

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra výkonové elektroniky a strojů

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konstrukce trakční baterie motokáry

Autor práce: **Bc. Jiří Studnička**  
Vedoucí práce: **Ing. Luboš Streit, Ph.D.**

---

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří STUDNIČKA**  
Osobní číslo: **E21N0053P**  
Studijní program: **N0714A060013 Elektronika a informační technologie**  
Specializace: **Výkonová elektronika**  
Téma práce: **Konstrukce trakční baterie motokáry**  
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

## Zásady pro vypracování

1. Popište hlavní pravidla pro návrh trakční baterie.
2. Navrhněte mechanické a elektrické uspořádání komponent baterie.
3. Navrhněte a realizujte systém správy baterií (BMS).
4. Zkonstruuje jeden segment baterie.
5. Experimentálně ověřte funkci BMS na segmentu.


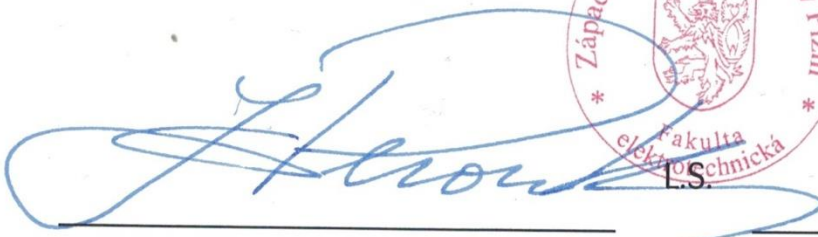

Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

---

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

**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh a realizaci trakční baterie pro elektrickou motokáru. Cílem této práce bylo popsat hlavní návrhová pravidla pro trakční baterie, navrhnout mechanické a elektrické uspořádání příslušných komponent baterie, navrhnout a realizovat komplexní systém správy baterií (BMS), zkonstruovat jeden segment trakční baterie a experimentálně ověřit funkci celého systému. Konstrukce trakční baterie a systému správy baterie vychází z předchozích zkušeností a praktických poznatků. Trakční baterie je rozdělena do tří segmentů. Každý segment obsahuje 189 článků typu li-ion. Navržený systém správy baterií se skládá ze dvou typů řídicích desek. Slave BMS měří napětí a teploty jednotlivých článků, a zároveň provádí balancování článků. Master komunikační BMS tvoří rozhraní mezi Slave BMS a vyšší vrstvou, dále může být využita pro programovou konfiguraci Slave BMS a servisní účely. Pro napájení elektrické motokáry budou využity dvě tyto trakční baterie. Vzhledem k univerzálnosti bude jedna baterie využita i pro napájení elektrické čtyřkolky.

## **Klíčová slova**

Trakční baterie, Konstrukce a návrh trakčních baterií, Elektrická motokára, Superkart, Systém správy baterie (BMS), Balancování článků baterie

## **Abstract**

This thesis is focused on the design and realization of a traction battery for an electric kart. The aim of this thesis was to describe the main design rules for traction batteries, to design the mechanical and electrical layout of the relevant battery components, to design and implement a comprehensive battery management system (BMS), to construct one segment of the traction battery and to verify the operation of the whole system in an experiment. The design of the traction battery and the battery management system is based on previous experience and practical knowledge. The traction battery is divided into three segments. Each segment is composed of 189 li-ion cells. The designed battery management system consists of two control boards. The slave BMS measures the voltage and temperature of each cell and at the same time performs cell balancing. The Master communication BMS forms an interface between the Slave BMS and the higher layer. It can also be used for program configuration of the Slave BMS and maintenance service. Two of these traction batteries will be used to power the electric kart. Due to the versatility, one of the batteries will also be used to power an electric quad bike.

## **KeyWords**

Traction battery, Traction battery design and construction, Electric kart, Superkart, Battery Management System (BMS), Battery cell balancing

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Luboši Streitovi, Ph.D. za věcné a cenné rady, připomínky a celkové vedení diplomové práce. Tato diplomová práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu No. SGS-2021-021.

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Základní typy trakčních baterií a jejich technologie .....	- 3 -
1.1 Olověné (Pb) akumulátory .....	- 3 -
1.2 Nikl-kadmiové (NiCd) akumulátory .....	- 5 -
1.3 Nikl-metal hydridové (NiMH) akumulátory .....	- 7 -
1.4 Lithium-iontové (li-ion) akumulátory .....	- 7 -
1.5 Lithium-polymerové (li-pol) akumulátory .....	- 10 -
2 Hlavní pravidla pro návrh trakčních baterií .....	- 11 -
2.1 Obecná pravidla vyplývající z technické normy .....	- 11 -
2.1.1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem z baterie a nabíječky .....	- 12 -
2.1.2 Opatření proti zkratům a ochrana před ostatními vlivy elektrického proudu ...	- 12 -
2.1.3 Opatření proti nebezpečím .....	- 13 -
2.1.4 Opatření proti nebezpečí vytvářené chemickými látkami .....	- 13 -
2.1.5 Pomocná zařízení a příslušenství baterie .....	- 13 -
2.1.6 Identifikační štítky, výstražná upozornění a návod pro použití, instalaci a	údržbu - 14 -
2.2 Pravidla vyplývající z Formula SAE a Formula Student Germany (FSG) .....	- 14 -
2.2.1 Definice základních pojmů .....	- 14 -
2.2.2 Rozdělení pracovní činnosti .....	- 15 -
2.2.3 Výkonové a napěťové omezení .....	- 15 -
2.2.4 Měření energie .....	- 15 -
2.2.5 Akumulátorový kontejner (box) .....	- 16 -
2.2.6 Úložiště energie (akumulátor) .....	- 17 -
3 Teoretický rozbor systémů správy baterií (BMS) .....	- 19 -
3.1 Centralizovaný BMS .....	- 19 -
3.2 Modulární BMS .....	- 20 -
3.3 Primární – sekundární BMS (Master – Slave BMS) .....	- 21 -
3.4 Distribuovaná BMS .....	- 22 -
3.5 Balancování článků akumulátoru .....	- 23 -

4	Rozbor použitých technologií a komponent.....	- 24 -
4.1	Parametry vybraného li-ion článku INR21700-40T .....	- 24 -
4.1.1	Rozsah pracovního napětí a využitelná kapacita.....	- 24 -
4.1.2	Pracovní proudy.....	- 25 -
4.2	Popis komponent řídicí desky Slave BMS .....	- 25 -
4.2.1	Popis integrovaného obvodu BQ76L455A-Q1 .....	- 26 -
4.2.2	Popis integrovaného obvodu SN74LN4051A-Q1 .....	- 30 -
4.3	Popis komponent řídicí desky Master komunikační BMS .....	- 31 -
4.3.1	Popis zapojení BQ76L455A-Q1 v konfiguraci bridge .....	- 32 -
5	Návrh a realizace elektrické a mechanické konstrukce trakční baterie .....	- 34 -
5.1	Návrh elektrické části trakční baterie .....	- 34 -
5.1.1	Zapojení segmentu.....	- 35 -
5.1.2	Provozní zapojení trakční baterie .....	- 36 -
5.1.3	Servisní zapojení trakční baterie.....	- 38 -
5.1.4	Zapojení trakčních baterií (kontejnerů) .....	- 38 -
5.2	Návrh mechanické části trakční baterie .....	- 40 -
5.2.1	Bateriový segment .....	- 40 -
5.2.2	Bateriový kontejner .....	- 41 -
6	Návrh a realizace systému správy baterií (BMS) .....	- 42 -
6.1	Návrh a realizace Slave BMS .....	- 42 -
6.1.1	Popis a specifikace Slave BMS .....	- 42 -
6.1.2	Dimenzování balančního obvodu .....	- 44 -
6.1.3	Elektrické zapojení Slave BMS.....	- 46 -
6.1.4	Návrh a konstrukce desky plošného spoje Slave BMS .....	- 50 -
6.1.5	Chladič Slave BMS .....	- 52 -
6.1.6	Mechanické uchycení Slave BMS k bateriovému segmentu.....	- 54 -
6.2	Návrh a realizace Master komunikační BMS .....	- 55 -
6.2.1	Popis a specifikace Master komunikační BMS .....	- 55 -
6.2.2	Elektrické zapojení Master komunikační BMS.....	- 56 -
6.2.3	Návrh a konstrukce desky plošného spoje Master komunikační BMS ....	- 58 -



6.2.4	Propojení Master komunikační BMS s CANARS externím modulem ....	- 59 -
7	Konstrukce jednoho segmentu baterie.....	- 60 -
8	Experimentální ověření funkce BMS na segmentu .....	- 61 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 65 -
	Literatura .....	- 68 -
	Přílohy .....	I
A.1	Slave BMS – Main.....	II
A.2	Slave BMS – BQ76L455A-Q1 .....	III
A.3	Slave BMS – Aux inputs .....	IV
A.4	Slave BMS – Cell circuit .....	V
A.5	Slave BMS – Cell A.....	VI
A.6	Slave BMS – Cell B.....	VII
A.7	Slave BMS – LED .....	VIII
A.8	Slave BMS – Connectors .....	IX
B.1	Master komunikační BMS – Main.....	X
B.2	Master komunikační BMS – BQ76L455A-Q1 .....	XI
B.3	Master komunikační BMS – DC/DC 5 to 12 V .....	XII
B.4	Master komunikační BMS – LED .....	XIII
B.5	Master komunikační BMS – Connectors.....	XIV
C.1	Slave BMS – DPS – Top layer .....	XV
C.2	Slave BMS – DPS – Mid1 layer .....	XV
C.3	Slave BMS – DPS – Mid2 layer .....	XV
C.4	Slave BMS – DPS – Bottom layer.....	XV
D.1	Master komunikační BMS – DPS – Top layer .....	XVI
D.2	Master komunikační BMS – DPS – Mid1 layer .....	XVI
D.3	Master komunikační BMS – DPS – Mid2 layer .....	XVII
D.4	Master komunikační BMS – DPS – Bottom layer.....	XVII

# Seznam symbolů a zkratek

## Obecné pojmy

ADC	Analogově-digitální převodník (Analog to digital converter)
AFE	Analogové zakončení (Analog front end)
AIR	Akumulátorové izolační relé (Accumulator isolation relay)
AMS	Systém správy akumulátoru (Accumulator management system)
BMS	Systém správy baterií (Battery management system)
Bottom	Spodní vrstva DPS
BQ	Zkrácený název obvodu BQ76L455A-Q1
BQ76L455A-Q1	Integrovaný obvod pro BMS
CAN bus	Sériová sběrnice (Controller area network)
CANARS externí modul	Komunikační modul
CC	Konstantní proud
CV	Konstantní napětí
Daisy chain	Komunikační sběrnice čipu BQ76L455EVM
DC – DC	Stejnoseměrný měnič napětí
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Mazatelná paměť (Electrically erasable memory)
EMC	Elektromagnetická kompatibilita (Electromagnetic compatibility)
EV	Elektrická vozidla (Electric vehicles)
FSG	Studentská formule (Formula Student Germany)
GLV	Uzemněné nízké napětí (Grounded low voltage)
GND	Zemní potenciál (Ground)
GPIO	Univerzální pin (General - purpose input / output)
HEV	Hybridní elektrická vozidla (Hybrid electric vehicles)
IC	Integrovaný obvod (Integrated circuit)
IMD monitoring device)	Zařízení pro monitorování izolačního stavu (Insulation
ks	Počet kusů
LED	Světelná dioda (Light - emitting diode)
Li-ion	Lithium-iontová baterie (článek)
Li-pol	Lithium-polymerová baterie (článek)
Master BMS	Hlavní řídicí deska
Master komunikační BMS	Hlavní komunikační řídicí deska
Mid1	Střední vrstva 1 DPS
Mid2	Střední vrstva 2 DPS
MUX	Multiplexor
NTC	Termistor (Negative temperature coefficient)
PCB	Deska plošných spojů (Printed circuit board)
PELV	Ochranné malé napětí (Protective extra low voltage)
PHEV vehicles)	Dobíjitelné hybridní elektrická vozidla (Plug-in hybrid electric
PWM	Pulzní šířková modulace (Pulse width modulation)

RS485	Průmyslová sériová sběrnice
SELV	Bezpečné malé napětí (Safety extra low voltage)
Slave BMS	Podružná řídicí deska
Superkart	Druh motosportu
Top	Horní vrstva DPS
TS	Trakční systém (Tractive system)
UART	Sériové rozhraní (Universal asynchronous receiver – transmitter)
UPS	Záložní zdroj energie (Uninterruptible power supply)
USB	Univerzální sériová sběrnice (Universal serial bus)

### Prvky a sloučeniny (chemie)

C	Uhlík (grafit)
Cd	Kadmium
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kyselina sírová
KOH	Vodní roztok hydroxidu draselného
Li	Lithium
LiCoO <sub>2</sub>	Kobaltitan lithný
Ni(OH) <sub>2</sub>	Hydroxid oxidu nikelnatého
NiCd	Nikl kadmium
NiMH	Nikl metal hydrid
Pb	Olovo
PbO <sub>2</sub>	Oxid olovičitý
PbSO <sub>4</sub>	Síran olovnatý

### Fyzikální veličiny

$I_{BAL\_orient}$	A	Orientační balanční proud
$I_{BAL\_výs}$	A	Výsledný balanční proud
$I_{BAT\_max}$	A	Provozní proud při příslušném výkonu
$I_{LED}$	A	Proud signální diodou LED
$I_C$	A (násobky C)	Vybíjecí proud
$I_{cut-off}$	A	Konečný nabíjecí proud
$P_{C\_max}$	W	Maximální mechanický výkon v daném provozním stavu
$R_{bal}$	Ω	Odpor balančního rezistoru
$U_{BAT\_min}$	V	Minimální provozní napětí trakčních baterií
$U_{čl\_min}$	-	Minimální pracovní napětí jednoho článku
$U_{kon}$	V	Konečné nabíjecí napětí
$U_{cut-off}$	V	Konečné vybíjecí napětí
$n_{čl\_par}$	-	Počet paralelně zapojených článků
$n_{čl\_seg}$	-	Počet sériově zapojených článků v jednom segmentu
$n_{seg}$	-	Počet segmentů jedné trakční baterie
$n_{tr\_bat}$	-	Počet sériově zapojených trakčních baterií

$\eta_{conv}$	-	Účinnost motorů
$\eta_{mot}$	-	Účinnost motorů
$C$	Ah	Kapacita akumulátorového článku
$n$	-	Počet paralelně zapojených balančních rezistorů

## Seznam obrázků

OBR. 1 HUSTOTA ENERGIE V WH/L A WH/KG U NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH TRAKČNÍCH AKUMULÁTORŮ (PŘEVZATO Z [1]) .....	- 3 -
OBR. 2 KONSTRUKCE KLASICKÉHO OLOVĚNÉHO AKUMULÁTORU (PŘEVZATO Z [2]) .....	- 4 -
OBR. 3 PŘEHLED TYPŮ OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ (PŘEVZATO Z [3]) .....	- 5 -
OBR. 4 KONSTRUKCE NiCd VÁLCOVÉHO ČLÁNKU (PŘEVZATO Z [8]) .....	- 6 -
OBR. 5 VYBÍJECÍ CHARAKTERISTIKY ČLÁNKU PANASONIC UR18650RX (PŘEVZATO Z [11])..	- 8 -
OBR. 6 PRINCIP FUNKCE LI-ION ČLÁNKU (PŘEVZATO Z [12]) .....	- 9 -
OBR. 7 SCHÉMA ZAPOJENÍ MĚŘIČE SPOTŘEBY (PŘEVZATO Z [18]) .....	- 16 -
OBR. 8 SCHÉMA ZAPOJENÍ TRAKČNÍHO SYSTÉMU A TRAKČNÍHO AKUMULÁTOROVÉHO KONTEJNERU (PŘEVZATO Z [18]) .....	- 18 -
OBR. 9 BLOKOVÉ SCHÉMA CENTRALIZOVANÉ BMS (PŘEVZATO Z [21]).....	- 20 -
OBR. 10 BLOKOVÉ SCHÉMA MODULÁRNÍ BMS (PŘEVZATO Z [21]) .....	- 21 -
OBR. 11 BLOKOVÉ SCHÉMA PRIMÁRNÍ – SEKUNDÁRNÍ BMS (MASTER – SLAVE BMS) (PŘEVZATO Z [21]).....	- 22 -
OBR. 12 BLOKOVÉ DISTRIBUOVANÉ BMS (PŘEVZATO Z [21]).....	- 22 -
OBR. 13 PRINCIP AKTIVNÍHO A PASIVNÍHO BALANCOVÁNÍ (PŘEVZATO Z [22]) .....	- 23 -
OBR. 14 ZJEDNODUŠENÉ PRINCIPIELNÍ ZAPOJENÍ BQ76L455A-Q1 (PŘEVZATO Z [24])....	- 26 -
OBR. 15 BLOKOVÉ SCHÉMA VNITŘNÍ STRUKTURY BQ76L455A-Q1 (PŘEVZATO Z [24]) ..	- 28 -
OBR. 16 TYPICKÉ ZAPOJENÍ BQ76L455A-Q1 (PŘEVZATO Z [24]) .....	- 30 -
OBR. 17 PRINCIPIELNÍ ZAPOJENÍ SN74LN4051A-Q1 (PŘEVZATO Z [25]) .....	- 31 -
OBR. 18 PRAVDIVOSTNÍ TABULKA SN74LN4051A-Q1 (PŘEVZATO Z [25]) .....	- 31 -
OBR. 19: ZAPOJENÍ BQ76L455A-Q1 V KONFIGURACI BRIDGE (PŘEVZATO Z [26]).....	- 33 -
OBR. 20 BLOKOVÉ ZAPOJENÍ SEGMENTU V KONFIGURACI 21s 9P SE SLAVE BMS .....	- 36 -
OBR. 21 SCHEMATICKÉ ZAPOJENÍ TRAKČNÍ BATERIE (KONTEJNERU) .....	- 37 -
OBR. 22 SCHEMATICKÉ ZAPOJENÍ SERVISNÍHO ZAPOJENÍ BATERIE (KONTEJNERU).....	- 38 -
OBR. 23 SCHEMATICKÉ ZAPOJENÍ TRAKČNÍCH BATERIÍ (KONTEJNERŮ) .....	- 39 -
OBR. 24 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ BATERIOVÉHO SEGMENTU.....	- 41 -
OBR. 25 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ BATERIOVÉHO.....	- 41 -
OBR. 26 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ ŘÍDÍCÍ DESKY SLAVE BMS.....	- 44 -
OBR. 27 SCHÉMA BALANČNÍHO OBVODU .....	- 45 -
OBR. 28 ZAPOJENÍ NTC SENZORŮ .....	- 48 -

OBR. 29 PROPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH BALANČNÍCH OBVODŮ.....	- 49 -
OBR. 30 ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK ŘÍDICÍ DESKY SLAVE BMS.....	- 51 -
OBR. 31 FINÁLNÍ PODOBA DPS ŘÍDICÍ DESKY SLAVE BMS.....	- 52 -
OBR. 32 CHLADIČ SLAVE BMS .....	- 53 -
OBR. 33 SLOUPEK CHLADIČE SLAVE BMS .....	- 53 -
OBR. 34 DRŽÁKY ŘÍDICÍ DESKY SLAVE BMS NA BATERIOVÉM SEGMENTU .....	- 54 -
OBR. 35 UCHYCENÍ SLAVE BMS NA BATERIOVÉM SEGMENTU.....	- 54 -
OBR. 36 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ ŘÍDICÍ DESKY MASTER KOMUNIKAČNÍ BMS.....	- 55 -
OBR. 37 ZAPOJENÍ DC-DC MĚNIČE Z 5 NA 12 V .....	- 56 -
OBR. 38 ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK ŘÍDICÍ DESKY MASTER KOMUNIKAČNÍ BMS .....	- 58 -
OBR. 39 FINÁLNÍ PODOBA DPS ŘÍDICÍ DESKY MASTER KOMUNIKAČNÍ BMS .....	- 59 -
OBR. 40 MASTER KOMUNIKAČNÍ BMS V KRABÍČCE .....	- 59 -
OBR. 41 SESTAVENÝ BATERIOVÝ SEGMENT.....	- 60 -
OBR. 42 VYČÍTÁNÍ ZMĚŘENÝCH HODNOT POMOCÍ SÉRIOVÉHO EMULÁTORU .....	- 62 -
OBR. 43 BMS PŘIPOJENÁ K TESTOVACÍMU PŘÍPRAVKU .....	- 63 -
OBR. 44 BATERIOVÝ SEGMENT S BMS V PROVOZU .....	- 64 -

## Seznam tabulek

TABULKA 1 JMENOVITÉ PARAMETRY ČLÁNKU INR21700-40T (DOSTUPNÉ Z [23]).....	- 24 -
TABULKA 2 PROVOZNÍ PROUDY TRAKČNÍ BATERÍ PŘI DANÝCH PROVOZNÍCH MECHANICKÝCH VÝKONECH MOTOKÁRY .....	- 35 -
TABULKA 3 PARAMETRY JEDNÉ TRAKČNÍ BATERIE (KONTEJNERU) .....	- 38 -
TABULKA 4 PARAMETRY DVOU SÉRIOVĚ ZAPOJENÝCH TRAKČNÍCH BATERÍ (KONTEJNERŮ) ...	-

## Úvod

Pro svoji diplomovou práci jsem si vybral konstrukci trakční baterie pro elektrickou motokáru. Moje volba byla ovlivněna tím, že se zajímám o rozvíjející se technologie, elektromobilitu a její nasazení v praxi. V dnešní době dochází k výraznému rozvoji elektromobility, tím pádem se zvyšují i nároky na trakční baterie. Z těchto důvodů vyplývá, že má smysl se zabývat konstrukcemi trakčních baterií a jejich vylepšeními.

Cílem této diplomové práce bylo popsání hlavních obecných pravidel pro konstrukce trakčních baterií, zkonstruování trakční baterie po elektrické a mechanické stránce, navržení komplexního systému správy baterie (dále jen „BMS“) a ověření funkce BMS na zkonstruované trakční baterii.

Zkonstruovanou trakční baterii lze využít pro napájení elektrické motokáry a zároveň ji lze použít jako zdroj pro elektrickou čtyřkolku. V případě elektrické motokáry budou použity dvě tyto trakční baterie, které budou zapojeny do série a budou tak tvořit **jmenovité napájecí napětí o hodnotě 454 V**. Pro elektrickou čtyřkolku bude využita pouze jedna trakční baterie, čili **jmenovité napětí bude 227 V**.

Trakční baterie je rozdělena do tří segmentů, které jsou mezi sebou sériově propojeny. Každý segment je tvořen sérioparalelním spojením **21s 9p (21 sériově a 9 paralelně)** li-ion článků. Jednotlivé články jsou umístěny v plastové konstrukci a jsou mezi sebou propojeny pomocí niklového pásku. Pásek je k článkům přibodován. Jednotlivé segmenty jsou umístěny v bateriovém boxu, který je vybaven vysokonapěťovými konektory. Každý segment je vybaven jednou řídicí deskou Slave BMS. Trakční baterie je vybavena jednou řídicí deskou Master BMS. Bateriový box bude doplněn o další bezpečnostní prvky, jako například odpínací stykače a měřič izolačního stavu. Návrh a konstrukce těchto prvků není součástí této diplomové práce.

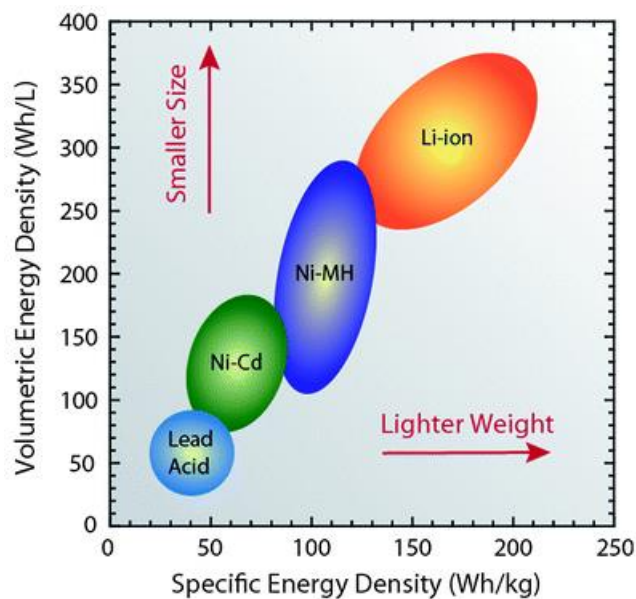
Slave BMS se stará o segment trakční baterie. Měří napětí všech **21 sériově zapojených článků** segmentu, balancuje napětí jednotlivých článků, tak aby bylo možné baterii dobít na maximální kapacitu, měří **28 externích teplot a 2 interní teploty** na plošném spoji. Všechny tyto funkce obstarává integrovaný obvod BQ76L455A-Q1 od Texas Instruments, který je vybaven komunikační sběrnici Daisy chain, díky které lze propojovat jednotlivé Slave BMS od příslušných segmentů. Pomocí této sběrnice lze propojit nejnižší Slave BMS s řídicí deskou Master BMS.



V této práci není řešena finální verze řídicí desky Master BMS, jelikož tato jednotka má vazbu na prvky, které budou teprve vyvíjeny či vybrány. Pro stolní ladění a servisní účely byla vyvinuta Master komunikační BMS, která je opět vybavena integrovaným obvodem BQ76L455A-Q1, který v tomto případě neobstarává měřicí funkce jako u Slave BMS, ale tvoří takzvaný komunikační most, který odděluje Master komunikační BMS od potenciálu baterie. Takovýto most umožňuje bezpečné propojení obou řídicích desek. Master komunikační BMS umožňuje servisní ladění, programování Slave BMS a tvoří rozhraní mezi segmenty trakční baterie a vyšší vrstvou. Pro komunikaci s vyšší vrstvou je Master komunikační BMS vybavena rozhraním USB, UART a CAN bus.

# 1 Základní typy trakčních baterií a jejich technologie

V této kapitole jsou shrnuty jednotlivé typy technologií akumulátorů, které jsou používány pro konstrukce trakčních baterií. Od výběru technologie akumulátoru se odvíjí kompletní návrh a konstrukce trakční baterie. Dále se od výběru technologie odvíjí parametry baterie např.: jmenovité napětí, jmenovitá kapacita, elektrická energie, výkon, hmotnost, hustota energie, vybíjecí a nabíjecí proudy, vnitřní odpor, životnost, náročnost údržby atd. Trakční baterie obvykle tvoří významný podíl celkové hmotnosti elektrického vozidla, proto je v dnešní době snaha využívat akumulátory s velkou hustotou energie. Parametry akumulátorů jdou velmi často proti sobě, proto je důležité zvolit technologii s vhodným kompromisem pro danou aplikaci. Pro elektrické pohony jsou v zásadě používány sekundární články (akumulátory), které jsou opětovně použitelné.

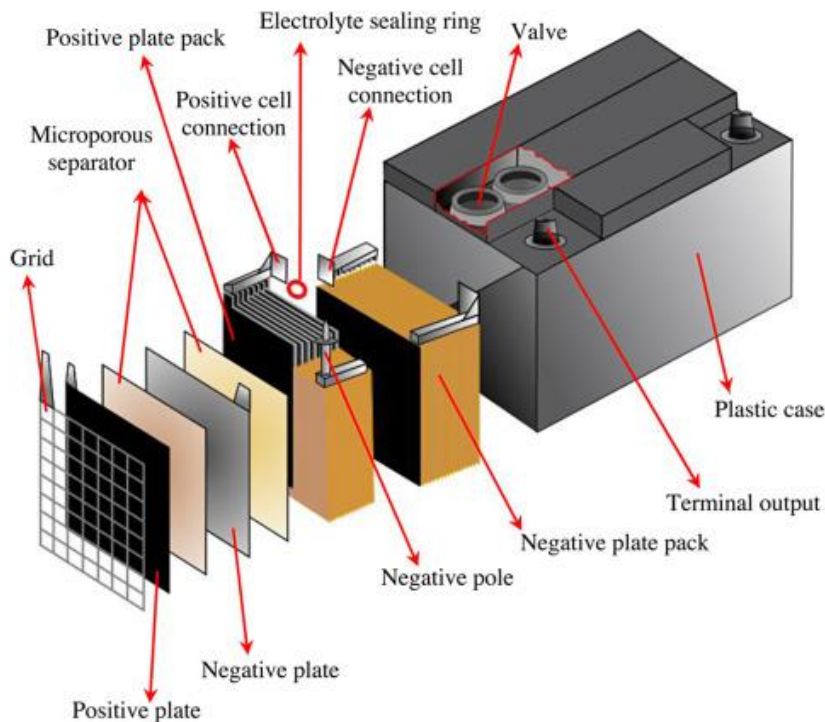


Obr. 1 Hustota energie v Wh/l a Wh/kg u nejpoužívanějších trakčních akumulátorů (převzato z [1])

## 1.1 Olověné (Pb) akumulátory

Olověné akumulátory jsou v dnešní době stále nejpoužívanější sekundární zdroje. Zároveň se jedná o technologicky nejstarší druh akumulátoru. První akumulátory tohoto druhu byly zhotovovány již v 19. století. Konstrukce tohoto akumulátoru se vyznačuje svojí jednoduchostí. Existuje mnoho typů, ale obecně lze říci, že základ konstrukce je podobný. Celý akumulátor je složen z několika článků, které jsou spojeny do série pro dosažení jmenovitého napětí. Článek obsahuje olověné desky, které tvoří kladnou a zápornou

elektrodu. Desky jsou ponořené do elektrolytu. Jako elektrolyt je využívána zředěná kyselina sírová ( $H_2SO_4$ ). Jednotlivé desky jsou odděleny pomocí separátoru, který je propustný vůči elektrolytu. Články akumulátoru jsou umístěné v odolném plastovém kontejneru, který obsahuje kladný a záporný terminál, dále může být doplněn o plnicí či odvětrávací ventily a indikátory stavu vybití baterie. Chemický proces, který vzniká při vybíjení a nabíjení akumulátoru je obousměrný, tudíž lze akumulátor využívat opakovaně. Při vybíjení klesá hustota elektrolytu, spotřebovává se kyselina sírová ( $H_2SO_4$ ) a při vybitém stavu je na kladné a záporné elektrodě síran olovnatý ( $PbSO_4$ ). Při nabíjení je proces přesně opačný, elektrolyt houstne a při nabitém stavu je na kladné elektrodě oxid olovičitý ( $PbO_2$ ) a na záporné elektrodě olovo ( $Pb$ ). [4] [5]



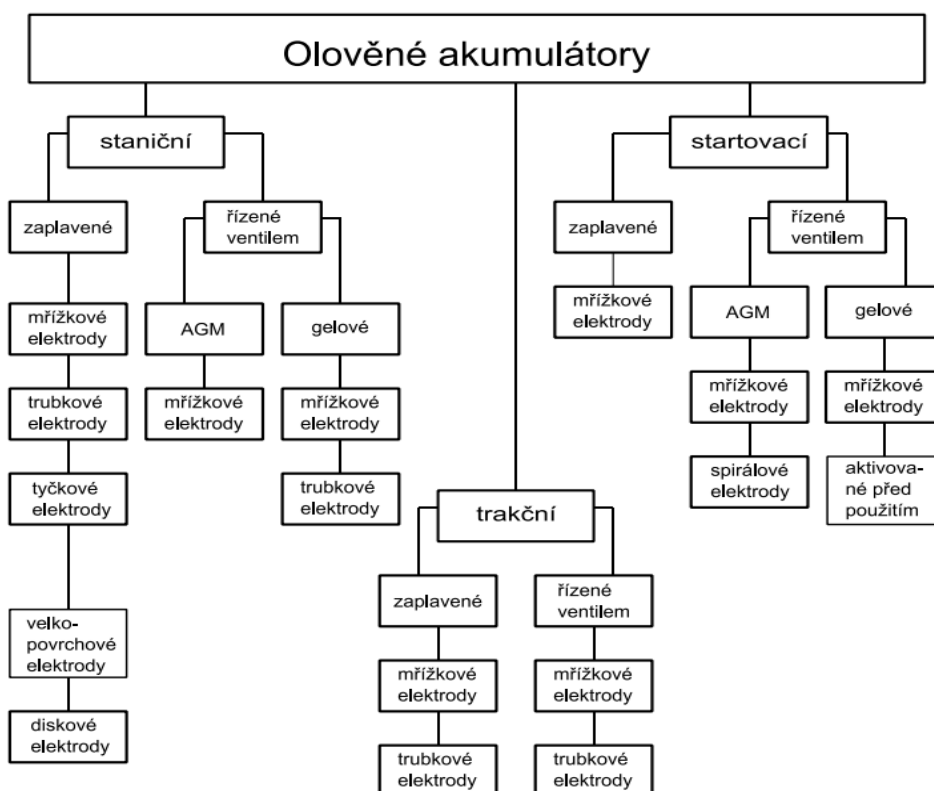
Obr. 2 Konstrukce klasického olověného akumulátoru (převzato z [2])

Pro konstrukce trakčních baterií lze využít sérioparalelního spojení jednotlivých olověných akumulátorů, tak aby bylo dosaženo požadovaného jmenovitého napětí a vybíjecího proudu. Olověné akumulátory jsou používány pro napájení palubní sítě automobilů, záložní zdroje (UPS), úložiště energie pro fotovoltaické elektrárny atd. [7]

Charakteristické vlastnosti těchto akumulátorů jsou:

- nízký vnitřní odpor akumulátoru;
- schopnost dodávat velké impulzní proudy;

- malá hustota energie, maximálně 50 Wh/kg;
- nízký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, obvykle do 350;
- odebraný náboj značně závislý na velikosti vybíjecích proudů;
- určeny pro krátkodobé velké odběry, částečné vybíjení (závisí na konstrukci akumulátoru);
- při dobrém stavu akumulátoru relativně malé samovybíjení;
- nízká cena a široký výběr na trhu;
- snadná údržba;
- obsahuje neekologické látky, olovo, kyselina sírová.



Obr. 3 Přehled typů olověných akumulátorů (převzato z [3])

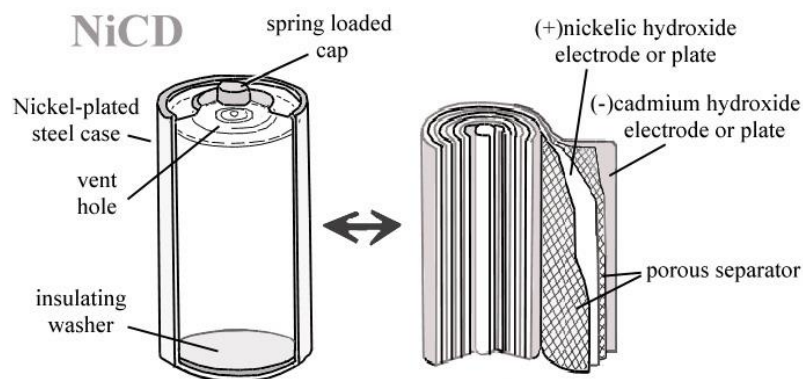
## 1.2 Nikl-kadmiové (NiCd) akumulátory

Jedná se opět o poměrně starou technologii. Vývoj těchto akumulátorů začal na přelomu 19. a 20. století. Vzhledem k faktu, že NiCd články obsahují velké množství kadmia (Cd), které je toxické, tak je snaha ustupovat od používání těchto akumulátorů. Nástupcem těchto akumulátorů jsou nikl-metal hydridové články, které jsou ekologicky téměř

nezávadné. NiCd akumulátory dosahují vyšších hustot energie, zhruba o 60 % oproti Pb akumulátorům.

NiCd akumulátory existují ve dvou základních provedeních. Prvním typem jsou velké akumulátory se zaplavenými elektrodami, které jsou v kapalném elektrolytu. Tento typ akumulátoru bývá převážně využíván pro velké statické staniční baterie. Druhým typem jsou hermeticky uzavřené články, které jsou vyráběny ve formě válcových či hranolových článků. Tyto články jsou využívány v elektronických přístrojích a v akumulátorovém nářadí. Z jednotlivých článků lze stavět větší baterie.

U válcových článků jsou elektrody stočeny do tvaru spirály a odděleny pomocí syntetického separátoru. Elektrody jsou umístěny do pouzdra z poniklované oceli, které tvoří obal a záporný pól článku. Pouzdro je naplněno alkalickým elektrolytem. Kladný pól se nachází v horní části článku. Kovový obal bývá vybaven ventilem, který v případě nadměrného tlaku zabrání výbuchu článku. Z hlediska výroby je válcový článek nejvýhodnější. U NiCd článků nedochází při vybíjení a nabíjení k přenosu materiálu jako u jiných technologií. Aktivní materiál na kladné elektrodě je hydroxid oxidu nikelnatého ( $\text{Ni(OH)}_2$ ) a na záporné elektrodě kadmium (Cd). [4] [10]



Obr. 4 Konstrukce NiCd válcového článku (převzato z [8])

Charakteristické vlastnosti těchto akumulátorů jsou:

- jmenovité napětí článku **pouze 1,2 V** (nižší oproti Pb článku, který má **2,1 V**);
- oproti Pb akumulátorům jsou dražší;
- odolné proti přebíjení;
- hustota energie do 80 Wh/kg;
- poměrně vysoká životnost, až 2000 vybíjecích a nabíjecích cyklů;

- obsahuje toxické kadmium (Cd);
- umožňuje vysoké nabíjecí proudy (až 2 C);
- možnost skladování ve vybitém stavu;
- trpí paměťovým efektem;
- vysoká výkonnost i při nízkých teplotách. [9]

### 1.3 Nikl-metal hydridové (NiMH) akumulátory

Jak již bylo zmíněno v minulé kapitole, tak tyto akumulátory jsou nástupci NiCd akumulátorů. NiMH technologie byla objevena v polovině 20. století a masivně se rozšířila na začátku 21. století. Konstrukčně jsou válcové NiMH akumulátory stejné jako NiCd akumulátory. Značnou výhodou je vysoká hustota energie, která je až téměř o 100 % větší než u svého předchůdce NiCd. Tento typ akumulátoru neobsahuje téměř žádné toxické látky. NiMH a NiCd jsou mezi sebou zaměnitelné.

Elektrody jsou opět nerozpustné v elektrolytu. Kladná elektroda obsahuje stejnou aktivní látku jako u NiCd akumulátorů. Aktivní látku záporné elektrody tvoří sloučenina metal - hydrid. Tato sloučenina má schopnost uvolňovat a absorbovat vodík (H). Elektrolyt obsahuje vodní roztok hydroxidu draselného (KOH). [4] [10]

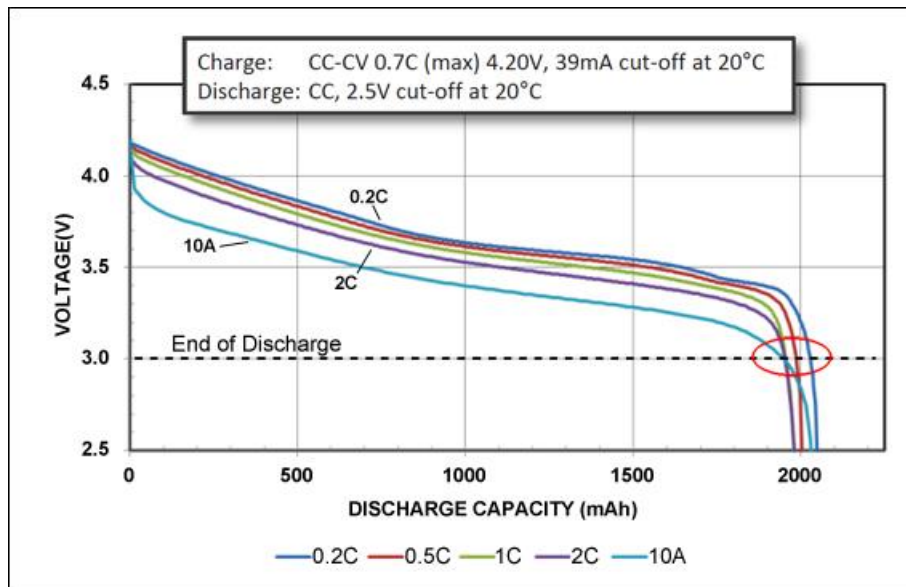
Charakteristické vlastnosti těchto akumulátorů jsou:

- shodné jmenovité napětí článku jako u NiCd články;
- hustota energie až 160 Wh/kg;
- neumožňuje tak rychlé nabíjení jako u NiCd;
- nižší vybíjecí proudy oproti NiCd;
- dražší oproti NiCd (přibližně o 30 %);
- téměř neobsahuje toxické látky;
- počet vybíjecích a nabíjecích cyklů maximálně 1000;
- oproti NiCd jsou odolnější vůči přebíjení. [10]

### 1.4 Lithium-iontové (li-ion) akumulátory

Li-ion akumulátory jsou nejnovější a zároveň technicky nejvyspělejší druh akumulátorů. První komerčně dostupnou verzi uvedla na trh společnost Sony v roce 1991. V dnešní době se tento typ akumulátorů velmi rozšířil. Pro trakční aplikace tyto jsou tyto články preferované. Akumulátory mohou být nabíjeny a vybíjeny velkými proudy. Tyto články mají velmi plochou vybíjecí charakteristiku. Velkou výhodou je fakt, že i při velkých vybíjecích proudech lze odebrat téměř celkový náboj akumulátoru. Na následujícím

obrázku lze vidět, že je plocha pod vybíjecími křivkami podobná a odebraný náboj téměř shodný. [14] [15]

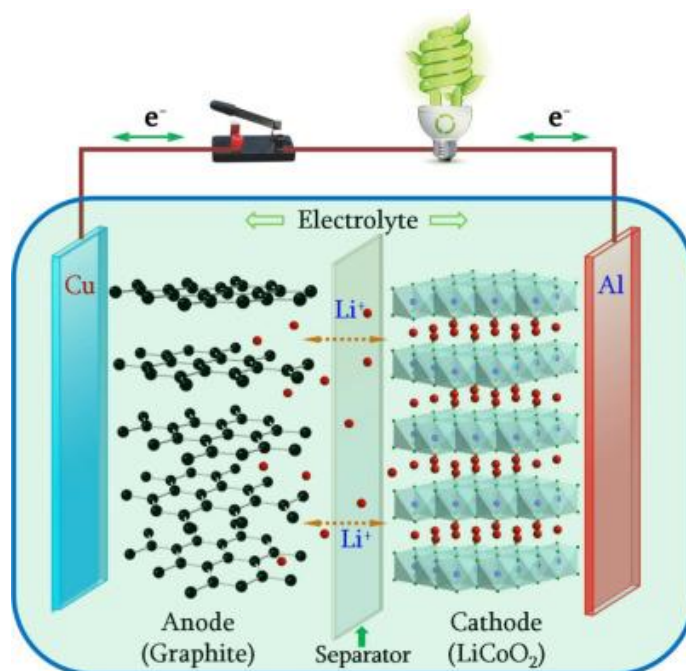


Obr. 5 Vybíjecí charakteristiky článku Panasonic UR18650RX (převzato z [11])

Oproti NiMH mají hustotu energie o 100 % větší. Existuje několik skupin li-ion akumulátorů, které mají podobné vlastnosti, ale liší se použitou chemií. Li-ion články jsou nejnáročnější na údržbu ze všech druhů akumulátorů. Při překročení mezních parametrů nebo při mechanickém poškození článků hrozí riziko vzplanutí akumulátoru. Články je nutné vybavit elektronikou, která zajišťuje nepřekračování mezních parametrů. Pro aplikace s jedním článkem se jedná o malý plošný spoj s několika elektronickými součástkami, který může být umístěn v obalu článku, tento obvod nazýváme jako ochranný. Systémy s více články jsou vybaveny battery management systémy (BMS), tyto systémy budou detailněji popsány v následujících kapitolách. Obecně lze říci, že tyto systémy zajišťují balancování článků, měří napětí článků, měří teploty článků, chrání baterii před přehříváním (podbitím) atd.

Li-ion články se vyrábí ve dvou základních provedeních, prvním typem jsou prizmatické články (hranolový tvar článku) a druhým typem válcové články. Z jednotlivých článků lze sestavovat velké trakční baterie. Článek se svojí konstrukcí podobá předešlým technologiím (NiCd, NiMH). Záporný pól (anoda) je obvykle tvořen uhlíkem (grafit – C). Aktivní hmotu na kladné elektrodě (katodě) tvoří oxidy kovů v závislosti na daném typu li-ion baterie (LiFePO<sub>4</sub>, LiCoO<sub>2</sub>, LiNiMnCoO<sub>2</sub>, atd.). Kladná a záporná elektroda jsou od sebe odděleny pomocí separátoru. Obal článku je vyplněn elektrolytem, který je na bázi

lithiové soli a organického rozpouštědla. Elektrochemický proces je založen na přenosu iontů lithia ( $\text{Li}^+$ ) mezi kladnou a zápornou elektrodou. Při vybíjení putují ionty ze záporné (anody) elektrody přes separátor do kladné (katody) elektrody. Při nabíjení je pohyb iontů přesně opačný. Pro konstrukci trakční baterie motokáry (čtyřkolky) je zvolen právě li-ion akumulátor. Parametry konkrétně zvoleného článku jsou popsány v dalších kapitolách. [15]



Obr. 6 Princip funkce li-ion článku (převzato z [12])

Základní druhy li-ion akumulátorů:

- (1)  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  – LTO – stabilní při vysokých teplotách, dražší oproti ostatním, využití ve staničních bateriích, UPS a pro solární osvětlení;
- (2)  $\text{LiFePO}_4$  - LFP– je odolnější vůči přebíjení, má nižší jmenovité napětí na článek (3,2V), malý vnitřní odpor, využíván u fotovoltaických elektráren;
- (3)  $\text{LiNiMnCoO}_2$  – NMC – umožňuje vysoké vybíjecí proudy na úkor velikosti kapacity, vhodný pro malé trakční aplikace, ruční akumulátorové nářadí;
- (4)  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  – LMO – nízký vnitřní odpor, zvýšená bezpečnost, umožňuje obrovské vybíjecí proudy, využívá se pro elektrická vozidla;
- (5)  $\text{LiCoO}_2$  – LCO – kratší životnost, nižší tepelná stabilita, vyšší riziko vzplanutí, malé vybíjecí proudy, využíván pro spotřební elektroniku, mobilní telefony, notebooky. [6] [7] [13]



Charakteristické obecné vlastnosti li-ion akumulátorů jsou:

- vysoké jmenovité **napětí na článku 3,6 V** (v závislosti na technologii může být jiné);
- vysoká hustota energie až 250 Wh/ kg;
- obrovské vybíjecí proudy (50 – 100 C);
- vysoké nabíjecí proudy (3 – 5 C);
- životnost až 1200 cyklů;
- nemají paměťový efekt;
- baterie ztrácejí kapacitu bez ohledu na používání;
- složitá a náročná zpětná recyklace;
- problematické hašení vzplanutých článků (Li hoří i pod vodou, dokud se nezchladí pod teplotu 200 °C).

### 1.5 Lithium-polymerové (li-pol) akumulátory

Tento typ akumulátorů je poměrně nový. Vychází z koncepce li-ion akumulátorů a zároveň vylepšují některé jejich vlastnosti. Hustota energie je zhruba o 20 % vyšší oproti li-ion akumulátorům. Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů je o něco vyšší než u li-ion. Li-pol akumulátory jsou hojně využívány v mobilních telefonech, fotoaparátech, notebookech, RC modelech atd. Často bývají vyráběny ve tvaru hranolů. Jejich obal může být měkký a lze ho tak ohýbat. Konstrukčně jsou články podobné s li-ion akumulátorům. Zápornou elektrodu tvoří opět uhlík (C) ve formě grafitu. Kladná elektroda bývá tvořena kobaltitanem lithným ( $\text{LiCoO}_2$ ). Jako elektrolyt je použit vodivý polymer, který je v tuhé formě. Obě elektrody jsou odděleny tenkým separátorem. Li-pol technologie vyžaduje stejné nároky na údržbu jako li-ion technologie. [16] [17] Charakteristické vlastnosti těchto akumulátorů jsou:

- jmenovité napětí článku 3,7 V;
- vyšší vybíjecí napětí 2,7 V (může se lišit podle typu článku) oproti li-ion (2,5 V);
- vysoké impulzní vybíjecí proudy (až 120 C);
- nejvyšší hustota energie ze všech dostupných technologií (až 270 Wh/kg);
- výroba článků je dražší oproti technologii li-ion. [16]

## 2 Hlavní pravidla pro návrh trakčních baterií

Návrh trakčních baterií je velmi komplexní úloha, pro kterou nelze stanovit jednoznačná pravidla. Dle konkrétní aplikace je vybrána vhodná technologie baterií, systém správy baterií (BMS), konstrukce a systém uložení baterií atd. Dále je nutné respektovat příslušné normy, které stanovují pravidla pro konstrukce baterií v závislosti na konkrétní aplikaci. U systémů trakčních baterií je hlavní důraz kladen na ochranu proti úrazu elektrickým proudem a ochranu proti vzniku požáru či výbuchu baterie.

V této kapitole jsou popsána základní pravidla, která vycházejí z technických norem pro příslušné typy trakčních baterií. Konkrétní technické normy jsou blíže popsány v následujícím textu. Dále jsou popsána pravidla, která vycházejí se soutěže studentské formule. Tato soutěž je rozdělena do několika divizí, přičemž každá má své vlastní pravidla. V této diplomové práci jsou popsána pravidla, která vycházejí z pravidel původní soutěže Formula SAE a odštěpené divize FSG (Formula Student Germany). Pravidla FSG vycházejí z pravidel Formula SAE a zároveň jsou si velmi podobná, proto dále v textu jsou popsána dohromady.

Pro návrh trakční baterie motokáry a čtyřkolky v této práci jsou využita obecná návrhová pravidla pro trakční baterie a pravidla vycházející se soutěží studentské formule. Zmíněná pravidla formule nejsou pro účely elektrické motokáry (čtyřkolky) dodržována v plném znění, jelikož trakční baterie elektrické motokáry má vyšší jmenovitou kapacitu (energii). Dále nemusí být pravidla striktně dodržována, protože motokára nebude procházet technickou přejímkou jako formule. Některé odchylky od pravidel budou popsány v kapitolách popisující konstrukci trakční baterie. Pravidla týkající se bezpečnosti jsou shodná s pravidly studentské formule. Vzhledem k rozsahu pravidel jsou v této práci vypsána pouze hlavní pravidla, detailnější popis lze najít v konkrétních pravidlech.

### 2.1 Obecná pravidla vyplývající z technické normy

Existuje široké spektrum technických norem, které se zabývá návrhovými a bezpečnostními pravidly pro konstrukce trakčních baterií. Vzhledem k faktu, že v této práci jsou využity bateriové články typu li-ion pro konstrukci trakční baterie, tak jsou v této kapitole vypsána pravidla vyplývající z technické normy: „Bezpečnostní požadavky pro akumulátorové baterie a bateriové instalace – Část 6: Bezpečný provoz lithium-ion baterií pro trakční aplikace – ČSN EN IEC 62485-6“ [20]. Tato kapitola postihuje pouze

nejdůležitější pravidla ze zmíněné normy, pro detailní informace o pravidlech je nutné prostudovat právě tuto normu.

### 2.1.1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem z baterie a nabíječky

- musí být zřízeny ochrany, které zabrání **přímému dotyku** (základní ochrana) a proti **nepřímému dotyku** (ochrana při vzniklé poruše) s nebezpečným napětím;
- tyto pravidla musí být dodržována při připojení i odpojení nabíječky a zároveň pokud je akumulátor ve vozidle i mimo něj;
- pro ochranu proti **přímému dotyku** lze provést opatření: ochrana izolací živých částí, ochrana přepážkou nebo krytem, ochrana zábranou a ochrana umístěním mimo dosah;
- pro ochranu proti **nepřímému dotyku** lze provést následující opatření: ochrana automatickým odpojením nebo signalizací, ochrana ochranou izolací, ochrana neuzemněným místním pospojováním, ochrana elektrickým oddělením;
- baterie do jmenovitého napětí **60 V** stejnosměrných nemusejí obvykle splňovat ochranu proti **přímému dotyku**, pak celá bateriová instalace splňuje podmínky pro SELV nebo PELV;
- u baterií se jmenovitým napětím v rozsahu **60 – 120 V** stejnosměrných je ochrana proti přímému dotyku vyžadována;
- pro baterie se jmenovitým napětím v rozsahu **120 – 1500 V** stejnosměrných je vyžadována ochrana při přímém i nepřímém dotyku.

### 2.1.2 Opatření proti zkratům a ochrana před ostatními vlivy elektrického proudu

- aby se zabránilo nechtěným zkratům, tak všechny kabely a konektory musí být izolované;
- izolace musí účinně odolávat proti vnějším vlivům např.: teplota, voda, prach, chemikálie, elektrolyt;
- kabely u pólů baterie musí být uchyceny tak, aby se předcházelo namáhání tahem a krutem;
- baterie je nutné chránit proti zkratům vhodnými pojistkami, případně lze využívat doplňující ochranu proti zemním zkratům a nadproudovou ochranu (tento bod je vhodné detailně prostudovat v normě a zároveň je třeba brát ohled na technickou realizovatelnost);

- při údržbě a práci na bateriích je nutné používat izolované nářadí, které má odpovídající elektrickou pevnost;
- údržby musí provádět pouze pověřené osoby;
- pro práci s bateriemi, které mají více než **120 V** stejnosměrných je nutné používat izolační ochranný oděv či izolační rohože, aby se zabránilo styku pracující osoby s částmi připojenými na zem;
- nové a nabité baterie musí mít izolační odpor dle katalogu výrobce, tento odpor je nutné kontrolovat.

### **2.1.3 Opatření proti nebezpečím**

- jednotlivé články lze nabíjet maximálním nabíjecím proudem, jestliže jsou zachované teplotní rozsahy definované výrobcem článků;
- články je nutné nabíjet dle specifikace výrobce (obvykle konstantním proudem či napětím);
- žádný článek z trakční baterie nesmí být přebíjen či podbíjen (limity stanovuje výrobce baterií).

### **2.1.4 Opatření proti nebezpečí vytvářené chemickými látkami**

- v případě správného používání li-ion akumulátorů nedochází k uvolňování toxických látek;
- v případě nesprávného používání či poškození akumulátorových článků může dojít k úniku elektrolytu, požáru či explozi;
- pokud dojde k některému zmíněnému havarijnímu stavu, tak je nutné v případě možnosti vypnout baterii a zároveň kontaktovat hasiče.

### **2.1.5 Pomocná zařízení a příslušenství baterie**

- funkce systému správy baterií (BMS) musí být částečně nebo zcela přiřazena k trakční baterii, nabíječce či k napájenému zařízení;
- BMS musí umět zabránit přepětí a nadproudu v rámci článků či celých bateriových bloků (segmentů) a zajistit tak odpojení baterie od napájeného zařízení;
- dále musí BMS předcházet přebíjení a podbíjení článků;
- pokud trakční systém umožňuje rekuperaci, je nutné správně nastavit systém BMS, tak aby nedocházelo překračování maximálního napětí;

- BMS musí být vybavena neresetovatelnou funkcí, která umí odstavit nabíjení či vybíjení, tato funkce slouží jako bezpečnostní pojistka pro případ odchylky od pracovního režimu;
- po provedené kontrole lze uvést baterii opět do provozu;
- BMS musí monitorovat teploty článků;
- v případě selhání článku či většího bloku článků musí BMS odpojit baterii či odstavit poškozenou část baterie;
- pro účely musí být BMS vybavena diagnostickými schopnostmi, přenos dat do vyššího systému či data zobrazovat na displeji.

### 2.1.6 Identifikační štítky, výstražná upozornění a návod pro použití, instalaci a údržbu

- trakční baterie musí být vybavena výstražnými a identifikačními štítky: postupujte podle instrukcí, nebezpečné napětí (platí pro baterie se jmenovitým napětím vyšším než **60 V** (stejnoseměrných), nerozdrtit, neohřívát nebo nepálit, nezkratovat, nerozebírat, neponořovat do žádné kapaliny;
- identifikační štítky musí být na každém článku či bateriovém systému;
- s baterií či její nabíječkou musí být dodávány návody, které jsou jasně srozumitelné.

## 2.2 Pravidla vyplývající z Formula SAE a Formula Student Germany (FSG)

Pravidla obou soutěží mohou být každoročně několikrát aktualizována, proto je důležité sledovat aktuální verze. V této práci jsou pravidla z Formula SAE 2023 verze 2, která lze najít na odkaze [18] a pravidla z Formula Student Germany (FSG) verze 1.1, která lze najít na odkaze [19].

### 2.2.1 Definice základních pojmů

Seznam základních pojmů, které definují vztah trakčních akumulátorů a ostatních částí trakčních systémů.

- **trakční systém (TS)** – každá část tohoto systému je elektricky připojena k motorům nebo akumulátorům;
- **uzemněné nízké napětí (GLV)** – každá elektrická část tohoto systému není součástí **trakčního systému**;

- **akumulátor** – veškeré bateriové články nebo superkondenzátory (obecně trakční baterie), které jsou využity pro ukládání energie pro účely **trakčního systému**.

### 2.2.2 Rozdělení pracovní činnosti

#### Personál (Vedoucí elektrického systému):

- je jediná osoba v týmu, která může prohlásit elektrické vozidlo za bezpečné a zahájit na něm pracovní úkon;
- musí doprovázet vozidlo při provozu nebo při převozu na závodní místo;
- musí být telefonicky kontaktovatelný po celou dobu závodu.

#### Údržba musí být vybavena ochrannými brýlemi a štítem jestliže:

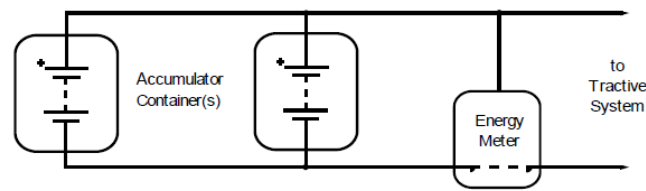
- jsou části **trakčního systému** odhaleny a pod napětím;
- provádí práci s **akumulátory**;
- zároveň je nutné používat vhodné izolované nářadí při práci na **akumulátorech** nebo **trakčním systému**.

### 2.2.3 Výkonové a napět'ové omezení

- okamžitý výkon dodávaný z **akumulátoru** nesmí překročit hranici **80 kW**;
- maximální povolené napětí mezi dvěma libovolnými body nikdy nesmí přesáhnout hodnotu **600 V** stejnosměrných;
- vozidlo nesmí rekuperovat, pokud je rychlost vozidla mezi **0 a 5 km/h**.

### 2.2.4 Měření energie

- všechna vozidla musí v průběhu závodů jezdit s měřičem energie, tento měřič poskytne pořadatel;
- měřič je detailně popsán na stránkách soutěže [18];
- měřič musí být snadno instalovatelný do vozidla;
- veškerá energie dodávaná **trakčnímu systému** musí proudit přes zmíněný měřič energie;
- mezní limity dodávaného výkonu a napětí kontroluje měřič energie;
- spotřebovaná energie se vypočítává jako časový integrál součinu měřeného napětí a proudu;
- k porušení pravidel dojde, pokud je překročeno maximální napětí nebo výkon či obojí po **nepřetržitou dobu 100 ms** a více, v případě použití **kouzavého průměru** dochází k porušení pravidel při **době překročení 500 ms** a více.



Obr. 7 Schéma zapojení měřiče spotřeby (převzato z [18])

### 2.2.5 Akumulátorový kontejner (box)

- akumulátor musí být vyroben z nehořlavého materiálu;
- musí být navržen, tak aby odolával silám, které vnikají vlivem decelerace;
- konstrukce kontejneru může být svařovaná či lepená;
- kryty a víka musí být připevněny minimálně jedním upevňovacím prvkem;
- akumulátorový box musí být rozdělen na sekce (segmenty akumulátoru);
- v každé sekci je povolena maximální hmotnost **12 kg**;
- každý segment akumulátoru musí být elektricky izolován vhodnou nehořlavou látkou (ne vzduchem);
- jednotlivé segmenty musí být v kontejneru zajištěny proti pohybu;
- akumulátorový kontejner musí být vyjmutelný z vozidla bez potřeby dalších ochranných krytů;
- kontejner musí být zcela uzavřen;
- kontejner smí obsahovat otvory pro kabelové svazky, ventilaci a upevňovací prvky;
- v případě využití akumulátorů, které produkují plyny při svém provozu, tak musí být box vybaven ventilačními otvory či přetlakovými ventily;
- kontejner musí být vybaven textem „Vysoké napětí“ a žlutým trojúhelníkem s bleskem;
- kontejner musí obsahovat číslo vozidla, název univerzity a telefonní číslo na **vedoucího elektrického systému**;
- kontejner musí být při manipulaci převážen pomocí určeného ručního vozíku;
- pokud je kontejner vyroben z elektricky vodivého materiálu tak: póly segmentu musí být izolovány od vnitřku boxu, vnější část boxu musí být propojena pomocí **GLV** a jakékoliv vodivé prostupy musí být chráněny proti proražení bariéry;
- pájení silových kabelů je zakázané;

- každý akumulátorový kontejner musí být vybaven alespoň jednou pojistkou a alespoň dvěma akumulátorovými izolačními relé (AIR) na obou pólech akumulátoru;
- každý akumulátorový kontejner musí být vybaven voltmetrem nebo červenou diodou, tyto indikátory signalizují napětí vyšší než **60 V stejnosměrných**;
- zmíněný indikátor musí být jasně viditelný i za slunečního svitu a zároveň musí být vždy funkční (i v případě, že akumulátor je vyjmutý z vozidla).

### 2.2.6 Úložiště energie (akumulátor)

- veškeré články nebo superkondenzátory, které ukládají energii pro **trakční systém**, tak musí být zabudovány do segmentů a ty jsou uzavřeny v akumulátorovém kontejneru;
- každý segment kontejneru musí mít **statické jmenovité napětí** menší než **120 V** stejnosměrných a zároveň maximální uložená energie je **6 MJ**;
- energie úložiště (segmentu) se vypočítá jako součin maximálního napětí a jmenovitá kapacity;
- všechny segmenty akumulátoru musí být shodné;
- jsou povoleny všechny typy článků, kromě termálních baterií a články založené na roztavené soli;
- palivové články jsou zakázané;
- všechny součásti **trakčního systému** musí být dimenzovány na maximální napětí celého akumulátoru;
- trakční baterie musí být vybavena zařízením pro monitorování izolačního stavu (IMD), které v případě porušení izolačního stavu odpojí trakční baterii od **trakčního systému**;
- nízkonapěťové systémy nesmí být zahrnuty do **trakčních systémů**, s výjimkami pro akumulátorové izolační relé (AIR), trakční DC / DC měniče, systém správy baterií (AMS, BMS), chladicí ventilátory a zařízení pro monitorování izolačního stavu (IMD);
- každý akumulátorový box musí být vybaven úplným systémem správy baterií (AMS, BMS);
- AMS musí nepřetržitě měřit napětí všech článků akumulátoru;
- dále musí AMS měřit proud tekoucí akumulátorem a teplotu článků;
- AMS musí měřit teplotu **alespoň 30 % článků** z akumulátoru;





### 3 Teoretický rozbor systémů správy baterií (BMS)

Battery management system (BMS), neboli systém správy baterií je obecný systém, který monitoruje a zajišťuje optimální provozní parametry bateriových článků či celých bateriových akumulátorů. Dále je možné se setkat s obecnějším označením accumulator management system (AMS). Obecně lze BMS rozdělit do několika kategorií v závislosti na provedení a podle množství monitorovaných veličin. Složitost BMS se odvíjí od požadavků a nároků na akumulátorové úložiště. Mezi **hlavní funkce BMS** patří:

- měření napětí jednotlivých článků;
- měření proudů článků či celkového proudu akumulátoru;
- měření teplot článků;
- měření spotřebované energie;
- hlídání mezních parametrů baterie;
- ovládání bezpečnostních periferií;
- řízení balančních obvodů;
- zajištění využitelnosti baterie v plném rozsahu provozních parametrů;
- zajištění odebrání většiny náboje z akumulátoru;
- zajištění bezpečného a rovnoměrného nabíjení jednotlivých článků akumulátoru;
- udržování baterie v dobré kondici;
- komunikace s nabíjecí stanicí;
- komunikace s vyšší vrstvou.

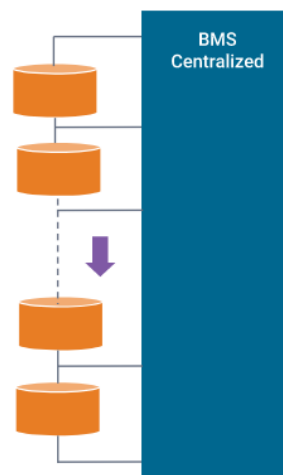
Existuje celá řada typů architektur BMS, v této kapitole jsou popsány pouze základní typy. V praxi se lze setkat s různými kombinacemi, které nemusí odpovídat následujícímu rozdělení. Mezi **základní typy architektur BMS** patří:

- (1) Centralizovaný BMS;
- (2) Modulární BMS;
- (3) Primární - sekundární BMS (Master – slave BMS);
- (4) Distribuovaný BMS. [21]

#### 3.1 Centralizovaný BMS

Celý akumulátorový box obsahuje pouze jednu centrální jednotku BMS. Jednotka obstarává všechny požadované funkce. Samotné srdce BMS může být založeno na dvou základních technologiích. První možností je využití mikrokontroléru a diskrétních

součástí na realizaci BMS. Toto řešení je velmi složité a nákladné na vývoj. Dále je zde značný prostor pro konstrukční a softwarové chyby celého systému. S tímto faktem souvisí i složité odladění takového BMS. Druhou možností je využití specializovaného integrovaného obvodu, který je určen pro BMS. Takovéto čipy obvykle zajišťují balancování článků, měření napětí a teplot jednotlivých článků, hlídání mezních parametrů, komunikaci s vyšší vrstvou atd. K čipu obvykle stačí doplnit pasivní součástky pro správnou funkci. Zmíněné čipy bývají technologicky velice pokročilé. Tato varianta je v dnešní době z hlediska konstrukce a ekonomiky nejvýhodnější. Obecně lze centralizované BMS považovat za nejekonomičtější řešení. Nevýhodou takovýchto systémů může být složitá kabeláž a případné komplikace při odstraňování chyb a problémů. [21]

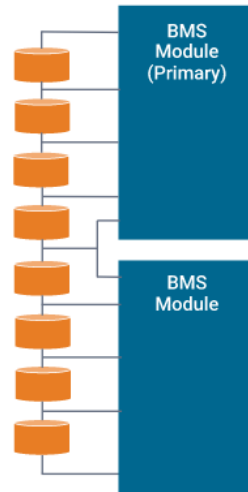


Obr. 9 Blokové schéma centralizované BMS (převzato z [21])

### 3.2 Modulární BMS

Modulární topologie BMS vychází z centralizované BMS. Systém BMS je rozdělen do několika submodulů. Jednotlivé submoduly mohou být propojeny pomocí komunikační sběrnice. Každý submodul obstarává určitou část akumulátoru, který je obvykle rozdělen do několika segmentů. Značnou výhodou tohoto systému je duplikovatelnost jednotlivých submodulů, díky tomu odpadají značné problémy s údržbou a laděním celého systému. Tato architektura BMS bývá využívána pro velké trakční baterie. Vzhledem k vysokému počtu submodulních BMS může být cena celého systému vyšší, než cena centralizované

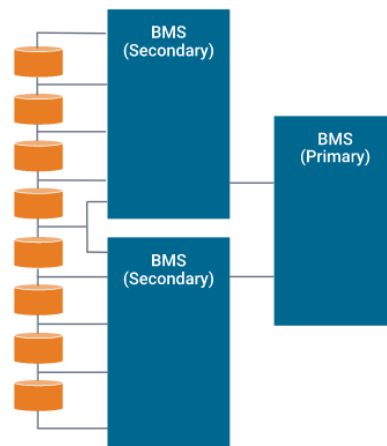
BMS. Srdce samotného systému může být opět tvořeno mikrokontroléry či specializovanými integrovanými obvody. [21]



Obr. 10 Blokové schéma modulární BMS (převzato z [21])

### 3.3 Primární – sekundární BMS (Master – Slave BMS)

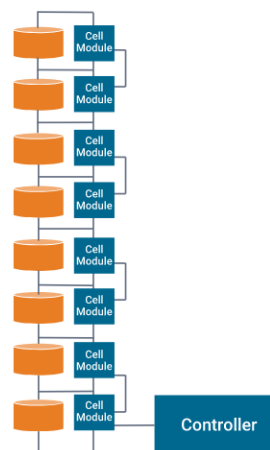
Architektura této BMS vychází z předchozí modulární BMS. Celkový akumulátor je rozdělen do několika segmentů. Každý sekundární (Slave) BMS obstarává svůj příslušný segment akumulátoru. Jednotlivé Slave BMS si mohou předávat měřená data pomocí komunikační sběrnice. Primární (Master) BMS je nadřazený Slave BMS. Z jednotlivých Slave BMS sbírá naměřená data a na základě softwarové konfigurace provádí interakce s akumulátorem, případně může provádět měření některých veličin. Díky přítomnosti nadstavěné Master BMS mohou být Slave BMS konstrukčně jednodušší a levnější. Master BMS a Slave BMS jsou mezi sebou propojeny pomocí komunikační sběrnice. Pro velké trakční baterie je tato topologie nejpoužívanější. Tato topologie je zvolena i pro navržený systém v této diplomové práci. [21]



Obr. 11 Blokové schéma primární – sekundární BMS (master – slave BMS) (převzato z [21])

### 3.4 Distribuovaná BMS

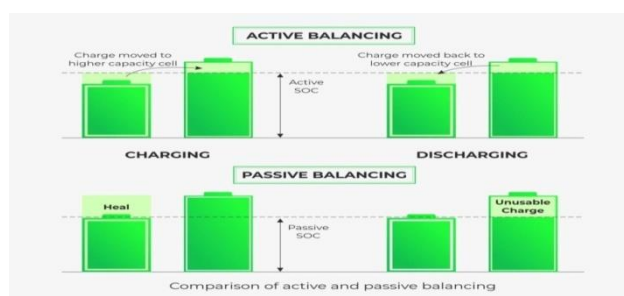
Distribuovaná BMS se topologicky značně liší od předešlých architektur. Každý článek obsahuje BMS buňku, která ho obstarává. Tato buňka obsahuje veškerý potřebný hardware pro monitorování a balancování článku. Jednotlivé buňky jsou mezi sebou propojeny pomocí komunikační sběrnice. Změřená data mohou být zpracována pomocí mikrokontroléru. Tato architektura je vhodná spíše pro menší bateriové systémy. [21]



Obr. 12 Blokové distribuované BMS (převzato z **Error! Reference source not found.**[21])

### 3.5 Balancování článků akumulátoru

Balancování se využívá u akumulátorů, které využívají sériového či sérioparalelního zapojení jednotlivých článků. Balancéry vyrovnávají hodnotu napětí jednotlivých článků, tak aby bylo stejné na každém článku. Díky této technice lze využít větší část kapacity článku. Jednotlivé články mají z výroby různé hodnoty kapacity, i přestože jsou ze stejné šarže. Dále je nutné uvažovat degradaci celkové kapacity vlivem provozního cyklování. Vzhledem k těmto odchýlkám dochází k nerovnoměrnému nabíjení či vybíjení článků. Články s nižší kapacitou jsou rychleji nabity či vybity. V případě, že napětí na některém článku z akumulátoru překročí maximální či minimální provozní napětí, tak BMS musí zajistit odpojení akumulátoru od zátěže či nabíjecí stanice. Snahou balančních obvodů je redistribuce energie z článků, které mají přebytek energie do článků, kde tato energie chybí. Existují dvě základní metody balancování článků. **Pasivní balancování** je založeno na připínání paralelních balančních rezistorů k jednotlivým článkům. Přebytečná energie je mařena na rezistorech a dochází tak k vyrovnání napětí jednotlivých článků. Tento princip je velmi jednoduchý a robustní. Oproti aktivnímu balancování je využita nižší část dostupné kapacity jednotlivých článků. Pro realizaci BMS systému v této diplomové práci je využito právě pasivní balancování z důvodu velkého počtu sériově zapojených článků. **Aktivní balancování** je založeno na pulzních DC - DC měničích. Jednotlivé měniče zajišťují přenos energie mezi články. Aktivní balancéry jsou značně složitější oproti pasivním a zároveň je vyšší i jejich cena. Tyto balancéry mohou být náchylnější na poruchy. Existuje celá řada metod a algoritmů balancování sériově řazených článků. Tato problematika je velice komplexní a přesahuje rozsah této diplomové práce. Detailní popis metod je proveden v disertační práci [29]. Následující obrázek vyobrazuje principy balancování.



Obr. 13 Princip aktivního a pasivního balancování (převzato z [22])

## 4 Rozbor použitých technologií a komponent

V této kapitole jsou popsány hlavní technologie a komponenty, které jsou využity pro konstrukci trakční baterie pro motokáru (čtyřkolku) a pro systém správy baterie BMS. Tato kapitola obsahuje výčet hlavních parametrů a katalogových zapojení. Použitá detailní zapojení jsou pak uvedena v kapitolách věnujících se návrhu a v přílohách.

### 4.1 Parametry vybraného li-ion článku INR21700-40T

Pro trakční baterii motokáry byl zvolen nabíjitelný cylindrický li-ion článek INR21700-40T od firmy Samsung, který je určený pro elektrické nářadí a elektromobilitu. Z těchto jednotlivých článků je složena trakční baterie.

Tabulka 1 Jmenovité parametry článku INR21700-40T (dostupné z [23])

Parametr	Hodnota	Specifikace
Standardní vybíjecí kapacita	Min. 4000 mAh	$I_C = 0,2 C$ (800 mA), $U_{cut-off} = 2,5 V$
Jmenovitá vybíjecí kapacita	Min. 3900 mAh	$I_C = 10 A$ , $U_{cut-off} = 2,5 V$
Jmenovité napětí	3,6 V	
Standardní nabíjení	CC - CV, 2 A, 4,2 V	$I_{cut-off} = 200 mA$
Jmenovité nabíjení	CC - CV, 6 A, 4,2 V	$I_{cut-off} = 100 mA$
Standardní nabíjecí čas	180 min	$I_{cut-off} = 200 mA$
Jmenovitý nabíjecí čas	70 min	$I_{cut-off} = 100 mA$
Maximální vybíjecí proud	45 A	Teplota nesmí nepřekročit <b>80 °C</b> (povrch článku)
Kontinuální vybíjecí proud	35 A	V rámci <b>provozní vybíjecí teploty</b>
Minimální pracovní napětí	2,5 V	Konec vybíjení
Garance kapacity	$C \geq 2400 mA$	Po 250 cyklech
Hustota energie	205 Wh/kg	
Hmotnost článku	Max. 70g	
Výška článku	Max. 70 mm	
Průměr článku	Max. 21,22 mm	
Provozní teplota nabíjení	0 – 45 °C	Uvažována teplota v okolí článku
Provozní teplota vybíjení	-20 – 60 °C	Uvažována teplota v okolí článku

#### 4.1.1 Rozsah pracovního napětí a využitelná kapacita

Zmíněný článek má pracovní rozsah napětí od **2,5 do 4,2 V**. Článek je nabíjen v režimech konstantního proudu (CC) a konstantního napětí (CV). Nabíjecí stanice musí být nastavena tak, aby v žádném případě nepřekračovala **maximální nabíjecí napětí 4,2 V** a zároveň nebyl překročen maximální nabíjecí proud. V pohonářských aplikacích mohou být články zatěžovány vysokými vybíjecími proudy, proto je doporučeno nevybíjet článek **pod 3 V**.

Tato hodnota bude dodržena i pro naši trakční baterii motokáry. S tímto sníženým rozsahem souvisí i snížená využitelná kapacita článku. Přibližným výpočtem byla stanovena **využitelná kapacita na 3600 mAh**, v pracovním rozsahu **napětí od 3 do 4,2 V**. Tato využitelná kapacita odpovídá přibližně 90 % z původní jmenovité kapacity. Využitelná kapacita byla stanovena na základě údajů z datasheetu výrobce [23].

#### 4.1.2 Pracovní proudy

Článek by měl být zatěžován maximálně nejvyšším možným proudem, který je uveden v katalogovém listu výrobce článku. Maximální přípustný proud souvisí s oteplením článku. Tento článek má maximální kontinuální vybíjecí proud 35 A, v pracovním teplotním rozsahu -20 až 60 °C. Maximální přípustný proud článkem je 45 A za podmínky, že teplota obalu článku nepřekročí 80 °C. V případě překročení teploty je nutné článek ihned odpojit od zátěže. Z parametrů pohonu motokáry vyplývá, že proud článkem při **jmenovitém výkonu motokáry (75 kW)** bude přibližně **23 A**. Článek má tedy dostatečnou proudovou rezervu. Při maximálním výkonovém přetížení motokáry (140 kW), které bude trvat pár vteřin, tak bude maximální proud článkem přibližně 45 A. Při krátkém přetížení nehrozí překročení teploty 80 °C.

#### 4.2 Popis komponent řídicí desky Slave BMS

Řídicí deska Slave BMS je jednou ze dvou řídicích desek celého systému správy baterií (BMS). Slave BMS měří napětí jednotlivých článků, balancuje články, měří teploty a je propojitelná pomocí komunikační sběrnice Daisy chain s dalšími Slave BMS či s jednou hlavní řídicí deskou Master BMS. Naměřená data si jednotlivé řídicí jednotky předávají mezi sebou. Finální řídicí deska Master BMS není předmětem této diplomové práce. Pro účely ladění a vyčítání změřených fyzikálních veličin byla v této práci navržena řídicí deska Master komunikační BMS.

Srdce Slave BMS je tvořeno dvěma integrovanými **obvody BQ76L455A-Q1** od firmy Texas Instruments, které jsou určeny pro balancování a monitorování li-ion článků. Tyto obvody obstarávají všechny zmíněné potřebné funkce. Dále se na Slave BMS nacházejí dva integrované **obvody SN74LV4051A-Q1** opět od firmy Texas Instruments. Obvod tvoří osmi kanálový analogový multiplexor / demultiplexor, který rozšiřuje možnost připojení dalších teplotních čidel. Zbytek komponent Slave BMS tvoří konektory, tranzistory, diody a pasivní součástky, které není nutné více popisovat. Výběr a



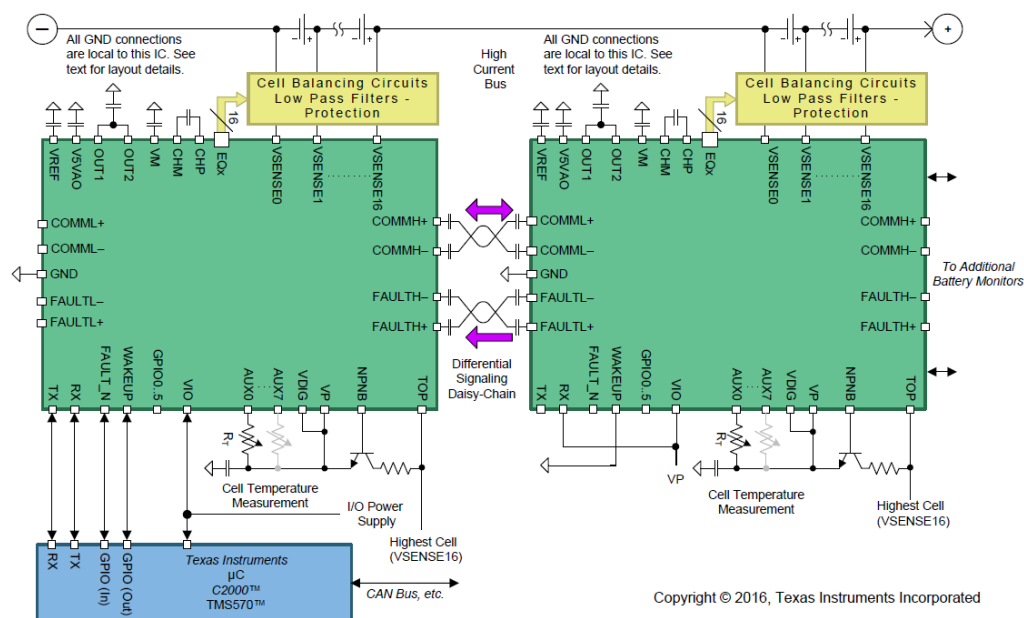
dimenzování hodnot některých součástek je popsán v kapitolách zabývajících se návrhem a realizací.

Dva zmíněné integrované obvody jsou detailně popsány v následujících kapitolách.

#### 4.2.1 Popis integrovaného obvodu BQ76L455A-Q1

Integrovaný obvod BQ76L455A-Q1 slouží pro monitorování, balancování a ochranu až pro 16 bateriových článků. Obvod je určený pro aplikace v automobilu. Obvod je vybaven vysokorychlostní diferenciální komunikační sběrnici Daisy chain, která odděluje vysoké stejnosměrné napětí pomocí izolačních kondenzátorů. Sběrnice umožňuje propojit až 16 těchto integrovaných obvodů do série, díky čemuž lze obvod využít jako součást BMS pro velké trakční baterie. Dále je obvod vybaven vysokorychlostní sběrnici UART.

Integrovaný obvod monitoruje a detekuje několik poruchových stavů např.: přepětí článku, podpětí článku, přehřívání článku a komunikační poruchy. Obvod je vybaven šesti GPIO piny a osmi analogovými pro měření teploty, jejichž funkci lze naprogramovat a přizpůsobit požadavkům BMS. Funkce balancování je založena na pasivní metodě, tedy k obvodu lze připojit tranzistory typu N-mosfet, které připínají balanční rezistory. Následující obrázek zobrazuje principiální zapojení integrovaného obvodu. [24]



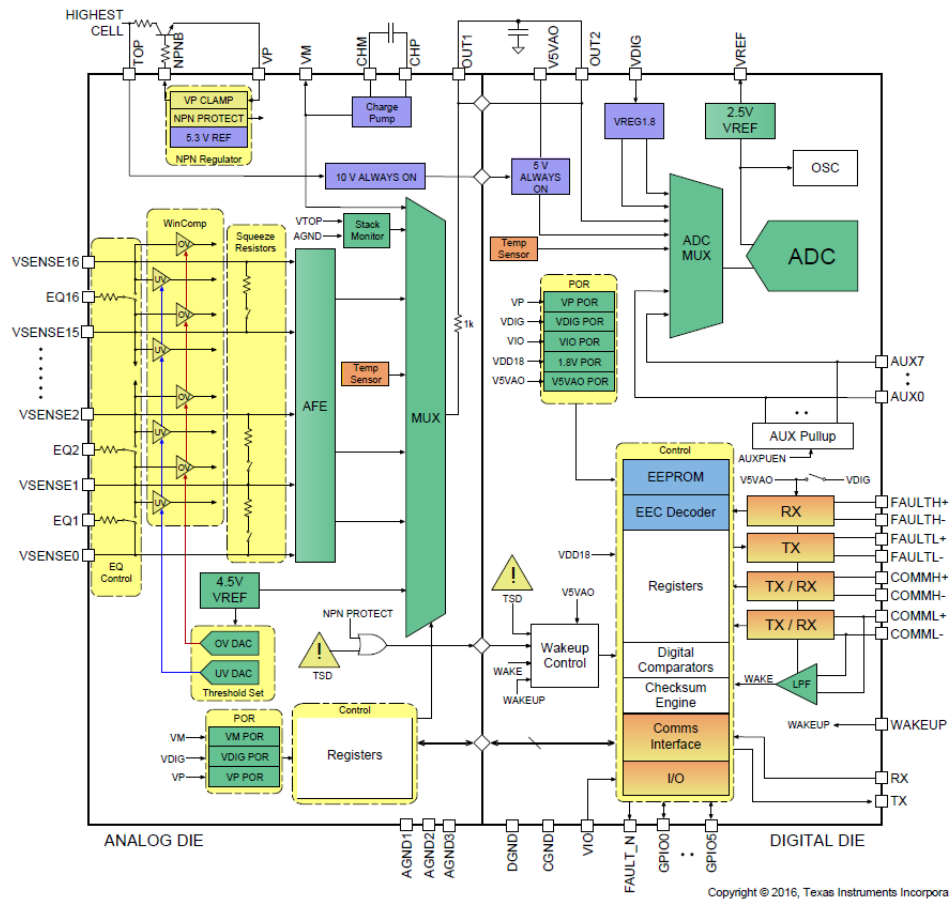
Obr. 14 Zjednodušené principiální zapojení BQ76L455A-Q1 (převzato z [24])

Přehled hlavních funkcí a parametrů obvodu BQ76L455A-Q1:

- monitorování a pasivní balancování pro 6 až 16 článků;

- výkonný 14-bitový analogově – digitální převodník (ADC) s interní referencí;
- všechny články jsou změřeny a převedeny do digitální podoby za pouze 2,4 ms;
- osm analogových vstupů pro měření teploty a ostatní senzory se vstupním napětíovým rozsahem 0 až 5V;
- interní přesná reference;
- integrovaná ochrana proti přepětí a podpětí;
- komunikační sběrnice UART s rychlostí až 1 Mb/s;
- možnost propojení až šestnácti BQ76L455A-Q1 do série pomocí sběrnice Daisy chain;
- pasivní balancování pomocí externích N-mosfetů;
- podpora aktivního balancování s integrovaným obvodem EMB1428Q/EMB1499Q;
- vnitřní ověření funkčnosti;
- pracovní teplotní rozsah -40 °C až 105 °C;
- určeno pro EV, HEV, PHEV, 48 V systémy, UPS, E-Bikes.

Obvod BQ76L455A-Q1 lze zapojit několika způsoby. Veškerá doporučená zapojení lze najít v datasheetu výrobce [24]. V této kapitole je dále popsána funkce integrovaného obvodu, která vychází z blokového schématu, rovněž z datasheetu výrobce. Dále je pak uvedeno zapojení integrovaného obvodu, ze kterého vychází zapojení pro řídicí jednotku Slave BMS. Finální zapojení, které je využito pro Slave BMS je uvedeno v kapitolách návrhu a realizace a přílohách této diplomové práce.



Obr. 15 Blokové schéma vnitřní struktury BQ76L455A-Q1 (převzato z [24])

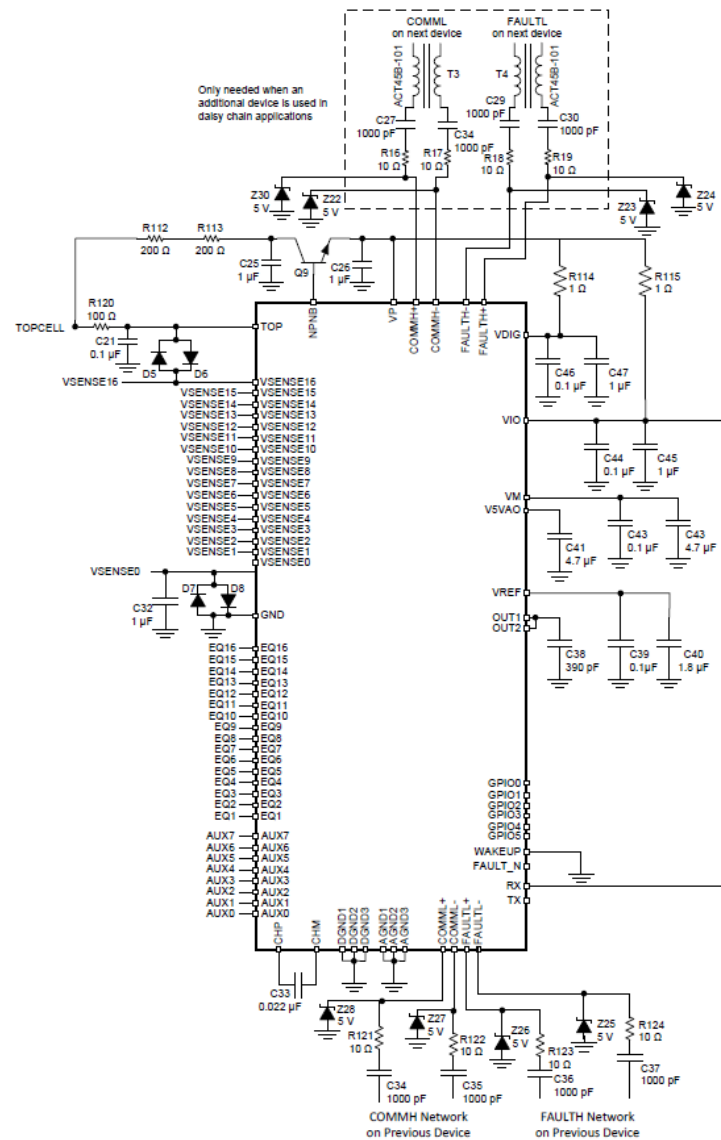
Uvedené blokové schéma vnitřní struktury vyobrazuje jednoznačně funkci obvodu. Napájení integrovaného obvodu (dále jen IC) je zajištěno z nejvyššího článku akumulátoru či příslušného segmentu akumulátoru. Napětí z nejvyššího článku je přivedeno do bipolárního tranzistoru, který pracuje v aktivním režimu a stabilizuje napájecí napětí na hodnotu 5,3 V. IC si vytváří svojí interní referenci 5,3 V, díky které udržuje stabilní napájecí napětí pro IC. Tranzistor je ovládán pomocí pinu NPNB a pin VP slouží jako zpětná vazba pro lineární stabilizátor ve formě tranzistoru. Veškerá ostatní napětí nutná pro svůj samostatný provoz si IC generuje sám vnitřně. Uvnitř IC jsou interní stabilizátory 10 V always ON, 5 V always ON, VREG 1,8 V a nábojová pumpa. Tyto stabilizátory napájejí vnitřní obvody IC. Nábojová pumpa má vyvedené napětí -5 V na pin VM, který je doplněn o blokovací kondenzátory. Záporné napětí -5 V slouží pro napájení vnitřních obvodů. Dále nábojová pumpa potřebuje blokovací kondenzátor mezi piny CHM a CHP. Napájecí napětí VDIG pro digitální obvody IO je obvykle přiváděno z pinu VP. Pro referenci AD převodníku je využita interní reference 2,5 V, která je filtrovaná pomocí externího blokovacího kondenzátoru na pinu VREF. Napájecí napětí VIO pro komunikační

obvody IO lze vzít z externího zdroje či z pinu VP. Volba zdroje závisí na konfiguraci IO. Poslední napětí je V5VAO, které je vyvedeno na stejnojmenný pin, je blokováno externími kondenzátory a lze ho využít pro napájení externích obvodů. Veškeré blokovací kondenzátory musí být umístěny co nejbližší k samotnému IC.

V levé části funkcionálního schématu se nachází 17 analogových vstupů pro měření jednotlivých napětí, tyto napětí jsou přes AFE a MUX přiváděna do AD převodníku. Do AD převodníku jsou také přivedena napětí z teplotních senzorů. Změřená napětí jednotlivých článků jsou porovnávána a vyhodnocována pomocí komparátorů přepětí a podpětí. Dále je IC vybaven šestnácti digitálními výstupy, které slouží pro ovládání balančních tranzistorů.

IC je vybaven vestavěnou EEPROM pamětí, která obsahuje konfiguraci a nastavení IC. Dále IC obsahuje pin WAKEUP, pomocí něhož lze přivést obvod do režimu spánku (nízká spotřeba energie). IC obsahuje dvě komunikační sběrnice. Pro komunikaci s vyšší vrstvou lze využít sběrnici UART. Pro komunikaci s více sériově zapojenými IC lze využít komunikaci Daisy chain. IC obsahuje 8 diferenciálních vstupů. Čtyři jsou určeny pro komunikaci směrem nahoru a čtyři směrem dolů. Dva páry COMM jsou určeny pro standardní komunikaci a dva páry FAULT pro případné poruchové stavy. Dále IC obsahuje digitální výstup FAULT\_N, který signalizuje poruchové stavy. IC je také vybaven šesti GPIO, jejichž funkci lze naprogramovat. [24]

Následující schéma zobrazuje standardní zapojení IC, které vyplývá z datasheetu. Finální schéma využití pro Slave BMS je pak popsáno dále.



Obr. 16 Typické zapojení BQ76L455A-Q1 (převzato z [24])

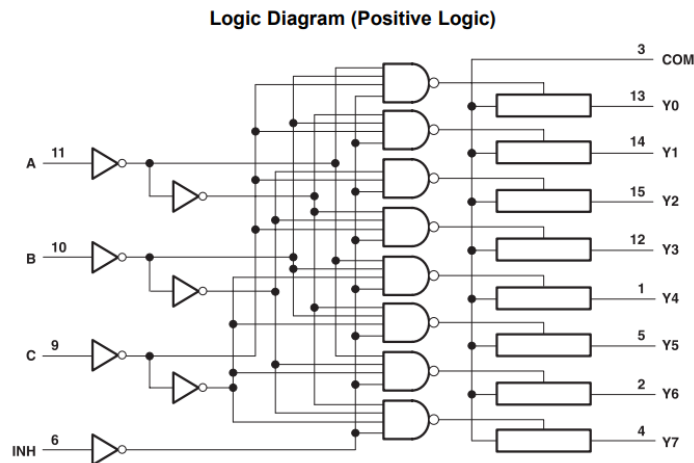
#### 4.2.2 Popis integrovaného obvodu SN74LV4051A-Q1

Integrovaný obvod SN74LV4051A-Q1 je osmi kanálový analogový multiplexor/demultiplexor. Obsahuje 8 analogových vstupů a 1 analogový výstup. Dále obvod obsahuje 3 digitální vstupy, pomocí nichž se vybírá aktivní vstup. Přehled hlavních funkcí a parametrů obvodu SN74LV4051A-Q1:

- určený pro aplikace v automobilu;
- pracovní teplotní rozsah od  $-40$  do  $120$  °C;
- pracovní napěťový rozsah (napájecí napětí) od 2 V do 5,5 V;
- vysoký poměr On – Off Output – Voltage;
- nízká úroveň přeslechů mezi elektronickými spínači;

- malé vstupní proudy. [25]

Následující obrázek vyobrazuje ekvivalentní vnitřní strukturu integrovaného obvodu. Obvod je tvořen hradly a elektronickými spínači. Hradla slouží pro výběr vstupu, který se připojí k výstupu. Obvod obsahuje jeden logický vstup, kterým lze blokovat výstup. Detailní zapojení multiplexoru je uvedeno v kapitolách návrhu a realizace a v přílohách diplomové práce.



Obr. 17 Principiální zapojení SN74LN4051A-Q1 (převzato z [25])

INPUTS				ON CHANNEL
INH	C	B	A	
L	L	L	L	Y0
L	L	L	H	Y1
L	L	H	L	Y2
L	L	H	H	Y3
L	H	L	L	Y4
L	H	L	H	Y5
L	H	H	L	Y6
L	H	H	H	Y7
H	X	X	X	None

Obr. 18 Pravdivostní tabulka SN74LN4051A-Q1 (převzato z [25])

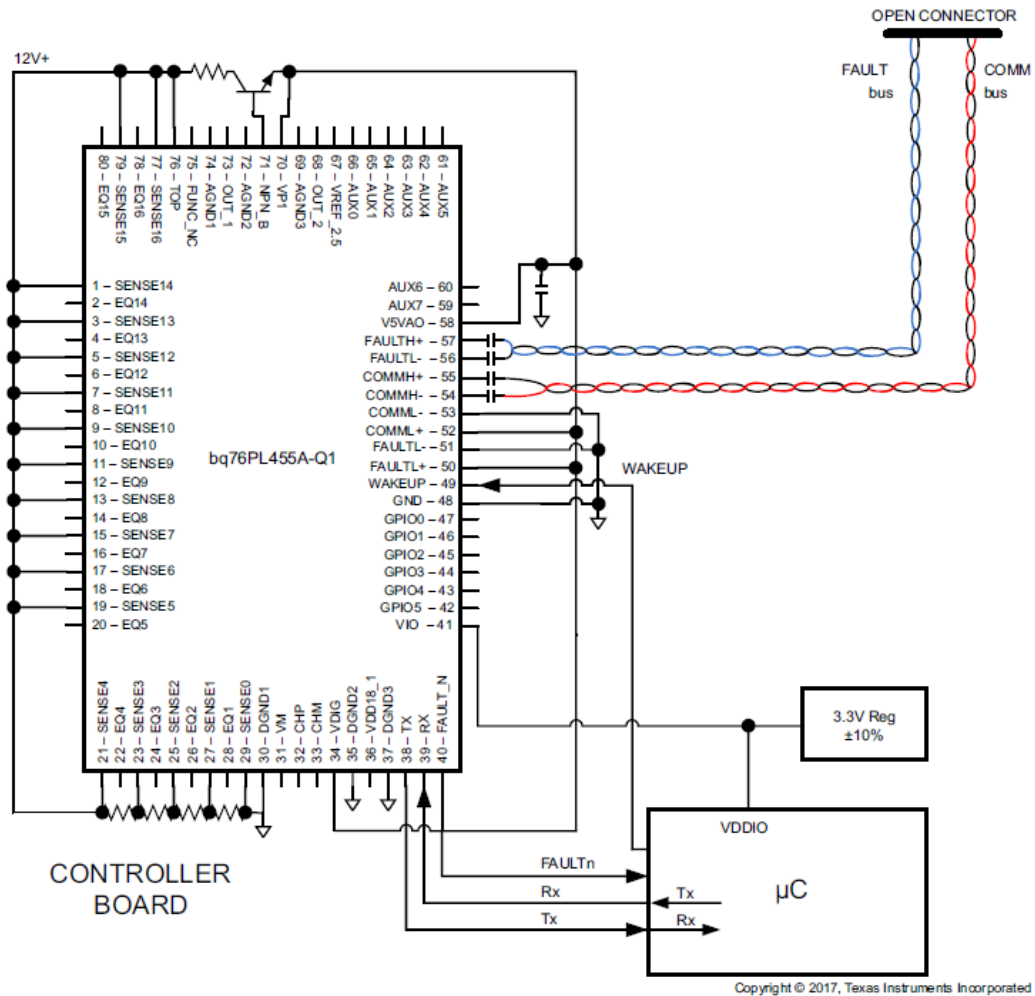
### 4.3 Popis komponent řídicí desky Master komunikační BMS

Master komunikační BMS je druhá řídicí deska systému správy baterií. Tato řídicí deska není finální Master deska, která bude využita v bateriovém kontejneru motokáry: Finální

Master BMS bude předmětem následujících diplomových prací. Master komunikační BMS bude využíván pro servisní účely, konfiguraci a ladění Slave BMS. Celý systém Master komunikační BMS je tvořen dvěma plošnými spoji. Základní desku tvoří CANARS externí modul, jehož autorem je Ing. Tomáš Košan, Ph.D. Tento modul je vybaven rozhraním USB pro propojení s počítačem, dále je vybaven komunikační sběrnici RS485, CAN bus a UART. Srdce tohoto modulu tvoří 32-bitový mikrokontrolér TM4C123GH6PM. Druhým plošným spojem je samotný Master komunikační BMS, který je propojený pomocí header konektorů na CANARS externí modul. Oba plošné spoje spolu komunikují pomocí rozhraní UART. Plošný spoj Master komunikační BMS tvoří DC - DC měnič napětí z 5 na 12 V a integrovaný obvod BQ76L455A-Q1. IC BQ76L455A-Q1 je zapojen jako bridge. Skutečné zapojení využitě v této diplomové je uvedeno v dalších kapitolách. Firma Texas Instruments poskytuje počítačový software, pomocí něhož lze vyčítat změřená data integrovaným obvodem BQ76L455A-Q1. Případně si lze naprogramovat svůj počítačový software pro vyčítání dat.

#### **4.3.1 Popis zapojení BQ76L455A-Q1 v konfiguraci bridge**

Pro řídicí desku Master komunikační BMS je IC BQ76L455A-Q1 zapojen jako bridge. Díky tomuto zapojení lze bezpečně propojit Master komunikační BMS s podřízenými Slave BMS. Pro komunikaci mezi jednotlivými BQ76L455A-Q1 je opět využita interní komunikační sběrnice Daisy chain. Sběrnice je doplněna o kondenzátory, které oddělují stejnosměrné napětí mezi jednotlivými BQ76L455A-Q1. Pokud dojde k poruše některého BQ76L455A-Q1 z řetězce, tak kondenzátory oddělí nebezpečné vysoké napětí a nedojde tak k úrazu. Kondenzátory jsou v této aplikaci dimenzovány na stejnosměrné napětí 1000 V. Díky zapojení BQ76L455A-Q1 jako bridge, tak lze Master komunikační BMS napájet z externího zdroje, který je galvanicky oddělen od trakční baterie. Komunikační sběrnice je také oddělena od trakční baterie. IC BQ76L455A-Q1 vyžaduje minimální napájecí napětí 12 V, proto je na řídicí desce implementován DC – DC měnič. Měnič je napájen ze sběrnice USB. Zapojení IC BQ76L455A-Q1 v konfiguraci bridge vychází ze standardního zapojení s tím rozdílem, že většina měřících napěťových vstupů je mezi sebou propojena a nejsou nijak využity. Zbytek zapojení je velmi podobný standardnímu zapojení. Pomocí sběrnice UART je BQ76L455A-Q1 propojeno s mikrokontrolérem TM4C123GH6PM. Následující obrázek vyobrazuje obecné zapojení IC BQ76L455A-Q1 v konfiguraci bridge s řídicím mikrokontrolérem.



Obr. 19: Zapojení BQ76L455A-Q1 v konfiguraci bridge (převzato z [26])

Skutečné zapojení, které je využito v této diplomové práci, tak je detailně popsáno v kapitolách návrhu a v přílohách této diplomové práce.



## 5 Návrh a realizace elektrické a mechanické konstrukce trakční baterie

V této kapitole je popsán návrh a realizace elektrické a mechanické konstrukce trakční baterie, a zároveň je zde popsáno vzájemné propojení řídicích desek Slave BMS a Master BMS. Samotná konstrukce BMS je popsána v další kapitole. Jak již bylo zmíněno, tato diplomová práce se nezabývá konstrukcí finální Master BMS, ale konstrukcí servisní řídicí desky Master komunikační BMS.

Finální elektrické zapojení je navrženo dle parametrů ze zadání. Dvě sériově řazené baterie mají mít celkové **jmenovité napětí 450 V**, celkovou **energii 14 kWh** a **jmenovitý vybíjecí proud (kontinuální) 300 A**.

Jedna trakční baterie je složena ze tří bateriových segmentů. Každý bateriový segment má 189 li-ion článků INR21700-40T, článek byl detailně popsán v kapitole 4.1. Segment je v konfiguraci 21s 9p. Výslednou energii segmentu ovlivňuje sériové i paralelní zapojení jednotlivých článků. Tři zmíněné segmenty budou uzavřeny v bateriovém kontejneru, který tvoří jednu samostatnou trakční baterii. Pro napájení pohonu elektrické motokáry budou využity právě tyto dvě trakční baterie, které budou zapojeny do série. Pro elektrickou čtyřkolku bude využita jedna trakční baterie.

### 5.1 Návrh elektrické části trakční baterie

Jak již bylo zmíněno, pro napájení pohonu elektrické motokáry jsou využity dvě navržené trakční baterie, které jsou sériově zapojeny. Parametry baterie vycházejí z parametrů pohonu, motorů a měničů motokáry. Elektrická motokára je vyzbrojena dvěma motory se jmenovitým mechanickým výkonem 35 kW, čili jmenovitý výkon motokáry je **70 kW**. Dále je třeba počítat s přetížením pohonu. Pro tuto aplikaci je přetížení stanoveno na 100 kW a špičkové přetížení na 140 kW. Při zapojení dvou trakčních baterií do série, získáváme **jmenovité napětí 454 V**. Pro stanovení proudů bateriemi je potřeba znát mechanický výkon pohonu, účinnost motorů, účinnost měničů a nejnižší možné napájecí napětí baterií. Rovnice (5.1) popisuje výpočet minimálního provozního napětí dvou sériově zapojených baterií.

$$U_{BAT\_min} = n_{seg} \cdot n_{\text{čl\_seg}} \cdot n_{tr\_bat} \cdot U_{\text{čl\_min}} = 3 \cdot 21 \cdot 2 \cdot 2,9 = 365 \text{ V} \quad (5.1)$$

kde  $U_{BAT\_min}$  je minimální provozní napětí trakčních baterií,  $n_{seg}$  je počet segmentů jedné trakční baterie,  $n_{\text{čl\_seg}}$  počet sériově zapojených článků v jednom segmentu,  $n_{tr\_bat}$  je počet sériově zapojených trakčních baterií a  $U_{\text{čl\_min}}$  je minimální pracovní napětí jednoho článku. Pro výpočet proudu trakčními bateriemi při jmenovitém výkonu je využita rovnice (5.2).

$$I_{BAT\_max} = \frac{P_{C\_max}}{\eta_{mot} \cdot \eta_{conv} \cdot U_{BAT\_min}} = \frac{70\,000}{0,95 \cdot 0,98 \cdot 365} = 206 \text{ A} \quad (5.2)$$

kde  $I_{BAT\_max}$  je provozní proud trakčních baterií při daném výkonu,  $P_{C\_max}$  je maximální mechanický výkon v daném provozním stavu,  $\eta_{mot}$  je účinnost motorů,  $\eta_{conv}$  je účinnost měničů a  $U_{BAT\_min}$  je minimální pracovní napětí sériově zapojených trakčních baterií.

Na základě rovnic (5.1) a (5.2) je stanovena následující tabulka, která určuje proudy při daném mechanickém výkonu motokáry. Přetížení motorů trvá maximálně několik sekund.

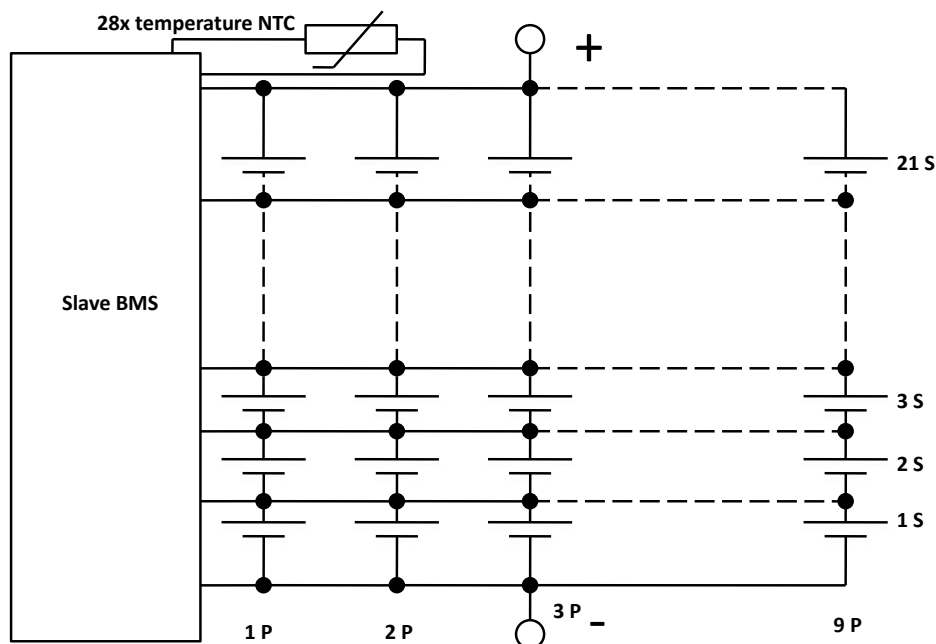
Tabulka 2 Provozní proudy trakční baterií při daných provozních mechanických výkonech motokáry

Mechanický výkon (kW)	Proud bateriemi (A)	Specifikace
70	206	jmenovité zatížení
100	294	maximální zatížení
140	412	špičkové zatížení

S ohledem na tyto stanovené parametry je třeba dimenzovat parametry trakčních baterií. Články baterie musí zvládat takové proudy, které vyplývají na základě výkonového zatížení motokáry a konfigurace zapojení článků.

### 5.1.1 Zapojení segmentu

Jeden bateriový segment trakční baterie je zapojen v konfiguraci 21s 9p. Segment obsahuje 189 kusů bateriových článků li-ion INR21700-40T. Z toho zapojení vyplývá, že **jmenovité napětí segmentu je 76 V** stejnosměrných. Využitelná kapacita segmentu vyplývá z počtu paralelních větví segmentu a přibližně stanovené využitelné kapacity jednoho článku (3,6 Ah), tudíž výsledná **kapacita je 32,4 Ah**. Součinem výsledné kapacity a jmenovitého napětí získáme energii segmentu. Výsledná energie segmentu je přibližně **2,45 kWh**. Každý segment obsahuje vlastní Slave BMS, která je napájena přímo ze segmentu. Slave BMS umožňuje měřit až **28 teplot** různých článků v rámci segmentu pomocí NTC termistorů. Jednotlivé segmenty lze propojovat do série. Slave BMS je vybavena komunikací, díky které si jednotlivé segmenty mohou předávat měřená data a předávat je vyšší vrstvě (Master BMS). Následující blokové schéma vyobrazuje elektrické zapojení článků v segmentu a propojení se Slave BMS.



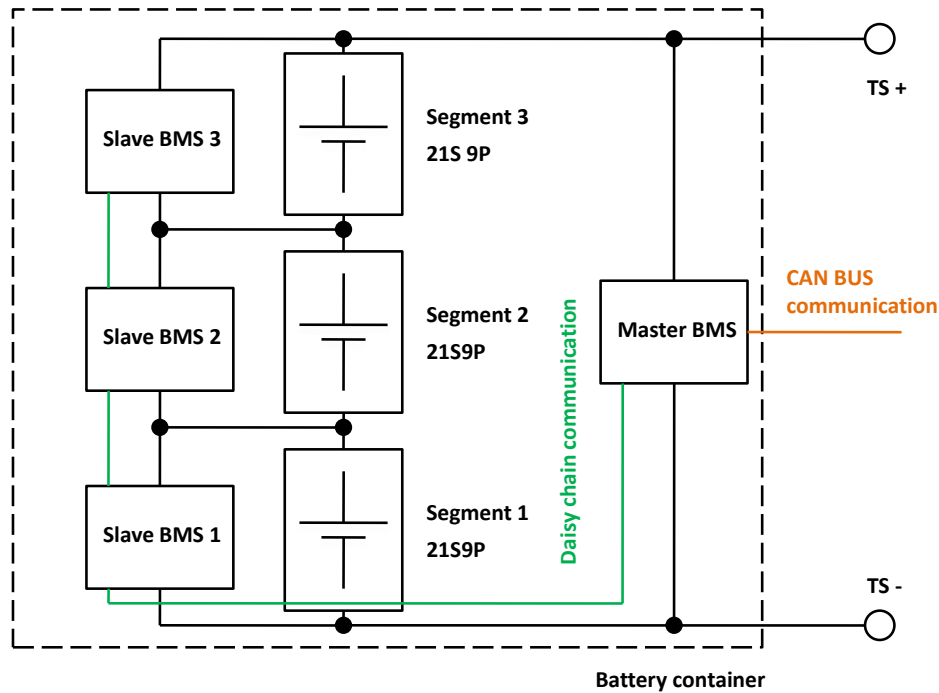
Obr. 20 Blokové zapojení segmentu v konfiguraci 21s 9p se Slave BMS

### 5.1.2 Provozní zapojení trakční baterie

Jedna trakční baterie (trakční kontejner) je složena ze tří bateriových segmentů, které jsou zapojeny sériově. Baterie obsahuje **567** li-ion článků, tudíž baterie je v konfiguraci **63s 9p**. Jmenovité napětí této trakční baterie je **227 V**. Využitelná kapacita je opět **32,4 Ah**, jelikož baterie obsahuje stejný počet paralelních větví. Výsledná energie je oproti jednomu segmentu trojnásobně vyšší, tudíž přibližně **7,3 kWh**. Každý segment je vybaven svojí vlastní Slave BMS, která se stará o příslušný segment. Slave BMS jsou mezi sebou propojeny pomocí komunikační sběrnice Daisy chain a předávají si tak změřené hodnoty. Nejnižší Slave BMS na Obr. 21 je označen jako Slave BMS připojen pomocí sběrnice Daisy chain k nadřazené Master BMS. Řídicí deska Master BMS je napájena z celkového napájecího napětí trakční baterie. Tato řídicí deska sbírá naměřená data, ovládá bezpečností periferie (AIR) a zároveň je vybavena rozhraním CAN bus, které slouží pro komunikaci s vyšší vrstvou trakčního systému. Jak již bylo zmíněno, finální Master BMS není předmětem této diplomové práce a bude teprve vyvíjena. Dále je třeba zmínit, že Obr. 21 nevyobrazuje propojení Master BMS s ostatními periferiemi, jelikož ještě neexistuje přesná specifikace periferií. Pro účely servisního ladění a programování Slave BMS je v této práci navržena Master komunikační BMS. Propojení Master komunikační Slave s bateriovým kontejnerem je detailně popsáno v podkapitole 5.1.3.

Díky této konfiguraci Slave BMS neustále měří teploty článků a vybalancovává napětí jednotlivých článků. V případě, že nastane poruchový stav (přehřátí, přebití, podbití

článků), tak Slave BMS okamžitě informuje Master BMS o nastalé poruše a ta okamžitě odpojí akumulátorový kontejner od nabíjecí stanice či zátěže a informuje vyšší vrstvu trakčního systému pomocí rozhraní CAN bus. Díky této konfiguraci je akumulátorový kontejner neustále pod kontrolou a lze tak bezpečně provozovat. Následující obrázek vyobrazuje propojení jednotlivých prvků v akumulátorovém kontejneru. Na tomto schematickém zapojení nejsou zakresleny ochranné prvky (pojistky, AIRy, IMD).



Obr. 21 Schematické zapojení trakční baterie (kontejneru)

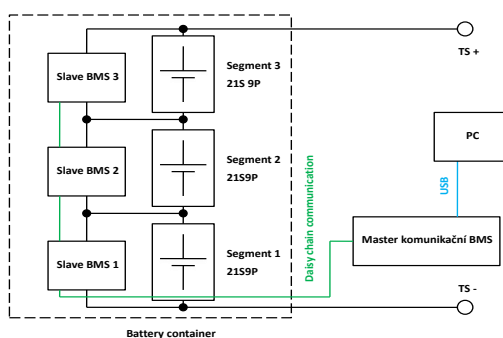
Následující tabulka popisuje parametry jedné trakční baterie. Pro napájení trakčního systému elektrické motokáry jsou využity právě dvě tyto trakční baterie, které jsou zapojeny do série. Pro napájení elektrické čtyřkolky je využita právě jedna tato trakční baterie.

Tabulka 3 Parametry jedné trakční baterie (kontejneru)

Parametr	Hodnota
Typ článků	INR21700-40T
Zapojení baterie	63s 9p, tj. 567 článků
Kapacita baterie	32,4 Ah
Energie baterie	7,3 kWh
Minimální napětí při vybití	183 V
Jmenovité napětí	227 V
Maximální napětí při nabití	265 V
Kontinuální vybíjecí proud	315 A
Maximální vybíjecí proud (maximální teplota čl. 80 °C)	405 A
Jmenovitý nabíjecí proud	54 A
Odhadovaná hmotnost	45 kg
Odhadovaný objem	44 l

### 5.1.3 Servisní zapojení trakční baterie

Pro účely ladění, programování Slave BMS a vyčítání změřených dat je využita řídicí deska Master komunikační BMS. Tato deska je připojena k nejnižšímu Slave BMS 1 pomocí komunikační sběrnice Daisy chain. Vzhledem ke konstrukci řídicí desky je možné desku bezpečně připojit pomocí rozhraní USB k počítači. Master komunikační BMS je napájena z rozhraní USB: Pomocí příslušného počítačového softwaru lze komunikovat s řídicí deskou Master komunikační BMS. V případě, že komunikace Daisy chain nefunguje, tak je možné propojit záporný pól baterie se zemnicí svorkou řídicí desky Master komunikační BMS. Záporný pól baterie je oddělen od fyzické země (GND) řídicí desky pomocí Cy bezpečnostního kondenzátoru. Toto oddělení je blíže popsáno v kapitolách konstrukce řídicí desky Master komunikační BMS. Následující obrázek vyobrazuje servisní zapojení trakční baterie.

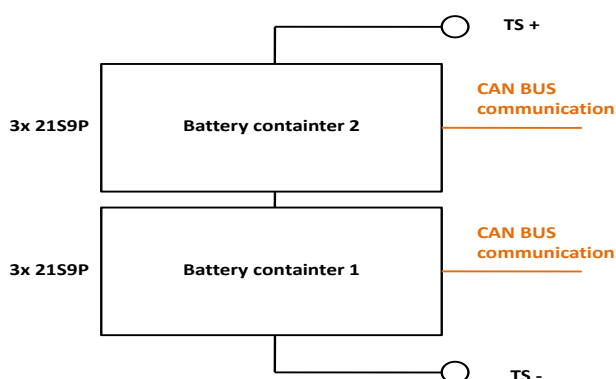


Obr. 22 Schematické zapojení servisního zapojení baterie (kontejneru)

### 5.1.4 Zapojení trakčních baterií (kontejnerů)

Jak již bylo zmíněno, pro napájení trakčního systému elektrické motokáry jsou využity dvě trakční baterie, které jsou zapojeny do série. Výsledné spojení tak tvoří konfiguraci

**126s 9p.** Jmenovité napětí těchto dvou sériově propojených baterií je **454 V**. Výsledná energie je téměř **14,6 kWh**. Každý trakční kontejner má své rozhraní CAN bus, pomocí něhož komunikuje s nadstaveným trakčním systémem. Následující obrázek vyobrazuje propojení trakčních baterií (kontejnerů).



Obr. 23 Schematické zapojení trakčních baterií (kontejnerů)

Následující tabulka popisuje parametry dvou sériově zapojených trakčních baterií. Pro správný provoz pohonu motokáry musí parametry trakčních baterií vyhovovat parametrům trakčního pohonu, které jsou uvedeny v Tabulka 2.

Tabulka 4 Parametry dvou sériově zapojených trakčních baterií (kontejnerů)

Parametr	Hodnota
Typ článků	INR21700-40T
Zapojení baterie	126s 9p, tj. 1134 článků
Kapacita baterie	32,4 Ah
Energie baterie	14,6 kWh
Minimální napětí při vybití	366 V
Jmenovité napětí	454 V
Maximální napětí při nabití	530 V
Kontinuální vybíjecí proud	315 A
Maximální vybíjecí proud (maximální teplota čl. 80 °C)	405 A
Jmenovitý nabíjecí proud	54 A
Odhadovaná hmotnost	90 kg
Odhadovaný objem	88 l

Při jmenovitém zatížení, tedy mechanickém zatížení **70 kW** teče bateriemi maximální proud **206 A**. Kontinuální vybíjecí proud baterií je 315 A. Proudová rezerva baterií při jmenovitém výkonu pohonu je **109 A**. Při **maximálním výkonovém zatížení (100 kW)**

teče bateriemi maximální proud **294 A**, tudíž rezerva baterie je 21 A. Při špičkovém výkonu dosahuje proud bateriemi maximální hodnoty 412 A. Při tomto zatížení dochází k překročení maximálního proudu bateriemi. Toto překročení lze tolerovat, jelikož špičkové přetížení trvá řádově jednotky sekund. V případě, že by teplota článku překročila teplotu 80 °C, tak BMS provede odpojení zátěže. Na základě těchto hodnot proudů lze stanovit, že trakční baterie jsou dimenzované s dostatečnou proudovou rezervou.

## **5.2 Návrh mechanické části trakční baterie**

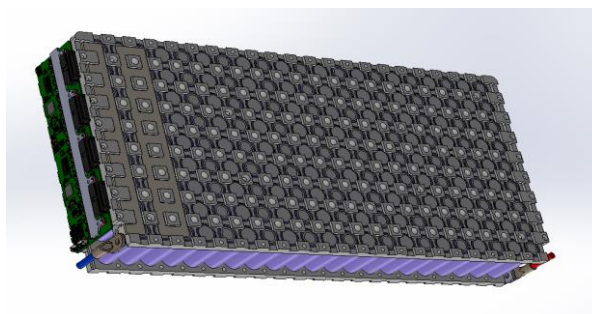
V této podkapitole je uveden velmi stručný popis mechanické konstrukce trakční baterie. Současné mechanické uspořádání a některé prvky nemusejí odpovídat finální verzi, jelikož stále probíhá vývoj. Při zadání této diplomové práce již byla navržena značná část mechanické konstrukce. V této práci byly řešeny drobné konstrukční prvky. Bylo nutné vymyslet uchycení řídicí desky Slave BMS na bateriový segment. Dále bylo nutné zkonstruovat hliníkový chladič na Slave BMS, který bude zajišťovat dostatečný odvod tepla z balančních rezistorů. Detailní popis těchto prvků je proveden v kapitole návrhu a realizace systému správy baterií.

Konstrukční řešení zmíněné trakční baterie lze z pohledu mechanické konstrukce rozdělit na dvě hlavní části. První částí je bateriový segment. Propojením tří segmentů vzniká bateriový kontejner, který tvoří druhou hlavní mechanickou část.

### **5.2.1 Bateriový segment**

Nosnou část bateriového segmentu tvoří dvě plastové mřížky. Mezi mřížkami jsou umístěné bateriové li-ion články. Mřížky jsou spojeny pomocí šroubů, tak aby byla zajištěna dostatečná mechanická pevnost segmentu. V jedné řadě jsou články řazeny paralelně. Polarity článků v sousedních řadách jsou vůči sobě otočeny tak, aby bylo vytvořeno sériové spojení. Pro svařování bateriových článků se standardně používá poniklovaný ocelový pásek. Vzhledem k vysokým proudům naší trakční baterie byl zvolen čistý niklový pásek. Fyzické propojení článků je tvořeno pomocí niklových pásků, které jsou přivařené (nabodované) k bateriovým článkům. Na stranách segmentu jsou kolektory. Mezi kolektory můžeme naměřit celé napětí segmentu. Šroubovými spoji jsou ke kolektorům připevněna kabelová oka. Díky těmto okům lze propojovat jednotlivé segmenty mezi sebou do série. Na jednom boku jsou přišroubované plastové držáky, které složí pro uchycení plošného spoje Slave BMS. Plastové šrouby spojují držáky s plošným spojem. Slave BMS obsahuje čtyři konektory. K niklovým páskům jsou přivedeny vodiče,

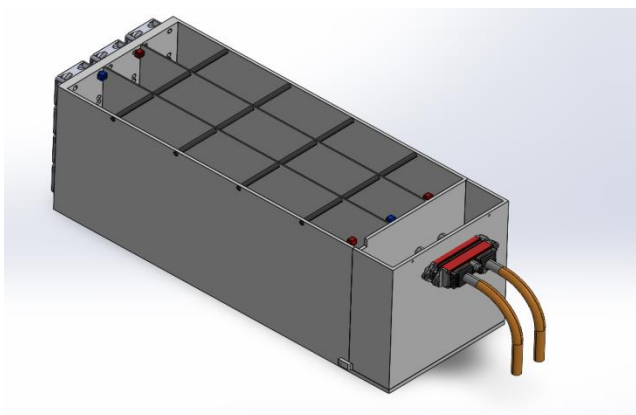
kteřé jsou k nim připájené. Vodiče jsou přivedeny do konektoru, který tvoří protikus konektoru na plošném spoji. Čidla teploty jsou umístěná mezi bateriovými články. Rozměry segmentu jsou 530 x 240 x 76 mm. Následující obrázek nevyobrazuje kabeláž pro propojení segmentu se Slave BMS.



Obr. 24 Konstrukční uspořádání bateriového segmentu

### 5.2.2 Bateriový kontejner

Vnitřek kontejneru je rozdělen do čtyř částí. Tři podélné části jsou vyhrazeny pro segmenty. Čtvrtá část je vyhrazena pro elektroniku a doplňující systémy (AIR, IDM, atd.). Jednotlivé bateriové segmenty jsou mezi sebou propojeny pomocí propojovacích kabelů. Vývody ze tří sériově zapojených segmentů jsou vyvedeny na vysokonapěťový konektor, který je umístěn na šasi bateriového kontejneru. Na zadní straně kontejneru jsou umístěny ventilátory, které ochlazují bateriové články a řídicí elektroniku. Takovýto bateriový kontejner bude umístěn na bokách elektrické motokáry. Rozměry kontejneru jsou 640 x 256 x 240 mm. Následující obrázek nevyobrazuje bateriové segmenty uvnitř kontejneru a uzavírací víko kontejneru.



Obr. 25 Konstrukční uspořádání bateriového



## 6 Návrh a realizace systému správy baterií (BMS)

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo navržení a realizování systému správy baterií (BMS). Celý systém správy baterií se skládá ze dvou typů řídicích desek. První řídicí deskou je Slave BMS, která monitoruje a balancuje články jednoho segmentu. Tato řídicí deska je napájena přímo ze segmentu a nepotřebuje žádné externí napájení. Slave BMS obstarává segment po celou dobu jeho života. Každá trakční baterie obsahuje tři segmenty. Pro napájení elektrické motokáry jsou využity dvě trakční baterie, tudíž tyto dvě baterie obsahují dohromady šest řídicích desek Slave BMS. Každý bateriový kontejner bude vybaven jednou řídicí deskou Master BMS, která sbírá naměřená data ze Slave BMS ovládá bezpečnostní periferie a komunikuje s vyšší vrstvou trakčního systému. Jak již bylo zmíněno, tak finální Master BMS není předmětem této diplomové práce. Druhou vyvinutou řídicí deskou v rámci této diplomové práce je Master komunikační BMS. Tato řídicí deska bude využívána pro servisní účely, konfiguraci a ladění Slave BMS. Tuto řídicí desku obecně lze využít pro komunikaci s jakoukoliv Slave BMS, která je založena na integrovaném obvodu BQ76L455A-Q1. V následujících podkapitolách je detailně popsán návrh a konstrukce desek BMS.

### 6.1 Návrh a realizace Slave BMS

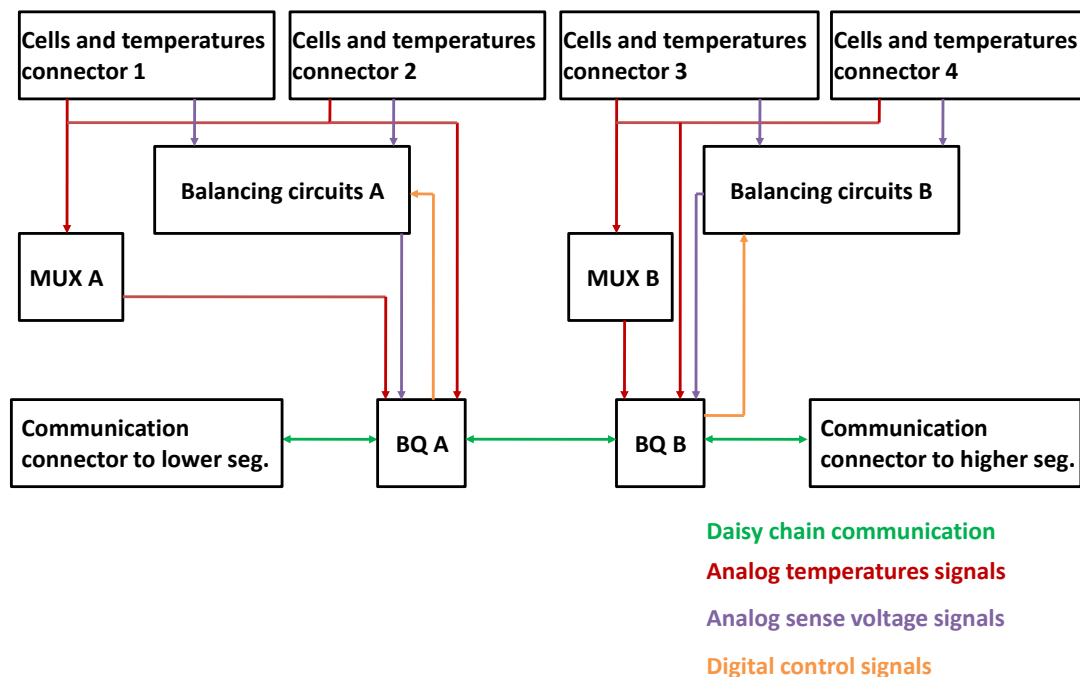
V této kapitole je detailně popsán návrh a realizace řídicí desky Slave BMS. V jednotlivých podkapitolách jsou detailně popsány jednotlivé postupy, které byly aplikovány pro realizaci Slave BMS.

#### 6.1.1 Popis a specifikace Slave BMS

V prvopočátku návrhu řídicí desky Slave BMS byla stanovena topologie této desky. Vzhledem k vysokému počtu sériově řazených článků byla zvolena Master – Slave topologie. U této topologie se každá Slave BMS stará o příslušný segment. Jednotlivé Slave BMS jsou mezi sebou propojeny pomocí komunikačního rozhraní Daisy chain. U naší trakční baterie je jeden bateriový segment v konfiguraci 21s 9p. Navržená Slave BMS balancuje napětí na každé paralelní větvi článků a měří teploty vybraných článků. Změřená data si jednotlivé Slave BMS mezi sebou sdílejí. Řídicí deska je založena na pasivním balancování, jelikož tento princip je spolehlivý a lze ho snadně implementovat na bateriové systémy s vysokým počtem sériově řazených článků. Jako řídicí čip Slave BMS je využit již zmíněný BQ76L455-Q1, který implementuje veškeré funkce, které potřebujeme pro

naší řídicí desku. Tento integrovaný obvod je blíže popsán v kapitole 4.2.1. Díky využití tohoto specializovaného obvodu jsme schopni zajistit vysokou spolehlivost BMS.

Bloková struktura na Obr. 26 popisuje zapojení Slave BMS. Řídicí deska Slave BMS obsahuje dva integrované obvody BQ76L455-Q1. Tyto obvody jsou mezi sebou propojeny pomocí komunikační sběrnice Daisy chain. Tato sběrnice je založena na dvou diferenciálních párech. První pár obstarává běžnou komunikaci pro přenos naměřených dat a druhý pár slouží pro přenos poruchových stavů. Každý integrovaný obvod BQ76L455-Q1 má sběrnici Daisy chain vyvedenou tak, aby bylo možné připojit následující nižší a vyšší integrovaný obvod BQ76L455-Q1. Na následujícím obrázku je zobrazena tato konfigurace sběrnice. Z obvodu BQ A je sběrnice vyvedena na komunikační konektor, který slouží pro připojení nižší Slave BMS či pro připojení Master BMS (Master komunikační BMS). U obvodu BQ B je sběrnice připojena ke komunikačnímu konektoru, který slouží pro připojení další vyšší Slave BMS. Řídicí deska Slave BMS je vybavena čtyřmi konektory, na tyto konektory jsou připojena napětí z jednotlivých článků a NTC termistory určené pro měření teplot článků. Napětí článků jsou z konektorů přivedena na balanční obvody, které jsou doplněné o filtrační obvody. Za filtračními obvody jsou pomocí BQ obvodů měřena napětí článků a podle hodnot napětí jsou spínány příslušné balanční tranzistory typu N-mosfet. Tyto tranzistory připojují balanční rezistory, na kterých je mařena přebytečná energie příslušných článků. Celkově je balancováno 21 sériově řazených článků. Jedenáct článků balancuje obvod BQ A a zbývajících deset balancuje BQ B. Každý BQ čip umožňuje měřit pouze 8 teplot, proto je Slave BMS vybaven dvěma multiplexory (MUX). Teploty z MUX A snímá řídicí obvod BQ A a teploty z MUX B snímá obvod BQ B. Slave BMS snímá dvě interní teploty přímo na desce plošného spoje. Tyto senzory monitorují provozní teplotu Slave BMS. K řídicí desce Slave BMS je možné připojit až 28 externích senzorů NTC pro monitorování teplot článků. Z tohoto počtu externích čidel vyplývá, že je měřena teplota u 15 % článků z celého bateriového segmentu, který obsahuje 189 článků. Napájení BQ obvodů je zajištěno přímo z bateriového segmentu. Slave BMS je vhodné připojit k segmentu co nejdříve po montáži segmentu, aby články baterie byly neustále pod kontrolou.



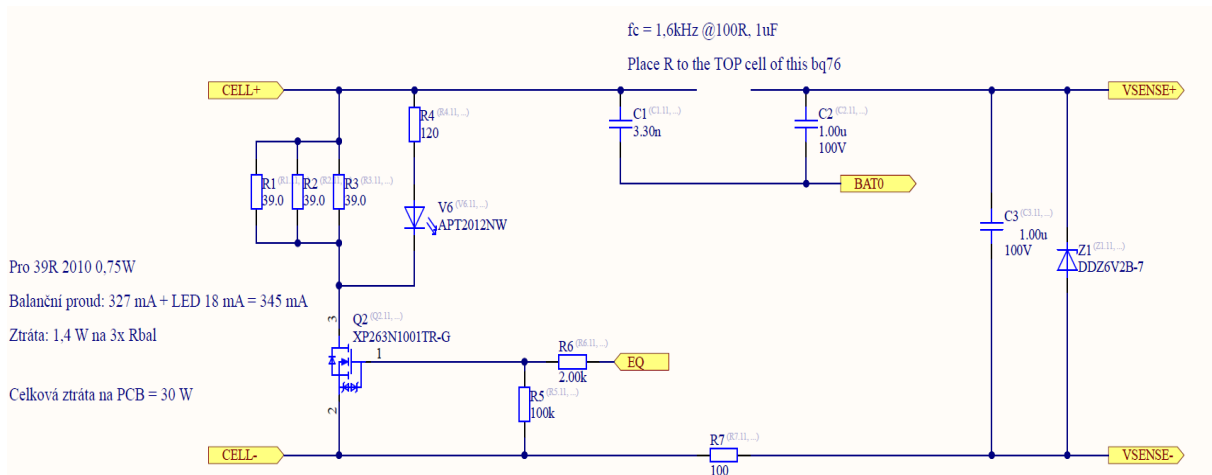
Obr. 26 Blokové schéma zapojení řídicí desky Slave BMS

Řídicí deska Slave BMS obstarává následující funkce:

- měření napětí 21 sériově zapojených článků;
- pasivní balancování 21 sériově zapojených článků;
- detekce přepětí či podpětí článků (přebíjení či podbíjení);
- měření 2 interních provozních teplot desky plošného spoje pomocí NTC;
- měření 28 externích teplot článků pomocí NTC;
- detekce přehřátí článků
- komunikace s dalšími Slave BMS či Master BMS.

### 6.1.2 Dimenzování balančního obvodu

Vhodné dimenzování balančního obvodu je důležité pro správnou funkci Slave BMS. Při dimenzování balančního obvodu je třeba brát v potaz několik faktorů. Nejdůležitějším faktorem je balanční proud tekoucí balančními rezistory a signalizační LED diodou skrze N-mosfet. Od balančního proudu se odvíjí čas balancování, výkonová ztráta na balančním tranzistoru a výkonová ztráta na balančních rezistorech. Od výkonových ztrát se odvíjí dimenzování a konstrukce chlazení Slave BMS. Následující obrázek vyobrazuje finální zapojení balančního obvodu s vhodně nadimenzovanými součástkami. Obrázek je vyřiznut ze schématu Cell circuit, které lze najít v příloze A.4.



Obr. 27 Schéma balančního obvodu

Nejprve bylo nutné stanovit orientační balanční proud. Stanovení balančního proudu vyplývá z praktických poznatků. Přibližná hodnota balančního proudu je stanovena jako 1 % z celkové kapacity paralelního spojení článků. V našem případě je paralelně zapojeno 9 článků. Rovnice (6.1) ukazuje výpočet přibližného balančního proudu.

$$I_{BAL\_orient} = 0,01 \cdot n_{\text{čl\_par}} \cdot C = 0,01 \cdot 9 \cdot 3600 = 324 \text{ mA} \quad (6.1)$$

kde  $I_{BAL\_orient}$  je orientační balanční proud,  $n_{\text{čl\_par}}$  je počet paralelně zapojených článků a  $C$  využitelná kapacita jednoho článku.

Při balančním proudu 324 mA by se 1% kapacity bateriového segmentu balancovalo po dobu 1 h. Dále je třeba stanovit vhodný počet a hodnoty balančních rezistorů. Je nutné dodržovat povolenou výkonovou ztrátu na rezistorech. Výpočet byl proveden pro několik počtů a hodnot rezistorů. Na Obr. 27 jsou balanční rezistory označeny jako R1, R2 a R3. Výpočtem byly zvoleny tři balanční rezistory o hodnotě 39  $\Omega$  v pouzdře 2010 (imperální značení). Výsledný balanční proud je součtem proudů skrze jednotlivé balanční rezistory a přes signalizační LED diodu. Signalizační LED diodou teče proud 18 mA. Výsledný balanční proud lze stanovit pomocí rovnice (6.2).

$$I_{BAL\_vys} = \frac{U_{kon}}{R_{bal}/n} + I_{LED} = \frac{4,2}{39/3} \cdot 10^3 + 18 = 341 \text{ mA} \quad (6.2)$$

kde  $I_{BAL\_vys}$  je výsledný balanční proud,  $U_{kon}$  je konečné nabíjecí napětí článku,  $R_{bal}$  je hodnota jednoho balančního rezistoru,  $n$  je počet paralelních balančních rezistorů a  $I_{LED}$  je proud tekoucí signalizační diodou LED.

Při výsledném balančním proudu 341 mA bude balancování 1 % kapacity segmentu trvat přibližně 57 min. Tento čas lze stanovit jako akceptovatelný.

Z těchto vypočítaných balančních proudů lze ověřit výkonové ztráty na balančních rezistorech a tranzistoru Q2. Výpočet výkonové ztráty byl proveden na základě součinu odporu příslušného prvku a druhé mocniny protékajícího proudu. Vzhledem k jednoduchosti takového výpočtu jsou zde uvedeny pouze výsledky výkonového ověření. Při daném výsledném balančním proudu vzniká na jednom balančním rezistoru výkonová ztráta 0,45 W. Rezistor v pouzdře 2010 zvládá výkonovou ztrátu 0,75 W, tedy máme dostatečnou rezervu. Zvolený mosfet Q2 má hodnotu  $R_{DS(ON)}$  pouze 0,33  $\Omega$  a vzniká na něm zanedbatelná výkonová ztráta 0,04 W. Z těchto hodnot lze stanovit, že prvky jsou správně nadimenzovány. Celková ztráta na všech balančních rezistorech je přibližně 29 W. Na rezistory bude přimontován hliníkový chladič, který bude odvádět výkonovou ztrátu. Tranzistory nepotřebují žádný externí chladič. Tyto výpočty je třeba brát s určitou rezervou, jelikož použité součástky mohou vykazovat značné výrobní odchylky.

### 6.1.3 Elektrické zapojení Slave BMS

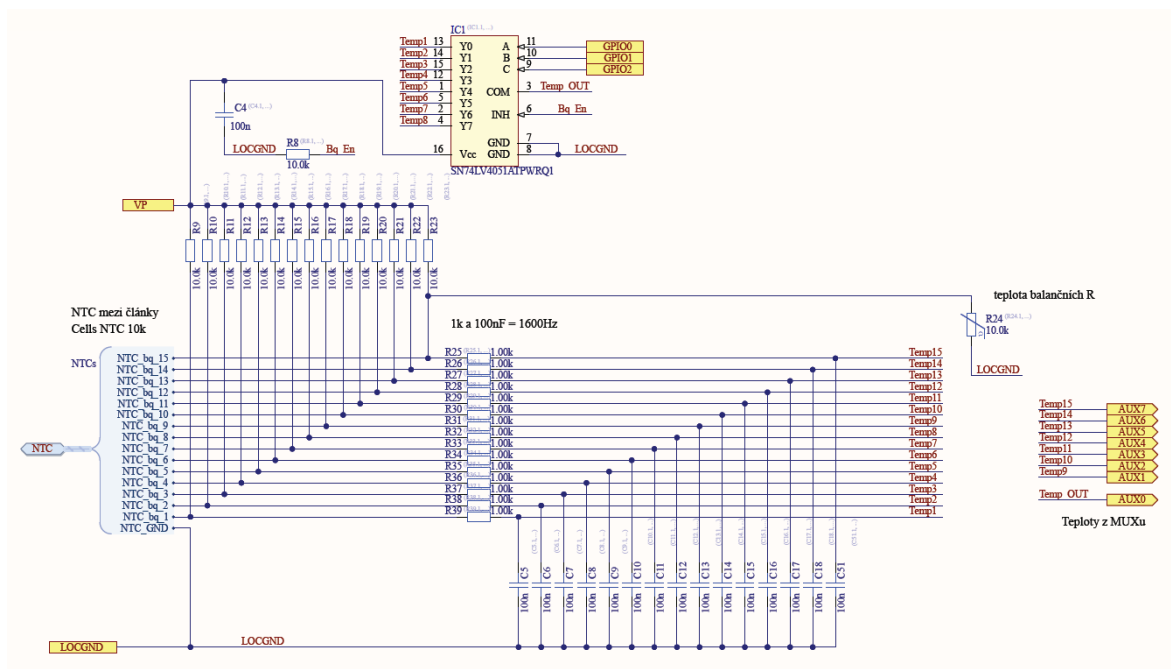
Celkové zapojení Slave BMS je rozděleno do 8 schémat. Jednotlivá schémata zapojení jsou uvedena v přílohách této diplomové práce. Vzhledem k rozsáhlosti schémat budou při popisu elektrických zapojení v této kapitole použity pouze výřezy ze schémat a odkazy na přílohy.

Návrh hodnot balančního obvodu byl popsán v kapitole 6.1.2. Zapojení balančních obvodů je vyobrazeno na Obr. 27, dále lze pak najít celé schéma v příloze A.4. Většinový balanční proud teče rezistory R1, R2 a R3. Minoritní část balančního proudu teče skrze rezistor R4 a signalizační LED diodu V6. LED dioda slouží pro účely ladění a zároveň můžeme snadno ověřit funkci balančních obvodů. Balanční rezistory a signalizační LED dioda jsou spínané pomocí unipolárního tranzistoru typu N-mosfet Q2. Rezistory R5 a R6 tvoří ovládací obvod tranzistoru. Rezistor R6 omezuje impulzní proudy, které jsou způsobeny vlivem parazitních kapacit tranzistoru Q2. Rezistor R5 zajišťuje správné vypínání tranzistoru, v případě, že výstup EQ se nachází ve stavu vysoké impedance. Vstupy a výstupy jsou popisovány z pohledu obvodu BQ76L455A-Q1. Integrovaný obvod BQ76L455A-Q1 provádí měření napětí na příslušném článku pomocí analogových vstupů VSENSE+ a VSENSE-. Filtrační kondenzátory C1 a C2 jsou připojeny na kladný pól příslušného článku a na společnou zem (nejnižší bateriový článek). Tyto filtrační kondenzátory potlačují přechodové rušivé jevy, které vnikají například při odpojování a připojování

externích konektorů. Rezistor R7 a C3 tvoří antialiasingový filtr ADC převodníku. Jeho mezní frekvence je nastavena na 1,6 kHz. Při této frekvenci má filtr přenos -3 dB, strmost takového filtru je -20 dB na dekádu. Poslední součástí je Zenerova dioda Z1 se jmenovitou hodnotou závěrného napětí 6,2 V. Tato dioda chrání analogové vstupy před přepětím. V případě, že se mezi vstupy VSENSE+ a VSENSE- objeví vyšší napětí než 6,2 V, tak se dioda začne otevírat, diodou začne protékat proud a omezí se hodnota napětí. Proud diodou Z1 je omezován pomocí R7. Přepětí může opět vznikat vlivem přechodových jevů. Hodnoty filtrů vychází z datasheetu výrobce integrovaného obvodu [24].

Druhou částí elektrického zapojení řídicí desky Slave BMS je zapojení samotného integrovaného obvodu BQ76L455A-Q1. Vzhledem k rozsáhlosti schématu zapojení je toto zapojení uvedeno pouze příloze A.2 této diplomové práce. Zapojení čipu BQ76L455A-Q1 vychází z doporučení výrobce čipu. Na schématu lze najít velké množství blokovacích kondenzátorů, které výrobce doporučuje, tak aby byla zajištěná správná a spolehlivá funkce integrovaného obvodu. Tyto blokovací kondenzátory nebudou dále popisovány, jelikož jejich hodnoty vyplývají ze zmíněných doporučení. Napájení Slave BMS je zajištěno z nejvyššího bateriového článku, respektive 11. a 21. článku z bateriového segmentu. Napájení integrovaného obvodu je zajištěno pomocí bipolárního tranzistoru Q1, který pracuje v aktivním režimu. Rezistory R40 a R41, které jsou zapojeny mezi nejvyšší článek a kolektor tranzistoru, tak omezují proud v případě poruchy, přesouvají částečnou výkonovou ztrátu z tranzistoru na sebe a zároveň s C25 tvoří filtr. LED dioda V1 signalizuje přítomnost napájecího napětí VP. Diody V2 a V3 ochraňují měřicí vstup VSENSE16. V případě, že se napětí na měřicím vstupu odchýlí od napětí na pinu TOP, tak se příslušná dioda otevře a ochrání měřicí vstup. Stejně tak diody V4 a V5 ochraňují měřicí vstup VSENSE0. Rezistory R53 a R55 omezují nabíjecí proudy velkých blokovacích kondenzátorů C43 a C49. Rezistor R54 je zapojen jako pull-up pro pin TX, který není u této řídicí jednotky využit. Poslední částí na tomto schématu je zapojení komunikační sběrnice Daisy chain. Sběrnici tvoří čtyři diferenciální páry. Dva páry jsou určeny pro komunikaci s vyšším BQ76L455A-Q či vyšší Slave BMS a dva pro připojení nižšího BQ76L455A-Q1 či nižší Slave BMS nebo Master BMS. Rezistory R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51 a R52 zajišťují správné impedanční přizpůsobení komunikační sběrnice. Tato sběrnice je chráněna před elektrostatickými výboji pomocí Zenerových diod Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8 a Z9.

Třetí částí zapojení Slave BMS je zapojení NTC termistorů pro měření teplot článku a interních teplot. Schéma zapojení je uvedeno na Obr. 28 a v příloze A.3. Zapojení lze rozdělit na dvě části. První částí je zapojení multiplexoru IC1, který je blokován pomocí blokovacího kondenzátoru C4. Celé zapojení měří 14 externích teplot a 1 interní teplotu. Výběr příslušného měřicího vstupu je realizován pomocí pinů GPIO0 až GPIO2. MUX snímá teploty Temp1 až Temp8, příslušný měřicí vstup je připínán na měřicí vstup AUX0. Zbývajících 6 externích teplot je měřeno pomocí vstupů AUX1 až AUX6. Měřicí vstup AUX7 obstarává měření interní teploty přímo na desce. Druhou částí zapojení jsou rezistorové děliče a antialiasingové filtry. Všechny měřicí NTC rezistory mají jmenovitou hodnotu 10 k $\Omega$ . Přes modrý harness NTC jsou vyvedeny měřicí děliče ke konektorům, ke kterým jsou připojené zmíněné měřicí NTC rezistory. Rezistory R9 až R23 spolu s měřicími NTC rezistory tvoří dělič. K děličům jsou připojeny dolnopropustní filtry s mezní frekvencí 1,6 kHz. Z filtrů jsou snímána napětí (teploty) přivedeny na měřicí vstupy čipu BQ76L455A-Q1 AUX0 až AUX7. Termistor R24 slouží pro měření interní teploty na desce plošného spoje.

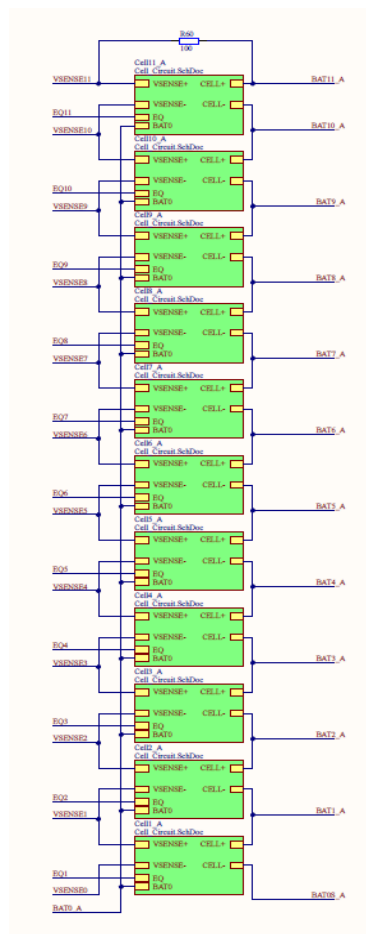


Obr. 28 Zapojení NTC senzorů

Čtvrtou částí zapojení jsou LED diody, které jsou určeny pro ladění a testování řídicí desky Slave BMS. Vzhledem k jednoduchosti zapojení je schéma pouze v příloze A.7. LED diody jsou doplněny o sériové rezistory o hodnotě 1,8 k $\Omega$ . Tyto rezistory nastavují

pracovní bod diody, tak aby diodou tekla proud přibližně 1,3 mA. Diody jsou ovládány pomocí pinů GPIO3 až GPIO5. Diody mají žlutou, zelenou a červenou barvu, tak aby bylo možné snadno identifikovat různé testované stavy.

Pátou a šestou částí zapojení Slave BMS je propojení jednotlivých balančních obvodů. Na Obr. 29 je propojení balančních obvodů od BQ A, celkové schéma lze nalézt v příloze A.5. Propojení balančních obvodů od BQ B je uvedeno pouze v příloze A.6. Zapojení balančních obvodů od BQ A a BQ B je shodné, jen u BQ A je jeden balanční obvod navíc. Následující popis je proveden pro obvod BQ A. Na schématu lze nalézt jednotlivé balanční obvody, které jsou označeny Cell1\_A až Cell11\_A. Každý sheet (zelený obdélníček) představuje jeden balanční obvod. Jednotlivé sheety mají propojené vstupy VSENSE a CELL, tak aby byly balanční obvody řazeny do série a byly paralelně připojeny k jednotlivým článkům. Rezistor R60 je nejvyšší filtrační rezistor.



Obr. 29 Propojení jednotlivých balančních obvodů



Sedmou částí zapojení Slave BMS je fyzické zapojení konektorů. Vzhledem k rozsahu schématu je zapojení uvedeno pouze v příloze A.8. Zapojení obsahuje 4 konektory. Konektory slouží pro připojení jednotlivých napětí z článku a NTC rezistorů pro měření teplot. Piny konektoru pro přivádění napětí z bateriových článků jsou zapojeny tak, aby bylo napětí baterie rovnoměrně rozloženo a potenciál postupně narůstal. Napětí z konektorů je do balančních obvodů přivedeno přes filtrační tlumivky, které potlačují rušení z okolí.

Poslední osmou částí zapojení Slave BMS je hlavní (main) zapojení, které propojuje jednotlivé části schématu. Vzhledem k velikosti zapojení je schéma uvedeno pouze v příloze A.1. Na schématu je vyobrazeno propojení jednotlivých částí, které byly popsány v předchozích odstavcích. Zapojení obsahuje dva konektory pro připojení dalších Slave BMS či Master BMS. Konektor H6 slouží pro připojení nižší Slave BMS či pro hlavní Master BMS. Konektor H5 slouží pro připojení vyšší Slave BMS. Za konektory se nachází sériově řazené kondenzátory na napětí **1000 V**. Tyto kondenzátory (C31 až C34 a C19 až C22) galvanicky oddělují jednotlivé Slave BMS. V případě poruchy na jedné Slave BMS nedojde ke zničení ostatních Slave BMS v řetězci. Každý diferenciální pár je vybaven dvěma tlumivkami, které chrání příslušný pár proti vysokofrekvenčnímu rušení, které se může namodulovat na komunikační pár. Komunikace Daisy chain mezi BQ A a BQ B je opět oddělena pomocí kondenzátorů na 1000 V.

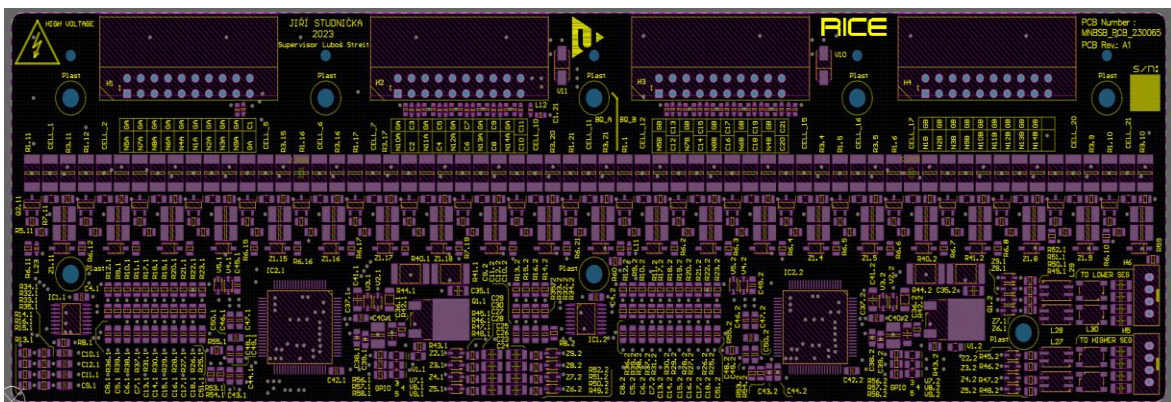
#### **6.1.4 Návrh a konstrukce desky plošného spoje Slave BMS**

Pro návrh plošného spoje byl využit software Altium Designer. Nejprve bylo nakresleno schéma zapojení. Funkce jednotlivých zapojení byla popsána v předchozí podkapitole 6.1.3. Jednotlivá schémata jsou uvedena v příloze A na straně II.

Řídicí deska Slave BMS je tvořena pouze jednou deskou plošného spoje (DPS). V první řadě byla řešena mechanická stránka desky plošného spoje. Nejprve bylo nutné stanovit rozměry DPS. Vzhledem k vysokému počtu součástek (566 ks) a velmi omezenému konstrukčnímu prostoru na segmentu bylo velmi složité stanovit finální rozměr DPS. Volbu rozměrů dále komplikoval požadavek na umístění součástek pouze na jedné straně a požadovaná pozice konektorů, které mají vazbu na okolí. Finální rozměr DPS byl zvolen na 215 x 64 mm. Součástky na jedné straně DPS usnadňují osazení DPS metodou přetavením v peci.

Nejprve byl nakreslen obrys DPS se zmíněnými rozměry. Následně byly rozmístěny konstrukční otvory, tak aby bylo možné DPS snadno přišroubovat k bateriovému segmentu

a zároveň bylo možné přidělat chladič, který odvádí teplo z balančních rezistorů. Dále byly rozmístěny jednotlivé součástky. Správné rozmístění má zásadní vliv na celkovou konstrukci DPS a elektromagnetickou kompatibilitu (EMC). Finální rozmístění součástek je uvedeno na Obr. 30. Nejprve byly umístěny konektory. Následně byly rozmístěny balanční obvody. Tyto obvody jsou rozmístěny, tak aby se rovnoměrně rozdělilo napětí přiváděné z bateriového segmentu. Filtrační kondenzátory balančních obvodů jsou umístěny co nejbližší k čipům BQ76L455A-Q1. Následně byly rozmístěny dva obvody BQ76L455A-Q1 a pasivní součástky okolo. Dle doporučení výrobce byly rozmístěny blokové kondenzátory co nejbližší k čipům BQ76L455A-Q1. V předposlední fázi byly rozmístěny ochranné a filtrační obvody komunikační sběrnice Daisy chain. V okolí oddělovacích kondenzátorů, které jsou za komunikačními konektory je dodržovaná izolační vzdálenost na šířku dvou těchto kondenzátorů. V poslední fázi rozmístování byly umístěny multiplexory pro snímání teplot a zbývající pasivní součástky.



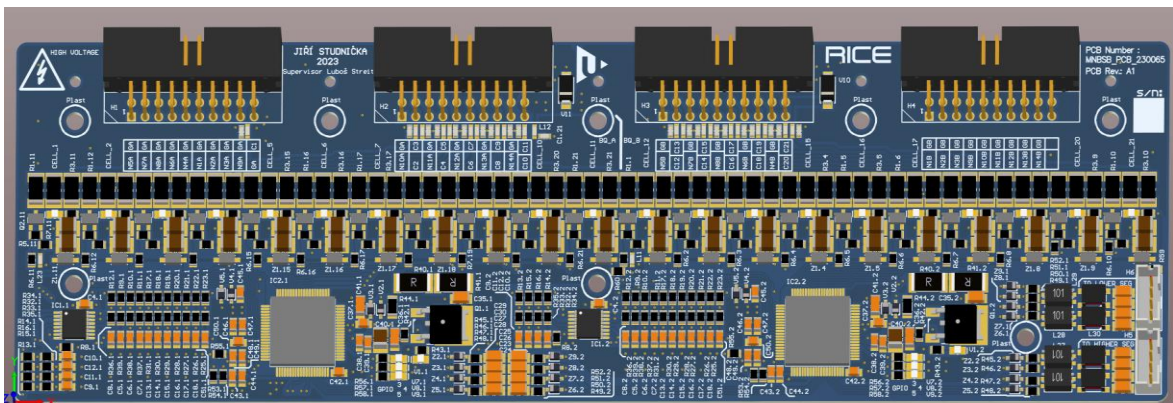
Obr. 30 Rozmístění součástek řídicí desky Slave BMS

Po finálním rozmístění součástek bylo nutné zvolit technologii DPS. Vzhledem k vysokému počtu součástek a složitosti zapojení byl zvolen čtyřvrstvý plošný spoj. Rozložení signálů v jednotlivých vrstvách vychází z obecných návrhových pravidel a z doporučení výrobce integrovaného obvodu BQ76L455A-Q1. V každé vrstvě jsou rozlité měděné polygony. Na každé vrstvě jsou dva takovéto polygony. Uprostřed DPS se nachází izolační mezera, která odděluje polygony v rámci příslušné vrstvy. Jednotlivé vrstvy DPS Slave BMS jsou uvedené příloze na straně XV. Ve vrstvách Top, Mid1 a Bottom jsou polygony připojeny k potenciálům BAT0\_A a BAT0\_B. Potenciál BAT0\_A je spojený se záporným pólem nejnižšího článku segmentu. Tento polygon se nachází na levé straně DPS. Potenciál BAT0\_B je spojený s kladným pólem 11. článku a zároveň se záporným

pólem 12. článku. Tento polygon se nachází v pravé části DPS. Ve vrstvě Mid2 jsou polygony spojeny s potenciály VP\_A a VP\_B, z těchto napětí jsou napájeny různé části obvodu. Toto rozložení polygonů snižuje impedanci BAT0\_A BAT0\_B (obecně GND), snižuje míru vyzařování a zároveň zlepšuje odolnost vůči rušení. Dále díky rozlité mědi nehrozí prohnutí.

Předposlední fází při konstruování DPS bylo propojení (routování) jednotlivých cest. Snahou bylo umístit co nejvíce cest do vrstvy Top. Dále byla snaha udržet co největší plochu zemního polygonu, tak aby rozváděl rovnoměrně ztrátový výkon po celé DPS a teplo se snadněji odvádělo z DPS. Do střední vrstvy Mid1 nebyly umístěné žádné cesty, tato vrstva vytváří tvrdé zemní spojení. Do střední vrstvy Mid2 byly umísťovány převážně cesty, které souvisejí s měřením napětí jednotlivých bateriových článků. V nejnižší vrstvě Bottom byly umístěny cesty, které se jina nevesly. Nejprve byly zapojovány krátké cesty a postupně se postupovalo k delším cestám. Cesty byly zapojovány v pořadí napájení, balanční obvody, sběrnice a ostatní cesty. Sběrnice Daisy chain je propojena pomocí diferenciálních párů. Rozmístění (layout) sběrnice vychází z doporučení výrobce, detailní informace lze najít v datasheetu [24].

V poslední fázi byly rozmístěny popisky součástek a servisní potisk.

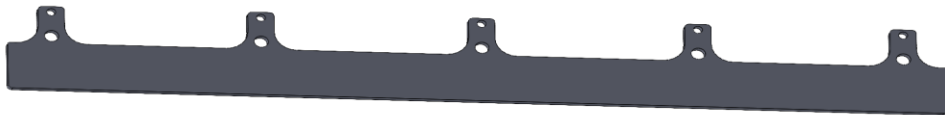


Obr. 31 Finální podoba DPS řídicí desky Slave BMS

### 6.1.5 Chladič Slave BMS

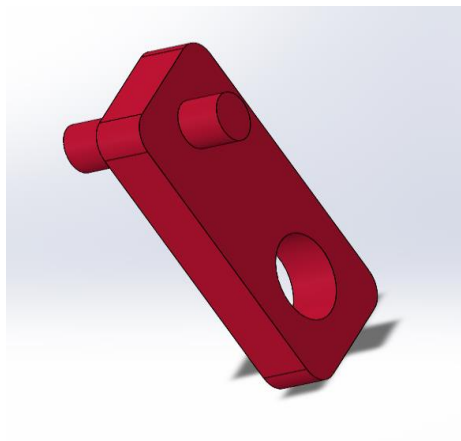
V kapitole 6.1.2 byl stanoven celkový ztrátový výkon balančních rezistorů na 29 W. Takovýto ztrátový výkon vzniká pouze v případě, že jsou balancovány všechny bateriové články zároveň. Konstrukce chladiče je vyobrazena na Obr. 32. Chladič je zkonstruován tak, aby ho bylo možné přimontovat ke konstrukčním otvorům DPS. Chladič bude vyfrézován z hliníkového materiálu o tloušťce 2 mm. Schopnost chladiče odvádět teplo

závisí na konvekci (proudění) okolního vzduchu. V dosavadní části vývoje bateriového kontejneru nejsme schopni toto proudění definovat. Pro přesný návrh chladiče by bylo nutné provést přesnou teplotní analýzu, která přesahuje rozsah této diplomové práce. Chladicí schopnost chladiče bude v budoucnu ověřena prakticky



Obr. 32 Chladič Slave BMS

Pro uchycení chladiče k řídicí desce Slave BMS byl zkonstruován plastový sloupek. Tento sloupek je vyobrazen na Obr. 33. Pět těchto sloupků je nacvaknuto do DPS.

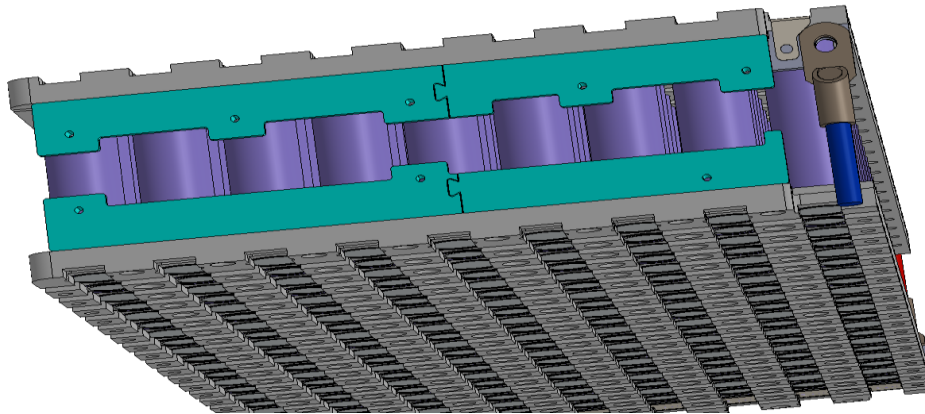


Obr. 33 Sloupek chladiče Slave BMS

Na balanční rezistory je přilepen teplovodivý izolační materiál. Tento materiál má lepidlo z obou stran. Chladič se nalepí na izolační materiál a zároveň se nacvakne na plastový sloupek. Na závěr se chladič přišroubuje pomocí šroubů k plastovým držákům, které upevňují řídicí desku Slave BMS. Tyto držáky jsou na Obr. 34. Celkovou situaci upevnění chladiče vyobrazuje Obr. 35.

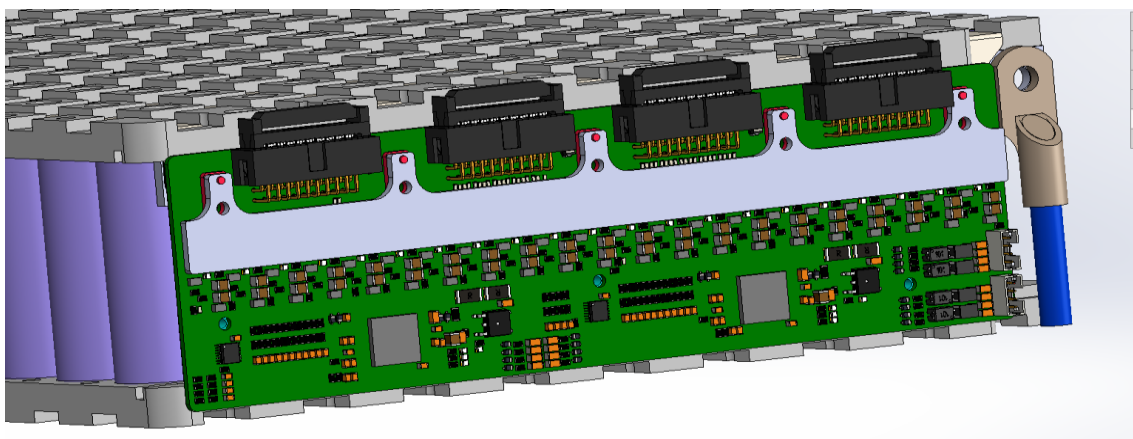
### 6.1.6 Mechanické uchycení Slave BMS k bateriovému segmentu

Pro uchycení DPS řídicí desky Slave BMS k segmentu byly zkonstruovány čtyři plastové držáky. Každé dva držáky na příslušné straně segmentu jsou do sebe zacvaknuty pomocí rybové drážky. Držáky jsou k segmentu přidělaný pomocí šroubových spojů.



Obr. 34 Držáky řídicí desky Slave BMS na bateriovém segmentu

Pokud máme přidělané držáky DPS Slave BMS, tak můžeme k držákům přidělat řídicí desku. Na řídicí desku Slave BMS nejprve připevníme chladič a následně ji položíme na držáky. Slave BMS přišroubujeme přes chladič pomocí pěti šroubů do držáků. Do zbývajících tří konstrukčních děr vložíme šrouby a připevníme Slave BMS ke spodním držákům.



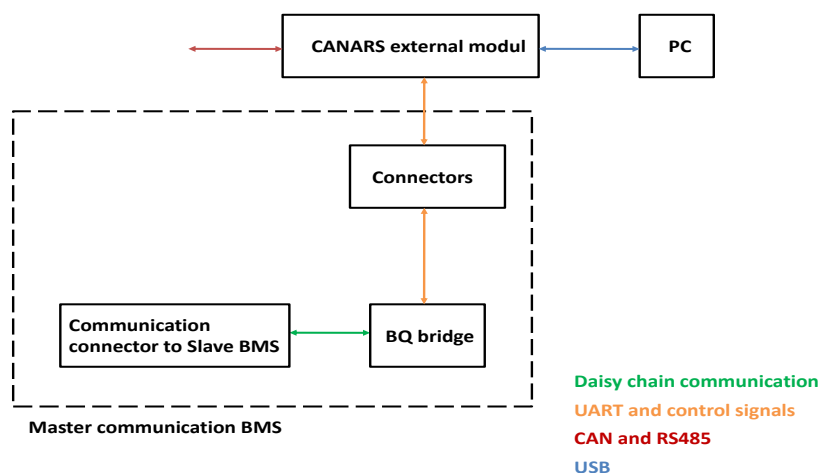
Obr. 35 Uchycení Slave BMS na bateriovém segmentu

## 6.2 Návrh a realizace Master komunikační BMS

V této kapitole je detailně popsán návrh a realizace řídicí desky Master komunikační BMS. Jednotlivé podkapitoly popisují postupy využité při návrhu a konstrukci.

### 6.2.1 Popis a specifikace Master komunikační BMS

Vzhledem k probíhajícímu vývoji stávajícího trakčního kontejneru nebyl v této práci konstruován finální Master BMS. Pro účely ladění byl v této práci vyvinut právě Master komunikační BMS. Topologie této řídicí desky je vyobrazena na následujícím obrázku. Tato řídicí deska se skládá ze dvou plošných spojů. Primární základní desku tvoří CANARS externí modul. Jak již bylo zmíněno autorem tohoto modulu je Ing. Tomáš Košan, Ph.D. Tento modul je vybaven sběrnicemi CAN bus, USB a RS485. Srdce tohoto modulu tvoří 32-bitový mikrokontrolér TM4C123GH6PM. Druhý plošný spoj je přímo Master komunikační BMS. Tento plošný spoj je propojený s CANARS externím modulem pomocí header konektorů. Oba plošné spoje mezi sebou komunikují pomocí rozhraní UART. CANARS externí modul lze propojit s počítačem pomocí rozhraní USB.



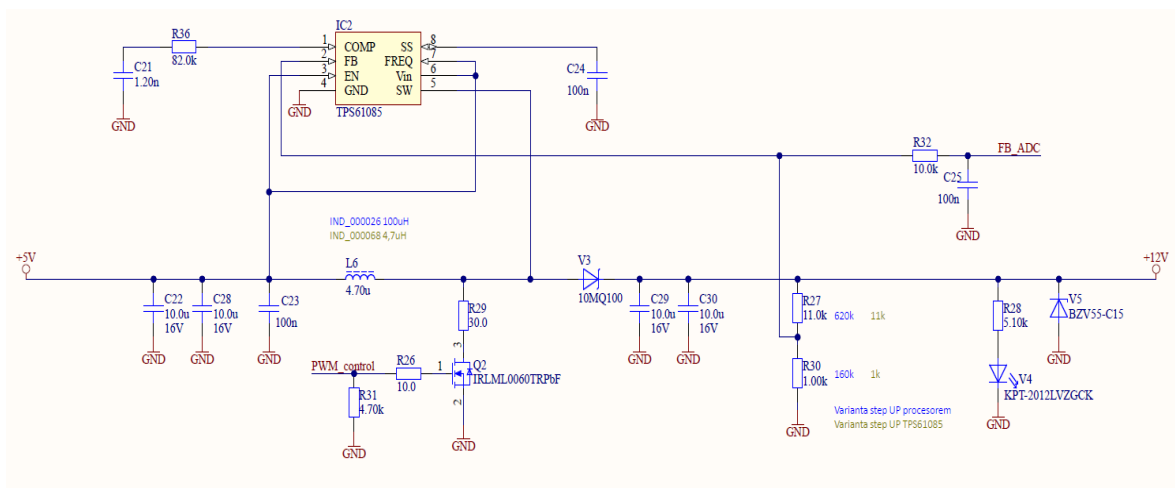
Obr. 36 Blokové schéma zapojení řídicí desky Master komunikační BMS

Srdce Master komunikační BMS tvoří opět integrovaný obvod BQ76L455A-Q1. V této aplikaci BQ76L455A-Q1 neprovádí měření a balancování, ale vytváří komunikační rozhraní mezi Master komunikační BMS a Slave BMS. Řídicí deska Master komunikační obstarává funkce: nastavování registrů řídicích desek Slave BMS a vyčítání změřených teplot a napětí jednotlivých článků.

## 6.2.2 Elektrické zapojení Master komunikační BMS

Zapojení Master komunikační BMS je opět rozděleno do více schémat. Celé zapojení je rozděleno do pěti schémat, tato schémata jsou uvedena v příloze B na straně X. Vzhledem k rozsahu schémat budou některá schémata uvedena pouze v příloze, menší celky jsou uvedeny v textu. Shodné části zapojení Master komunikační BMS se Sláve BMS nebudou opět popisovány.

První částí popisovaného schématu je zapojení DC – DC měniče, který zvyšuje stejnosměrné napětí z 5 na 12 V. Toto zapojení je uvedeno na Obr. 37 a v příloze B.3. Jelikož CANARS externí modul poskytuje pouze napájecí napětí 5 V a integrovaný obvod BQ76L455A-Q1 v konfiguraci jako bridge vyžaduje minimální napájecí napětí 12 V, tak pro zvýšení napětí byl využit DC – DC měnič. Tento má obvyklou topologii step-up měniče.



Obr. 37 Zapojení DC-DC měniče z 5 na 12 V

Řízení měniče může obstarávat přímo mikrokontrolér z desky CANARS externího modulu nebo integrovaný obvod TPS61085, který je na schématu označen jako IC2. V případě, že zvolíme první variantu řízení, tak nejsou osazeny součástky IC2, R36, C21, C24, R29, R26, R31 a Q2. Kondenzátory C22, C28 a C23 tvoří vstupní filtr měniče. Tlumivka L6 slouží pro zvýšení napětí. Pro případ řízení mikrokontrolérem byla hodnota tlumivky (100  $\mu$ H) stanovena pomocí kalkulátoru [27]. Pro druhý případ (řízení pomocí IC2) byla hodnota tlumivky (4,7  $\mu$ H) stanovena na základě doporučení výrobce čipu [28]. Rezistor R29 omezuje proud tekoucí tlumivkou. Rezistor R26 omezuje impulzní proudy vyvolané parazitními kapacitami tranzistoru Q2 a R31 zaručuje spolehlivé uzavření Q2. Schottkyho dioda V3 zabráňuje toku proudu z výstupu na vstup měniče. Kondenzátory C29 a C30 tvoří výstupní filtr. Rezistory R27 a R30 tvoří zpětnovazební dělič. Na základě

zpětnovazebního napětí je řízeno spínání měniče. V případě, že je pro řízení použit mikrokontrolér, tak je spínání řízeno pomocí PWM\_control. Pokud je využit IC2, tak si spínání řídí sám tento obvod. Rezistor R32 a C25 tvoří antialiasingový filtr s mezní frekvencí 160 Hz. LED dioda V4 signalizuje přítomnost napětí 12 V. Pokud by se na výstupu měniče objevilo napětí větší než 15 V, tak se začne otevírat Zenerova dioda V5 a napětí se stabilizuje na 15 V.

Druhou částí zapojení Master komunikační BMS je zapojení BQ76L455A-Q1 v konfiguraci bridge. Vzhledem k rozsahu zapojení je schéma uvedené pouze v příloze B.2. Toto zapojení je velmi podobné zapojení BQ76L455A-Q1 u řídicí desky Slave BMS. Zapojení blokovacích kondenzátorů vychází opět z doporučení výrobce čipu [24]. Napájení tohoto integrovaného je zajištěno stejným způsobem jako u Slave BMS. Komunikační sběrnice Daisy chain je zapojena opět shodně jako u Slave BMS. Měřicí vstupy VSENSE nejsou v této aplikaci využity. Analogové vstupy VSENSE5 až VSENSE16 jsou mezi sebou propojeny. Vstupy VSENSE1 až VSENSE5 jsou připojeny přes napěťový dělič, který je tvořen rezistory R13, R14, R15 a R19. Toto zapojení vyplývá z katalogu výrobce. Komunikační piny TX a RX jsou využity pro komunikaci s CANARS externím modulem. Pomocí pinu WAKEUP lze čip uvést do stavu nízké spotřeby (spánku). Tyto piny jsou doplněny o pull-up či pull-down rezistory dle doporučení výrobce.

Třetí částí schématu Master komunikační Slave je zapojení LED diod. Toto zapojení je stejné jako Slave BMS, a proto je uvedeno pouze v příloze B.4.

Čtvrtou částí zapojení je zapojení konektorů této řídicí desky. Toto zapojení nepotřebuje další popis. Zapojení je uvedeno v příloze B.5.

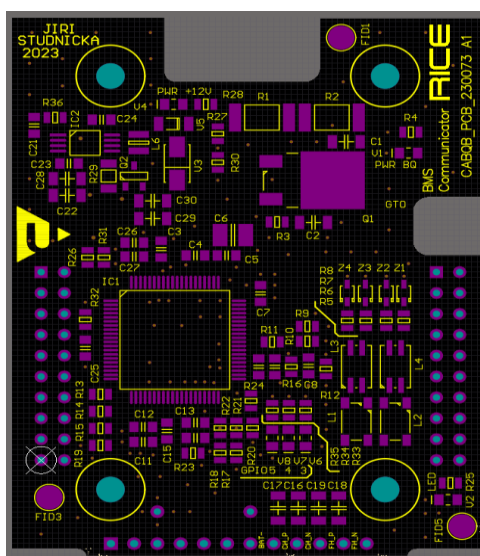
Poslední pátou částí zapojení Master komunikační BMS je hlavní (main) zapojení, které vyobrazuje propojení jednotlivých částí schématu. Zapojení je uvedeno v příloze B.1. Komunikační sběrnice je opět vybavena oddělovacími kondenzátory a filtračními tlumivkami. LED dioda V2 je využitelná pro účely ladění. Kondenzátor C20 je typu Cx. Tento kondenzátor je připojen mezi zemí (LOGGND) řídicí desky Master komunikační BMS a záporným pólem trakční baterie (GND\_BATTERY). GND\_BATTERY je vyvedeno na svorkovnici CANARS modulu. Tato svorka se propojuje se záporným pólem baterie jen v případě, jestliže komunikace Daisy chain nefunguje.



### 6.2.3 Návrh a konstrukce desky plošného spoje Master komunikační BMS

Plošný spoj byl navrhován obdobným postupem jako plošný spoj Slave BMS. Řídicí deska Master komunikační BMS je tvořena dvěma plošnými spoji. První DPS je CANARS externí modul, který byl již navržen. Druhý DPS tvoří právě Master komunikační BMS, který je popsán v této kapitole. Tato DPS obsahuje 90 součástek. Rozměry a tvar DPS vyplývají z rozměrů řídicí desky CANARS externí modulu a krabičky, ve které bude tento celek uzavřen. Rozměry této DPS jsou 65 x 51 mm. Součástky jsou opět umístěny z jedné strany DPS pro účely snadného osazení.

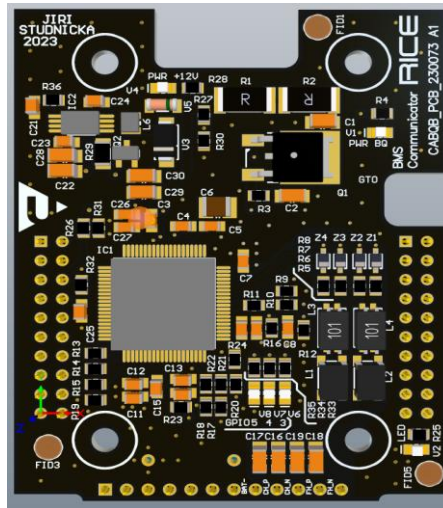
Opět byl nejprve nakreslen obrys DPS s příslušnými rozměry a tvarem. Následně byly rozmístěny konstrukční otvory a konektory s přímou vazbou na okolí. Pomocí těchto konektorů bude tato DPS navazována na DPS modulu CANARS externí. Dále byly rozmístěny oddělovací kondenzátory a filtrační tlumivky sběrnice Daisy chain. Následně byly rozmístěny součástky DC – DC měniče. V poslední fázi byl umístěn integrovaný obvod BQ76L455A-Q1 a zbývající pasivní součástky. Na Obr. 39 je vyobrazeno finální rozmístění součástek.



Obr. 38 Rozmístění součástek řídicí desky Master komunikační BMS

Opět byl zvolen čtyřvrstvý plošný spoj. Jednotlivé vrstvy jsou uvedeny v příloze D na straně XVI. V každé vrstvě DPS je rozlity měděný polygon. Ve vrstvách Top, Mid1 a Bottom jsou polygony spojeny se zemním potenciálem (GND). Vrstva Mid2 je spojena s potenciálem VP. Ve vrstvě Top je umístěno nejvíce cest. Zbývající cesty, které se nevešly do vrstvy Top, tak jsou umístěny do vrstev Mid2 a Bottom.

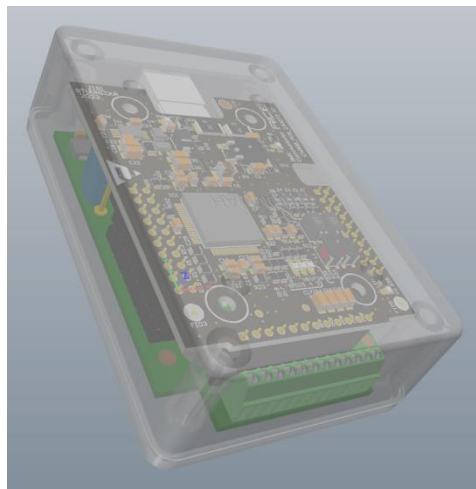
Nejprve byly zapojeny cesty sběrnice Daisy chain. Tato sběrnice je vedena diferenciálními páry. Následně byl zapojen DC – DC měnič a napájení na celé desce. V poslední fázi byly zapojeny cesty v okolí integrovaného obvodu BQ76L455A-Q1. Následující obrázek vyobrazuje finální podobu DPS řídicí desky Master komunikační BMS.



Obr. 39 Finální podoba DPS řídicí desky Master komunikační BMS

#### 6.2.4 Propojení Master komunikační BMS s CANARS externím modulem

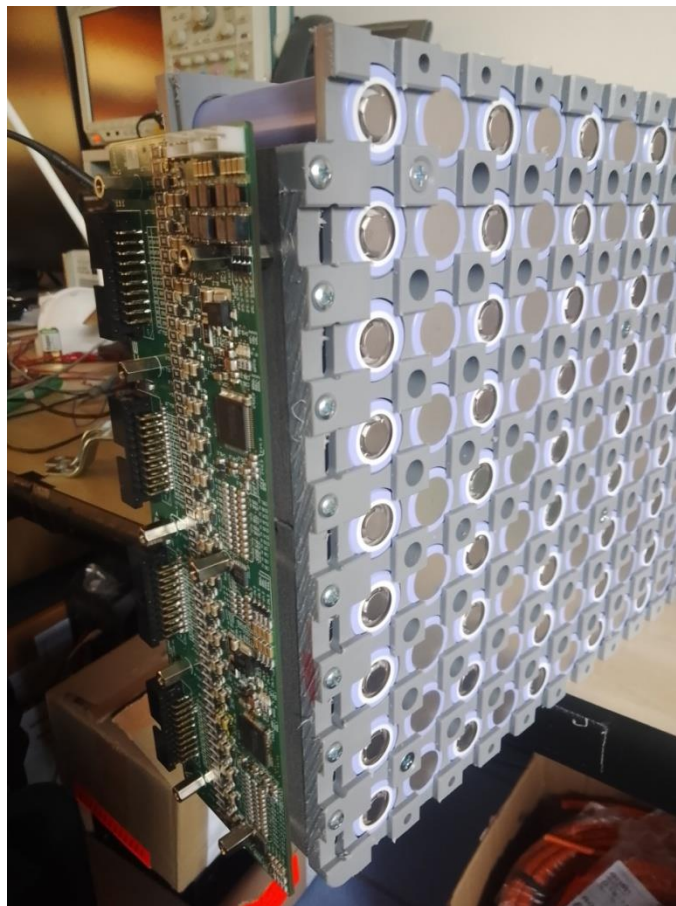
Jak již bylo zmíněno systém Master komunikační je složen ze dvou plošných spojů. Tyto plošné spoje jsou spojeny pomocí header konektorů. DPS jsou umístěny v krabičce, která má vyfrézované otvory pro konektory a svorkovnice. Prvky s vazbou na okolí jsou tudíž snadno dostupné. Níže je vidět umístění DPS v krabičce.



Obr. 40 Master komunikační BMS v krabičce

## 7 Konstrukce jednoho segmentu baterie

Čtvrtým bodem zadání této diplomové práce je fyzické sestavení bateriového segmentu. Konstrukce tohoto bateriového segmentu je popsána v kapitole 5.2.1. Následující obrázek Obr. 41 vyobrazuje sestavený segment. Nejprve byly jednotlivé bateriové články naskládány mezi nosné plastové mřížky. Následně se obě mřížky spojily pomocí šroubů tak, aby konstrukce držela pospolu. Na boční stěnu bateriového segmentu byly přimontovány držáky pro uchycení řídicí desky Slave BMS. Tyto držáky jsou vyobrazeny na Obr. 34. V poslední fázi montáže byla k držákům přimontována řídicí deska Slave BMS. Takto připravený segment byl poslán do specializované firmy, která provedla svaření jednotlivých článků. Články jsou mezi sebou propojeny pomocí čistých niklových pásků. Na následujícím obrázku nejsou jednotlivé vodiče, které propojují Slave BMS s bateriovým segmentem, protože články segmentu nejsou svařené.



Obr. 41 Sestavený bateriový segment

## 8 Experimentální ověření funkce BMS na segmentu

Posledním bodem zadání této diplomové práce je experimentální ověření funkce BMS na bateriovém segmentu. Připojení neověřené elektroniky BMS přímo k bateriovému segmentu je velice nebezpečné, riskovali bychom zničení bateriových článků, zničení Slave BMS, vznik požáru, úraz elektrickým proudem atd. Z tohoto důvodu je testování funkce BMS rozděleno do dvou fází. První fází je oživení řídicí desky Slave BMS a Master komunikační BMS. Druhou fází je otestování funkce BMS přímo na jednom bateriovém segmentu.

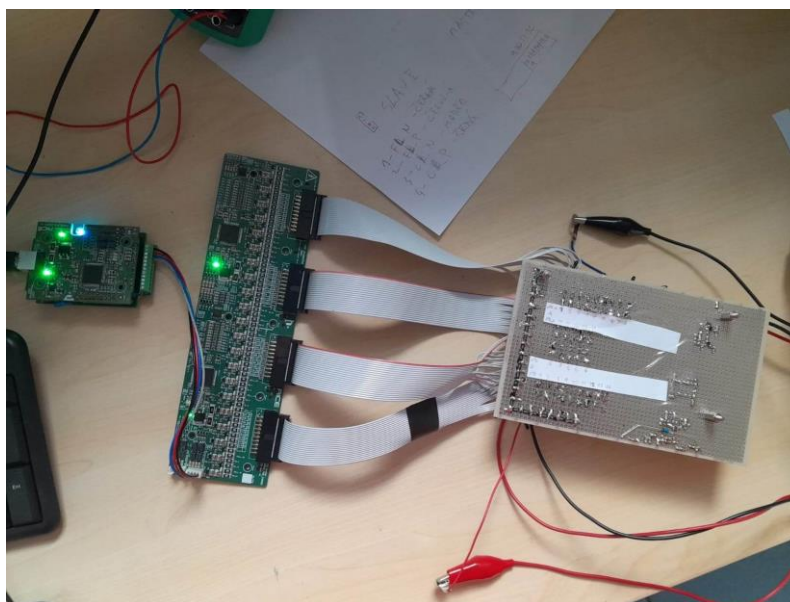
V první řadě byla oživena řídicí deska Master komunikační BMS. Na laboratorním zdroji bylo nastaveno napětí 5 V s proudovým omezením. Napětí ze zdroje bylo připojeno na napájecí piny řídicí desky. Předpokládaný odebíraný proud desky byl cca 10 mA. V momentě, kdy laboratorní zdroj setrvává v režimu konstantního napětí (CV) a deska odebírá přibližně předpokládaný proud, lze stanovit, že elektrická stránka desky je v pořádku. Následně byla Master komunikační BMS propojena s deskou CANARS externím modulem. Ing. Tomáš Košan, Ph.D vytvořil jednoduchý testovací firmware, který je nahraný v CANARS externím modulu. Tento modul se propojí s počítačem pomocí rozhraní USB a pomocí sériového emulátoru ho lze ovládat. Firmware umožňuje inicializaci řetězce obvodů BQ76L455A-Q1, vyčítání změřených napětí a teplot, ovládání balančních obvodů atd. Následující obrázek Obr. 42 vyobrazuje vyčítání změřených hodnot pomocí sériového emulátoru.

Ke vstupům AUX jsou připojené teplotní NTC senzory. Na výpisu emulátoru je vidět, že napětí vstupu AUX0 (Value 1.23) je 887 mV. Napětí je nižší než na ostatních AUX vstupech, jelikož v momentě výpisu byl ohříván příslušný NTC senzor.

```
Cells voltage [mV]:
Value 0.0: 7
Value 0.1: 6
Value 0.2: 7
Value 0.3: 7
Value 0.4: 7
Value 0.5: 7
Value 0.6: 6
Value 0.7: 7
Value 0.8: 7
Value 0.9: 5
Value 0.10: 6
Value 0.11: 6
Value 0.12: 3859
Value 0.13: 3678
Value 0.14: 3496
Value 0.15: 3337
AUX voltages [mV]:
Value 0.16: 1726
Value 0.17: 1295
Value 0.18: 1258
Value 0.19: 1265
Value 0.20: 1258
Value 0.21: 1267
Value 0.22: 1257
Value 0.23: 1265
Digital die temp. sensor [C]:
Value 38
Analog die temp. sensor [C]:
Value 31
Cells voltage [mV]:
Value 1.0: 6
Value 1.1: 6
Value 1.2: 6
Value 1.3: 6
Value 1.4: 7
Value 1.5: 2736
Value 1.6: 2735
Value 1.7: 2738
Value 1.8: 2741
Value 1.9: 2741
Value 1.10: 2743
Value 1.11: 2746
Value 1.12: 2746
Value 1.13: 2749
Value 1.14: 2749
Value 1.15: 2747
AUX voltages [mV]:
Value 1.16: 2567
Value 1.17: 2591
Value 1.18: 2594
Value 1.19: 2591
Value 1.20: 2588
Value 1.21: 2583
Value 1.22: 2596
Value 1.23: 887
Digital die temp. sensor [C]:
Value 30
Analog die temp. sensor [C]:
Value 26
Cells voltage [mV]:
Value 2.0: 6
Value 2.1: 7
Value 2.2: 5
Value 2.3: 6
Value 2.4: 5
Value 2.5: 5
Value 2.6: 2829
Value 2.7: 2829
Value 2.8: 2834
Value 2.9: 2833
Value 2.10: 2836
Value 2.11: 2838
Value 2.12: 2841
Value 2.13: 2844
Value 2.14: 2841
Value 2.15: 2841
AUX voltages [mV]:
Value 2.16: 2566
Value 2.17: 2614
Value 2.18: 2594
Value 2.19: 2604
Value 2.20: 2580
Value 2.21: 2593
Value 2.22: 2560
Value 2.23: 2517
Digital die temp. sensor [C]:
Value 28
Analog die temp. sensor [C]:
Value 27
```

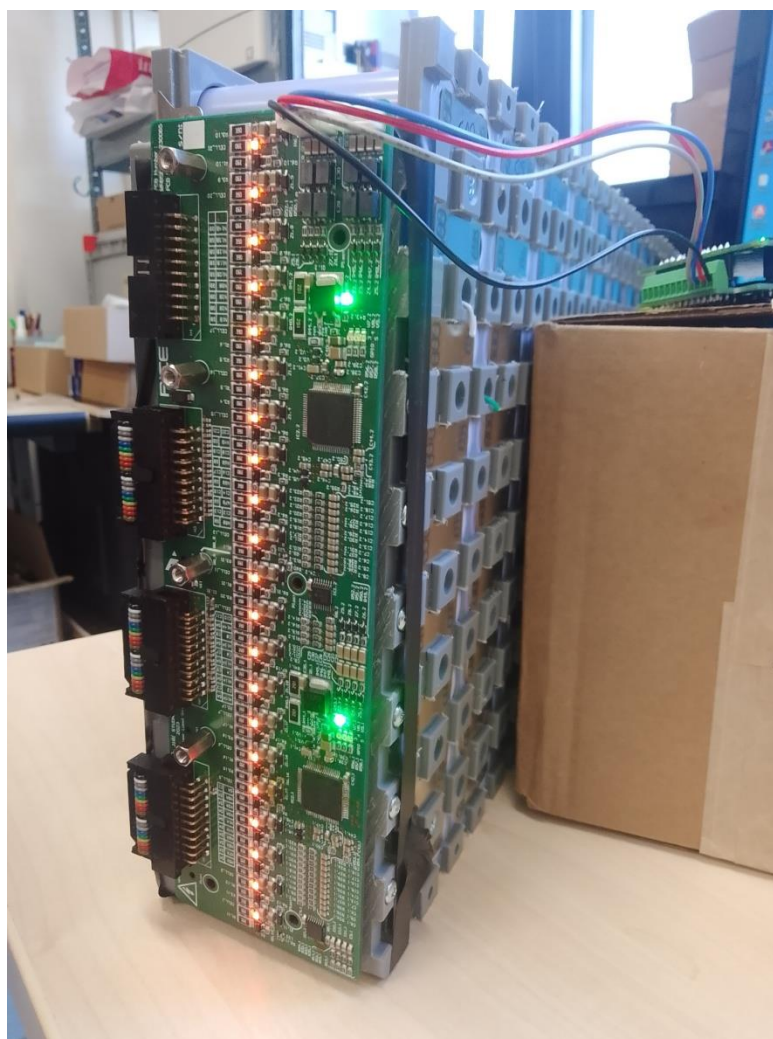
Obr. 42 Vychítání změřených hodnot pomocí sériového emulátoru

Následně byla podobným způsobem oživena řídicí deska Slave BMS. Bateriový segment je simulován sériovým zapojením rezistorů. Testovací dělič tvoří 21 rezistorů se jmenovitým odporem  $82\ \Omega$ . K děliči jsou připojeny napěťové vstupy desky Slave BMS. Dělič je napájen z laboratorního zdroje, který je nastaven na napětí 60 V s proudovým omezením na 100 mA. Samotný dělič odebírá ze zdroje proud přibližně 40 mA. Po připojení Slave BMS k děliči by měl být odebíráný proud právě 40 mA, protože čipy BQ76L455A-Q1 jsou ve sleep režimu. Následně byla propojena Slave BMS s Master komutační BMS pomocí komunikační sběrnice Daisy chain. Po úspěšné inicializaci čipů se zvýší proud přibližně o 15 mA. Pomocí sériového emulátoru byly otestovány funkce vyčítání změřených parametrů, ovládání GPIO a ovládání balančních obvodů. Následující obrázek vyobrazuje testovací sestavu s přípravkem při ověřování funkce BMS.



Obr. 43 BMS připojená k testovacímu přípravku

Po úspěšném otestování Slave BMS na odporovém děliči bylo možné ověřit funkci BMS přímo na bateriovém segmentu. Při práci s bateriovým segmentem bylo nutné dodržovat zásady práce pod napětím. Svaření bateriových článků provedla specializovaná firma. Na svařený bateriový segment byla vytvořena kabeláž pro vyvedení jednotlivých napětí článků a teplotních čidel do Slave BMS. Následně byla propojena Master komunikační BMS se Slave BMS a byly ověřeny veškeré funkce Slave BMS přímo na bateriovém segmentu. Následující obrázek vyobrazuje bateriový segment s připojenou Slave BMS. Na obrázku lze vidět 21 rozsvícených oranžových LED diod, které signalizují balancování všech bateriových článků. Každá oranžová dioda signalizuje balancování příslušného článku.



Obr. 44 Bateriový segment s BMS v provozu

## Zhodnocení a závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat hlavní pravidla pro návrh trakčních baterií, navrhnout mechanické a elektrické uspořádání komponent baterie, navrhnout a realizovat systém správy baterií (BMS), zkonstruovat jeden bateriový segment a experimentálně ověřit funkci celé BMS na bateriovém segmentu.

V první kapitole 1 této diplomové práce byla provedena podrobná rešerše baterií, které jsou vhodné pro stavbu velkých trakčních baterií. Z této rešerše vyplývá, že v dnešní době jsou pro trakční baterie nejvhodnější bateriové články technologie typu li-ion a li-pol. Obě tyto technologie mají vysokou hustotu energie (až **270 Wh/kg**), velké jmenovité napětí jednoho článku (**obvykle 3,6 V**), vysoké vybíjecí proudy (až **120 C**) atd. Na základě těchto poznatků byly pro naši trakční baterii zvoleny články typu li-ion.

V následující druhé kapitole 2 byla popsána hlavní pravidla pro návrh trakčních baterií. Návrhová pravidla, která jsou popsána v této kapitole, vycházejí z pravidel studentské formule a technické normy. Vzhledem k podobnosti pohonu naší elektrické motokáry a elektrické formule, tak jsou pravidla studentské formule velice směrodatná pro návrh trakční baterie. Studentská formule je rozdělena do mnoha divizí, v této práci jsou rozebrána pravidla divizí Formula SAE [18] a Formula Student Germany (FSG) [19]. Dále je provedena rešerše technické normy: „Bezpečnostní požadavky pro akumulátorové baterie a bateriové instalace – Část 6: Bezpečný provoz lithium-ion baterií pro trakční aplikace – ČSN EN IEC 62485-6“ [20]. S ohledem na tyto pravidla byl prováděn návrh trakční baterie a návrh systému správy baterií (BMS). Obecně lze říci, že pro konstrukci specifické trakční baterie je nutné sledovat příslušné technické normy na základě využití a technologie baterie.

Ve třetí kapitole 3 byl proveden teoretický rozbor systémů správy baterií (BMS) a principů balancování bateriových článků. Na základě tohoto rozboru byla zvolena topologie **Master – Slave BMS s pasivním balancováním** pro náš systém správy baterie (BMS). Tato topologie se vyznačuje svojí robustností a využitelností pro velké trakční baterie (vysoký počet sériově řazených článků).

V následující čtvrté kapitole 4 byl proveden výběr a rozbor komponent pro konstrukci trakční baterie a BMS. Pro trakční baterii byl zvolen cylindrický li-ion článek **INR21700-40T** [23] od firmy Samsung. Tento článek má jmenovité napětí **3,6 V**, jmenovitou vybíjecí kapacitu **3900 mAh** a kontinuální vybíjecí proud **35 A**. Funkce BMS obstarává



integrovaný obvod **BQ76L455A-Q1** od firmy Texas Instruments. Tento obvod monitoruje a balancuje až **16 li-ion** článků, měří až **8** teplot a umožňuje komunikaci až se **šestnácti** sériově řazenými těmito obvody.

V páté kapitole 5 byl proveden návrh elektrické a mechanické konstrukce trakční baterie elektrické motokáry. Návrh elektrických parametrů vychází ze zadání, tyto parametry jsou uvedené právě v této kapitole. Pro napájení elektrické motokáry NeoFELis jsou využity dvě sériově řazené trakční baterie. Tyto dvě sériově řazené baterie (konfigurace **126s 9p**) mají jmenovité napětí **454 V**, energii **14,6 kWh** a kontinuální vybíjecí proud **315 A**. Jednu trakční baterii lze využít pro napájení elektrické čtyřkolky. Každá trakční baterie je rozdělena do tří segmentů. Tyto segmenty jsou uzavřeny v trakčním kontejneru.

V šesté kapitole 6 byl proveden návrh systému baterií (BMS). Navržený systém BMS je rozdělen na dvě řídicí desky. První je řídicí deska Slave BMS, která měří a balancuje **21** sériově řazených článků, měří **28** externích teplot článků, měří **2** interní teploty DPS a komunikuje s dalšími Slave BMS či s Master BMS. Každý bateriový segment je vybaven jednou Slave BMS, tudíž jedna celá trakční baterie obsahuje tři tyto desky, Finální řídicí deska Master BMS nebyla předmětem této práce. Pro účely ladění byla vyvinuta řídicí deska Master komunikační BMS. Tato deska je tvořena dvěma DPS. Primární DPS je CANARS externí modul, který je vybaven rozhraními USB, CAN bus a RS485. Tato DPS nebyla navrhována v této diplomové práci. Druhou DPS je právě Master komunikační BMS, která vytváří rozhraní mezi CANARS externím modulem a Slave BMS. Pomocí PC lze provádět servisní účely či vyčítání měřených dat.

Sedmá 7 a osmá 8 kapitola této práce se zabývá praktickou realizací bateriového segmentu a ověřením funkce BMS. Na základě návrhu v kapitole 5.2.1 byly vyrobeny jednotlivé komponenty bateriového segmentu. Následně byl segment smontován a poslán do specializované firmy, která se zabývá svařováním článkových baterií. Dále byly oživeny řídicí desky Slave BMS a Master komunikační BMS. Z bezpečnostních důvodů bylo prvotní ověření funkce BMS provedeno na rezistorovém děliči, který simuluje sériově řazené bateriové články. Po úspěšném otestování funkcí BMS na děliči byla BMS připojena ke svařenému bateriovému segmentu. Na segmentu byly opět úspěšně ověřeny veškeré funkce Slave BMS. Lze tedy konstatovat, že zadání této diplomové práce bylo splněno v plném rozsahu.

Vývoj trakční baterie motokáry NeoFELis nekončí touto diplomovou prací. Dále bude nutné vyvinout finální Master BMS, zvolit vhodná proudová a napěťová čidla, navrhnout vhodné jištění bateriového kontejneru, vybrat vhodná akumulátorová izolační relé a

navrhnout vhodné uspořádání těchto komponent v kontejneru. Hlavním přínosem této diplomové práce je posunutí vývoje trakční baterie, zkonstruování a zprovoznění Slave BMS a Master komunikační BMS. Řídicí desku Master komunikační BMS lze použít pro ladění všech BMS, které jsou založené na integrovaném obvodu BQ76L455A-Q1.

## Literatura

- [1] *Epec: Battery cell comparison* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>
- [2] *ScienceDirect: Lead Acid Battery* [online]. 2009 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/lead-acid-battery>
- [3] KADRŇKA, Petr. *Zkoumání teplotních změn olověného akumulátoru v režimu hybridních vozidel*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Petr Křivík.
- [4] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 2. vydání. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity, 1998. ISBN 80-7082-411-5.
- [5] *Skoro vše o akumulátorech* [online]. 2008 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: [https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2019/06/Lux\\_Akumulatory.pdf](https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2019/06/Lux_Akumulatory.pdf)
- [6] MÁNEK, Jan. *Návrh systému pro správu baterií (BMS) pro elektrickou formuli*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Vít Hlinovský.
- [7] IRA, Lukáš. *Návrh a realizace battery management systému trakční baterie*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Pavel Skarolek.
- [8] *Cactusbush: Familiar Batteries* [online]. 2014 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://cactusbush.wordpress.com/2014/11/23/familiar-batteries/>
- [9] *Battery charger CZ: NiCd Nikl-kadmiový akumulátor* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: [https://www.bch-battery.cz/NiCd-Nikl-kadmiovy-akumulator-a11\\_14.htm](https://www.bch-battery.cz/NiCd-Nikl-kadmiovy-akumulator-a11_14.htm)
- [10] HAMMERBAUER, Jiří. *Sekundární články NiCd* [online]. In: . s. 27 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kei/nzas/prednasky.html>
- [11] *Battery university: Discharge characteristics of li-ion* [online]. 2021 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-501a-discharge-characteristics-of-li-ion>
- [12] *ResearchGate: Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-configuration-of-rechargeable-Li-ion-batteries-Na-ion-Mg-ion-or\\_fig8\\_284136761](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-configuration-of-rechargeable-Li-ion-batteries-Na-ion-Mg-ion-or_fig8_284136761)
- [13] *Battery university: Types of lithium-ion* [online]. 2021 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [14] HAMMERBAUER, Jiří. *Akumulátory li-ion* [online]. In: . s. 10 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kei/nzas/prednasky.html>
- [15] KOMRSKA, Tomáš. *Trakční baterie* [online]. In: . s. 66 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/emb/prednasky.html>

- [16] *Velo Fiala: Rozdělení baterií podle elektrochemického principu* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.velofiala.cz/n/rozdeleni-baterii-podle-elektrochemickeho-principu>
- [17] HAMMERBAUER, Jiří. *Akumulátory li-pol* [online]. In: . s. 4 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kei/nzas/prednasky.html>
- [18] *Formula SAE: FSAE Rules 2023* [online]. 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://fsaeonline.com/cdswweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [19] *Formula Student Germany: Rules for FSG 2023* [online]. 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [20] ČSN EN IEC 62485-6. *Bezpečnostní požadavky pro akumulátorové baterie a bateriové instalace. Část 6: Bezpečný provoz lithium-ion baterií pro trakční aplikace*. 2021.
- [21] *Synopsys: What is a Battery Management System?* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>
- [22] *Ionenergy: How Does Cell Balancing Improve Battery Life* [online]. 2022 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.ionenergy.co/resources/blogs/cell-balancing-battery-life/>
- [23] *TME: Datasheet INR21700-40T* [online]. 2017 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/cz/details/accu-inr21700-40t/akumulatory/samsung-sdi/inr21700-40t/?gclid=CjwKCAjw6vyiBhB\\_EiwAQJRopgjkHhKdBWmegzM1EMtb09l15ttWFT5rEPE7F7L-yrXzcTUyhgU9dhoCBN8QAvD\\_BwE&gclsrc=aw.ds](https://www.tme.eu/cz/details/accu-inr21700-40t/akumulatory/samsung-sdi/inr21700-40t/?gclid=CjwKCAjw6vyiBhB_EiwAQJRopgjkHhKdBWmegzM1EMtb09l15ttWFT5rEPE7F7L-yrXzcTUyhgU9dhoCBN8QAvD_BwE&gclsrc=aw.ds)
- [24] *All datasheet: BQ76PL455A* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/859808/TI1/BQ76PL455A.html>
- [25] *Texas Instruments: SN74LV4051A-Q1* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://www.ti.com/product/SN74LV4051A-Q1?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=asc-int-null-prodfolderdynamic-cpc-pf-google-ww-int&utm\\_content=prodfolddynamic&ds\\_k=DYNAMIC+SEARCH+ADS&DCM=yes&gclid=CjwKCAjw6vyiBhB\\_EiwAQJRopiTDAMSfzhpruDVHMPxcCLXiOeB-vb-V882WoOao9UvqNzIDccVYoRoCdDoQAvD\\_BwE&gclsrc=aw.ds](https://www.ti.com/product/SN74LV4051A-Q1?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=asc-int-null-prodfolderdynamic-cpc-pf-google-ww-int&utm_content=prodfolddynamic&ds_k=DYNAMIC+SEARCH+ADS&DCM=yes&gclid=CjwKCAjw6vyiBhB_EiwAQJRopiTDAMSfzhpruDVHMPxcCLXiOeB-vb-V882WoOao9UvqNzIDccVYoRoCdDoQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds)
- [26] *Texas Instruments: Bq76PL455A-Q1 Uses* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/an/slva785/slva785.pdf?ts=1682455179120&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slva785/slva785.pdf?ts=1682455179120&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [27] *Flaviutamas: Boost Converter Power Stage Calculator* [online]. 2020 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://flaviutamas.com/calc/electronics/dc-dc/boost>
- [28] *Texas Instruments: TPS61085* [online]. 2014 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://www.ti.com/product/TPS61085?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=app-null-null-GPN\\_EN-cpc-pf-google-ww-int&utm\\_content=TPS61085&ds\\_k=TPS61085&DCM=yes&gclid=Cj0KCQjwmN2iBhC](https://www.ti.com/product/TPS61085?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=app-null-null-GPN_EN-cpc-pf-google-ww-int&utm_content=TPS61085&ds_k=TPS61085&DCM=yes&gclid=Cj0KCQjwmN2iBhC)

rARIsAG\_G2i5S-Y-EgtM-VSrh-LeEk7R-

uAWaZ2mK3Lg5lsrqVvN5B1RGpVaiqiIaAr\_GEALw\_wcB&gclsrc=aw.ds

- [29] VALDA, Lukáš. *Metody a algoritmy vyvažování sériově řazených lithiových článků*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jiří Hammerbauer.

## Přílohy

### Přílohy A – Schémata Slave BMS

A.1	Slave BMS – Main.....	II
A.2	Slave BMS – BQ76L455A-Q1 .....	III
A.3	Slave BMS – Aux inputs .....	IV
A.4	Slave BMS – Cell circuit .....	V
A.5	Slave BMS – Cell A.....	VI
A.6	Slave BMS – Cell B.....	VII
A.7	Slave BMS – LED .....	VIII
A.8	Slave BMS – Connectors .....	IX

### Přílohy B – Schémata Master komunikační BMS

B.1	Master komunikační BMS – Main.....	X
B.2	Master komunikační BMS – BQ76L455A-Q1 .....	XI
B.3	Master komunikační BMS – DC/DC 5 to 12 V .....	XII
B.4	Master komunikační BMS – LED .....	XIII
B.5	Master komunikační BMS – Connectors.....	XIV

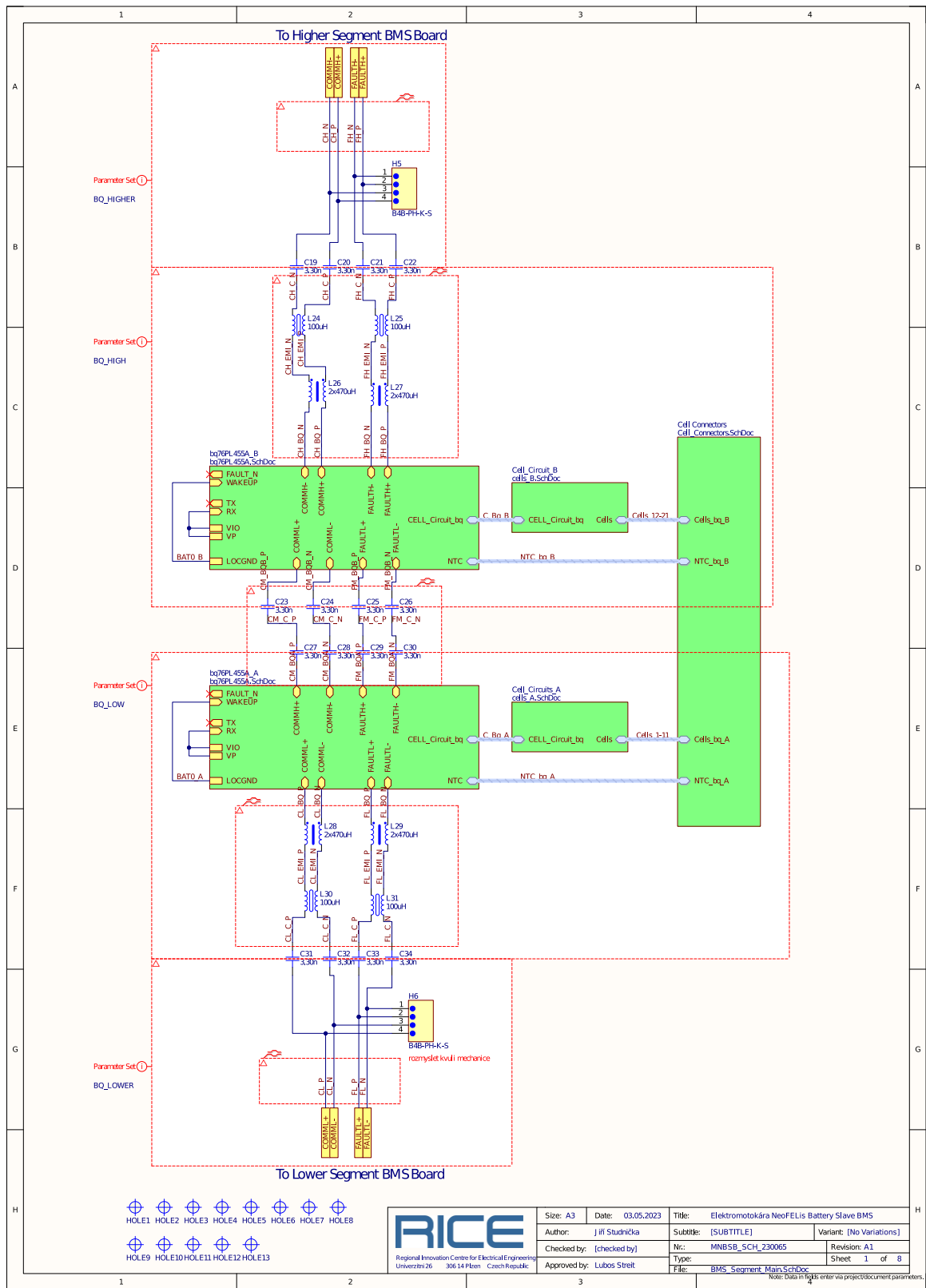
### Přílohy C – DPS (PCB) Slave BMS

C.1	Slave BMS – DPS – Top layer .....	XV
C.2	Slave BMS – DPS – Mid1 layer .....	XV
C.3	Slave BMS – DPS – Mid2 layer .....	XV
C.4	Slave BMS – DPS – Bottom layer.....	XV

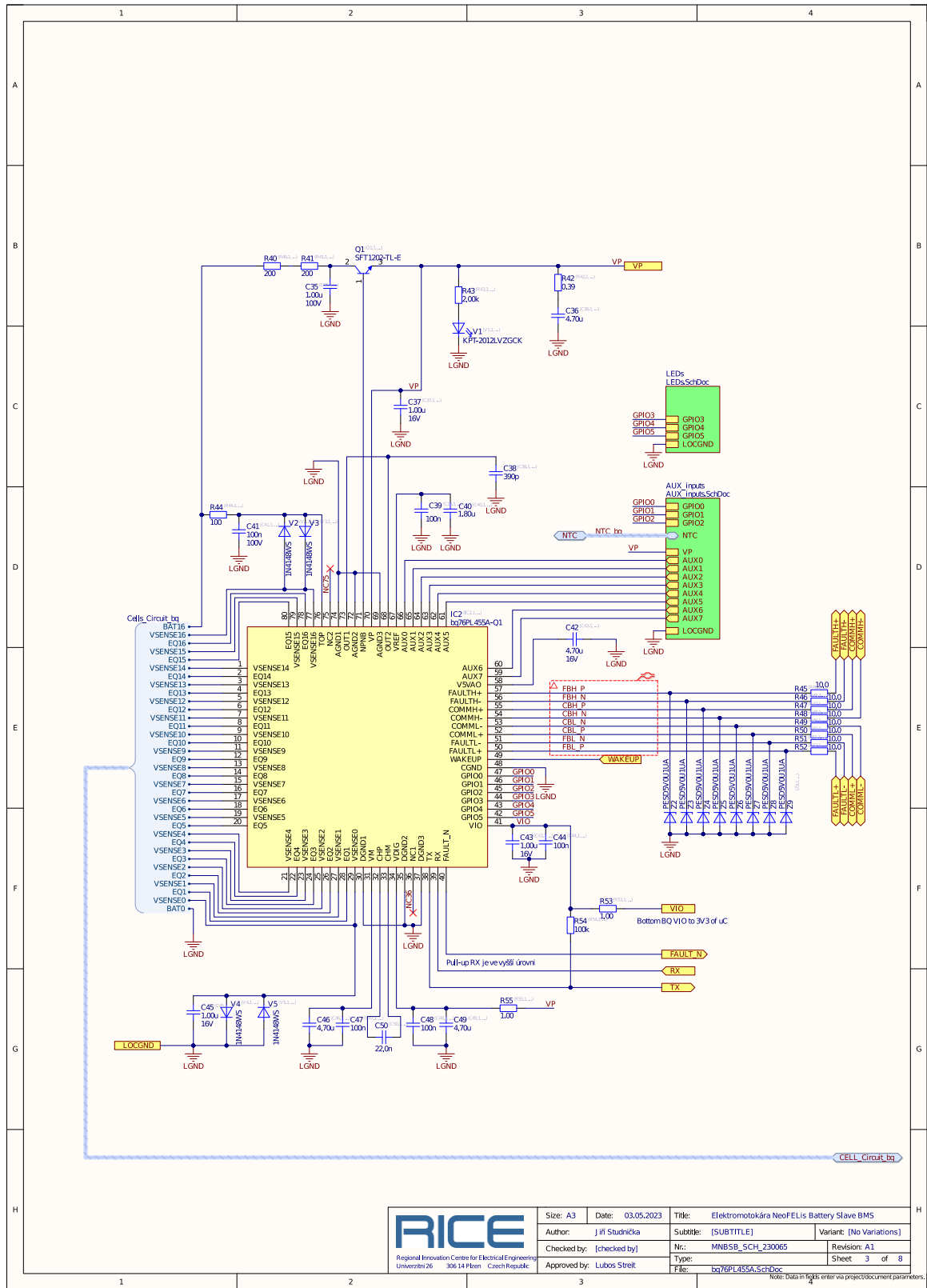
### Přílohy D – DPS (PCB) Master komunikační BMS

D.1	Master komunikační BMS – DPS – Top layer .....	XVI
D.2	Master komunikační BMS – DPS – Mid1 layer .....	XVI
D.3	Master komunikační BMS – DPS – Mid2 layer .....	XVII
D.4	Master komunikační BMS – DPS – Bottom layer.....	XVII

### A.1 Slave BMS – Main

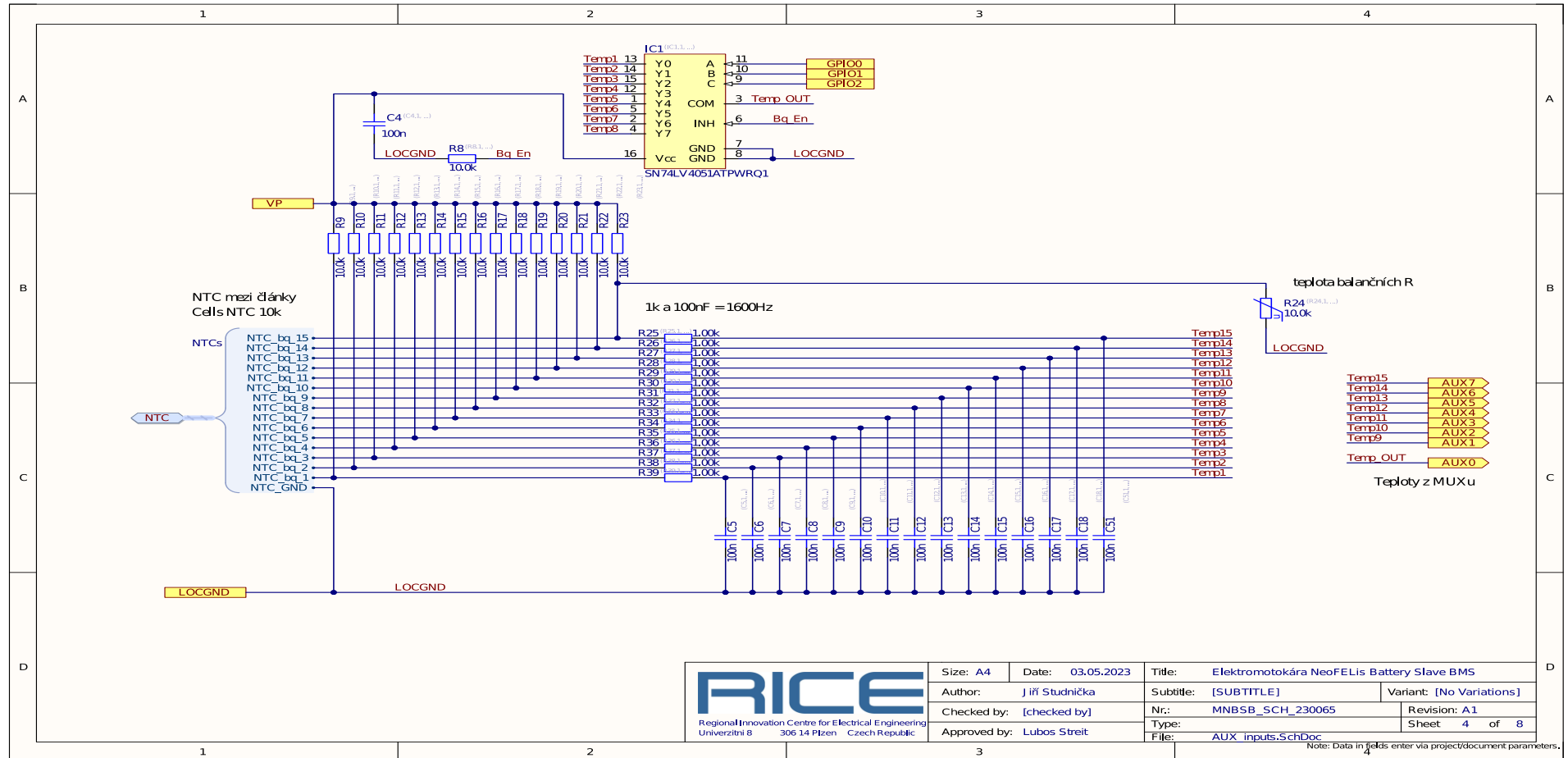


## A.2 Slave BMS – BQ76L455A-Q1

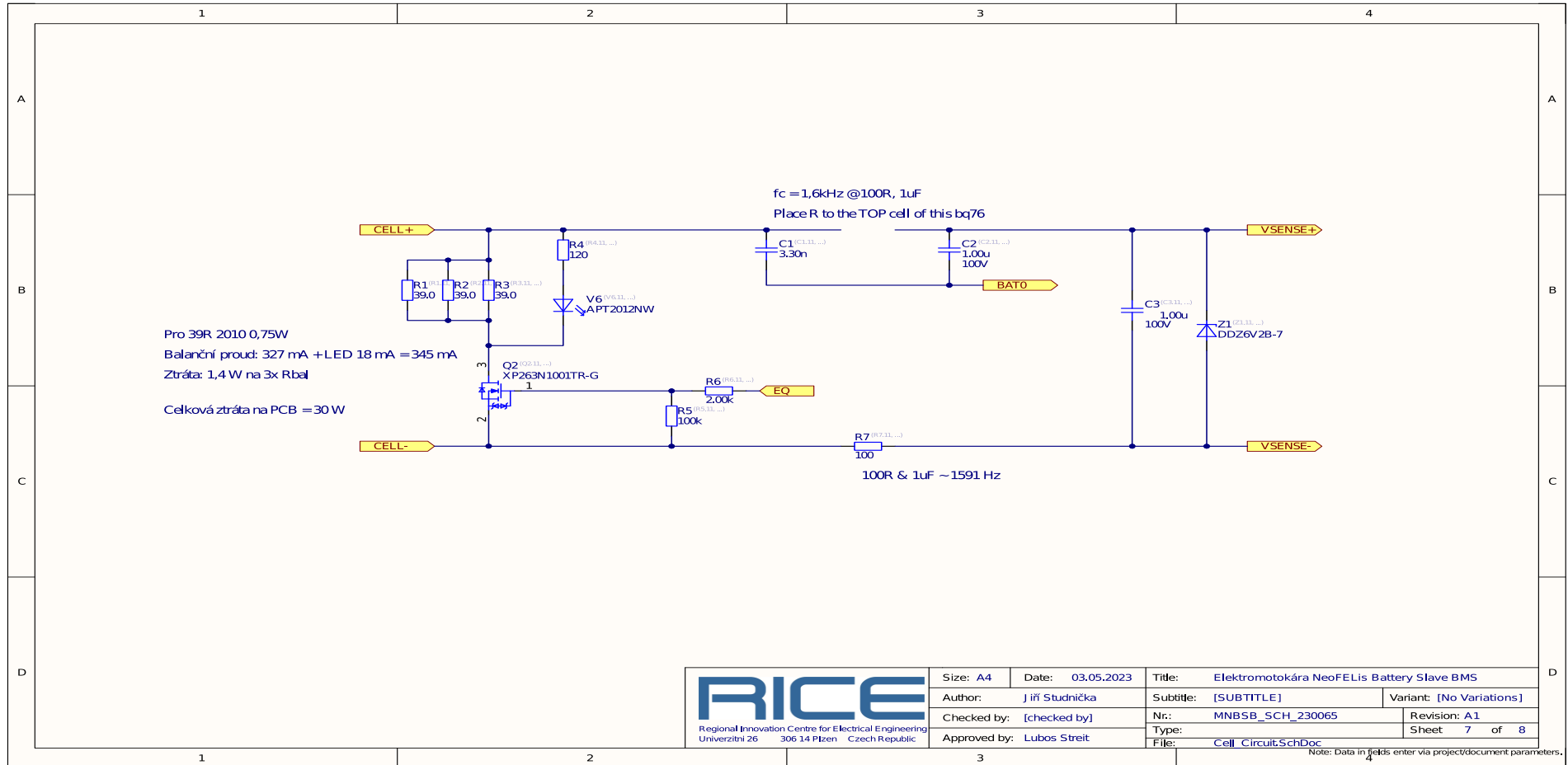




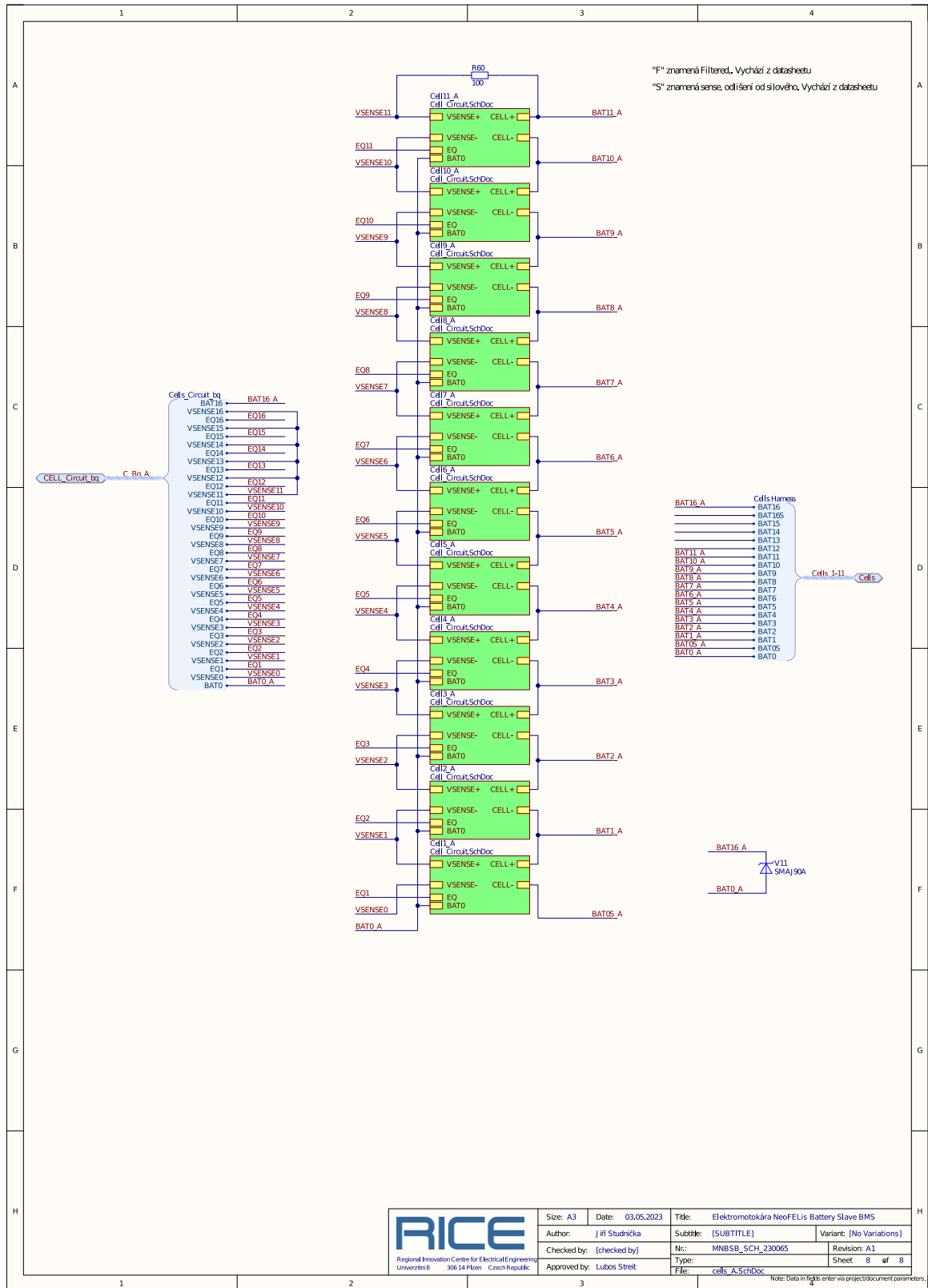
### A.3 Slave BMS – Aux inputs



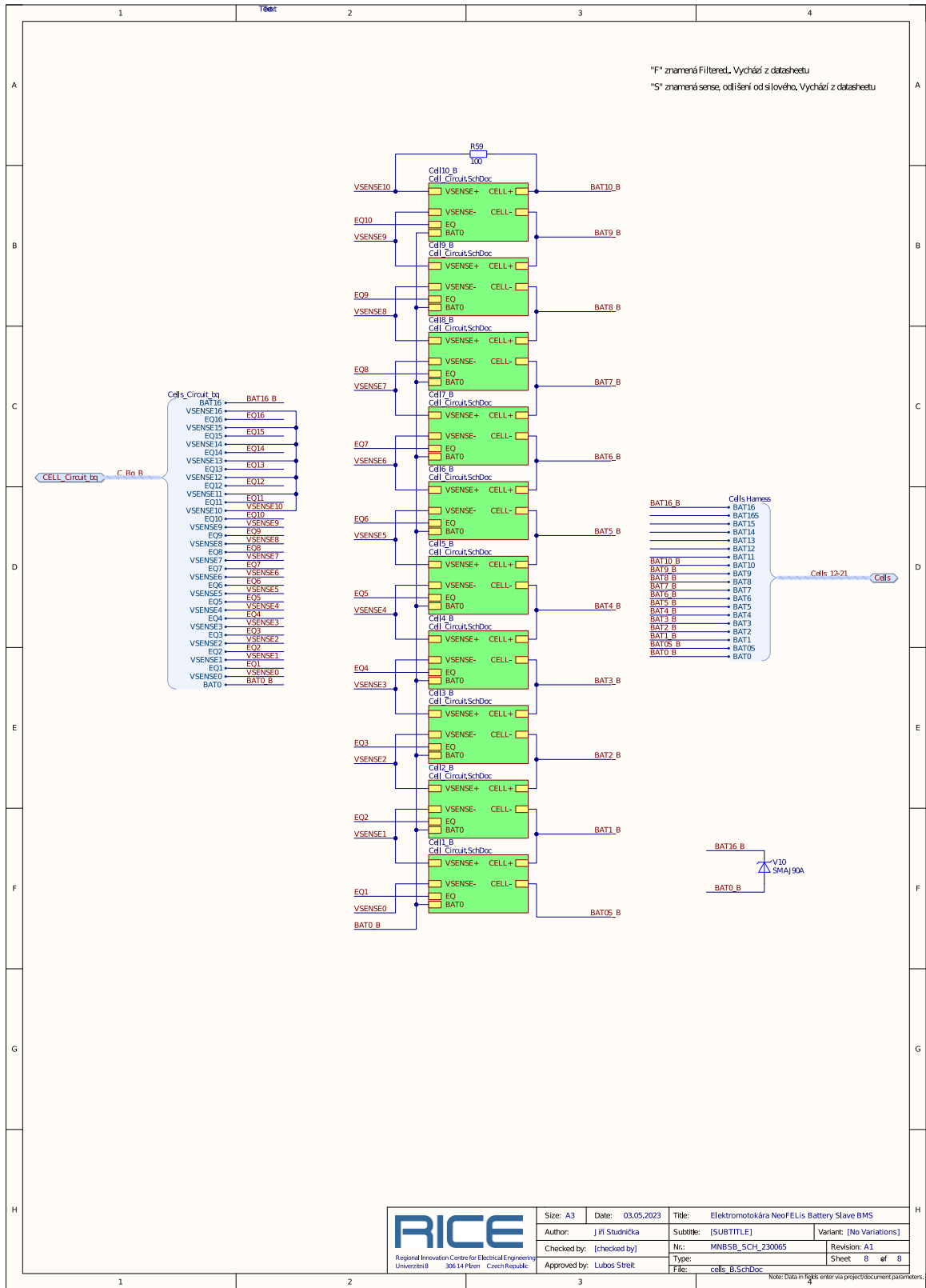
A.4 Slave BMS – Cell circuit




### A.5 Slave BMS – Cell A

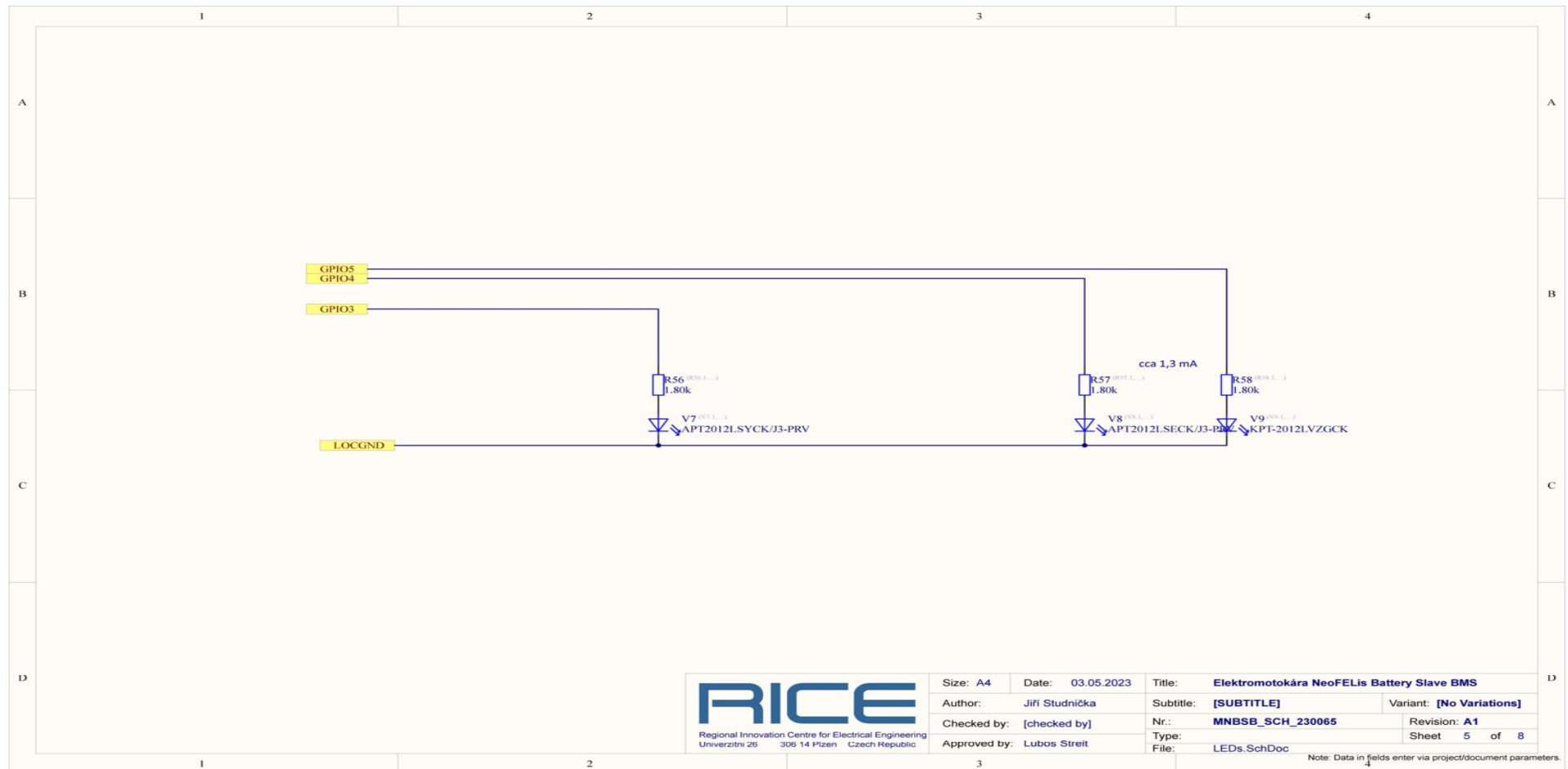



### A.6 Slave BMS – Cell B



 Regional Innovation Centre for Electrical Engineering University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic	Size: A3	Date: 03.05.2023	Title: Elektromotorkára NeoFELis Battery Slave BMS	
	Author: Jiri Studnicka	SubTitle: (SUBTITLE)	Variant: (No Variations)	
	Checked by: (checked by)	Nr.: MNBSB_SCH_230065	Revision: A1	
	Approved by: Lubos Streit	Type: cells_B.SchDoc	Sheet 8 of 8	
			Note: Data in light enter via project document parameters.	

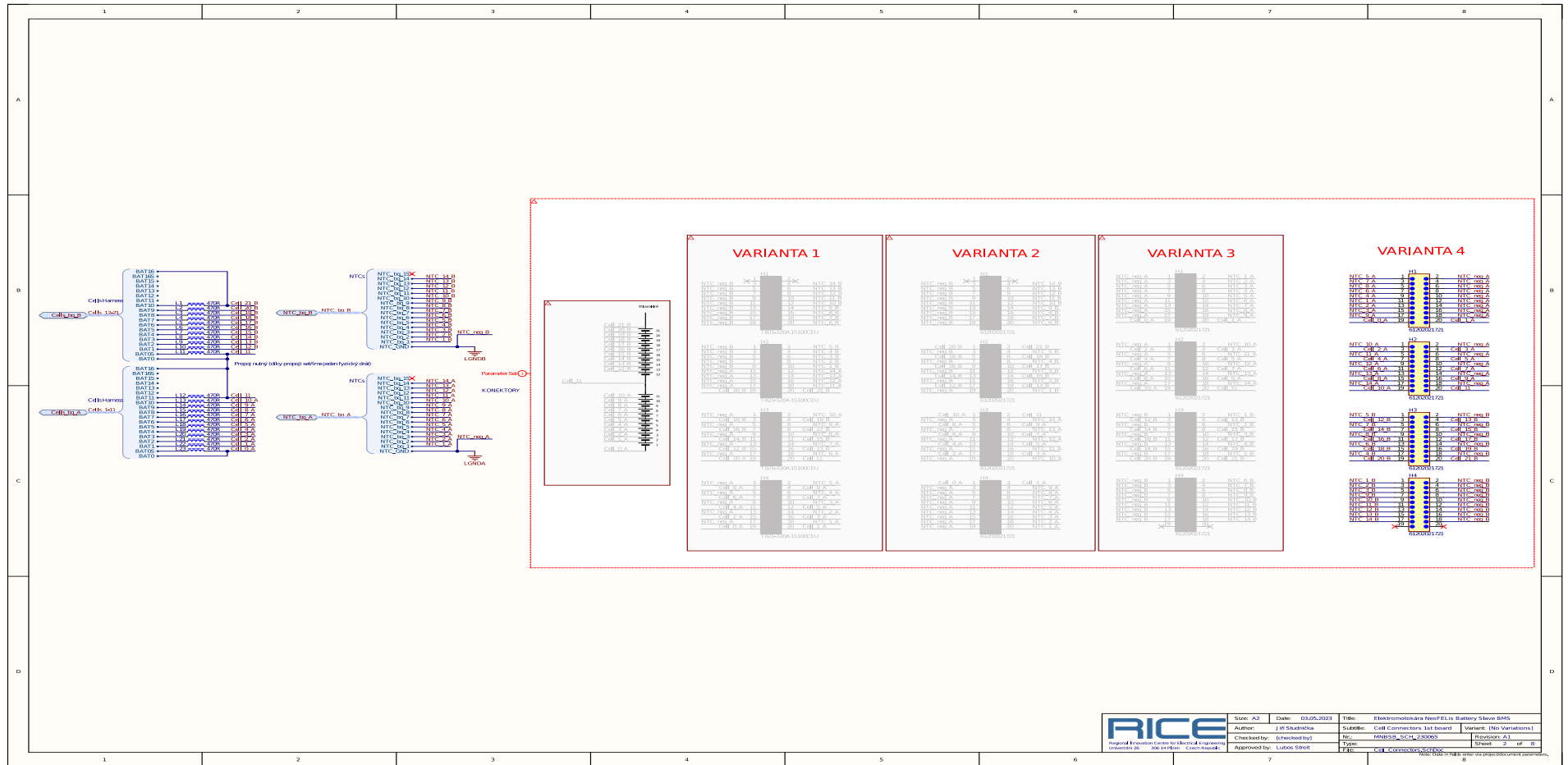
### A.7 Slave BMS – LED



 <p>Regional Innovation Centre for Electrical Engineering Univerzitní 26 306 14 Pízen Czech Republic</p>	Size: A4	Date: 03.05.2023	Title: Elektromotokára NeoFELis Battery Slave BMS	
	Author: Jiří Studnička	Subtitle: [SUBTITLE]		Variant: [No Variations]
	Checked by: [checked by]	Nr.: MNBSB_SCH_230065	Revision: A1	
	Approved by: Lubos Strett	Type: LEDs_SchDoc	Sheet 5 of 8	

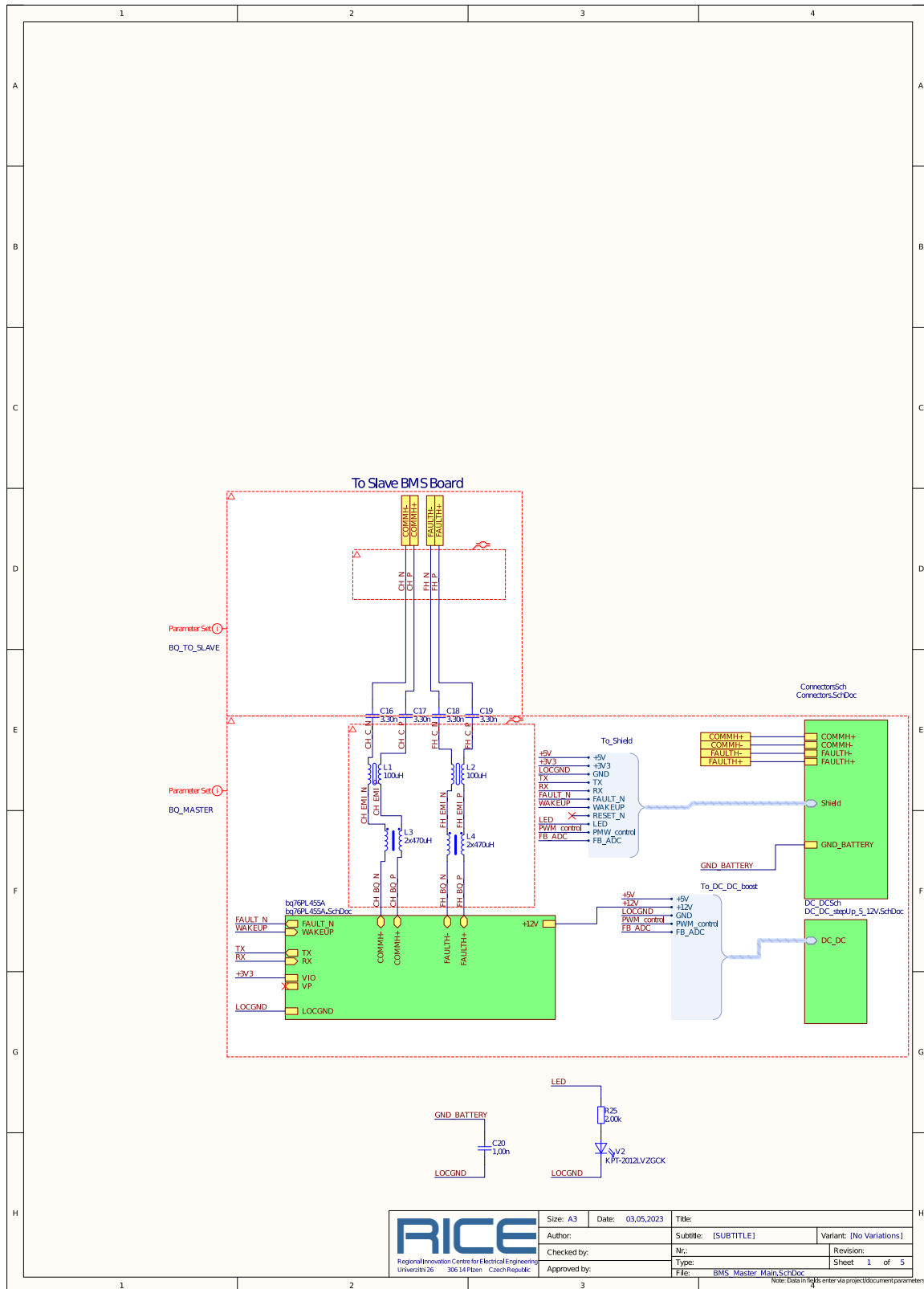
Note: Data in fields enter via project/document parameters.


### A.8 Slave BMS – Connectors



	Size: A2	Date: 03.09.2023	Title: Elektromobilná vozidla ELH Battery Slave BMS
	Author: J.P.Štancová	Subject: Cell Connectors 1st board	Version: 1(No Variations)
	Checked by: [checked by]	Nr.: MMBSS_SCH_23005	Revision: A1
	Approved By: LUBOS ŠTEK	Type: PCB CONNECTORS/PCB/CAD	Sheet: 2 of 3

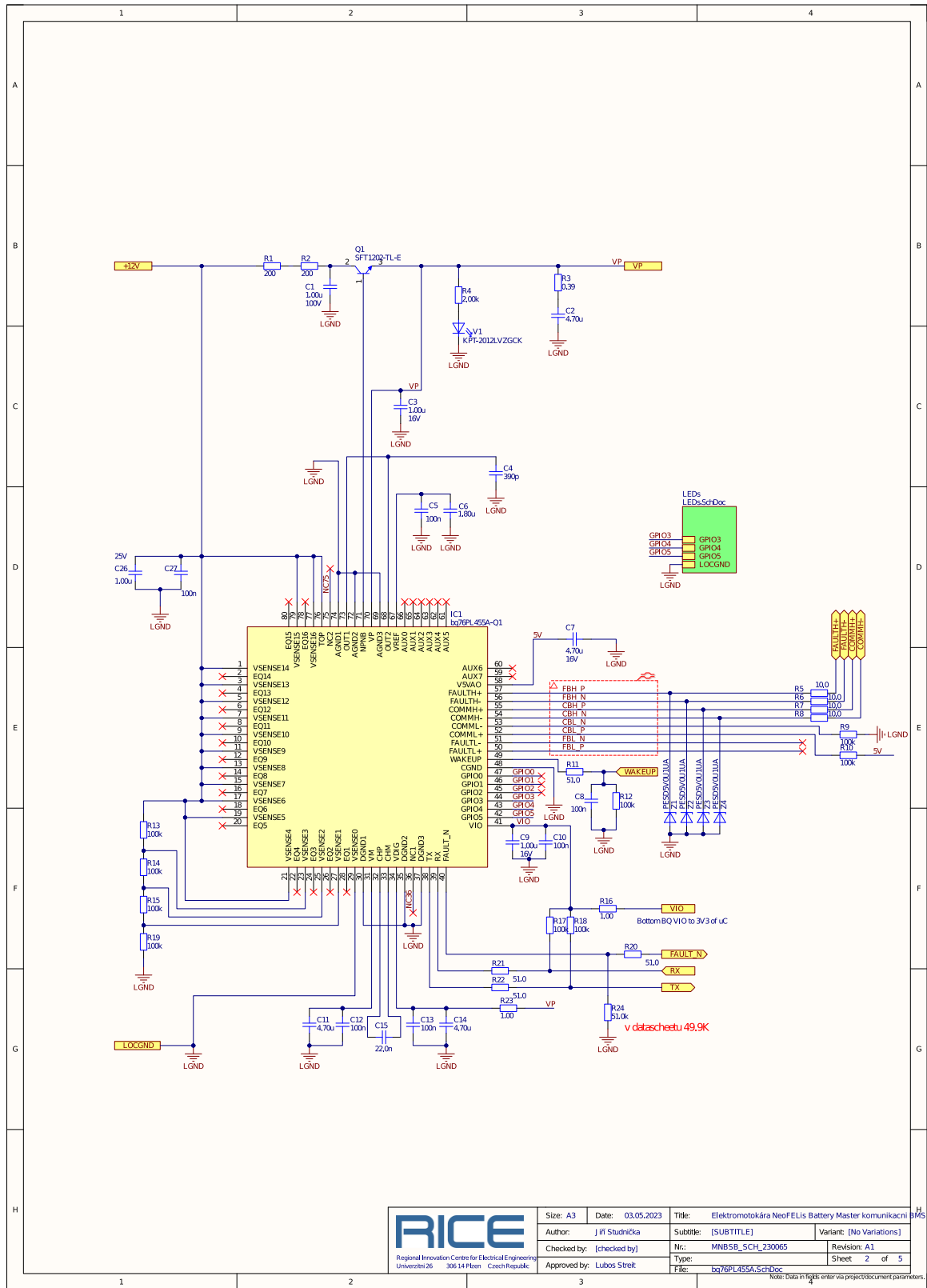
### B.1 Master komunikační BMS – Main



 <p>Regional Innovation Centre for Electrical Engineering University of West Bohemia, Czech Republic</p>	Size: A3	Date: 03,05,2023	Title:
	Author:		SubTitle: [SUBTITLE]
	Checked by:		Nr.:
	Approved by:		Type:
			File: BMS_Master_Main.SchDoc
			Variant: [No Variations]
			Revision:
			Sheet 1 of 5

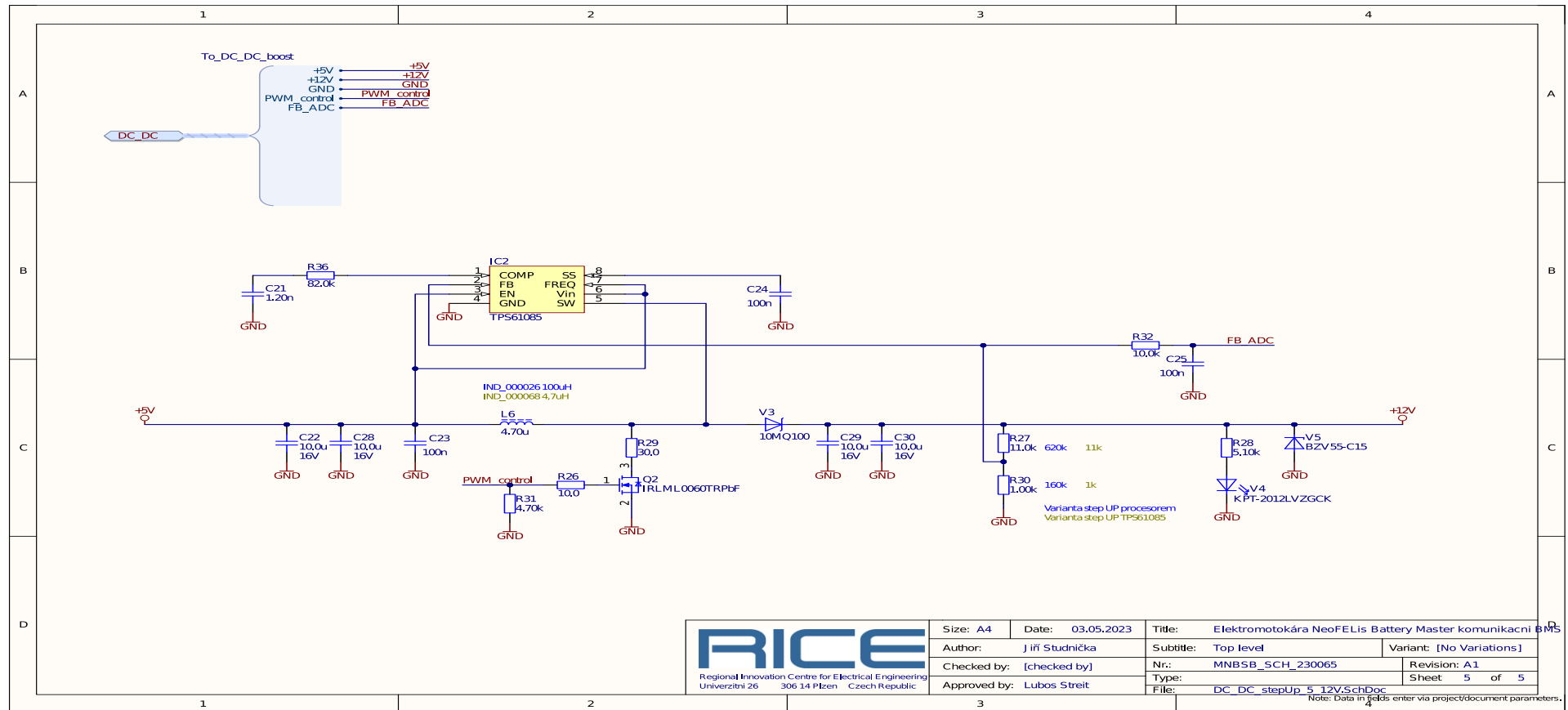
Note: Data in fields enter via project/document parameters.

## B.2 Master komunikační BMS – BQ76L455A-Q1

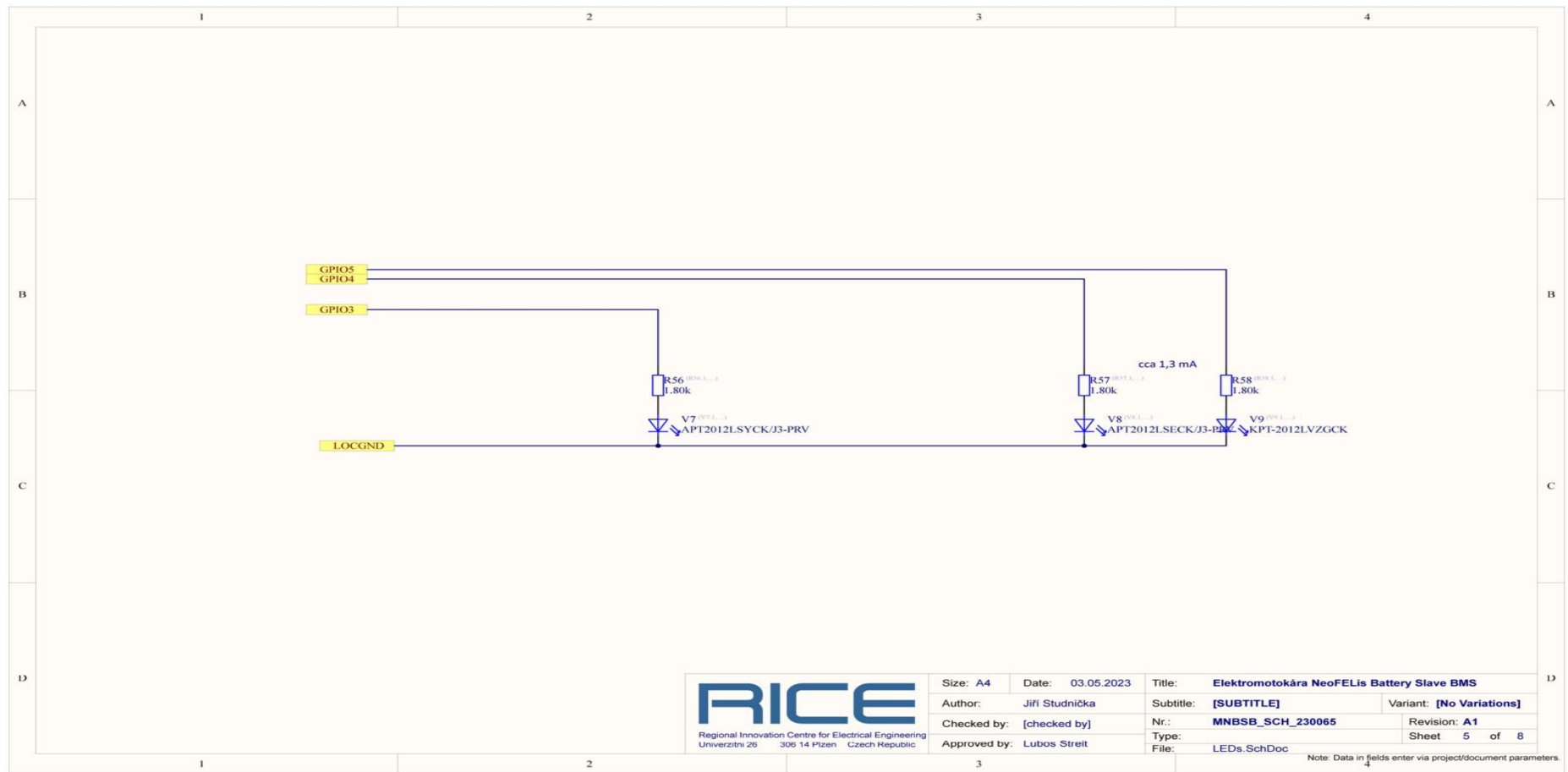




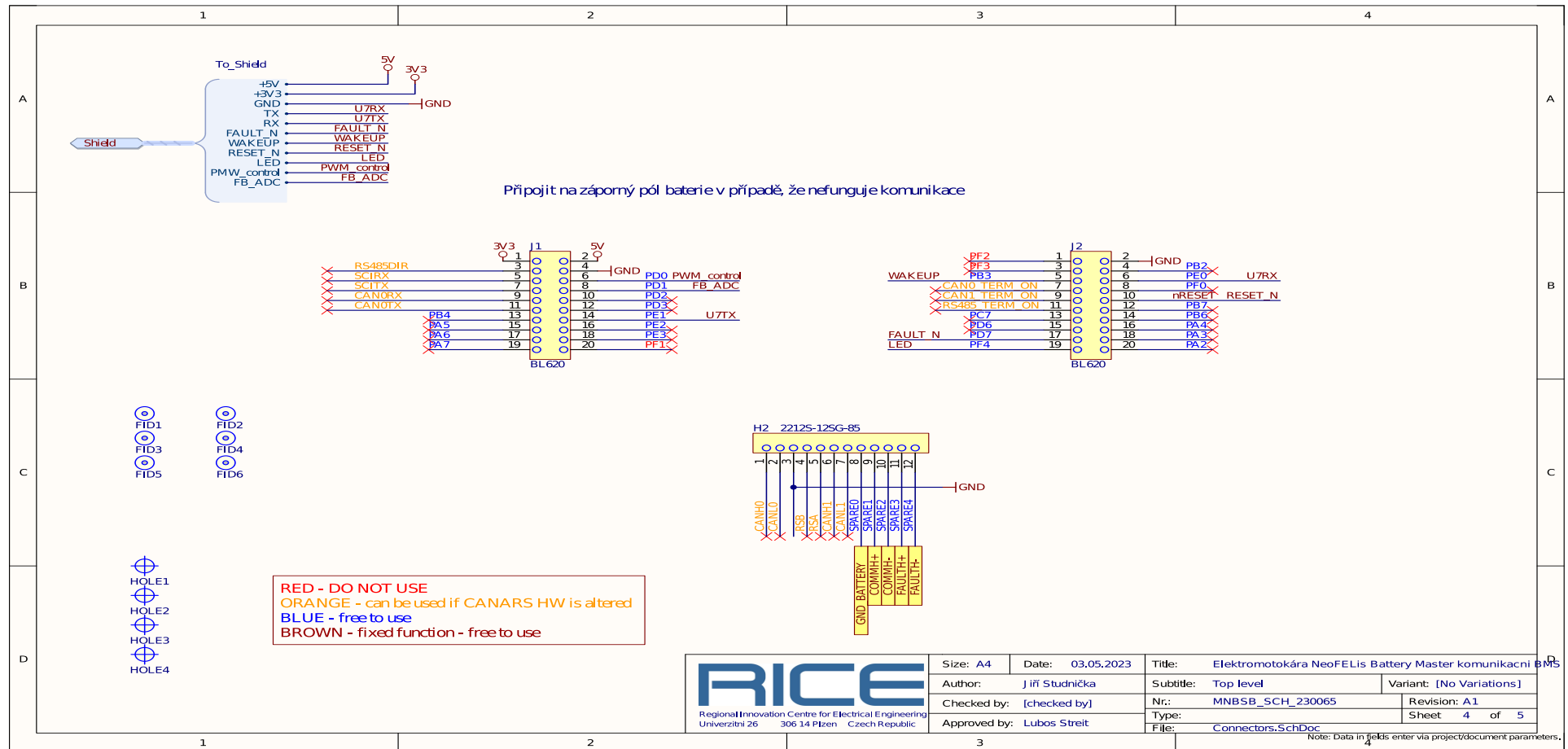
### B.3 Master komunikační BMS – DC/DC 5 to 12 V

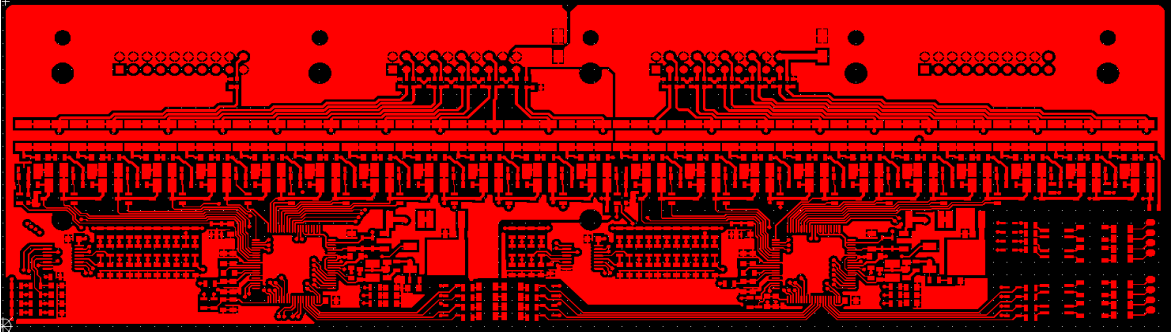
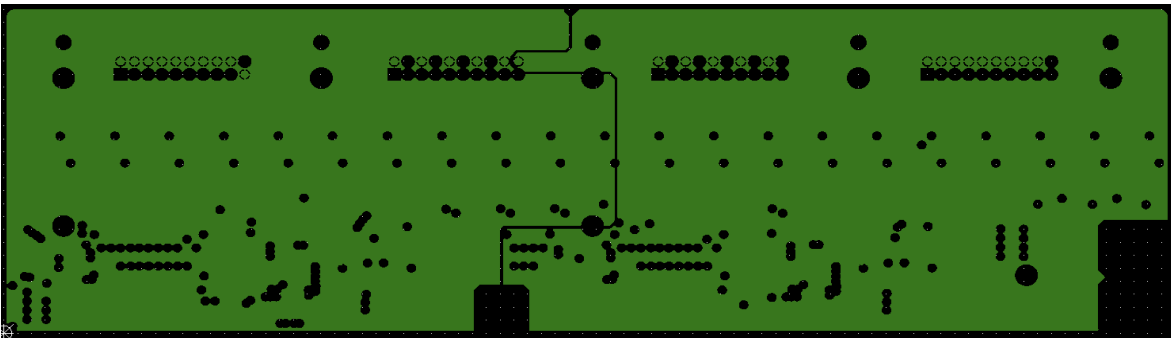
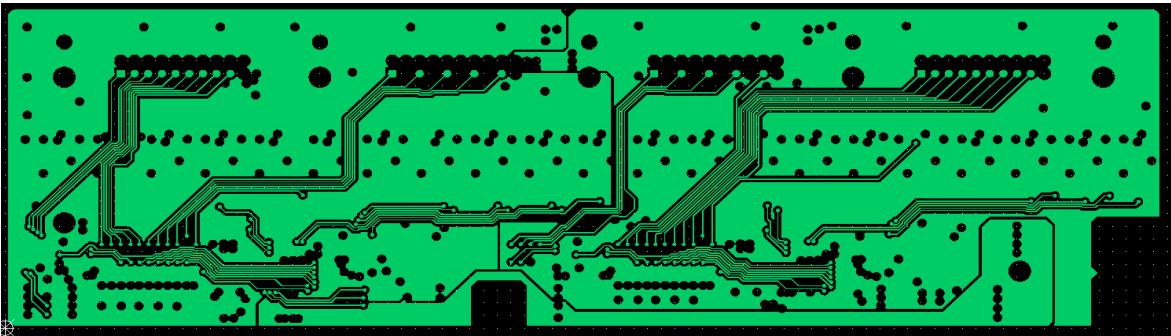
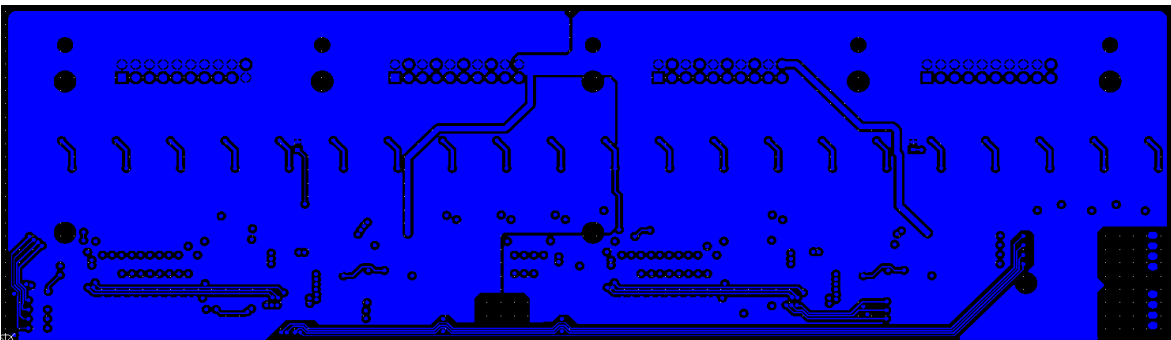


### B.4 Master komunikační BMS – LED

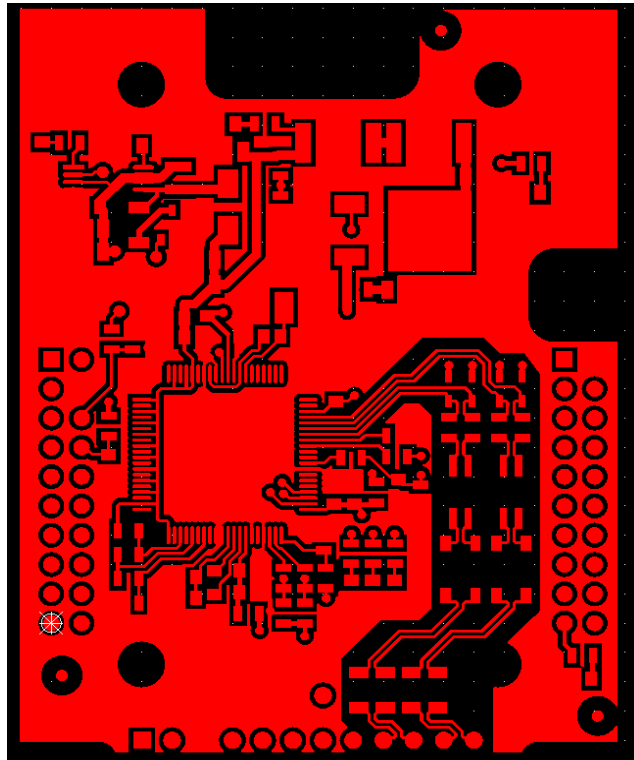


### B.5 Master komunikační BMS – Connectors

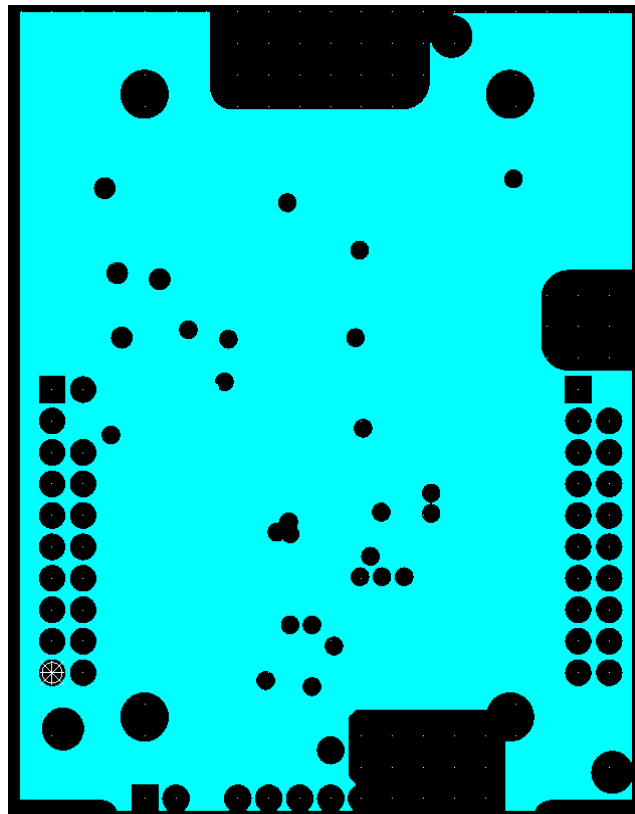


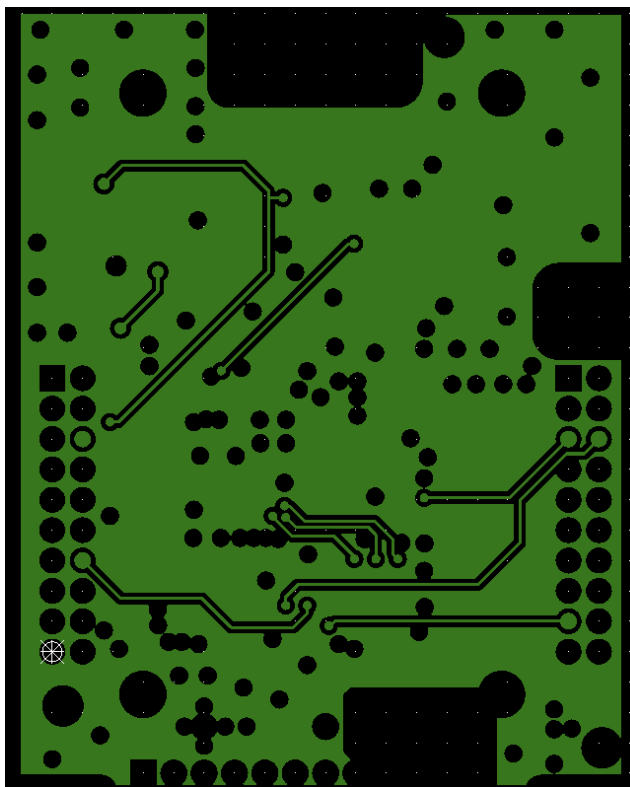
**C.1 Slave BMS – DPS – Top layer****C.2 Slave BMS – DPS – Mid1 layer****C.3 Slave BMS – DPS – Mid2 layer****C.4 Slave BMS – DPS – Bottom layer**

**D.1 Master komunikační BMS – DPS – Top layer**



**D.2 Master komunikační BMS – DPS – Mid1 layer**



**D.3 Master komunikační BMS – DPS – Mid2 layer****D.4 Master komunikační BMS – DPS – Bottom layer**