci.

- Signály nutné pro splnění výše zmíněných požadavků jsou „systémově kritické“.
  - Musí být možné detekovat jejich rozpojení a zkrat na zem, jakož i zkrat na napájecí napětí analogových signálů, nemožné stavy dané opuštěním možného rozsahu pro signály používané v programovatelných zařízeních a poškození, ztrátu i opoždění signálů šířených digitálně.
  - Detekce závady musí vést k rozepnutí alespoň jednoho pólu baterie.
- Nehořlavá přepážka musí oddělovat baterii od nádrže.
- Až 90 % rozsahu brzdového pedálu může být použito pro čistě elektrické brždění.
- Přijatelné chladicí médium je pouze čistá voda, vzduch nebo olej.
- V baterii musí být stykač typu NO odpojící její kladný pól. Jeden z pólů jeho cívky musí být přímo začleněn do vypínacího obvodu formule, druhý pak musí být ovládán hybridním systémem.
- Je zakázáno do hybridního systému dodávat energii z jiných zdrojů.
- V zapnutém stavu musí hybridní systém splňovat IPxxB.
- Baterie na závodech projdou inspekcí a budou zapečetěny.
- Tým musí odevzdat HSD [25] [26].

## 3 Rešerše trhu

Při konstrukci baterií pro FS je nutné zohlednit kromě výkonových parametrů a pravidel soutěže také omezení vycházející z dostupnosti článků na trhu. Rešerše je zaměřena převážně na evropský trh, neboť bateriové články jsou z hlediska bezpečnosti přepravy považovány za nebezpečné zboží [27].

### 3.1 Stanovení požadavků na články

Závodní monopost, pro který je baterie v rámci této práce navrhována a konstruována, je výrazně specifický a požadavky na jeho baterii se tedy budou oproti běžnému elektrickému či hybridnímu vozidlu lišit. Jako východisko pro jejich stanovení jsou brány hlavně disciplíny sprint a endurance jakožto dva opačné extrémy zátěže, kterým bude baterie vystavena. Z požadavků na baterii pak vyplývají i požadavky na jednotlivé články.

#### 3.1.1 Požadavky vycházející z pravidel

Jelikož monoposty FS TUL Racing patří historicky mezi jedny z těžších a výkonnějších, cílem bude dosáhnout nebo předčít parametry hybridního pohonu na něž cílí pravidla, tedy průměrného výkon 5 kW a kapacity 500 Wh. Lze uvažovat, že vzhledem k poměru váhy a výkonu minulé formule 0,324 kW/kg by měl celý hybridní systém včetně úprav konstrukce vozu pro jeho integraci disponovat alespoň stejným poměrem, neboť přidaná váha zhorší ovladatelnost vozu. To tedy při daném průměrném výkonu dovoluje maximální přidanou hmotnost 15,4 kg.

Hybridní pohon monopostu bude spočívat ve dvou nezávislých elektromotorech s planetovými převodovkami, které budou přímo pohánět přední kola, zatímco zadní budou poháněna motorem spalovacím. Vybrané vodou chlazené elektromotory mají odhadovanou váhu 2,5 kg jednoho kusu, jejich měniče pak 525 g, váhu dalších komponent lze jen spekulovat. Předpokládejme dále váhu hliníkového chladiče včetně vodní pumpy a potrubí 1 kg, náplň vody 2 kg, váhu jedné planetové převodovky 500 g a váhu potřebných vodičů 500 g. Přidejme ještě 500 g navíc ve váze přidané nutností přizpůsobit formuli integraci hybridního pohonu. Dostáváme se tak na odhadovanou váhu systému bez baterie zhruba 11 kg, což na baterii ponechává pouhých 4,4 kg. Zdá se tedy rozumné přiblížit se co nejlépe limitu 3 kg článků, a pokusit se co nejvíce předčít parametry zamýšlené pravidly, neboť váha baterie je zhruba přímo úměrná jejím parametrům. Navýšením její váhy, která je oproti váze celého systému relativně malá lze tedy poměrně výrazně zlepšit parametry hybridního systému, ovšem předpokladem je, že je na tyto parametry systém dostatečně dimenzován (čemuž tak je).

Pro sprint bude vyžadována vysoká pulzní výkonová hustota, pro endurance zase vysoká trvalá výkonová hustota a dobrá kapacita. Zároveň je žádoucí přiblížit se co nejvíce omezení 60 V pro co nejvyšší snížení proudů. Na vyšší proudy musí být dimenzovány všechny prvky v cestě výkonu, což sebou nese výraznou přidanou hmotnost, jakož i nezanedbatelně vyšší cenu.

#### 3.1.2 Vlastní požadavky

Žádoucí je vysoká spolehlivost a s tím spojená nízká složitost konstrukčního řešení – během závodu není možné kvůli zapečetění baterii opravit, proto by tedy mělo být zredukováno

množství článků v baterii pro snížení počtu případných bodů selhání. Vysoce žádoucí je i schopnost provozu při vysokých teplotách – závody se konají v letních měsících, kdy jsou obzvláště na asfaltovém povrchu závodního okruhu teploty vysoké a lze tedy předpokládat, že články budou provozovány blízko limitu 60 °C stanovenému pravidly.

Bezpečnost je do jisté míry méně důležitá než u běžného HEV vzhledem k nízkému napětí a malé energii baterie, jakož i dalším bezpečnostním opatřením specifikovaným pravidly, jako je nehořlavé oblečení pilota, přítomnost několika protipožárních přepážek, provozování formule pouze na speciálních tratích a nutnost, aby byl řidič schopen vozidlo opustit do 5 s.

Konečně je faktorem i cena – tým FS TUL Racing závisí na sponzorských darech, je tedy vhodné snižovat náklady, kde je to možné. Výběr vzorků na testování je rovněž nutné držet střídmy, neboť finance dostupné na jejich nákup jsou minimální.

Nezajímavé parametry jsou oproti HEV volumetrická hustota výkonu a energie, neboť už hmotnostní omezení zaručuje rozumný objem baterie. Dále životnost, neboť články budou používány pouze po několik málo cyklů během jedné závodní sezóny (některé jiné komponenty jsou dimenzovány na životnost pouze 50 h) a tempo samovybití, neboť případná nutnost dobíjení baterie je za cenu lepších výsledků přijatelná.

### 3.1.3 Požadavky alternativní strategie

Zmíněná kritéria počítají s baterií s dobrou kapacitou a výkonovými schopnostmi, která se během závodu bude i přes rekuperaci brzděné energie postupně vybíjet. Lze však uvažovat jinou strategii – zvolit články s nízkou kapacitou, ale extrémními výkony, přičemž by byla používána převážně brzděná energie namísto energie předem uložené v baterii. Priority výběru se pak změni vyškrtnutím požadavku na vysokou gravimetrickou hustotu energie daného požadavkem kapacity 500 Wh.

## 3.2 Dostupné články

Výrobci článků nenabízejí jednotlivé články konečnému uživateli ke koupi. Nejsou obvykle volně dostupné ani katalogy či technické listy, výběr bylo proto nutno provést převážně prohlédáním eshopů. Eshopy prodávající články lze volně rozdělit do dvou skupin – obchody zaměřené na běžné spotřebitele a obchody zaměřené speciálně na prodej článků pro konstrukci baterií.

Obchody pro běžné spotřebitele rozdělují články na Li-Ion a LiPo baterie, přičemž baterie označované li-pol jsou výhradně ve formátech pouch a téměř výhradně dostupné jako baterie pro dálkově ovládané modely. Články „Li-Ion“ pak odpovídají cylindrickým pouzdrům (opět bez uvedení chemie) a dostupné jsou jak v obchodech s elektronikou a bílým zbožím, tak ve velkém množství v obchodech s elektronickými cigaretami.

Obchody zaměřené na prodej článků pro konstrukci baterií tvoří jen menšinu a jsou téměř jedinými obchody, které nabízí prizmatické formáty článků, jakož i pouch články pro jiné než modelářské účely. Rovněž jsou jedinými obchody, které u článků (alespoň sporadicky) uvádí jejich chemické složení a detailnější parametry, i když kvalita popisů je velice různorodá a technické listy téměř nikdy nejsou uvedeny.



### 3.2.1 Články pro modelářské účely

V modelářských obchodech lze koupit převážně již složené baterie o malém počtu článků bez ochranné elektroniky. Dostupné jsou i články s již připevněnými vývody a konektory, parametry jsou však vesměs horší než články v bateriích od stejných výrobců, nebo dokonce ze stejných řad. Baterie zde prodávané jsou zajímavé extrémně vysokými udávanými parametry – například baterie z řady TEAM Corally Voltax 120C, jak označení napovídá, jsou určeny na vybíjecí proudy až 120 C, zatímco společnost Turnigy uvádí pro své baterie série Nano-Tech Plus nabíjecí proudy až 30 C. Tyto parametry jsou však uvedeny jen jako popisy v obchodech nebo potisk na bateriích, což pro použití v soutěži není dostatečné. Z tohoto důvodu bylo kontaktováno emailem několik výrobců s žádostí o zaslání technického listu.

Tabulka 3.1: Dostupnost technických listů u výrobců modelářských baterií

Výrobce	Dostupnost technických listů	Reakce na žádost o technický list
AMEWI	Neúplné	Bez odpovědi
df models	Neúplné	Parametry jejich baterií označili jako „standardní“
E-flite	Manuály	Bez odpovědi
gens ace	Nedostupné	Bez odpovědi
HPI Racing	Nedostupné	Poskytnut úplný technický list
KAVAN	Nedostupné	Bez odpovědi
Konect	Nedostupné	Bez odpovědi
LRP	Pouze neúplné pro sérii ANTIX	Slíbena doplnění technických listů na webové stránce, k 16.5.2023 však stále nejsou dostupné
Ruddog	Nedostupné	Bez odpovědi
Spektrum	Manuály	Bez odpovědi
TEAM Corally	Nedostupné	Dovoleno nabíjení pouze mezi 17 – 22 °C, technický list neposkytnut
Traxxas	Nedostupné	Poskytnut bezpečnostní technický list bez parametrů
Turnigy	Nedostupné	Nelze dohledat kontakt na výrobce, pouze na distributora (HobbyKing)

Jediný výrobce, který technický list k baterii poskytl bohužel nenabízí baterii s dostatečně dobrými parametry pro použití v hybridní formuli. Vzhledem k neúspěšnosti získání technických listů od výrobců byly ještě osloveny vybrané eshopy.

Tabulka 3.2: Dostupnost technických listů u vybraných prodejců modelářských baterií

Obchod	Reakce na žádost o technický list
RC Levněji	Technický list nemají
Pecka modelář	Bez odpovědi
RC profi	Bez odpovědi
RC modely outlet	Technický list nemají
MZ racing	Technický list nemají
Shop RC	Bez odpovědi
rcbattery.com	Bez odpovědi
HobbyKing	Technický list nemají

Vzhledem k nedostupnosti technických listů, jakož i nutnosti nebezpečného rozebrání předem složených baterií pro vytvoření vlastní, což přidává další složitost a riziko selhání, byly modelářské baterie úplně zavrhnuty pro použití v hybridní baterii studentské formule a jejich vlastnosti tak nebyly ani testovány.

### 3.2.2 Články na míru

Několik společností nabízí výrobu článků a baterií na míru. Pokus o kontaktování byl úspěšný pouze u společnosti VOLTAPLEX se sídlem v Hong Kongu. Společnost se zdála otevřená alespoň řádově se přizpůsobit počtu článků postačujícímu pro složení dvou hybridních baterií, avšak vzhledem k ceně a nejistým parametrům finálních článků byla tato možnost rovněž zavržena.

### 3.2.3 Články určené pro konstrukci baterií

Co se týká prizmatických článků, jsou dostupné pouze v rozměrech, které jim dávají příliš vysokou váhu pro složení baterie o přijatelném nominálním napětí při dodržení maximální hmotnosti článků 3 kg dle pravidel. Dostupné pouch články jsou rovněž příliš těžké, drobnější pak nejsou určeny na dostatečně vysoké výkony. Jako jediné použitelné a komerčně dostupné řešení se tedy ukázaly cylindrické články v pouzdrech velikosti 18650 až 21700. Z tohoto důvodu byly upraveny stanovené požadavky čistě pro články cylindrické.

- Vybíjecí proud alespoň 20 A pro 18650 a 30 A pro 21700, aby bylo dosaženo proudu zhruba 100 A a tedy výkonu 5 kW při nominálním napětí baterie 50 V. Články jiných rozměrů byly řešeny individuálně při stejném požadavku.
- Předpokládaná kapacita hotové baterie alespoň 500 Wh nebo nabíjecí proud předpokládané konfigurace alespoň 100 A.
- Dovolena maximální teplota nabíjení alespoň 50 °C a vybíjení alespoň 60 °C.

Zavrženy byly starší, levnější verze článků od stejných výrobců (např. Molicel P28A byla zavržena, neboť byla testována Molicel P28B) a články musely být dostupné pro nákup na testovací účely (čili v období od 10.11.2022 do 3.2.2023).

## 3.3 Zvolené články

Články vybrané dle stanovených kritérií obsahuje **příloha A** včetně jejich vybraných parametrů a odhadu základních parametrů baterie, kterou by z nich bylo možné vytvořit za předpokladu nominálního napětí 3,6 V. Kromě Tenpower a Molicel vybraní výrobci volně nepublikují své technické listy a pokusy o jejich kontaktování se nepotkaly s úspěchem. Některé parametry tedy nebylo možné dohledat.

Jako experiment byl zvolen i článek Samsung 48G2, který by bylo možné označit jako mezi-stupeň mezi high energy a high power. I přes neodpovídající teplotní rozsah byl navíc začleněn do testování nejlepší dostupný článek 18650 společnosti Sanyo UR18650RX.

Žádný LFP článek díky příliš nízkým kapacitám a nedostatečně vysokým nabíjecím proudům nesplnil parametry výběru. Poměrově ke své kapacitě jsou jejich výkonové parametry sice výrazně lepší než u ternárních článků, avšak při přímém srovnání jsou oba druhy článků schopny

poskytnout podobný výkon, přestože ternární články disponují výrazně vyšší kapacitou a nominálním napětím. Tento problém bude ilustrován na teoretických parametrech baterie, kterou by bylo možné zkonstruovat s využitím jednoho z nejlepších dostupných LFP článků, a to ANR26650M1-B společnosti Lithium Werks v pouzdru 26650 v porovnání s jedním z nejlepších ternárních článků Molicel P45B s pouzdem 21700.

Tabulka 3.3: Porovnání baterie vyrobitelné z reprezentativního LFP a ternárního článku

<b>Parametr baterie</b>	<b>ANR26650M1-B</b>	<b>P45B</b>
Konfigurace	3P13S	3P14S
Nominální napětí	42,9 V	50,4 V
Nominální kapacita	7,5 Ah / 321,75 Wh	13,5 Ah / 680,4 Wh
Maximální nabíjecí proud	30 A	40,5 A
Maximální nabíjecí výkon při nominálním napětí	1,287 kW	2,041 kW
Maximální vybíjecí proud	150 A	135 A
Maximální vybíjecí výkon při nominálním napětí	6,435 kW	6,804 kW
Maximální teplota při nabíjení/vybíjení	55 °C / 55 °C	60 °C / 80 °C

LTO články, které by rovněž mohly splňovat požadavky zmíněné alternativní strategie volby výkonných článků s nižší energií nejsou v pouzdech vhodných pro použití v baterii hybridní studentské formule dostupné vůbec.

## 4 Testování článků

Testování nakoupených článků probíhalo na bateriových testerech Chroma 17216M-10-6 a Chroma 17212R-5-100 v kombinaci s testovací komorou CTS t-40/100 a zařízením pro sběr teplot DLM064A1WA osazeným termočládky typu K. Vzhledem k časovým a finančním omezením byl od každého článku testován pouze jeden vzorek, který však byl vždy srovnán s nominálními parametry pro ověření, že se nejedná o hrubě vadný kus.

### 4.1 Testovací zapojení

Chroma 17216M-10-6 nabízí 16 kanálů s napětovým rozsahem až 5 V a proudem až 6 A. Chroma 17212R-5-100 pak nabízí 12 kanálů s vyšším proudovým rozsahem až 100 A. Tyto kanály je pak možné v rámci jednoho zařízení paralelizovat pro vyšší proudy. Slabší tester byl pro všechny testy paralelizován na 18 A, zatímco kanály silnějšího byly používány jednotlivě.

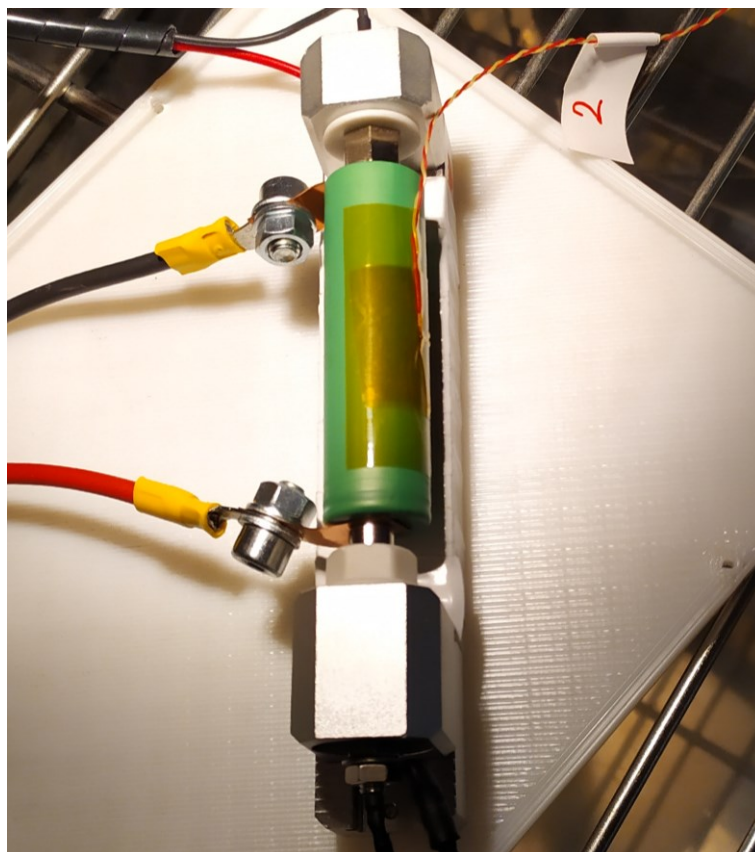
Vzhledem k velké časové náročnosti byla pro srovnávací testy vybrána pouze jedna teplota testovací komory, a to 25 °C. Testovací zapojení spočívá ve speciálním nastavitelném přípravku, určeném pro uchopení cylindrických článků, umožňujícím měření čtyřvodičovou metodou. Skrze průchodku lze do komory protáhnout pouze omezené množství vodičů, najednou tedy bylo možné i přes počet kanálů a dostatek přípravků testovat nejvíce čtyři vzorky.

Jelikož kontakt testovacích přípravků má dost vysoký přechodový odpor, hrozí riziko zkreslení naměřených teplot zahříváním svorek baterie. Navíc plast použitý pro držení kontaktů v přípravku je teplotně náchylný, hrozí tedy i roztavení svorky. Pro testování proudy vyššími než 18 A byly tedy k článkům přivařeny technologií micro TIG pomocné měděné kontakty o tloušťce 0,3 mm. Pro minimalizaci jejich vlivu bylo dbáno, aby byly pro všechny baterie rozměrově stejné. K těmto kontaktům pak byly připevněny výkonové vodiče testeru pomocí šroubů M6. Přípravky však byly i v tomto zapojení využity pro uchopení článků, jakož i pro připojení měřících vodičů čtyřvodičového zapojení. Toto zapojení bylo ověřeno pomocí termokamery, která na vývodech neukázala výrazné zahřátí ani při vysokých proudech.



Obrázek 4.1: Demonstrace přivařování vývodů k článku technologií micro TIG

Teplotní čidlo bylo umístěno na střed boku článku a přichyceno polyimidovou páskou. Není jisté, zda toto umístění odpovídá pravidlům FS, které vyžadují umístění teplotního čidla na záporný pól. Záporným pólem cylindrického článku je celé jeho pouzdro, je však možné, že pod záporným pólem je míněno místo, kam se připojuje záporná přípojnice. Přesto bylo toto umístění zvoleno, neboť je výrazně opakovatelnější než umístění na vývod článku.



Obrázek 4.4.2: Článek Sony VTC5D s termočlánkem v testovací komoře připojený přes pomocné kontakty.

## 4.2 Úvodní testy

Úvodní testy pro seznámení se s testovacím vybavením, ověření testovacího zapojení a získání výchozích dat, ze kterých bude možné stanovit přesnější metodiku testování byly prováděny na vzorku čtyř článků, které byly výtýpovány jako nejnadějnější. Formát 21700 zastoupily články Molicel P45B a Tenpower 40TG, zatímco formát 18650 byl zastoupen články Molicel P28B a Sony VTC5A.

Struktura testovacích programů byla volena následovně:

- Začátek programu spočívá v úvodním nabití a vybití proudem 1 C.
- Mezi všemi kroky byla ponechána pauza 10 min pro ustálení napětí a teploty.
- Jednotlivé kroky byly uspořádány od nejnižších po nejvyšší proudy pro případ, že dojde k poškození článku během testování.
- Na nabíjecí a vybíjecí kroky bylo nastaveno kromě napěťových a proudových limitů i ukončení teplotní podmínkou dle hodnot z technických listů.
- Nominální kapacita byla měřena vybitím 0,2 C, jemuž předcházelo nabití CC-CV 1 C.

- Vybíjecí proudy byly testovány pro 1 C, 5 C a 10 C včetně maximálního proudu dovoleného výrobcem.
- Nabíjecí proudy byly testovány od 1 C s krokem 1 C až do maximálního proudu dovoleného výrobcem. Nabíjení probíhalo cyklem CC-CV na maximální napětí článku, jako ukončovací podmínka byl zvolen pokles proudu pod 100 mA.

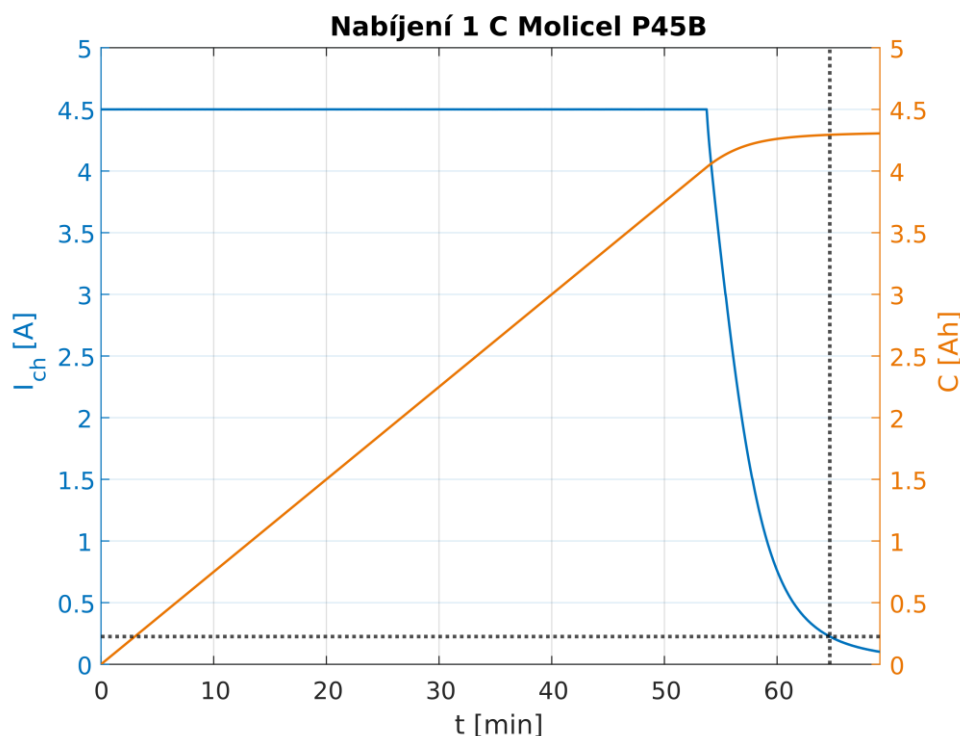
Testování vnitřního odporu bylo vynecháno, neboť pro účely srovnání článků tento parametr není zajímavý, když je možno články porovnat přímo při dané zátěži.

#### 4.2.1 Poznatky z úvodních testů

Testy proběhly kromě jednoho přerušení chybou kanálu způsobenou špatným kontaktem v přípravku bezproblémově. Nedošlo k nebezpečnému selhání článku, články dokonce ani neztratily své parametry. Místo, kde se o bužírku článku 40TG opíralo teplotní čidlo bylo po vysokých teplotách na pohled ovlivněné, avšak na pohmat nebylo patrné žádné fyzické poškození či zeslabení.

Vybíjecími testy byly naměřeny prakticky nominální parametry, nabíjecí však ukázaly, že i při maximálních proudech mají články stále výraznou teplotní rezervu. Lze předpokládat, že dlouhodobé rychlé nabíjení by negativně ovlivnilo životnost článků, ta však z pohledu baterie hybridní studentské formule není nijak významná, navíc předpokládaný provozní režim počítá pouze s pulzním rychlým dobíjením při regenerativním brzdění během závodu. Srovnávací testy by tedy měly tuto skutečnost odrážet.

Dalším poznatkem je vliv proudové hranice nabíjení na rychlost nabíjení a nabitou kapacitu. Jako příklad je zde uveden článek Molicel P45B, kde by při nabíjení 1 C volba hranice 1/20 C místo 100 mA zkrátila nabíjení o 267 s (6,4 % doby nabíjení), zatímco nabitá kapacita by poklesla pouze o 11.2 mAh (0,26 % nabitě kapacity). V kontextu délky testů není tento rozdíl dostatečně významný pro změnu metody, avšak je to významný poznatek pro urychlení nabíjení finální baterie bez využití vyšších proudů.



Graf 4.1: Nabíjení článku 1 C se znázorněním hranice proudu 1/20 C

Konečně se ukázalo problematické porovnávat mezi sebou články různých energetických hustot a velikostí pouzder. Jako příklad bude uvedena proudová zátěž 10 C při vybíjení:

- Molicel P45B – proud 45 A odpovídající proudu baterií 3P 135 A.
- Tenpower 40TG – proud 40 A odpovídající proudu baterií 3P 120 A.
- Molicel P28B – proud 28 A odpovídající proudu baterií 5P 140 A.
- Sony VTC5A – proud 25 A odpovídající proudu baterií 5P 125 A.

Je zde patrné, že články s vyšší energetickou hustotou jsou znevýhodněné zatěžováním většími proudy. Jako řešení se tedy nabízí vztáhnout velikost proudu k hmotnosti či objemu článku. Pro tyto účely zde budou zavedeny dvě nové (v literatuře běžně neuváděné) jednotky: A/l a A/kg. Tyto jednotky byly zvoleny oproti častěji používaným Wh/l a Wh/kg pro vyšší vypovídající hodnotu o parametrech konečné baterie, jelikož je na hybridní formuli omezen právě proud dle technického listu výrobce článků, nikoliv výkon.

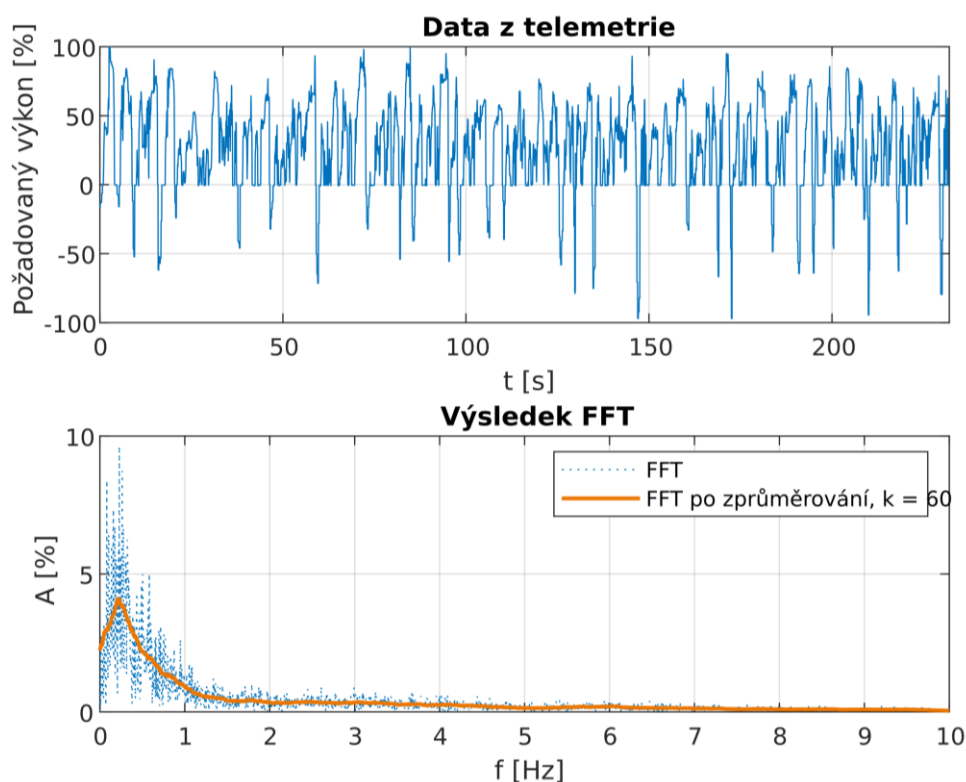
### 4.3 Analýza dat telemetrie pro stanovení parametrů testu

Pro co nejrealnější parametry testu vlastností článků při pulzním zatěžování byla využita dostupná data z telemetrického systému monopostu Klárka z jízdy během jednoho ze závodů sezóny 2022.

Využita byla data z pozice škrticí klapky motoru a tlaku brzděného okruhu. Data pozice klapky byla normalizována na rozsah 0 až 1, data z tlaku brzděného systému pak byla normalizována na rozsah 0 až -1. Data byla následně sečtena pro získání grafu vypovídajícího o požadovaném výkonu v čase. Takto získaná data pak byla podrobena FFT a její výsledek byl zprůměrován jednoduchým průměrováním s plovoucím oknem velikosti 60. Průměrná špička takto získaných dat vychází při periodě 4,64 s. Střída využití plynu byla při otevření klapky více než 25 %

stanovena jako 58,34 %, zatímco střída využití brzdy jako 8,50 %. Pro nabíjení byla navíc sledována maximální délka brždění, jenž odpovídá přesně 1 s.

Data použitá v testech byla zaokrouhlena nahoru, pro testy pulzního vybíjení tedy byla použita perioda 5 s a střída 60 %. Pro nabíjení byla rovněž volena perioda 5 s, avšak střída byla zvolena 20 %, což odpovídá pulzům o maximální pozorované délce 1 s. Tato úprava je provedena, aby bylo možné předpovědět chování hybridního pohonu při maximálním regenerativním brždění, neboť není možné předem délku brždění znát a náhlá ztráta části brzdného výkonu hybridního systému by mohla vést ke ztrátě ovladatelnosti vozu.



Graf 4.2: Naměřená data z telemetrie a jejich FFT analýza

## 4.4 Srovnávací testy

### 4.4.1 Specifikace testů

Vzhledem k poznatkům z úvodních testů byla jejich struktura přepracována. Testy byly ponechány poměrně rozsáhlé pro možnost najít nejvhodnější hodnoty, podle kterých je možné články srovnat. Některé testy jako nabíjení 1 C byly ponechány, protože jejich výsledky jsou nutné například pro dopočtení kapacity reálně nabitě pulzním nabíjením.

Délka každého finálního testovacího programu se s pauzami délky 10 min blíží 18 h, avšak z praktických důvodů zapojené články byly měněny pravidelně po 24 hodinách, byl zde tedy prostor pro prodloužení programu bez prodloužení celkového trvání testů. Doba pro ustálení tedy byla prodloužena na 15 minut, neboť hodnota 10 minut byla hraniční. Ukončovací teplota vybíjecích testů s velkými proudy byla nehledě na technický list vždy stanovena na 80 °C pro lepší porovnatelnost článků, pro nabíjení byla zachována omezení stanovená výrobcem. Výsledná struktura je následující:



- Program začíná úvodním nabitím a vybitím proudem 1 C.
- Mezi všemi kroky je pauza 15 min pro ustálení, kroky jsou uspořádány od nejnižších po nejvyšší proudy.
- Maximální teplota při nabíjecích krocích je dle technického listu, při vybíjení je na pevně 80 °C.
- Nominální kapacita je měřena vybitím 0,2 C, jemuž předchází nabití CC-CV 1 C.
- Vybíjecí proudy jsou testovány pro 1 C, 5 C a 10 C včetně maximálního proudu dovoleného výrobcem, dále pak jako funkce hmotnosti při 100 A/kg, 200 A/kg, 400 A/kg a 600 A/kg, jako funkce objemu při 300 A/l, 600 A/l, 1200 A/l a 1800 A/l a konečně pulzně s periodou 5 s a střídou 20 % při 10 C, 15 C a 20 C.
- Nabíjecí proudy jsou testovány cyklem CC-CV při 1 C, 2 C, 3 C a maximu dle výrobce s ukončovací podmínkou poklesu proudu pod 100 mA, včetně pulzního nabíjení CC do horního mezního napětí s periodou 5 s a střídou 20 % při 5 C, 8 C a 10 C.

Pro vypočtení proudů byly použity hmotnosti z technických listů (pokud byly dostupné) a nominální rozměry pouzder článků (čili např. článek s pouzdem 18650 byl brán jako válec o průměru 18 mm a výšce 65 mm). Dolní mezní napětí vybíjení bylo vždy stanoveno dle technického listu nebo jako 2,5 V, pokud nebylo dostupné.

Články nebyly podrobeny testu odpovídajícímu normalizovanému jízdnímu cyklu ani testu kombinujícímu nabíjení a vybíjení pro obtížné vytěžení užitečných informací pro porovnání z takového testu oproti testování jednotlivých vlastností odděleně.

#### 4.4.2 Výsledky testů

Testování probíhalo celodenně po dobu 10 dní a bylo shromážděno zhruba 2,65 GB dat, která byla zpracovávána vlastními, do velké míry automatickými, skripty v prostředí MATLAB.

Z důvodu omezené časové dostupnosti silnějšího testeru byl po dokončení měření ve slabším z testerů vyřazen článek Sanyo UR18650RX, jelikož byl dle výsledků měření nejhorší s kapacitou řádově 2 Ah. Článek navíc dosahoval pouze 93,6 % své nominální kapacity, nelze tedy vyloučit, že se jednalo o poškozený či padělaný kus. Článek BAK N18650CNP byl rovněž vyřazen vzhledem k omezené časové dostupnosti testeru v kombinaci s výpadkem kanálu.

Všechny články testované na silnějším testeru byly schopny splnit i nejvyšší úroveň zátěže po uspokojivou dobu, s výjimkou Samsung 48G2. Pro srovnání tedy budou využity právě testy při nejvyšších zátěžích.

Testy prováděné s proudem jako funkcí objemu a hmotnosti se ukázaly být výrazně provázané. V testu vybíjecím tempem 600 A/kg byly oproti testům s vybíjecím tempem 1800 A/l články vybity průměrně o 4,8 % SOC více. Maximální rozdíl byl 16,1 % u VTC5C, naopak u VTC6A rozdíl pozorován nebyl. Pokud by rozdíl byl výrazný, bylo by možné k němu u jinak podobných článků přihlídnout, vzhledem k tomuto rozptylu však výsledky těchto testů nebudou uvažovány.

Rovněž nebyly pozorovány články, které jsou lepší v pulzních testech než při trvalé zátěži, nebo naopak. Výsledky pulzního vybíjení tedy měly při výběru článku minimální váhu.

Jako zajímavé se ukázalo, že články s obecně horšími parametry se nabíjejí déle než ostatní, neboť dříve dosáhnou svého horního mezního napětí.

Všechny články s výjimkou Samsung 48G2 nevykazovaly snížení parametrů ani po testování nad běžné pracovní meze.

### 4.4.3 Výběr článku

Za hlavní kritérium výběru byly voleny výsledky testů vybíjením při zátěži 600 A/kg. Přihlédnuto bylo jak k maximální dosažené teplotě, tak k předpokládané kapacitě výsledné baterie  $C_{tot}$  vypočtené při vybíjení touto zátěží. Dalším rozhodovacím kritériem byly výsledky testu pulzního nabíjení, konkrétně předpokládaná kapacita výsledné baterie  $C_{nab}$ , kterou by bylo možné dobít plným proudem 20 C, jakož i teplota, které články dosáhly a procento skutečného dobití baterie oproti kapacitě dobité běžným nabíjením.

Tabulka 4.1: Parametry použité pro srovnání jednotlivých článků

Článek	Kapacita	Vybíjení 600 A/kg			Pulzní nabíjení 10 C		Parametry výsledné baterie		
	$C_{0,2C}$ vs. $C_{nom}$ [%]	C vs. $C_{0,2C}$ [%]	t [°C]	$U_{avg}$ [V]	C vs. $C_{1C}$ [%]	t [°C]	yPxS	$C_{tot}$ [Wh]	$C_{nab}$ [Wh]
HJ2	97,9	94,2	69,2	3,208	51,5	35,9	5P13S	577	361
P45B	95,7	<b>96,4</b>	68,1	<b>3,269</b>	59,2	37,5	3P14S	<b>570</b>	<b>409</b>
VTC5D	102,1	92,0	70,0	3,204	58,6	34,6	5P13S	<b>528</b>	<b>376</b>
25R8	100,0	94,6	78,4	3,092	49,7	34,8	5P14S	512	325
P28B	91,8	92,7	<b>66,5</b>	<b>3,265</b>	52,2	34,1	5P13S	506	316
40TG	100,8	94,6	78,7	3,132	51,0	37,6	3P14S	502	329
NCR2070C	99,0	90,7	80,0	3,196	53,7	37,5	4P12S	482	314
VTC5C	103,2	93,0	80,1	3,040	49,0	35,3	5P13S	474	308
VTC6	103,6	73,4	80,3	3,151	42,6	38,3	5P13S	467	272
H40A	100,1	83,7	80,0	3,175	53,2	37,8	3P14S	447	308
30Q6	99,2	72,4	80,3	3,135	44,1	37,0	5P13S	439	311
25S	98,6	92,2	<b>66,5</b>	3,204	<b>60,7</b>	<b>32,8</b>	5P12S	437	332
25PG	101,4	91,8	70,6	3,113	55,7	34,6	5P12S	434	315
VTC5A	99,0	90,8	70,2	3,153	59,4	33,5	5P12S	425	314
20SG	102,8	<b>95,6</b>	67,5	3,097	<b>63,6</b>	<b>31,7</b>	5P13S	396	332
40T4	95,5	73,3	80,1	3,186	38,6	39,3	3P14S	375	271
20S	98,9	<b>96,6</b>	<b>60,8</b>	<b>3,269</b>	<b>70,2</b>	<b>30,1</b>	5P12S	375	317
VTC6A	99,3	64,8	80,2	3,064	33,5	37,4	3P14S	331	106
48G2	98,0	35,2	80,2	2,836	-	-	3P14S	197	-

Mezi články lze pozorovat výrazné rozdíly. Články s nižší kapacitou mají tendenci zůstat chladnější než články s kapacitou vyšší. Tento rozdíl lze částečně přisoudit faktu, že článek s nižší kapacitou bude stejný proud dodávat po kratší dobu než článek s kapacitou vyšší a jelikož se články vybíjí před ustálením teploty, nestihne tolik narůst.

Články společnosti Molicel vykazují výraznou odchylku od nominální kapacity stanovené výrobcem, kapacita článku P28B je dokonce o 80 mAh nižší než minimální uvedená v technickém listu. Otestování dalších článků stejné šarže odhalilo obdobnou odchylku od parametrů.

Článek Molicel P45B byl zvolen jako preferovaný pro konstrukci baterie. Nabízí pátou nejnižší teplotu při vybíjení, druhou nejvyšší vybíjecí kapacitu výsledné baterie a nejvyšší schopnost výsledné baterie pohltit energii při regenerativním brždění. Jedná se navíc o článek v preferovaném velkém pouzdru 21700. Jelikož je však dostupnost článků na trhu vysoce proměnlivá, byly zvoleny další přijatelné články a to Sony/Murata VTC5D, LG HJ2 a Molicel P28B.

## 5 Návrh funkčního vzorku baterie

Baterie vozu studentské formule bude zodpovědná pouze za napájení dvou elektromotorů umístěných přímo v kolech přední nápravy. Napájení systémů spalovacího motoru bylo ponecháno oddělené pro vyšší spolehlivost a nižší nároky na baterii hybridního pohonu.

### 5.1 Testování limitů zvoleného článku

Články Molicel P45B byly po testování stále dostupné a byly tedy objednány. Pro dimenzování vodičů v baterii však bylo nutné stanovit jejich maximální parametry. Testovány byly vybíjecí proudy pulzní zátěží, přičemž parametry byly přizpůsobeny disciplíně sprint. Formule Klárka je schopna disciplínu absolvovat za 4,1 s. Pro rezervu tedy bylo uvažováno 5 s plného výkonu a konzervativních 30 s pro dochlazování (než formule přijde znovu na řadu).

Komora byla opět nastavena na 25 °C a článek byl z plně nabitého stavu vybíjen do dosažení spodního mezního napětí. Velikost proudu byla nastavena na 100 A a byla zvyšována po 10 A do limitu baterie. Jako maximální se ukázal proud 140 A, při kterém článek dokončil 12 pulzů. Z článku tak bylo vyčerpáno 2,32 Ah, což odpovídá zhruba polovině jeho kapacity. Teplota dosáhla maxima 71.9 °C. Při vyšším proudu článek nebyl schopen dokončit ani první pulz. Toto testování znatelně neovlivnilo parametry článku.

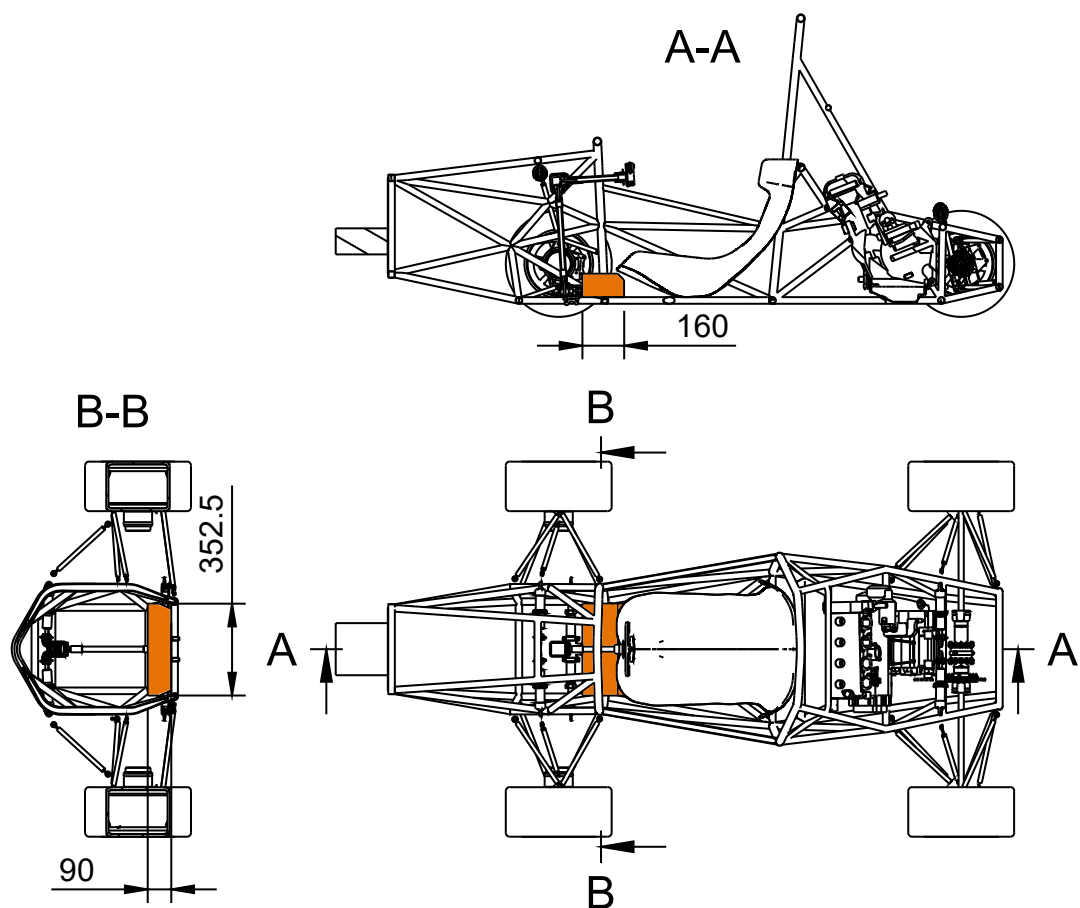
### 5.2 Základní parametry baterie

#### 5.2.1 Uspořádání článků

Vzhledem ke stanoveným požadavkům bylo zvoleno zapojení baterie 3P14S. Toto zapojení lze považovat za ideální, neboť poskytne maximální možné napětí baterie při použití lithiových článků s maximálním napětím 4,2 V.

#### 5.2.2 Rozměry a umístění

Pro volbu umístění bylo nejprve stanoveno několik rozměrových variant baterie na základě možných uspořádání článků a předpokládaného objemu podpůrné elektroniky. Na základě těchto variant bylo ve spolupráci s jedním z vedoucích sekce "rám a kapotáž", Ondřejem Polívkou, stanoveno přijatelné umístění baterie.



Obrázek 5.1: Předběžné umístění baterie v úvodním návrhu rámu

### 5.2.3 Metoda chlazení

Jelikož lze předpokládat vysokou okolní teplotu, nebude k dispozici velký teplotní rozdíl mezi teplotou baterie a chladicím médiem, čímž lze vyloučit prosté chlazení vzduchem. Aktivní chlazení dle pravidel zmíněných v kapitole 2.6.1 připadá v úvahu pouze termoelektrickým jevem, což by však výrazně zvýšilo složitost baterie a neslo výrazné navýšení spotřeby energie.

Jako ideální řešení se jeví použít PCM, jelikož baterie nebude vytěžována trvale. Výhody této metody navíc odpovídají požadavku jednoduchosti, spolehlivosti i nízké hmotnosti a řešily by nízký dostupný teplotní rozdíl, neboť drží teplotu téměř konstantní. Je však rovněž v rozporu s pravidly.

Nejvhodnější by pak pravděpodobně bylo aktivní imerzní chlazení. Jeho implementace však byla týmem zamítnuta pro vysokou komplikovanost stávajícího chlazení elektromotorů a spalovacího motoru. Zvolené řešení tedy spočívá v pasivním imerzním chlazením pomocí minerálního oleje (zvolen pro nižší viskozitu než silikonový), který má za úkol hlavně přirozeným prouděním předat teplo z článků do krytu baterie, jakož i svojí teplotní kapacitou zpomalit dynamiku teploty článků a zvýšit rovnoměrnost teplotního rozložení. Nadějí je, že v případě thermal runaway bude olej snižovat teplotu článku dostatečně, aby se jev nešířil baterií nebo aby byl alespoň zpomalen a že absence vzduchu v komoře s články zabrání případnému hoření či explozi.

Aby toto řešení fungovalo co nejlépe, byl zvolen jako materiál krytu hliník, konkrétně vařitelný a dostupný AlMg3, pro jeho vysokou tepelnou vodivost jakož i relativně snadné utěsnění baterie. Požadavek na chlazení krytu vzduchem pak byl předán Jozefovi Jaroslavovi Fekiačovi, přičemž navrhl náfučky v bočnicích těsně za předním přitlačným křídlem, které budou vzduch brát z vlastní jízdy formule, dostatečnost tohoto řešení však nezbývá než otestovat za reálných jízdních podmínek na skutečném vozu.

## 5.2.4 Chladicí médium

Požadavkem na minerální olej byla vysoká elektrická pevnost a absence kontaminace sírou, aby nedošlo k reakci s měděnou přípojnici, jakož i dostatečný rozsah pracovní teploty. Zvolen byl izolační olej Total Isovoltine II, určený například do transformátorů.

## 5.3 Výběr elektroniky

Společným omezením výběru všech komponent baterie byla dobrá dostupnost na trhu, aby nastala situace, kdy bude nutné změnit návrh baterie čistě pro nedostupnost komponent. Výběr byl zaměřený na díly určené pro užití na poli automobilového průmyslu, neboť jsou podmínky instalace ve formuli na součástky velice náročné například co do vibrací.

### 5.3.1 Proudové čidlo

Jako proudové čidlo se nabízí volit buď bočník, nebo senzor na bázi Hallova jevu. Bočník by bylo možné poměrně levně vyrobit, avšak vznikl by tak další prvek, jehož parametry a vlastnosti by bylo nutné odladit, proto bylo toto řešení zavrženo. Je však možné ho uvažovat pro baterie dalších monopostů.

Požadavkem byl proudový rozsah přesahující maximální proud baterie 420 A při vybíjení a 135 A při nabíjení, výstup splňující požadavky na systémově kritické signály, jakož i vysoká přesnost, zvláště při nižších proudech pro možnou implementaci odhadu SOC počítáním coulombů.

Jako vhodné řešení se tak ukázaly bezkontaktní snímače proudu se dvěma proudovými rozsahy řady DHAB společnosti LEM, konkrétně model S/106. Disponuje proudovými rozsahy  $\pm 20$  A a  $\pm 500$  A. Vyžaduje napájení 5 V při proudu typicky 15 mA. Při očekávaných provozních teplotách baterie nabízí absolutní odchylku citlivějšího kanálu 0,23 A až 0,60 A při plném zatížení a absolutní odchylku méně citlivého kanálu 1,62 A až 11,4 A při plném zatížení, což se jeví jako dostatečné pro formuli, neboť bude možné SOC kalibrovat často z OCV. Proti bočníku je hlavní nevýhodou omezená šířka pásma 70 Hz a poměrně velká absolutní odchylka.

### 5.3.2 Pojistka

Baterie je osazena tavnou pojistkou čistě pro ochranu před zkratem, neboť nadproudové stavy hlídá BMS a přetavení pojistky by se mělo stát pouze v krajním případě. Pojistka tedy byla dimenzována tak, aby dobře ustála jak trvalé, tak pulzní zatížení dovolené pro články. Trvalé zatížení odpovídá proudu 135 A, pulzní pak proudu 420 A po maximum 5 s. Co se týká přerušovací schopnosti, při testu použitého článku zátěží 150 A pokleslo jeho napětí okamžitě

z 4,2 V pod 2,5 V. Takovýto pokles odpovídá vnitřnímu odporu jednoho článku 11,33 mΩ. Při zapojení 3P a zanedbání odporu kontaktů a přípojnice lze tedy čekat maximální zkratový proud 1112 A.

Jako optimální pojistka splňující tyto požadavky se ukázala být V fuse 90 058 05.200 společnosti Siba s maximálním proudem 200 A, maximálním napětím 80 VDC a odporem 0,17 mΩ. Pojistka by měla vydržet proud 420 A po dobu zhruba 10 až 20 s při pokojové teplotě. Přerušovací schopnost pojistky 1200 A je dostatečná.

### 5.3.3 Stykač

Stykač je v baterii jen jeden a pravidly je vyžadován jeho typ jako NO. Co do jeho proudové zatížitelnosti, byla hledána vyšší, než je maximální proud baterie. Jelikož se jedná pouze o pulzní zátěž a v běžném provozu nebude stykač spínán ani rozepínán se zátěží, pravděpodobně by byl dostačující i stykač slabší, avšak riziko jeho poškození nebo svaření kontaktů bylo považováno za nepřijatelné. Ze stejného důvodu byla vyžadována možnost rozepnutí pod proudem alespoň 1000 A. Důraz byl však kladen i na váhu a velikost stykače, neboť se jedná o obecně rozměrný komponent. Provozní napětí cívkou bylo stanoveno na 12 V, jelikož musí být napájena z vypínacího okruhu formule.

Zvolený stykač KILOVAC EV200AAACA společnosti TE Connectivity je nejmenší stykač, který parametry vyhovuje. Jeho pracovní napětí je 12 až 900 VDC, zvládá trvalou zátěž 500 A, odpor kontaktů je 0,2 mΩ a zvládá přerušit proud až 2000 A. Navíc disponuje ekonomizérem, který snižuje proud cívkou v sepnutém stavu na pouhých 0,13 A, což je velice žádoucí vzhledem k vytíženosti 12 V rozvodů formule.

### 5.3.4 Konektory

Vzhledem k dimenzování pojistky a implementaci torque vectoringu, který může vyžadovat plný výkon baterie do pouze jednoho elektromotoru, byly voleny konektory určené na 200 A, aby byly pojistkou řádně chráněné a aby na nich byl co nejnižší napěťový úbytek. Dalším požadavkem bylo krytí alespoň IPx5B a mechanické zabránění přepólování chybným zapojením, jakož i mechanické zajištění konektoru v zapojeném stavu. Důležitý byl i požadavek na nízký zástavbový prostor.

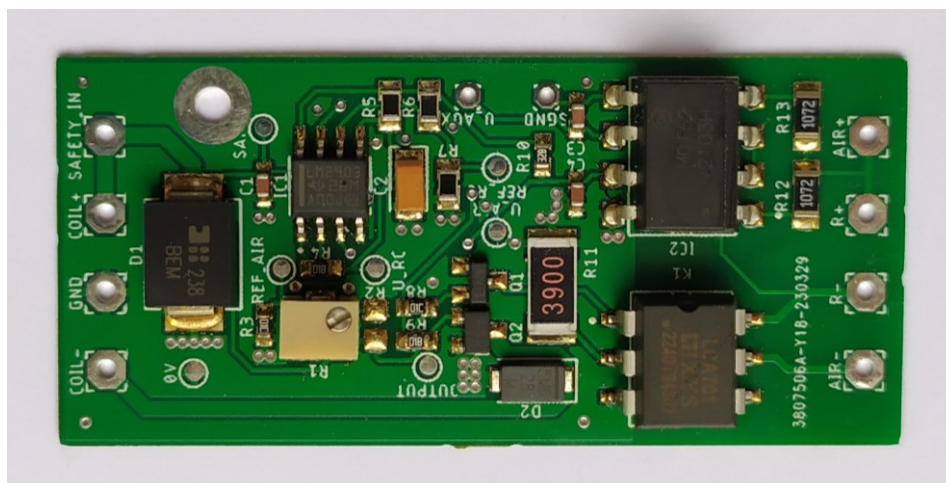
Jako vhodné se ukázaly 8 mm konektory řady SurLok Plus<sup>TM</sup> společnosti Amphenol. Dovolují maximální proudy 200 A při teplotním rozsahu -40 až 125 °C, splňují IP67B jakož i UL 94 V-0 a odolají napětí až 1500 VDC. Volena byla verze se svorkou se šroubovým závitem M8 pro snadné upevnění k přípojnicí. Konektory byly zvoleny tak, aby nebylo možné je prohodit.

Baterie vyžaduje ještě spojení se svazkem vozu. Potřebných je pět kontaktů – dva napájecí pro 12 V, dva pro CAN sběrnici a jeden pro vypínací obvod. Na formuli jsou již hojně používané konektory řady DTM, které zvládají proudy až 7,5 A a splňují IP68, byl proto využit konektor DTM04-6P s šesti kontakty.

Pro programování a komunikaci s mikropočítačem integrovaným v baterii byl hledán konektor USB ve verzi do panelu splňující alespoň IPx5. Zvolen byl konektor 17-250021 společnosti CONEC, který splňuje IP67 a integruje zásuvku USB B mini.

## 5.4 Precharge

Vzhledem k vysoké kapacitě motorových měničů je vhodné osadit stykač takzvaným precharge obvodem, který stykač nejprve přemostí odporem a pomalu nabije výstup na uspokojivé napětí před sepnutím. Existují komerční řešení, jako například ZEVA Smart Precharger, který lze zakoupit v celku, ale k dispozici je i jeho elektrické schéma pod licencí MIT. Tento obvod byl využit jako inspirace pro tvorbu vlastního precharge obvodu s čistě analogovou elektronikou namísto dedikovaného mikropočítače. Zachována byla v podstatě jen hodnota precharge odporu a v hrubých rysech volba některých komponent a jejich propojení.



Obrázek 5.2: Osazený obvod precharge

Obvod precharge je napájen 12 V z vypínacího okruhu formule a je zapojen elektricky místo cívky stykače, tedy v okamžiku požadavku jeho sepnutí je na precharge přivedeno napětí. Precharge odpor okamžitě přemostí kontakty stykače pomocí optorelé LCA701STR. Napětí na stykači je měřeno pomocí fototranzistoru MCT623S. Část spojená s napětím baterie je tak galvanicky oddělena. Měřené napětí je porovnáváno komparátorem s hodnotou přednastavenou trimmem R1. Překročení této hodnoty je zpožděno tak, že výstup komparátoru vede do RC členu pro šumovou odolnost. Druhý komparátor pak dle výstupu z RC členu rozpojí optorelé a tranzistorem MOSFET sepne stykač. Jeden z kanálů fototranzistoru je ponechán pro monitorování napětí na stykači pomocí BMS.

Implementace precharge obvodu má výhodu v umožnění detekce zkratu na výstupu, nikdy tak z principu jeho fungování nemůže dojít k sepnutí stykače do zkratu. Precharge odpor s hodnotou  $50\ \Omega$  je co do svého výkonu poddimenzován se ztrátovým výkonem pouze 25 W, což je však přijatelné, jelikož bude zatěžován pouze okamžikově. Jeho teplota, jakož i doba sepnutí precharge obvodu, může navíc být monitorována BMS.

Kompletní schéma včetně výkresu plošného spoje a BOM obsahuje [příloha C](#).

## 5.5 Návrh BMS

Centralizovaná topologie nejlépe vyhovuje parametrům baterie hybridního pohonu formule díky nízkému napětí a malému počtu článků. První návrh kombinoval napájecí měnič, BMS obvod i precharge na společný plošný spoj, od tohoto řešení však bylo ustoupeno ve prospěch samostatného zdroje a samostatného precharge obvodu. Cílem bylo zjednodušit hledání



problémů, snížit cenu případné změny návrhu a umožnit jejich další samostatné využití, například na dalším voze.

### 5.5.1 Výběr BMS čipu

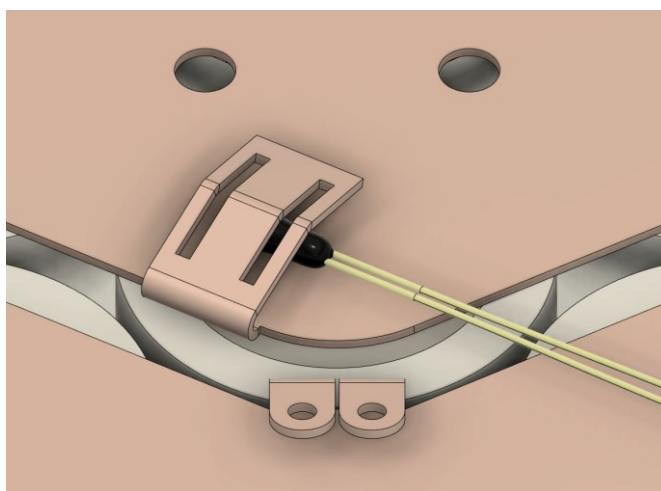
Na BMS čip byl stanoven požadavek dostupnosti, podpory zapojení 14S v jednom čipu, implementace balancování, možnost vyčítání hodnot přes UART a kompenzace napětíového poklesu na přípojnicí. Certifikace pro automobilový průmysl byla výhodou. Nejvhodnějším kandidátem se ukázal být čip BQ79614 společnosti Texas Instruments. V době jeho výběru byl dobře dostupný, včetně jeho pinově kompatibilní verze BQ79616 a Texas Instruments navíc poskytuje kvalitní dokumentaci a návody.

Čip splňuje standard AEC-Q100 a nabízí uspokojivou přesnost svého hlavního 16 bit ADC převodníku 1,5 mV. Díky redundantním cestám pro napětí je možná i jejich diagnostika. Balancovací proud se nastavuje externími odpory, maximální hodnota je 240 mA. Balancování je sice pasivní, ale jelikož bude článek pomalu nabíjen mimo formuli, mělo by být postačující. Čip je napájen přímo ze svorek baterie vlastním lineárním zdrojem, ve vypnutém režimu má spotřebu pouze 16 až 23  $\mu$ A.

### 5.5.2 Měření teploty

Pro měření teploty byly zvoleny termistory typu NTC pro poměrně jednoduchou a robustní implementaci. I když provozní rozmezí baterie nepřesáhne 60 °C, termistory byly voleny pro možné použití na celém provozním rozsahu článků -20 °C až 80 °C.

Díky neobvyklým požadavkům na snímání teploty alespoň 30 % článků nebylo možné využít snímání teplot pomocí BMS čipu. Vzhledem k počtu článků bylo voleno snímání teploty středního článku z každého paralelního bloku, celkem tedy 14 teplot pro pokrytí jedné třetiny článků. Navíc pak byl ponechán jeden kanál pro teplotu chladicího média a jeden pro precharge odpor. Čidla jsou připevněna k přípojnicí pomocí drobných ohýbacích plošek, jakož i dvoudílnou silikonovou zalévací hmotou pro kvalitnější uchycení odolné proti vibracím.



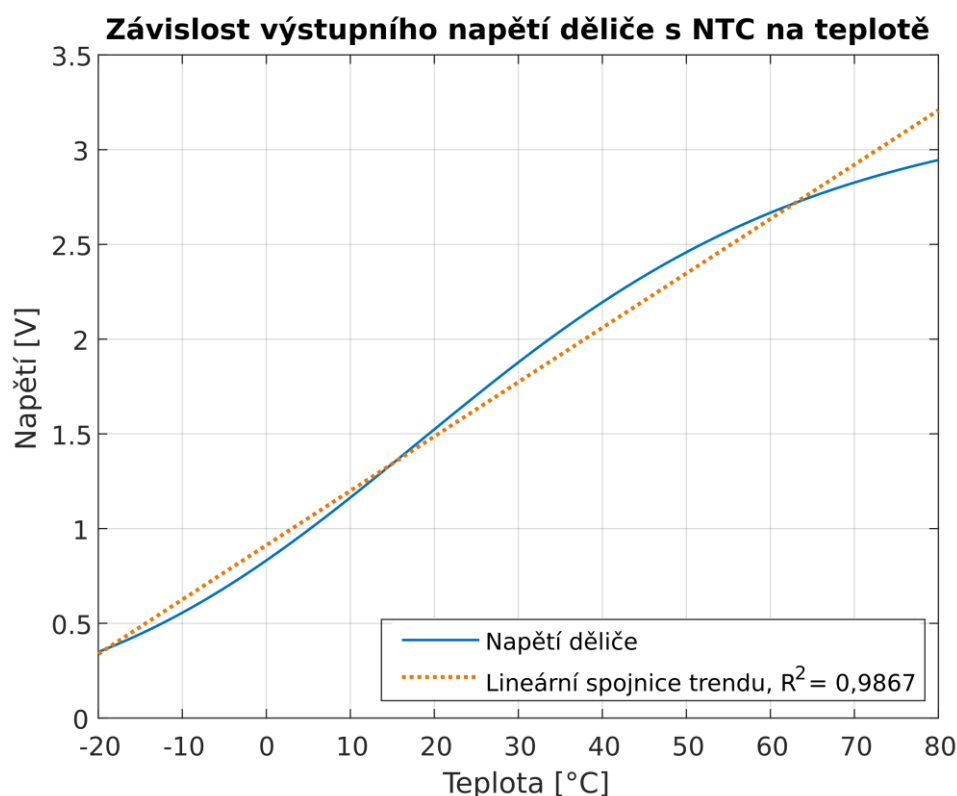
Obrázek 5.3: Detail uchycení teplotního čidla k přípojnicí

Vzhledem k velkému množství čidel byla zvolena čidla s vyšším nominálním odporem 30 kΩ, hlavně pro snížení spotřeby obvodu. Zvolena byla čidla NTCLE350E4303FHB0 společnosti Vishay.

Pro linearizaci bylo voleno zapojení čidla jako napěťového děliče. Pro splnění požadavku možnosti detekce zkratu na zem a napájecí napětí, jakož i přerušení vodiče, byl požadován odstup maximálního a minimálního napětí na napěťovém děliči alespoň 0,3 V od mezí napětí napájecího. Hodnota pevného odporu tohoto děliče  $R_1$  byla stanovena vzorcem:

$$R_1 = \sqrt{R_{NTC,min} R_{NTC,max}}$$

Jako maximální odpor termistoru  $R_{NTC,min}$  byla dosazena hodnota při -20 °C, jako minimální odpor  $R_{NTC,max}$  pak hodnota při 80 °C. Vychází tak hodnota pevného odporu 32,31 kΩ, jako nejbližší standardní hodnota byl zvolen odpor hodnoty 32 kΩ. Dělič bude napájen napětím 3,3 V ze stejného zdroje jako mikropočítač, napětí na odporovém děliči se tedy bude pohybovat od 0,35 V po 2,95 V, což je ideální, neboť není nutné tento výstup dále upravovat pro dosažení vhodného rozmezí. Odpory byly voleny tenkovrstvé s tolerancí 0,1 % a teplotním koeficientem 25 PPM/°C.



Graf 5.1: Výpočet napětí na napěťovém děliči při nominálních hodnotách

Pro zaznamenání takového množství teplot byl využit 16 kanálový analogový multiplexor 74HC4067PW společnosti Nexperia, jehož výstup je pro minimalizaci vlivu jeho poměrně vysokého vnitřního odporu a pro minimální ovlivnění samotného NTC veden skrze napěťový sledovač. Použit zde je MCP6V76UT-E/OT společnosti Texas Instruments pro výborně nízkou vstupní napěťovou nesymetrii, vstupní klidový proud, provozní napájecí proud a CMMR. Operační zesilovač je následován jednoduchým RC členem pro filtrování signálu, neboť lze čekat jeho výrazné zarušení v prostředí vozu.

Konečně je nutné stanovit potřebné parametry měřicího ADC. Na linearizované křivce je nejnižší rychlost změny napětí  $10,667 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  při  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Žádoucí je rozlišení na desetiny stupně, což odpovídá minimálnímu napěťovému kroku  $1,0667 \text{ mV}$  a tedy počtu kvantizačních úrovní 3094. Po zaokrouhlení na nejbližší vyšší mocninu dvou dostáváme 4096, což odpovídá ADC s rozlišením 12 bit. Vzhledem k přetrvávající nelinearitě a potřebě dosáhnout co nejvyšší přesnosti budou všechny kanály zkalibrovány pomocí look-up table.

### 5.5.3 Výběr mikropočítače

Mikropočítač bude mít za úkol ovládat precharge obvod, jakož i snímat téměř všechny teploty a proudové čidlo. Plní tak funkci monitorovací, bezpečnostní, a navíc i funkci komunikační.

Mezi nejpodstatnější požadavky patří podpora dvou UART rozhraní (jedno pro BMS, jedno pro komunikaci s počítačem), podpora CAN 2.0 s rychlostí 1 Mbit/s, dostatečný výkon na případnou implementaci složitějších metod odhadů stavů baterie a nízká složitost implementace samotného mikropočítače. Konečně by měl mít ADC převodník s rozlišením alespoň 12 bit, jak bylo stanoveno v předchozí kapitole.

Zvolen byl mikropočítač ESP32-PICO-V3 společnosti Espressif. Procesor sice nepodporuje CAN, ale podporuje TWAI, což je rozhraní s CAN plně kompatibilní. Zvažovány byly i procesory řady STM32 společnosti STMicroelectronics, které nabízí jako výhodu například podporu funkční bezpečnosti, režimy extrémně nízké spotřeby, nebo třeba čipy pro automobilový průmysl. Jejich dostupnost však stále kolísá a ESP32 je z pohledu udržitelnosti ve studentském týmu výrazně výhodnější díky jeho jednoduchosti. Konkrétní vybraný mikropočítač PICO-V3 obsahuje již integrovaný oscilátor, paměť flash a jeho anténní výstup pro Wi-Fi má impedanci  $50 \Omega$ , pro jeho zapojení tedy v podstatě stačí pouze několik kondenzátorů a je možné vyhnout se ladění obvodů s krystalovým oscilátorem či srovnání impedance antény a čipu. Navíc lze očekávat dlouhodobou dostupnost téměř plně kompatibilních variant čipů, neboť samotné PICO-V3 bylo předcházeno kompatibilním čipem PICO-D4 a nedávno byl vydán nový kompatibilní čip PICO-V3-02.

### 5.5.4 Napájecí obvod

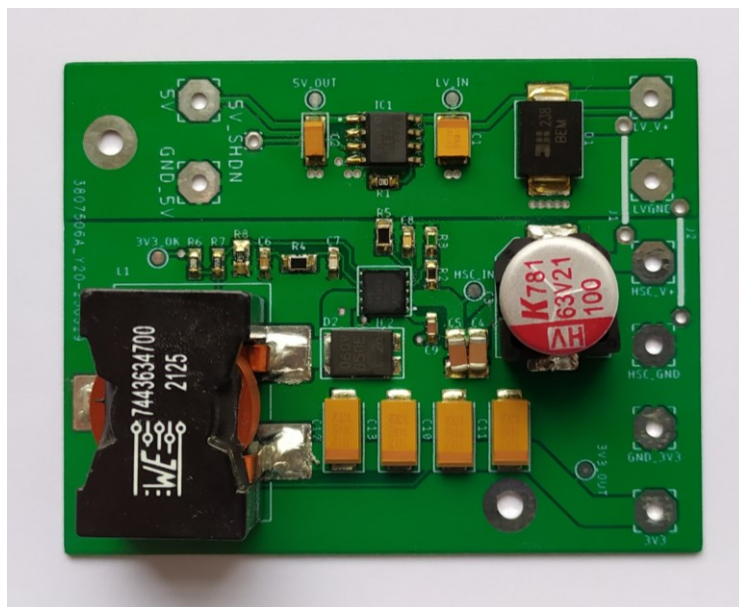
Pro napájení jsou vyžadována dvě různá napětí a to 5 V pro proudové čidlo a 3,3 V pro mikropočítač a teplotní čidla.

Na zdroj 5 V nejsou kladeny velké proudové nároky, při jeho volbě byl kladen důraz spíše na jeho stabilitu a jednoduchost implementace, jakož i cenu. Může být připojen na napájení 12 V, neboť jeho provoz nemá smysl bez přítomnosti tohoto napájení pro možnost sepnutí stykače. Zvolen byl lineární regulátor LP2951-50QDRQ1 od Texas Instruments s proudovou zatížitelností 100 mA a vysokou přesností výstupního napětí 2 % přes všechny pracovní teploty.

Zdroj 3,3 V je již více zatížený, volena tedy byla spínaná topologie. Vzhledem k vytiženosti rozvodu 12 V vozu pak byl volen zdroj schopný fungovat při až 60 V pro možnost napájení přímo z hybridní baterie. Minimální proudová zatížitelnost byla s rezervou požadována 2 A, dále byl hledán co nejnižší klidový proud a vysoká účinnost.)

Zvolen byl čip Texas Instruments TPS54361QDPRTQ1. Vzhledem k složitosti návrhu spínaného regulátoru byl pro určení požadovaných hodnot součástek využit nástroj WEBENCH®

Power Designer (rovněž od Texas Instruments), který je zároveň doporučen v technickém listu. Vypočtené hodnoty byly ručně ověřeny dle vzorců z technického listu. Zdroj byl pro zvýšení spolehlivosti a vzhledem k možnosti jeho uplatnění i v jiných komponentech formule dimenzován na jeho maximální možný proud 3,5 A. Při volbě skutečných komponent pak bylo dbáno na parazitní vlastnosti jako ESR kondenzátorů a odpor cívek, aby nebyla snížena účinnost obvodu, nedošlo k přehřátí těchto komponent a aby zdroj byl stabilní. Hlavní kritéria návrhu byla přesnost a stabilita regulace napětí, jakož i účinnost. Dosaženo bylo včetně zohlednění vlastností použitých součástek napěťové tolerance 1,15 % a zvlnění výstupního napětí 15,51 mVpp.



Obrázek 5.4: Osazený napájecí obvod

Kompletní schéma, výkres plošného spoje a BOM napájecího obvodu obsahuje [příloha E](#).

### 5.5.5 Další součástky

Všechny součástky až na tantalové kondenzátory jsou pro snížení počtu různých součástek a bezpečnost dimenzovány na napětí alespoň 60 VDC. Všechny použité součástky osazené na plošných spojích, až na ESP32, jsou rovněž certifikované pro použití v automobilovém průmyslu. Všechny vstupy, ať už napěťové nebo signální, jsou navíc ochráněny před napěťovými špičkami vhodnými TVS diodami.

Wi-Fi výstup mikropočítače je vyveden do IPEX konektoru, ke kterému je připojena komerční anténa pro možnost vzdálené diagnostiky baterie.

Vzhledem k rozdílu napěťových úrovní ESP32 a BQ79614 bylo nutné na UART propojení mezi nimi umístit překladač napěťových úrovní.

Pro programování a komunikaci s ESP32 přes USB je použit převodník USB na UART CP2102, který je zapojen tak, aby byl napájen z připojeného USB zařízení.

Rozhraní se sběrnici CAN je zprostředkováno čipem SN65HVD230DR společnosti Texas Instruments, který byl volen pro podporovanou rychlost 1 MB/s a napájecí napětí 3,3 V.

Celé schéma BMS včetně výkresu plošného spoje a BOM obsahuje [příloha D](#).

## 5.6 Dimenzování vodičů

### 5.6.1 Měřicí vodiče

Vodiče pro snímání napětí článků, balancování baterie a připojení NTC termistorů představují unikátní problém. Musí totiž proniknout do části komory zatopené minerálním olejem. Nelze použít běžný slaněný vodič, podél lanka by minerální olej vzlínal skrz kabel. Navíc musí být použit materiál s olejem kompatibilní. Jelikož není v baterii příliš prostoru a jelikož je vhodné, aby se vodiče v případě zkratu přepálily a baterii tak ochránily, je zároveň žádoucí i velmi tenký průřez jádra. Počet žil rovněž musí být velký. Osazeno v komoře bude 16 NTC termistorů, které vyžadují dohromady 32 vodičů. Dále BMS vyžaduje 15 vodičů pro snímání napětí, dalších 15 vodičů pro balancování, dva vodiče pro snímání poklesu napětí na přípojnicích a dva vodiče pro napájení BMS. Dohromady je tedy potřeba 66 vodičů.

Vzhledem k těmto požadavkům byl zvolen speciální podélně vodotěsný kabel BITNER XzTKMXpw určený pro telekomunikaci. Jeho pracovní rozmezí teplot je  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což je poměrně nízké, avšak jedná se o kompromis s cenou a dostupností. Je tvořen 40 dráty průřezu  $0,2\text{ mm}^2$  v deseti skupinách po čtyřech vodičích. Jeho izolace je složená z polyetylenu. Aby bylo možné proniknout tímto kabelem do komory, jsou využity běžné plastové vývodky IP68. Některé přebytečné žíly lze využít pro posílení vytižených vodičů (napájení BMS), zbylé zůstanou nevyužité.

### 5.6.2 Přípojnice

Pro spojení článků a přípojnice byla zvolena technologie micro TIG. Zvláště byly dimenzovány přípojnice uvnitř a vně zaplavené komory.

Přípojnice jsou vyrobené z mědi pro výbornou tepelnou i elektrickou vodivost. Použitá měď je v tloušťce  $0,5\text{ mm}$ , což je na hranici svařitelnosti k článku  $21700$  použitým strojem. Cílem dimenzování je hlavně omezení poklesu napětí na přípojnicích uvnitř baterie. Bylo však nutné zohlednit i výrazný ztrátový výkon, za přijatelnou hodnotu byl tedy stanoven maximální pokles napětí  $0,25\text{ V}$  při  $420\text{ A}$ . To při odhadované délce přípojnice  $550\text{ mm}$  odpovídá průřezu  $22,18\text{ mm}^2$ , volen tedy bude celkový minimální průřez  $22,5\text{ mm}^2$ . Skrze několik jednoduchých vzorců lze odvodit vztah:

$$\frac{\rho_{hm} I^2 t}{\rho_{el} S^2 c} = \Delta\vartheta$$

Z hustoty materiálu  $\rho_{hm}$  kterou výrobce udává jako  $8,94\text{ g/cm}^3$ , proudu  $I$ , času trvání  $t$ , rezistivity materiálu  $\rho_{el}$  udané výrobcem jako  $24\text{ n}\Omega\text{m}$  při  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , průřezu materiálu  $S$  a měrné tepelné kapacity  $c$  stanovené výrobcem jako  $0,386\text{ J/(gK)}$  lze stanovit oteplení materiálu  $\Delta\vartheta$  nezávisle na jeho délce. Předpokladem je, že materiál není jinak ohříván či ochlazován a oteplení je dostatečně malé, takže se parametry nemění. Po dosazení vychází oteplení zvolené tloušťky přípojnice na  $12,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což je stále v mezích přijatelnosti, neboť se jedná o pulzní vytižení. Při maximálním trvalém proudu  $135\text{ A}$  bude ztrátový výkon pouze  $10,7\text{ W}$ , což se jeví jako přijatelné, zvláště jelikož bude přípojnice ponořena v minerálním oleji pro lepší chlazení.

Průřez  $22,5\text{ mm}^2$  je v komoře s elektronikou brán jako minimální. Zvláště v blízkosti kontaktu s články je přípojnice rozšířena, aby umožnila lepší odvod tepla jak ze sebe, tak z článků.

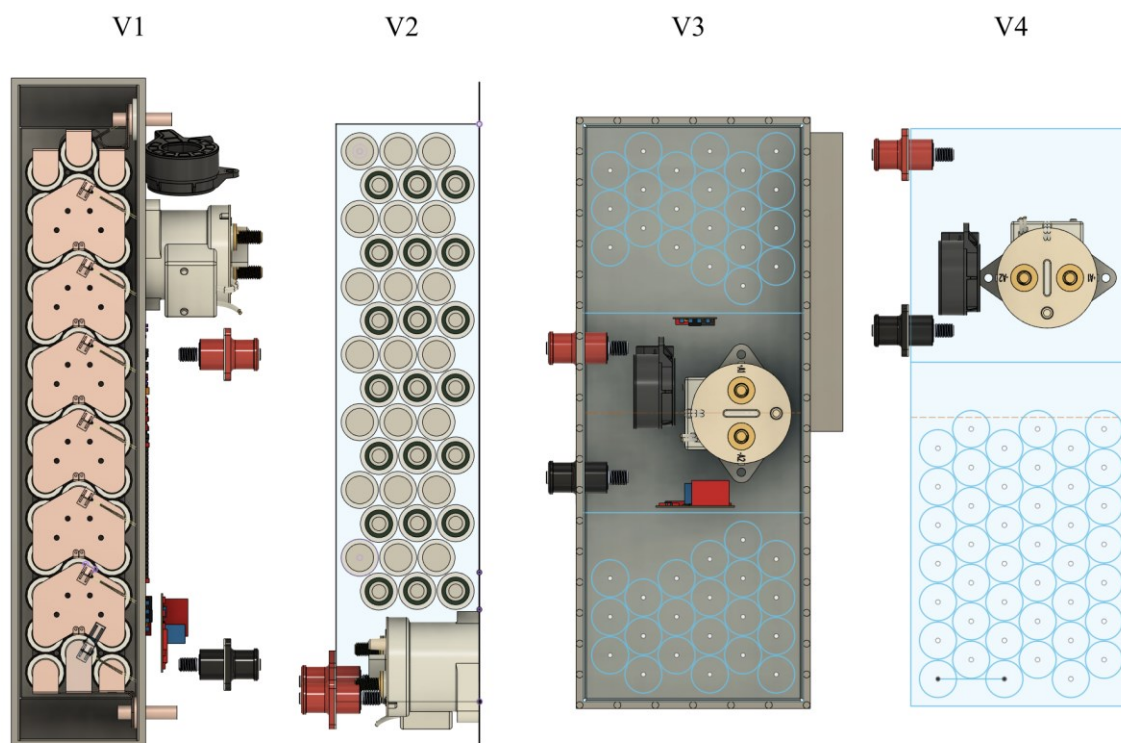
Minimální průřez přípojnice v komoře s elektronikou byl volen jako 28,5 mm<sup>2</sup>, tedy zhruba o 25 % vyšší. Je tak učiněno kvůli horšímu chlazení v této komoře. Pro dosažení dostatečného průřezu není využito tlustšího materiálu přípojnice, ale je vrstven stejný materiál jako v zaplavené komoře kvůli jednodušší výrobě, zredukování počtu různých potřebných polotovarů. Díly takto na sebe vrstvené jsou proto navrženy s oválnými dírami.

### 5.6.3 Ostatní vodiče

Pro USB konektor je využit běžný kabel USB. Pro napájecí vodiče v konektoru DTM jsou využity vodiče s maximálním možným kompatibilním průřezem, a to sice 1 mm<sup>2</sup>. Pro CAN je pak použita kroucená dvoulinka s odpovídající charakteristickou impedancí, která je použita i pro celé CAN vedení formule. Propoje mezi jednotlivými deskami a k elektronice jsou realizovány vodiči o průřezu 0,75 mm<sup>2</sup> pro napájecí vodiče, vodiče rozepínacího okruhu a vodiče stykače. Vodiče signální a nesoucí 5 V napájení mají průřez 0,35 mm<sup>2</sup>. Všechny tyto vodiče kromě USB jsou druhu TXL, odolné do 125 °C a do 60 V. Tento druh vodičů je pro svoji tenkou izolaci a dobrou teplotní odolnost využíván v celém svazku formule.

## 5.7 Návrh pouzdra baterie

Pouzdro baterie prošlo čtyřmi různými rozvrženími. Cílem rozvržení V1 bylo co nejoptimálnější chlazení, problematické však bylo umístění stykače, jakož i nutnost upevnit hlavní konektory na odnímatelný panel. Tyto konektory by navíc mířily opačným směrem, než je žádoucí, jinak by byla hlavní teplosměnná plocha komory s bateriemi překryta elektronikou.



Obrázek 5.5: Jednotlivé verze rozvržení hlavních komponent baterie

Rozvržení V2 byl pokus o umístění stykače do komory s články, ukázalo se však nereálné kvůli požadavku na výrazně složitý tvar komory a s tím spojenými problémy.

Rozvržení V3 je již blízké konečnému. Pro elektroniku byla ponechána komora uprostřed, která by tak mohla mít ventilační škvíry a dovolit účinnější chlazení článků. Vzhledem k nutnosti mít vícero vývodů a přidané složitosti dvou oddělených komor bylo však toto řešení také opuštěno.

Čtvrtá verze je konečným kompromisem, který byl použit pro návrh funkčního prototypu. Mezi pozitiva patří jedna ucelená komora pro baterie, prostorná komora pro elektroniku a vývody na straně měničů. Nevýhodou je však poměrně kompaktní naskládání článků, které by mohlo vést k přehřívání uprostřed. Co se týká rozložení váhy, rovněž pravděpodobně nebude symetrické. Navíc nebylo možné umístit symetricky konektory.



Obrázek 5.6: Finální návrh baterie s odejmutými kryty

Články jsou drženy na místě 3D tištěnou strukturou z PETG (černá), která je na dně a pod víkem baterie. Mezi články je mřížka tištěná z teplotně odolného TPU, která dovoluje bateriím mírný pohyb zapříčiněný teplotní expanzí. Proudové čidlo je rovněž drženo 3D tištěnou strukturou z PETG, tištěné spoje a konektory jsou pak na jednodlitém tištěném kusu z PETG, který je k hliníkovému pouzdru připevněn jak mechanicky, tak přilepením.

Konečně je nutné zaplavenou komoru utěsnit k hornímu krytu. Za tímto účelem bylo zvoleno NBR těsnění o tloušťce 1 mm vypálené laserem. Tloušťka byla zvolena poměrně velká, aby kompenzovala nerovnosti, které ve svrchní ploše baterie pravděpodobně vzniknou navařením 4 mm tlustého obvodového dílu se závitovými dírami M3.

### 5.7.1 Tlaková výpust'

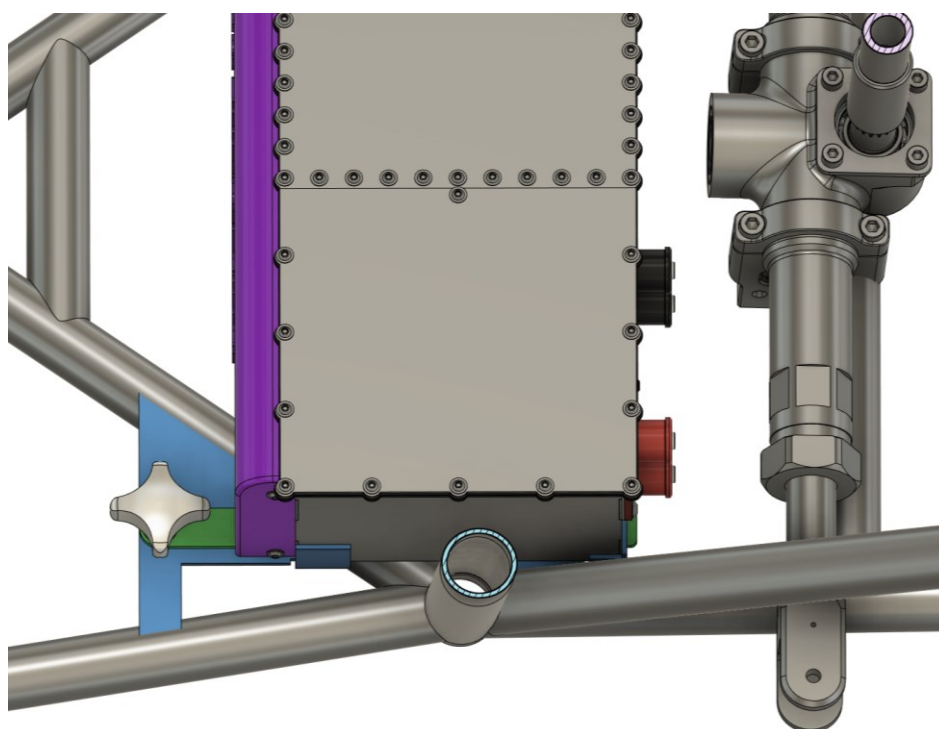
Pro dovolení chladicímu oleji měnit svůj objem a alespoň částečné odvedení zplodin v případě katastrofického selhání článku má zaplavená komora výpust', která je i vyžadována pravidly. Vhodnějším řešením by byl přetlakový ventil dimenzovaný na nízký tlak, například 0,2 bar, v dostatečně malých rozměrech je jejich cena však nepřípustně vysoká.

Jako řešení bylo využito rychlospojky pro stlačený vzduch. V zapojeném stavu je sice vždy průchozí, při uzavřené baterii by však neměl olej mít možnost vytéct, neboť by v komoře vznikl podtlak. Důležité je, že spojka dovoluje rychlou výměnu baterie a v rozpojeném stavu těsní, je poměrně malá a odolná vůči oleji a teplotě.

Pro připevnění této rychlospojky k baterii je použit hliníkový kroužek s vnitřním závitem, navařený na stěnu baterie. K zatěsnění je použit plochý kroužek z NBR.

### 5.7.2 Uchycení k rámu

Pro uchycení k rámu jsou ke spodní straně baterie navařené dva 2 mm tlusté hliníkové pásy. Na přední straně baterie ve směru jízdy pouze přechuhují a zapadnou do otvorů v ocelových protikusech v rámu. Na opačné straně pak dírou pasují přes na pevno navařené závitové trny uchycené přímo k rámu. Je tak zajištěno, že i nepřišroubovaná baterie je vymezena proti pohybu do stran a předozadně. Pro přišroubování budou použita hliníková ruční kolečka, aby bylo dosaženo dobrého mechanického a elektrického spojení baterie s rámem.



Obrázek 5.7: Detail uchycení baterie pomocí hliníkového pásu přivařeného k baterii (zelená) a ocelového plátu přivařeného k rámu (modrá)



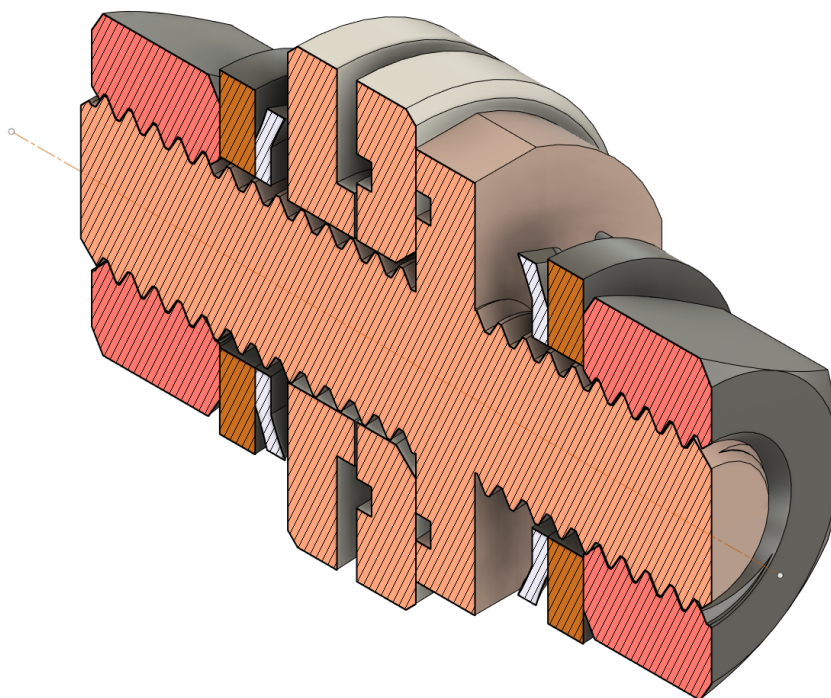
### 5.7.3 Průchodky pro kontakty

Pro vyvedení kladného a záporného pólu baterie z olejem zaplavené komory se jeví jako nejlevnější řešení s nejnižší zástavbou tvorba vlastních průchodků.

Jako materiál byla zvolena elektrolytická měď pro její vodivost. Pro připevnění k průchodkám byl zvolen závit M8x1,25. Při uvážení malého průměru závitu 6,466 mm má tento závit minimální průřez 32,84 mm<sup>2</sup>. Jelikož je průřez větší než průřez přípojnice, je tento závit považován za dostatečný. Rozměry závitu jsou minimální možné, běžný závit M6x1 by již požadavek na průřez nesplnil.

Matky, podložky a ozubené podložky použité na svorce jsou z poniklované mosazi. Pro utěsnění byla do dílu vytvořena i drážka pro běžný o-kroužek v rozměru 13 x 1 z materiálu NBR 70, teplotně odolného do 100 °C.

Jelikož záporný pól baterie musí být spojen s šasi, je toho zde využito a záporná svorka je přímo v kontaktu s hliníkovým krytem baterie. Kladná svorka pak je doplněna o dvoudílný distanční prvek vysoustružený z plastu, který na jedné straně rovněž obsahuje drážku pro o-kroužek. Volba konkrétního plastu zde není kritická, podstatná je hlavně jeho teplotní odolnost, zvolen byl dostupný PE-UHMW pro houževnatost a teplotní odolnost do 80 °C.



Obrázek 5.8: Řez průchodkou kladného pólu baterie

Na velkém průměru jsou plošky na klíč velikosti 19 mm, vnější průměr je ponechán surový z polotovaru o průměru 20 mm. Pro jednoduchost výroby jsou měděné díly pro kladný i záporný pól stejné, velikost sražení hran a případný zápich byly ponechány na obráběči, Bc. Martinu Váňovi, pro jeho pohodlí, průměr zápichu je však omezen na malý průměr závitu.

## 5.7.4 Spojovací materiál

Šrouby zašroubované do hliníku jsou voleny z korozivzdorné oceli pro minimalizaci elektrolytické koroze. Nabízelo by se použití hliníkových šroubů, neboť nejen že jsou s hliníkem kompatibilní, ale jsou i výrazně lehčí. Využity však nebyly vzhledem k poměrně jednoduchému stržení závitu či hlavy, které se v minulosti v týmu ukázalo jako problematické. Na všech šroubových spojích kromě těch držících kryty baterie byly použity ozubené podložky pro snížení šance samovolného uvolnění vlivem vibrací.

## 5.8 Úpravy na základě HSD

Z odevzdání HSD vyplynuly některé požadavky na baterii, které nebyly součástí pravidel. Hlavním je nutnost implementace samostatného odpojení baterie od nabíječky. S možnou nutností úprav však bylo počítáno. Jedinou šťastnou náhodou je, že svazkový konektor řady DTM na baterii měl v původní konfiguraci jeden nevyužitý pin a jelikož dovoluje proud až 7,5 A a napětí až 250 VDC, jeho kombinace se zvolenou nabíječkou s nejvýše 8 A výstupem je přijatelná.

Vstup napětí z nabíječky prochází skrze klasické automobilové relé typu SPST s maximálním napětím 75 V a proudovou zatížitelností až 70 A (při 14 VDC, hodnota pro 60 VDC není uvedena). Relé se může zdát naddimenzované, je však nejlevnějším dostupným relé s dostatečnými parametry. Dále je vstup jističen běžnou 19 mm automobilovou pojistkou o hodnotě 7,5 A a maximálním napětím 80 VDC v odpovídajícím držáku. Průřez vodiče je volen jako 1 mm<sup>2</sup>. Relé je ovládáno výstupem BMS obvodu značeným AUX, který je ovládán mikropočítačem přes MOSFET včetně zpětné diody a byl přidán jako rezerva.

Další pohledy na úplný 3D model baterie obsahuje [příloha B](#).

## 5.9 Problémy v konstrukci

Plošné spoje byly vyrobeny komerční firmou, osazeny byly v pájecí peci v laboratoři-dílně „bastlárna“, což se však ukázalo problematické díky mé nezkušenosti, neboť se na drobných vývodech některých čipů vytvořily můstky z cínu, které vyžadovaly ruční odstranění. Plošné spoje rovněž byly ponechány dvouvrstvé pro snížení ceny a jednodušší hledání problémů, zvláště na obvodu BMS by však alespoň čtyřvrstvý návrh dovolil výrazně vyšší hustotu součástek. Plošný spoj zdroje byl vyroben v tloušťce 0,8 mm, ostatní pak v tloušťce 0,6 mm, která se ukázala jako příliš nízká, neboť plošné spoje jsou výrazně ohebné.

Snaha vyvést vodiče NTC termistorů a vodiče pro snímání a balancování baterie ven z komory s olejem vedla na poměrně komplikované řešení s dost vysokou šancí selhání. Pro další baterie, kde již nebude natolik kritické mít možnost upravovat plošný spoj BMS, neboť problémy s ním nebudou tolik očekávané bude vhodnější BMS zabudovat přímo do komory s články a vyvést jen napájecí a komunikační vodiče.

## 5.10 Problémy při realizaci funkčního vzorku

Finalizovat konstrukci a objednat díly na pouzdro baterie nebylo považováno za moudré do obdržení zpětné vazby na HSD a finalizace návrhu rámu formule, neboť by mohlo být

vyžadováno výrazné upravení konstrukce baterie. Rám se však výrazně zpozdil a s nachylujícím se časem bylo objednáno vypálení dílů na laseru. Díly však nedorazily hliníkové, ale ocelové. Další objednávka u jiné společnosti se zase výrazně opozdila, a tak pouzdro nedorazilo včas pro zkonstruování baterie. Problém však nebyl osamocený.

Vypálení mědi laserem bylo objednáno již před dokončením návrhu – nejprve byly objednány výpalky z mědi o tloušťce 0,3 mm pro výrobu startovací baterie monopostu z 18650 článků LFP, sloužící také pro ověření výrobních možností pálení mědi a vyzkoušení některých prvků konstrukce hybridní baterie. Výpalky z 0,5 mm mědi pro hybridní baterii se však rovněž výrazně zpozdily, pravděpodobně díky charakteru spolupráce týmu formule s danou společností.

Problém nastal dokonce i v dostupnosti čipu BMS, ten však byl nakonec zakoupen přímo od Texas Instruments.

Největším problémem se však ukázala být objednávka článků. Proces vytvoření objednávky se vnitřně v týmu opozdil díky nečekaným vlivům a před jejím dokončením se články Molicel P45B staly nedostupné. Zvažovány byly i alternativní vybrané články, ty však formátově neodpovídaly článkům P45B a jejich volba by tak znamenala zahodit velké množství práce na návrhu a 3D modelu baterie. Brzy se podařilo dojednat pořízení článků ze zahraničí, dodací lhůta se však opakovaně natolik protáhla, že z článků již nebylo z časových důvodů možné funkční vzorek zkonstruovat.

## Závěr

Cílem této práce bylo uvést problematiku návrhu baterie pro hybridní monopost FS a výběru vhodných článků. Nejprve byla provedena rešerše stavu trhu lithiových článků, na základě níž byly vybrány a otestovány články splňující stanovené požadavky. Dále byl předložen návrh baterie specifický použitím vybraného článku Molicel P45B, který vzhledem k požadavkům vyplývajícím z konkrétního vozu a omezením daným pravidly vedl na imerzně chlazenou baterii 3P14S. Probrána byla specifika tohoto návrhu jako utěsnění komory a odvedení přebytečného tlaku, ale i obecnější části návrhu jako dimenzování přípojnice či výběr elektronických komponent. Rovněž byl probrán návrh BMS založeného na čipu BQ79614 a precharge obvodu. Konečně byly uvedeny některé problémy spojené se zvoleným návrhem, včetně jejich opodstatnění a možných řešení.

Stav trhu s bateriemi se ukázal jako dosti chudý a působil jako hlavní omezení této práce vzhledem k nestálé dostupnosti, cenám a dodacím lhůtám článků. Požadavky co do výkonu a kapacity baterie se podařilo předčít s trvalým proudem 135 A odpovídajícím dle měření průměrnému výkonu 6,12 kW a kapacitou baterie 570 Wh při vytížení 600 A/kg. Rovněž bylo dosaženo působivých 420 A pro disciplínu sprint, které dovolují špičkový výkon až 17,2 kW po dobu 5 s v závislosti na stavu nabití baterie.

Bohužel pozdní dodání článků znemožnilo splnění otestování funkčního vzorku baterie a vzhledem k pozdní dodávce elektrických motorů by bylo znemožněno i testování baterie ve voze. Práce na baterii přes tyto obtíže však bude pokračovat i nad rámec této práce pro účely soutěže FS. Největší přínos této práce však nespočívá v konkrétních naměřených výsledcích, ale v představení unikátní metody porovnání článků, jakož i návrhu specifické baterie pro použití v monopostu FS.

## Použitá literatura

- [1] XIONG, Rui. *Battery management algorithm for electric vehicles*. [Beijing]: China Machine Press, 2020. ISBN 978-7-111-60864-6.
- [2] VISHNUMURTHY, K. A. a K. H. GIRISH. A comprehensive review of battery technology for E-mobility. *Journal of the Indian Chemical Society* [online]. 2021 [cit. 2023-05-21]. ISSN 0019-4522. Dostupné z: doi:10.1016/j.jics.2021.100173
- [3] RAHN, Christopher a Chao-Yang WANG. *Battery systems engineering*. First published. Chichester: Wiley, 2013. ISBN 978-1-119-97950-0.
- [4] ANDREA, Davide. *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston: Artech House, 2010, 290 p. ISBN 16-080-7104-9.
- [5] ZHOU, Long et al. State Estimation Models of Lithium-Ion Batteries for Battery Management System: Status, Challenges, and Future Trends. *Batteries* [online]. 2023 [cit. 2023-05-21]. ISSN 2313-0105. Dostupné z: doi:10.3390/batteries9020131
- [6] MA, Shuai et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Progress in Natural Science: Materials International* [online]. 2018, 653-666 [cit. 2023-05-21]. ISSN 1002-0071. Dostupné z: doi:10.1016/j.pnsc.2018.11.002
- [7] PLACKE, Tobias a K.T. CHAU. Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports* [online]. 2022, 4058-4084 [cit. 2022-12-01]. ISSN 2352-4847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2022.03.016
- [8] LINDEN, David a Thomas B. REDDY, ed. *HANDBOOK OF BATTERIES*. Third ed. New York: McGraw-Hill, 2002. ISBN 0-07-135978-8.
- [9] MCDOWALL, Jim. Understanding Lithium-Ion Technology. In: *IEEE PES Energy Storage and Stationary Battery Committee (ESSB)* [PDF; online]. New Orleans, 2015 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://cmte.ieee.org/pes-essb/wp-content/uploads/sites/43/2016/06/2015-WM-PN-Understanding-Li-ion-Jim-McDowall.pdf>
- [10] LG Chem F2. In: *BATEMO: UNDERSTANDING BATTERIES* [online]. Karlsruhe: Batemo, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.batemo.de/products/batemo-cell-library/lg-chem-f2/>
- [11] LG Energy Solution INR21700-M58T. In: *BATEMO: UNDERSTANDING BATTERIES* [online]. Karlsruhe: Batemo, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.batemo.de/products/batemo-cell-library/lg-energy-solution-inr21700-m58t/>
- [12] About Self-discharge of Lithium ion Solar Batteries. In: *AltEnergyMag* [online]. Huntington Beach: BTH Management, 2023 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z:

<https://www.altenergymag.com/news/2021/12/21/about-self-discharge-of-lithium-ion-solar-batteries/36539>

- [13] LAIN, Michael J., James BRANDON a Emma KENDRICK. Design Strategies for High Power vs. High Energy Lithium Ion Cells. *Batteries* [online]. 2019 [cit. 2023-05-20]. ISSN 2313-0105. Dostupné z: doi:10.3390/batteries5040064
- [14] NEMETH, Thomas et al. Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations. *Journal of Energy Storage* [online]. [cit. 2023-05-13]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2020.101656
- [15] SCHRÖDER, Robert, Muhammed AYDEMIR a Günther SELIGER. Comparatively Assessing different Shapes of Lithium-ion Battery Cells. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, 104-111. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.02.013
- [16] SHAHID, Seham a Martin AGELIN-CHAAB. A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries. *Energy Conversion and Management: X* [online]. 2022 [cit. 2022-12-01]. ISSN 25901745. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecmx.2022.100310
- [17] ZICHEN, Wang a Du CHANGQING. A comprehensive review on thermal management systems for power lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021 [cit. 2022-12-01]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2020.110685
- [18] SHAHJALAL, Mohammad et al. A review of thermal management for Li-ion batteries: Prospects, challenges, and issues. *Journal of Energy Storage* [online]. 2021 [cit. 2022-12-01]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2021.102518
- [19] BARRERAS, Jorge Varela et al. A Consensus Algorithm for Multi-Objective Battery Balancing. *Energies* [online]. 2021 [cit. 2023-05-26]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14144279
- [20] SCARBOROUGH, Craig. Hybrid F1 power: how does it work?. In: *CAR* [online]. Peterborough: Bauer, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.carmagazine.co.uk/hybrid/how-f1-engine-works/>
- [21] Electric power in F1: a decade of hybrid success. In: *Mercedes-Benz Group Media* [online]. Stuttgart: Mercedes-Benz, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20230513140116/https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Electric-power-in-F1-a-decade-of-hybrid-success.xhtml?oid=44056073>
- [22] MILLIKIN, Mike, ed. Porsche introduces 918 Spyder plug-in hybrid sports car. In: *Green Car Congress: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility* [online]. BioAge, 2023 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20230208032322/https://www.greencarcongress.com/2013/05/918-20130516.html>

- [23] PETRÁNY, Máté. The 250-MPH McLaren Speedtail's Batteries Are Sealed in a Unique Oil to Keep Them Cool: Complex problems require complex solutions, especially at breakneck speeds. In: *The Drive* [online]. Miami: Recurrent Ventures, 2022 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20221207111716/https://www.thedrive.com/news/35443/the-250-mph-mclaren-speedtails-batteries-are-sealed-in-a-unique-oil-to-keep-them-cool>
- [24] *FORMULA STUDENT GERMANY: INTERNATIONAL DESIGN COMPETITION* [online]. Bad Abbach: Formula Student Germany, 2023 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/>
- [25] FSA, FSEAST, FSN, FSCZECH, FSAA & FSPT. *FS CV Hybrid Rules Extension 2023 V1.2* [online]. [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://fseast.eu/wp-content/uploads/2023/01/FS-CV-Hybrid-Rules-Extension-2023-V1.2.pdf>
- [26] FORMULA STUDENT GERMANY. *FS Rules 2023 v1.1* [online]. [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/rules/FS-Rules\\_2023\\_v1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf)
- [27] TNT HOLDINGS B.V. Co jsou lithiové baterie?. In: *TNT Czech Republic* [online]. Hoofddorp, 2017 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://www.tnt.com/express/cs\\_cz/site/how-to/ship-lithium-batteries.html](https://www.tnt.com/express/cs_cz/site/how-to/ship-lithium-batteries.html)

## Přílohy

### A Články vybrané pro testování

Parametry článků:

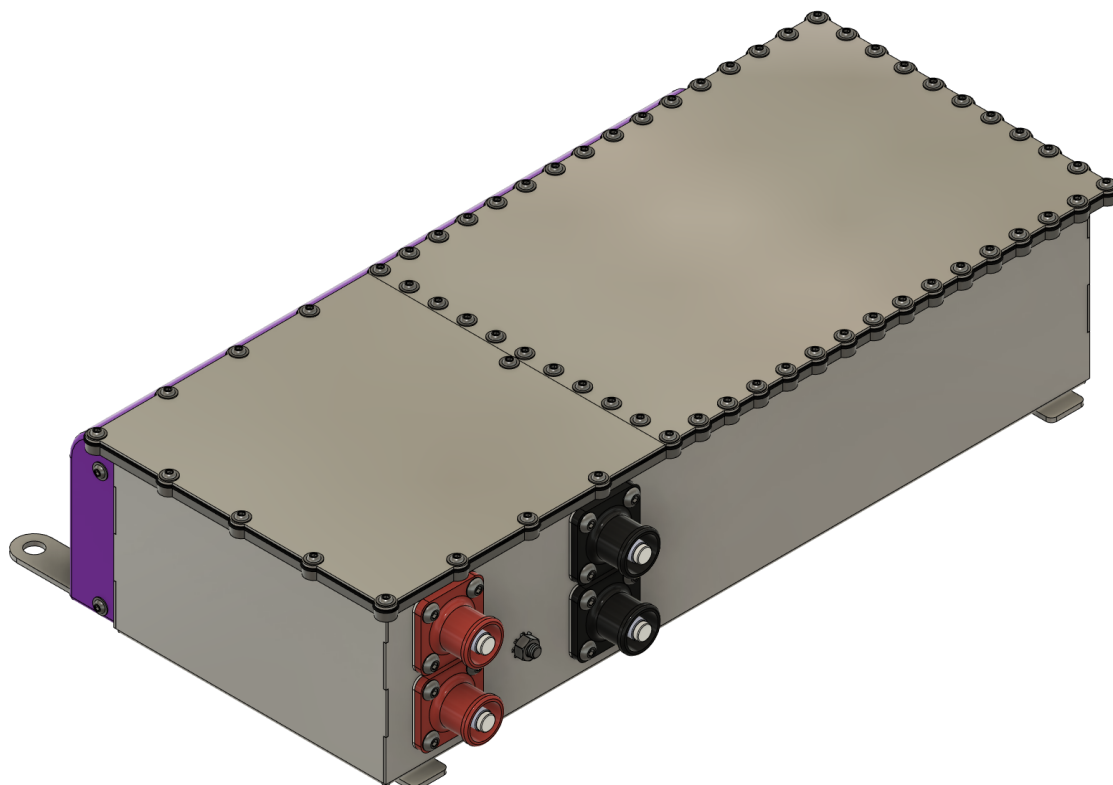
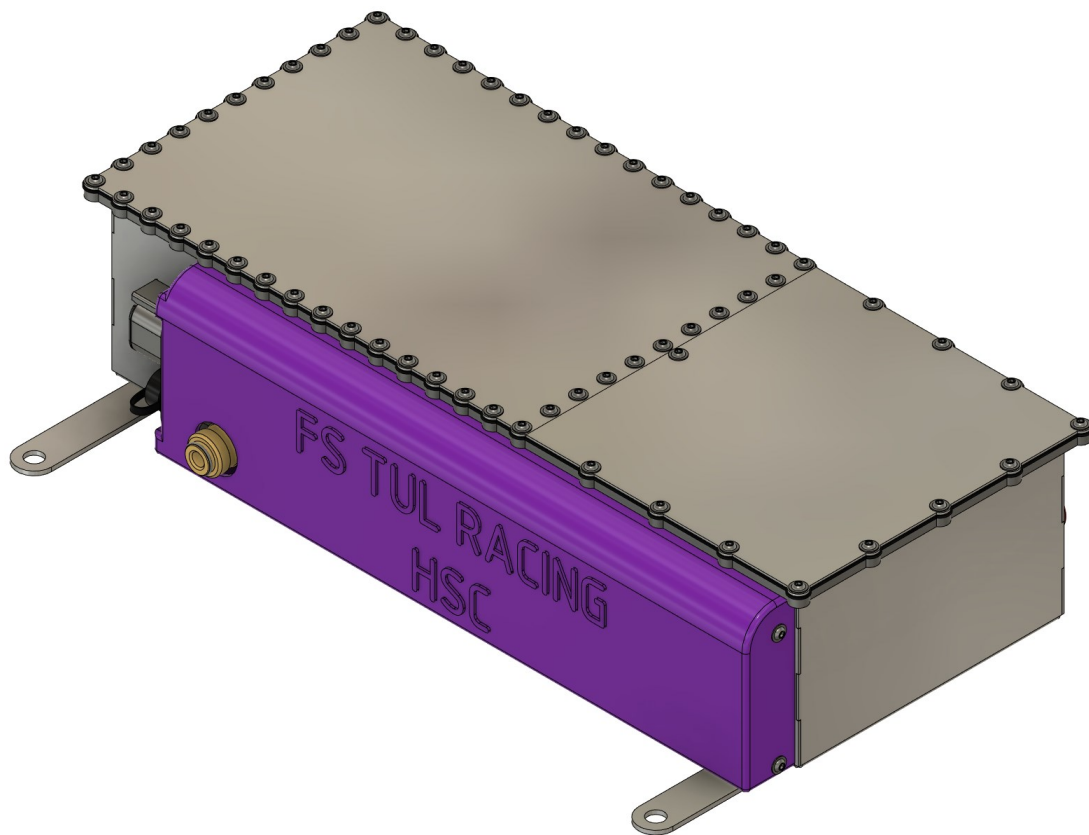
Název	Výrobce	Pouzdro	C [mA]	I <sub>d,Max</sub> [A]	I <sub>c,Max</sub> [A]	Váha [g]	t <sub>c,Max</sub> [°C]	t <sub>d,Max</sub> [°C]
N18650CNP	BAK	18650	2500	30	5	47	50	75
HJ2	LG Chem	18650	3000	20	6	45,5	50	75
H40A	LG Chem	21700	4000	30	-	-	-	-
INR21700-P45B	Molicel	21700	4500	45	13,5	69	60	60
INR18650-P28B	Molicel	18650	2800	40	8,4	48	60	60
25R8	Samsung	18650	2500	20	4	45	50	80
30Q6	Samsung	18650	3000	30	4	45,7	-	-
40T4	Samsung	21700	4000	45	6	70	50	80
25S	Samsung	18650	2450	25	4	47	50	80
20S	Samsung	18650	2000	30	4	48	50	80
48G2	Samsung	21700	4800	9,6	4,8	69	-	-
NCR2070C	Sanyo	20700	3500	30	3,5	62	-	-
UR18650RX	Sanyo	18650	2050	20	1,365	47,5	45	60
US18650 VTC5D	Sony/Murata	18650	2700	35	6	46,7	60	60
US18650 VTC5A	Sony/Murata	18650	2500	35	6,5	48	60	60
US21700 VTC6A	Sony/Murata	21700	4000	40	9	72,7	60	60
US18650 VTC6	Sony/Murata	18650	3000	30	5	46,6	60	60
US18650 VTC5C	Sony/Murata	18650	2500	30	4	46	-	-
20SG	Tenpower	18650	2000	30	4	45	50	75
40TG	Tenpower	21700	4000	45	6	67	50	80
25PG	Tenpower	18650	2500	20	4	47	50	75

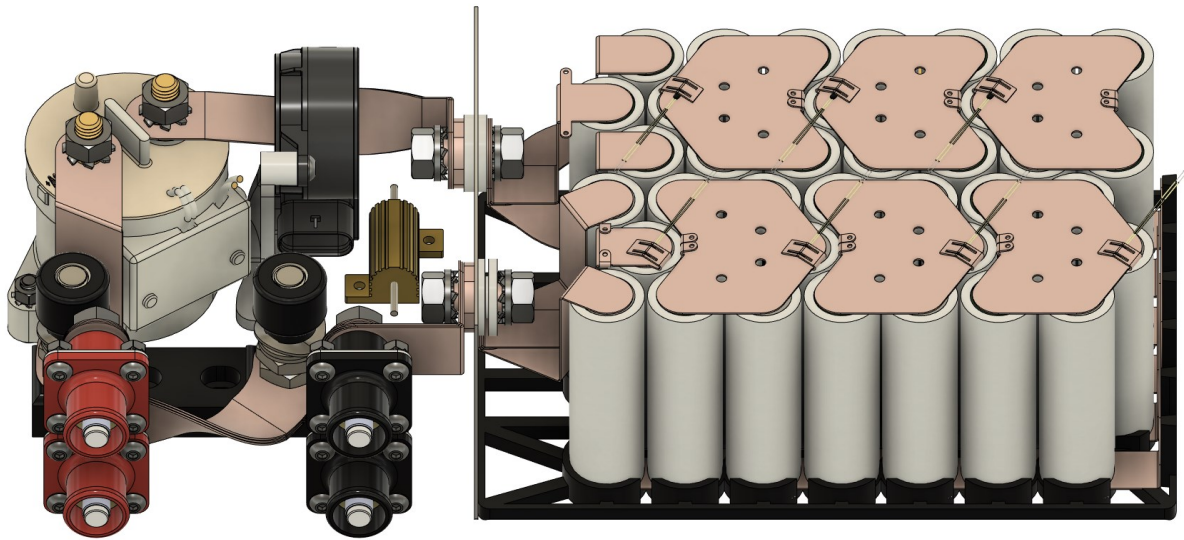
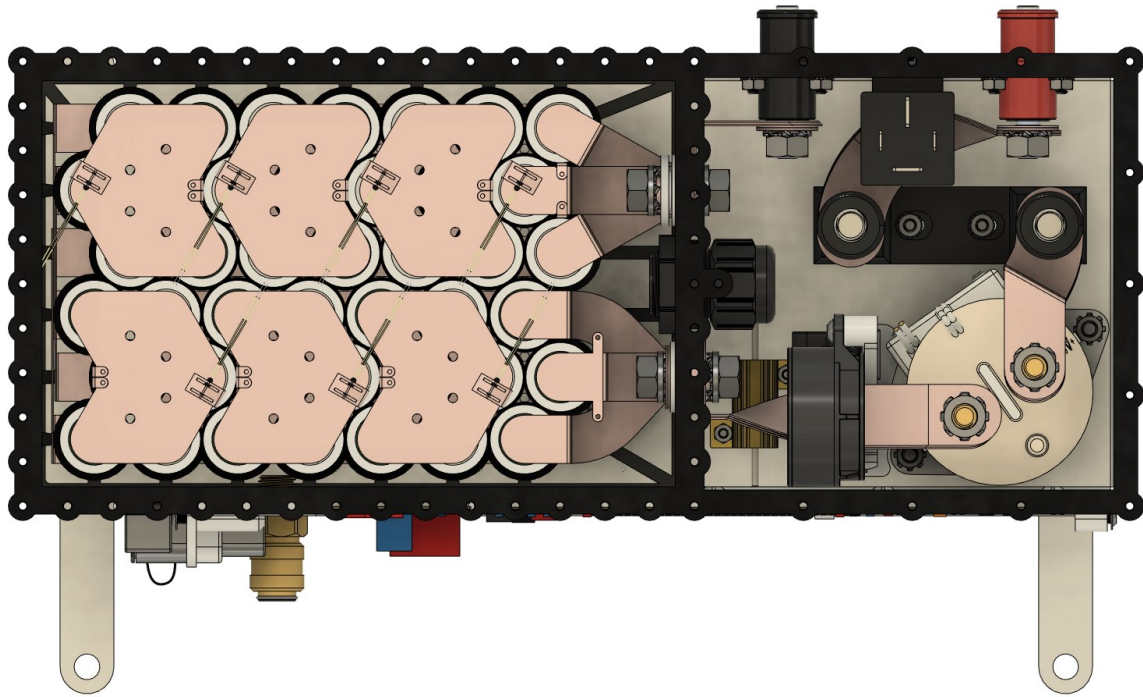


Teoretické parametry baterie:

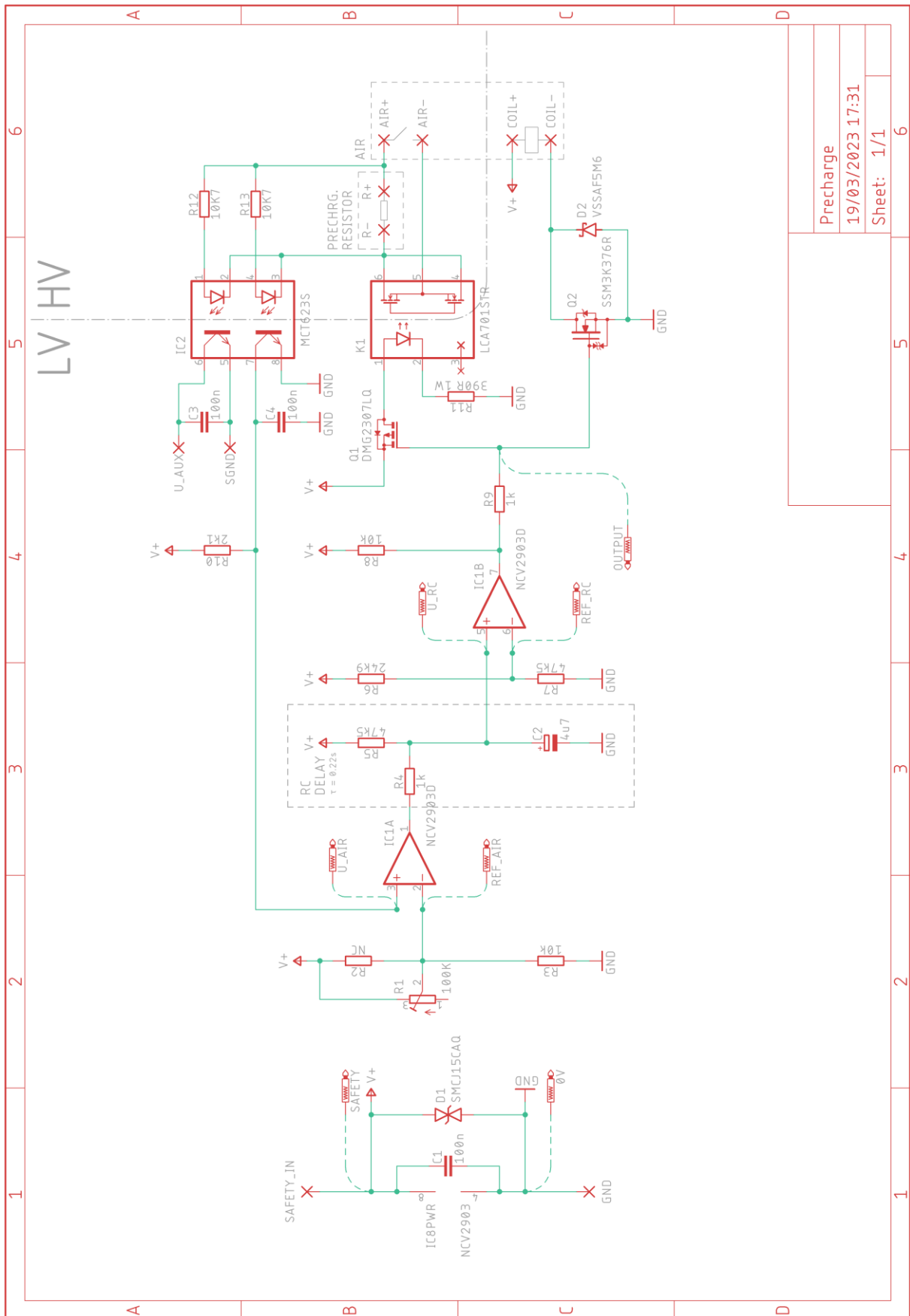
Název článku	S	P	Nabíjecí výkon [kW]	Vybíjecí výkon [kW]	Kapacita [Wh]	Hmotnost [kg]
N18650CNP	12	5	1,08	6,48	540	2,82
HJ2	13	5	1,40	4,68	702	2,96
H40A	14	3	-	4,54	605	-
INR21700-P45B	14	3	2,04	6,80	680	2,80
INR18650-P28B	13	5	1,97	9,36	655	2,93
25R8	14	5	1,01	5,04	630	3,04
30Q6	13	5	0,94	7,02	702	2,97
40T4	14	3	0,91	6,80	605	2,88
25S	12	5	0,86	5,40	529	2,82
20S	12	5	0,86	6,48	432	2,88
48G2	14	3	0,73	1,45	726	2,90
NCR2070C	12	4	0,60	5,18	605	2,98
UR18650RX	12	5	0,29	4,32	443	2,85
US18650 VTC5D	13	5	1,40	8,19	632	3,04
US18650 VTC5A	12	5	1,40	7,56	540	2,88
US21700 VTC6A	14	3	1,36	6,05	605	3,05
US18650 VTC6	13	5	1,17	7,02	702	3,03
US18650 VTC5C	13	5	0,94	7,02	585	2,99
20SG	13	5	0,94	7,02	468	2,93
40TG	14	3	0,91	5,29	605	2,77
25PG	12	5	0,86	4,32	540	2,82

## B Další pohledy na návrh baterie





## C Schéma, PCB a BOM precharge obvodu



Precharge

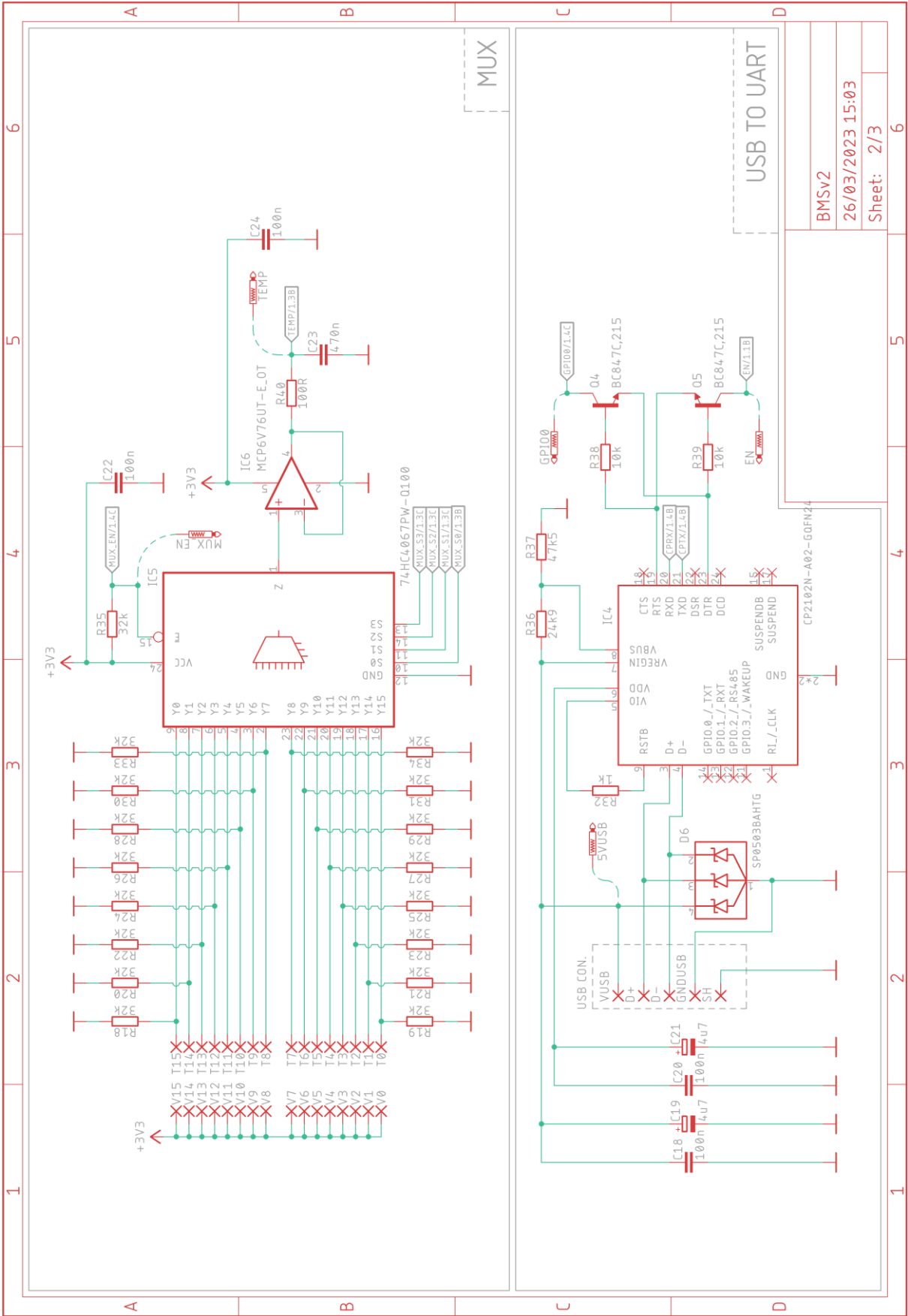
19/03/2023 17:31

Sheet: 1/1



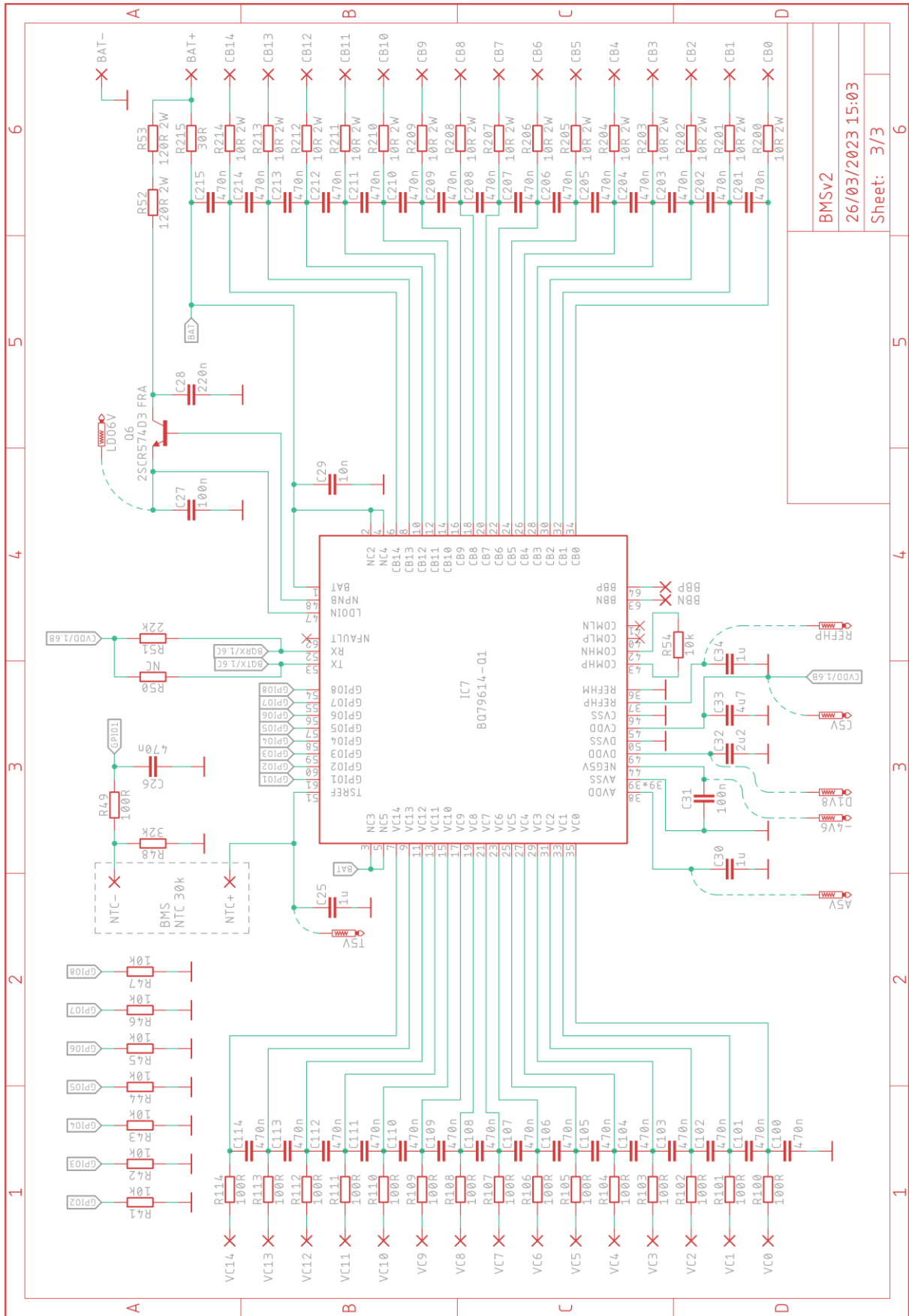
Označení dílu	Díl	Pouzdro
R1	100 k $\Omega$	RTRIM3214W
C1, C3, C4	100 nF	C0603
R12, R13	10,7 k $\Omega$	R1206
R3, R8	10 k $\Omega$	R0603
R4, R9	1 k $\Omega$	R0603
R6	24,9 k $\Omega$	R0805
R10	2,1 k $\Omega$	R0603
R11	390 k $\Omega$ , 1 W	R2512
R5, R7	47,5 k $\Omega$	R0805
C2	4,7 $\mu$ F	C1206-POL
Q1	DMG2307LQ	SOT23
K1	LCA701STR	LCA701STR
IC2	MCT623S	SOP254P1030X508-8N
R2	NEOSAZEN	R0805
IC1	NCV2903D	SO08
D1	SMCJ15CAQ	SMC
Q2	SSM3K376R	SOT23F-3
D2	VSSAF5M6	DO-221AC-2

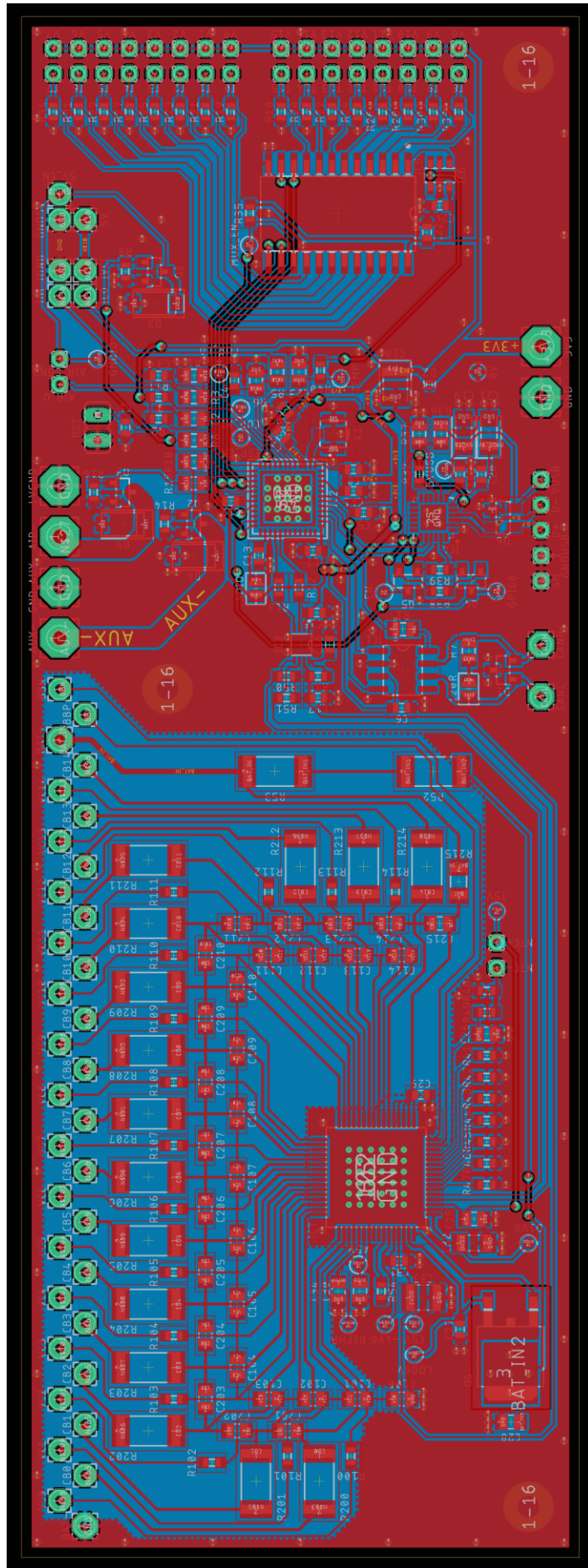




BMSv2  
 26/03/2023 15:03  
 Sheet: 2/3



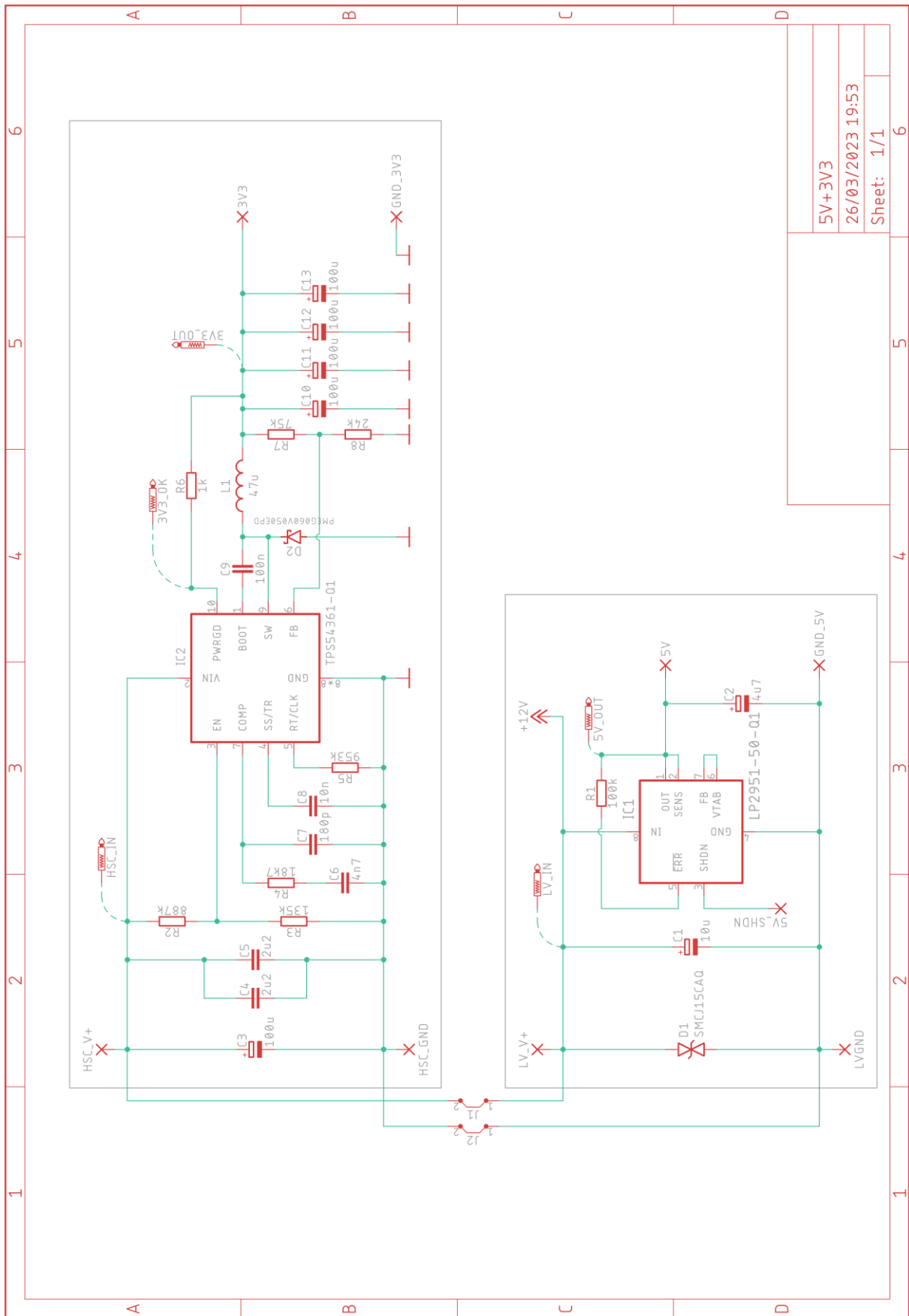




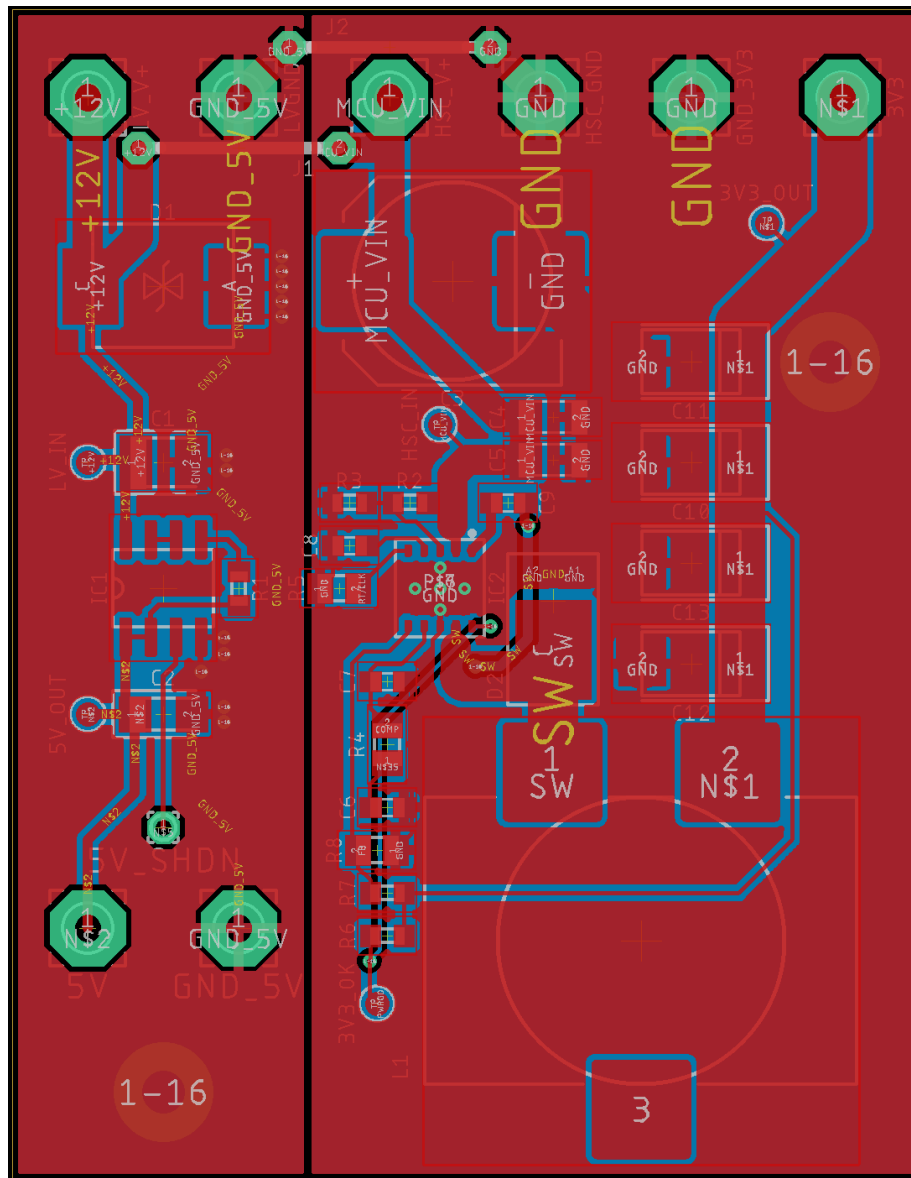
Označení dílu	Díl	Pouzdro
R1	NEOSAZEN	R0805
R40, R49, R100, R101, R102, R103, R104, R105, R106, R107, R108, R109, R110, R111, R112, R113, R114	100 $\Omega$	R0603
R17	100 k $\Omega$	R0603
C1, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C20, C22, C24, C27, C31	100 nF	C0603
R200, R201, R202, R203, R204, R205, R206, R207, R208, R209, R210, R211, R212, R213, R214	10 $\Omega$ 2 W	R2512
R2, R9, R14, R16, R38, R39, R41, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R54	10 k $\Omega$	R0603
C29	10 nF	C0603
C10	10 $\mu$ F	C1210-POL
R7, R8, R10, R15	120 $\Omega$	R0805
R52, R53	120 $\Omega$ 2 W	R2512
R12, R13, R32	1 k $\Omega$	R0603
C2, C25, C30, C34	1 uF	C0805
C28	220 nF	C0805
R51	22 k $\Omega$	R0603
R3, R5, R36	24,9 k $\Omega$	R0805
Q6	2SCR574D3 FRA	TO252
C32	2,2 uF	C1206
R215	30 $\Omega$	R1206
R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31, R33, R34, R35, R48	32 k $\Omega$	R0603
C23, C26, C100, C101, C102, C103, C104, C105, C106, C107, C108, C109, C110, C111, C112, C113, C114, C201, C202, C203, C204, C205, C206, C207, C208, C209, C210, C211, C212, C213, C214, C215	470 nF	C0805
R4, R6, R37	47,5 k $\Omega$	R0805
C33	4,7 $\mu$ F	C1210
C19, C21	4,7 $\mu$ F	C1206-POL
R11	649 $\Omega$	R0603
IC5	74HC4067PW-Q100	TSSOP24
Q4, Q5	BC847C,215	SOT23
IC7	BQ79614-Q1	64-HTQFP_(PAP)
IC4	CP2102N-A02-GQFN24	QFN50P400X400X80-25N
IC2	ESP32-PICO-V3	ESP32PICOV3
IC3	LSF0102DC-Q100	VSSOP-8
IC6	MCP6V76UT-E_OT	SOT23-5
R50	NEOSAZEN	R0603
D1	PESD1CAN	SOT23

<b>Označení dílu</b>	<b>Díl</b>	<b>Pouzdro</b>
D2	PESD3V3S1BLYL	PESD5V0S1BL315
X1	RSP-122811-01	RSP-122811-01
IC1	SN65HVD230DR	SOIC127P599X175-8N
D6	SP0503BAHTG	SP0503BAHTG
Q1, Q2, Q3	SSM3K376R	SOT23F-3
D3, D4, D5	VSSAF5M6	DO-221AC-2

# E Schéma, PCB a BOM napěťového zdroje



5V+3V3
26/03/2023 19:53
Sheet: 1/1



Označení dílu	Díl	Pouzdro
R1	100 k $\Omega$	R0603
C9	100 nF	C0603
C3	100 $\mu$ F	10X10.4_ANTI-VIBRATION
C10, C11, C12, C13	100 $\mu$ F	EIA_6032-28
C8	10 nF	C0603
C1	10 $\mu$ F	C1210-POL
R3	135 k $\Omega$	R0603
C7	180 pF	C0603
R4	18,7 k $\Omega$	R0805
R6	1 k $\Omega$	R0603
R8	24 k $\Omega$	R0805
C4, C5	2,2 $\mu$ F	C1206
L1	47 $\mu$ F	WE-HCFSMT_HIGH_CURRENT_INDUCTOR
C6	4,7 nF	C0603
C2	4,7 $\mu$ F	C1206-POL
R7	75 k $\Omega$	R0603
R2	887 k $\Omega$	R0603
R5	953 k $\Omega$	R0805
IC1	LP2951-50-Q1	SOIC127P599X175-8N
D2	PMEG060V050EPD	CFP-15-3
D1	SMCJ15CAQ	SMC
IC2	TPS54361-Q1	WS0N-10