

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky

## Návrh monitorovacího systému Li-Ion baterie

**Tomáš Nekvapil**

Vedoucí: Ing. Vít Záhlava, CSc.  
Studijní program: Elektronika a komunikace  
Květen 2020



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nekvapil** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **466138**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh monitorovacího systému Li-Ion baterie**

Název bakalářské práce anglicky:

**Li-Ion Battery Monitoring System Design**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku správy baterií Li-Ion.
2. Navrhněte obvodové elektrické schéma zapojení monitorovacího systému 6-článekového modulu.
3. Navrhněte desku plošného spoje.
4. Ověřte funkčnost systému.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

1. Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady, Třetí rozšířené vydání, Grada Publishing, Praha 2005
2. Záhlava, V. : Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011
3. Plett, G.L.: Battery Management Systems, Volume I, Artech House, 2015
4. Katalogové a aplikační listy příslušných elektronických součástek

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vít Záhlava, CSc., katedra mikroelektroniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

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

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce, panu Ing. Vítu Záhlavovi, za poskytnuté konzultace, které mi velmi pomohly při návrhu DPS a psaní této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval celému týmu eForce FEE Prague Formula za příležitost získání cenných zkušeností a vědomostí, které jsem během působení v tomto týmu využil k vytvoření této práce. V neposlední řadě bych také chtěl poděkovat rodině, která mi byla velkou oporou při studiu.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem veškerou použitou literaturu v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských prací.

V Praze, 20. května 2020

## Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout a vyrobit systém pro monitorování Li-Ion baterie, která plní funkci záložního zdroje pro napájení elektroniky ve vozidle elektrické formule týmu eForce FEE Prague Formula.

K její realizaci bylo nutné vytvořit schéma zapojení a navrhnout desku plošných spojů, tyto desky osadit součástkami a otestovat funkčnost jednotlivých bloků.

Takto vyrobená deska bude využita v závodním monopostu FSE.09, který se zúčastní následující sezóny 2020 soutěže Formula Student v kategorii Electric.

**Klíčová slova:** baterie, monitorování, Li-Ion, MCU, měření proudu, měření teploty, CAN

**Vedoucí:** Ing. Vít Záhlava, CSc.

## Abstract

The goal of this thesis was to design and manufacture the Li-Ion battery monitoring system, LVB. This unit will serve as backup power supply for electronic units in eForce FEE Prague Formula electric vehicle.

For this project, it was necessary to create schematic and layout of the PCB. This board was then assembled and the functionality of major HW blocks was tested.

This electronic unit will be used in the latest electric race car, that will be participating in upcoming season of Formula Student 2020 in the Electric category.

**Keywords:** battery, monitoring, Li-Ion, MCU, current measurement, temperature measurement, CAN

**Title translation:** Li-Ion Battery Monitoring System Design

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	1	<b>3 Praktická část</b>	<b>19</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>3</b>	3.1 Požadavky na jednotku . . . . .	19
<b>2 Teoretická část</b>	<b>5</b>	3.2 Logický diagram rozhodování . . .	20
2.1 Technologie baterií . . . . .	5	3.3 Návrh elektrického schématu zapojení . . . . .	22
2.1.1 Olovené baterie . . . . .	5	3.3.1 Blokové schéma . . . . .	22
2.1.2 NiMH . . . . .	6	3.3.2 Battery Management System - systém správy baterie . . . . .	24
2.1.3 Li-Ion . . . . .	7	3.3.3 Měření proudu . . . . .	28
2.2 Výběr baterie . . . . .	9	3.3.4 Řízení vybíjení a probouzení systému . . . . .	32
2.3 Formula Student . . . . .	10	3.3.5 Měření teploty . . . . .	37
2.3.1 Popis soutěže . . . . .	10	3.3.6 Mikrokontrolér . . . . .	40
2.3.2 Požadavky na systém vyplyvající z pravidel Formula Student Germany . . . . .	12	3.3.7 Izolované rozhraní CAN . . . .	41
2.4 Termistory . . . . .	13	3.3.8 Vstupní konektory . . . . .	44
2.4.1 NTC - termistor s negativním teplotním koeficientem . . . . .	14	3.3.9 Výstupní konektor . . . . .	45
2.4.2 PTC - termistor s pozitivním teplotním koeficientem . . . . .	14	3.4 Návrh desky plošných spojů . . . .	47
2.5 Komunikační protokol CAN . . . .	15	3.5 Osazování a ověření funkčnosti .	51

<b>4 Závěr</b>	<b>55</b>
<b>Použitá literatura</b>	<b>57</b>
<b>Přílohy</b>	<b>61</b>
A Soupis součástí . . . . .	61
B Výkresy jednotlivých vrstev DPS	64
C Schéma LVB . . . . .	66



## Obrázky

2.1 Baterie Sony VTC5A US18650VTC5 [6].....	9	3.7 Elektronické zapojení diferenciálního zesilovače pro měření proudu .....	29
2.2 Vyrobená baterie skládající se ze 6 článků a termistorů .....	10	3.8 Elektronické zapojení analogového spínače .....	32
2.3 Termistor s negativním teplotním koeficientem [11] .....	14	3.9 Zapojení pro řízení vybíjení a probouzení systému .....	33
2.4 Porovnání charakteristik NTC a PTC termistorů [13] .....	15	3.10 Závislost $I_D$ vs. $V_{GS}$ pro tranzistory ovládající vybíjení [24]	34
2.5 Struktura vrstev podle standardu ISO 11898 [15] .....	16	3.11 Zapojení probouzení systému ..	35
2.6 Struktura zapojení jednotlivých koncových bodů na sběrnici CAN [15] .....	16	3.12 Zapojení paměťového členu ...	36
3.1 Obecný diagram rozhodování LVB	20	3.13 Zapojení termistorů .....	38
3.2 Diagram stavu RUN Mode .....	21	3.14 Zjednodušené zapojení jednoho termistoru .....	39
3.3 Funkční diagram LVB .....	23	3.15 Zapojení mikrokontroléru .....	41
3.4 Zapojení BQ76925 na desce .....	25	3.16 Izolovaný zdroj 17791063215 od Würth Elektronik [28] .....	42
3.5 Zapojení vstupní části BQ76925 na desce .....	26	3.17 Zapojení izolovaného zdroje pro rozhraní CAN .....	42
3.6 Zapojení výstupní části B76925 na desce .....	27	3.18 Zapojení izolace komunikace pro rozhraní CAN .....	43
		3.19 Zapojení CAN Transceiveru TJA1040T .....	44
		3.20 Konektor B7B-XH-A firmy JST [33] .....	45

3.21 Konektor XT60 firmy AMASS [35] .....	45
3.22 Konektor D-SUB POWER-D 9 pin 7W2 firmy Norcomp, Inc. [36].	46
3.23 Pohled na model DPS shora ...	47
3.24 Vrchní vrstva DPS se skrytými zbylými vrstvami .....	48
3.25 Vrchní vnitřní vrstva DPS určená pro zem .....	49
3.26 Spodní vnitřní vrstva DPS určená pro napájení .....	50
3.27 Spodní vrstva DPS .....	51
3.28 Boční pohled na 3D model DPS	51
3.29 Osazená DPS s baterií ze shora	53
4.1 Potisk přední vrstvy DPS jednotky LVB .....	64
4.2 Motiv spojů přední vrstvy DPS jednotky LVB .....	64
4.3 Motiv vrstvy země DPS jednotky LVB .....	65
4.4 Motiv vrstvy napájení DPS jednotky LVB .....	65
4.5 Motiv spojů spodní vrstvy DPS jednotky LVB .....	66

## Tabulky

2.1 Klíčové vlastnosti baterie Sony VTC5A .....	9
3.1 Požadavky týmu na jednotku ...	20
3.2 Charakteristiky termistoru NJ28MA0302 firmy AVX [27] ....	38
3.3 Klíčové elektrické vlastnosti konektoru .....	46
3.4 Potřebné součástky pro úspěšné sestavení setu a zástavbu do kabeláže .....	47
4.1 Soupis součástek použitých na desce LVB .....	61

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Význam (jednotka)
C	elektrická kapacita (F)
I	elektrický proud (A)
T	teplota (°C)
P	výkon/příkon (W)
R	elektrický odpor ( $\Omega$ )
U	elektrické napětí (V)
$\beta$	teplotní konstanta (K)
$\alpha$	teplotní koeficient odporu ( $K^{-1}$ )

Zkratka	Význam
PTC	Positive Temperature Coefficient
NTC	Negative Temperature Coefficient
ISO	International Organization for Standardization
USB	Universal Serial Bus
DC	Direct Current
DPS	Deska Plošných Spojů
PCB	Printed Circuit Board
FEE	Faculty of Electrical Engineering
MCU	Micro Controller Unit
TVS	Transient Voltage Suppression
CAN	Controller Area Network
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
ADC	Analog to Digital Converter
A/D	Analogově-Digitální převodník
LED	Light Emitting Diode
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
BMS	Battery Monitoring System
OZ	Operační Zesilovač
ESD	Electrostatic Discharge
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
RMS	Root Mean Square
D-SUB	D-subminiature
VGA	Video Graphics Array
LVB	Low Voltage Battery



# Kapitola 1

## Úvod

eForce FEE Prague Formula je studentský tým na Fakultě elektrotechnické ČVUT, který se účastní mezinárodní studentské soutěže Formula Student v kategorii Electric. V rámci této soutěže mají studenti za úkol navrhnout a sestavit závodní vůz formule a poté ho prezentovat na závodech. Tým je složený převážně ze studentů fakulty elektrotechnické a strojí ČVUT. Pro budoucí generaci elektrické formule FSE.09 bylo potřeba navrhnout jednu z elektronických jednotek, a to systém monitorování nízkonapěťové Li-Ion baterie. Toto téma jsem si zároveň zvolil jako svoji bakalářskou práci.

V této práci budou v druhé kapitole popsány technologie baterií. Poté bude vybrána baterie a nastíněno, které parametry je nutné sledovat. Bude představena soutěž Formula Student a její pravidla, která budou ovlivňovat návrh tohoto systému. Bude také detailně vysvětlen princip termistorů využívaných v této práci a také bude představena komunikační sběrnice CAN, která je ve vozidle používána.

V třetí kapitole budou představeny požadavky na jednotku, ukázán logický diagram rozhodování a detailně vysvětlen návrh jednotlivých funkčních bloků systému monitorování baterie. Bude navržena deska plošných spojů a ta bude ručně osazena komponenty. Nakonec budou jednotlivé bloky otestovány, aby byla ověřena jejich funkčnost.

V závěru budou poté zhodnoceny dosažené výsledky. Hlavním cílem této práce je navrhnout, vyrobit, osadit a ověřit funkčnost systému pro monitorování nízkonapěťové baterie (LVB), který bude použit v budoucí generaci elektrické formule FSE.09 pro sezónu 2020.



## Kapitola 2

### Teoretická část

#### 2.1 Technologie baterií

Jelikož se tato práce zabývá správou baterií, na úvod tedy budou představeny hlavní technologie akumulátorů, používané na trhu, a jejich princip, výhody a nevýhody. Budou také představeny hlavní parametry, které mají být sledovány u vybrané baterie. Na trhu se objevují celkem tři hlavní typy akumulátorů olověné, NiMH a Li-Ion.

##### 2.1.1 Olověné baterie

Nejstarší technologií, dnes ještě stále využívanou, jsou olověné baterie. Dnes stále drží 40 - 45 % trhu s bateriemi, a to díky jejich nenáročnosti na údržbu a relativně nízké ceně. Jsou hojně využívány v automobilech, nákladních autech a autobusech jako startovací baterie a záložní baterie pro elektroniku. [1]

Olověný akumulátor obsahuje elektrody na bázi olova, jako elektrolyt se používá kyselina sírová  $H_2SO_4$  zředěná vodou. Při nabitém stavu tvoří zápornou elektrodu olovo a kladnou elektrodu oxid olovičitý  $PbO_2$ . Vybíjením se mění hmota obou elektrod na síran olovnatý  $PbSO_4$ , v tomto procesu se také tvoří elektrony. Elektrolyt tím přichází o kyselinu sírovou a vytváří se voda.

Nabíjení je inverzní reakce. Napětí jednoho článku je obvykle 1,9 V, záleží na materiálu, ze kterého jsou elektrody. [1]

Výhody olovených akumulátorů: [2]

- relativně jednoduchá a levná výroba,
- Nízké samovolné vybíjení, nejnižší ze všech akumulátorů,
- krátkodobě dokáží poskytnout velmi vysoké vybíjecí proudy,
- dobré chování při nízkých a vyšších teplotách, nejlepší teplotní rozsah  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [1]

Nevýhody olovených akumulátorů: [2]

- malá hustota energie,
- pomalé nabíjení, plně nabití baterií může zabrat až 16 hodin,
- musí být uloženy nabitě, aby se předešlo degradaci,
- životnost je limitována nízkým počtem nabíjecích cyklů, hluboké vybíjení degraduje baterii,
- problematické vyřazení, není možné jen tak zařadit mezi běžný odpad, nebezpečí vůči životnímu prostředí.

## ■ 2.1.2 NiMH

Nikl-metal hydridové akumulátory se začaly vyvíjet v šedesátých letech dvacátého století. Vývojem v oblasti hydridových slitin se vyřešily jejich původní problémy s nestabilitou a díky tomu byly schopny produkovat až o 40 % více specifické energie než jejich předchůdce, NiCd. Jejich problémem je relativně velká hodnota samovolného vybíjení, kdy první den po plném nabití ztratí až 20 % své kapacity a poté až 10 % měsíčně. Tyto akumulátory poskytují vyšší výkon, ale za vyšší cenu než olovené baterie. [3]

Dnes jsou využívány jako nabíjecí univerzální baterie AA, AAA a dalších velikostí. Byly využívány v hybridních elektromobilech (HEV), jako např. Toyota Prius [1].



Aktivním materiálem na záporné elektrodě jsou slitiny kovů, které při nabíjení vytváří hydridy, tedy jsou schopny vázat vodík. Kladná elektroda je tvořena oxidem niklitým a jako elektrolyt se používá hydroxid draselný. Při vybíjení hydridy slitin kovů uvolňují hydroxidové ionty a vzniká oxid nikelnatý. Tyto ionty jdou přes vnější obvod a na záporné elektrodě oxidují hydridy slitin kovů na vodu a kovy. Při nabíjení tato reakce probíhá opačně. NiMH články dokážou vyprodukovat napětí 1,35 V, což může být nevýhoda, jelikož pro napájení většiny elektroniky by bylo potřeba více takovýchto článků. [4]

Výhody těchto baterií jsou: [3]

- až dvojnásobná hustota energie než u oloveného akumulátoru a až 40 % více specifické energie než NiCd,
- nemají tak výrazný paměťový efekt jako NiCd, odolnost proti nízkému vybití, mohou být oživeny,
- bezproblémový transport a uložení, nepodléhají regulacím,
- nejsou tolik toxické pro životní prostředí, možnost recyklování niklu.

Naopak, mezi nevýhody těchto baterií patří: [3]

- jsou citlivé při nabíjení na přebíjení,
- zahřívají se při rychlém nabíjení a vybíjení,
- vysoká hodnota samovolného vybíjení,
- nízká efektivita oproti Li-Ion,
- relativně nízké teplotní rozmezí  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### ■ 2.1.3 Li-Ion

Poslední, dnes obecně nejpokročilejší, technologií jsou lithium-iontové baterie, Li-Ion. V dnešní době se jedná o hlavního hráče na trhu, zejména kvůli vysoké hustotě energie, které tyto baterie poskytují. Dnes jsou používány v mnoha oborech a lze je nalézt v téměř všech zařízeních, která mají akumulátor, od mobilních telefonů, notebooků až po baterie v elektrických automobilech a letadlech.

Elektrolytem v těchto bateriích jsou lithiové soli. Kladná elektroda je tvořena uhlíkem, záporná elektroda obsahuje lithiované oxidy kovů, například oxid kobaltolithný nebo oxid manganicitolithný. Tento oxid se při nabíjení rozkládá, uvolňuje lithiové kationty, vzniká oxid kobaltnatý a u toho se vytváří elektrony, které přispívají na záporné elektrodě k vázání lithiových kationtů na uhlík. Při vybití dochází k rozpadu této sloučeniny a k vytvoření oxidu kobaltolithného na kladné elektrodě pomocí uvolněných elektronů. Tato reakce dokáže vyprodukovat napětí až 4,1 V. [1]

Výhody lithium-iontových akumulátorů jsou následující: [5]

- vysoká hodnota napětí článku až 4,1 V,
- vysoká hustota energie, a velmi dobrá schopnost vybití,
- relativně dlouhá životnost a nízká potřeba údržby,
- vysoká kapacita, nízký vnitřní odpor a dobrá efektivita,
- jednoduchý nabíjecí cyklus a dobrý nabíjecí čas,
- nízká hodnota samovolného vybití oproti NiMH.

K nevýhodám patří: [5]

- degradují při skladování v plně nabitém stavu ve vysoké teplotě,
- pomalé nabíjení při teplotách pod 0 °C,
- při přepravě vyšších objemů podléhají regulacím,
- při hlubokém vybití je riziko nevratného poškození článku, [4]
- riziko požáru nebo exploze při
  - příliš vysokém vybitím proudu,
  - příliš vysokém nabíjecím proudu,
  - při přebíjení článků,
  - při mechanickém poškození.



**Obrázek 2.1:** Baterie Sony VTC5A US18650VTC5 [6]

## 2.2 Výběr baterie

Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem bylo rozhodnuto o použití Li-Ion baterií, zejména kvůli jejich vysoké hustotě energie a zkušenostem v týmu se správou takovýchto baterií. Jelikož se tento chemický princip využívá i u hlavního akumulátoru formule, byly vybrány články, ze kterých se tento akumulátor skládá. Byly zvoleny bateriové články firmy Sony Energy Devices Corporation, model Sony VTC5A, s označením US18650VTC5A. Její klíčové parametry jsou vypsány v tab. 2.1. [7]

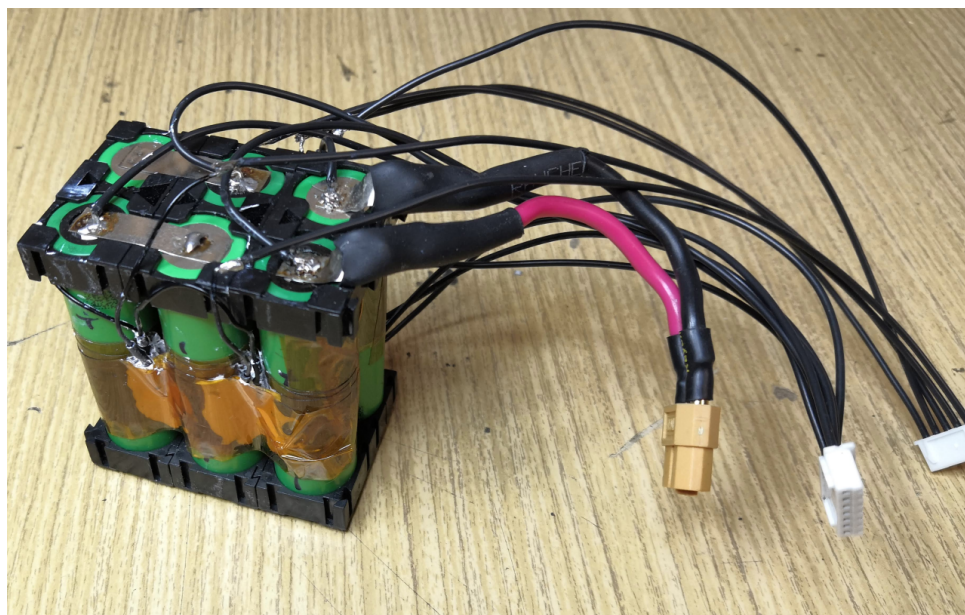
**Tabulka 2.1:** Klíčové vlastnosti baterie Sony VTC5A

Název	Hodnota
Nominální kapacita	2500 mAh
Nominální napětí	3,6 V
Maximální nabíjecí napětí	4,25 V
Nabíjecí napětí	4,2 V
Mezní (minimální) napětí baterie	2 V
Maximální stálý proud vybíjení	35 A
Maximální stálý proud nabíjení	6 A
Maximální rozsah teplot	0 °C až 60 °C

Jak bylo zmíněno v popisu vlastností této technologie baterií v sekci 2.1.3, tyto baterie jsou velmi citlivé na provoz mimo doporučené rozpětí. Bude tedy nutné kontrolovat, aby se jednotlivé články baterie nedostaly z povolených rozmezí udávaných výrobcem, viz tab. 2.1.

Bude tedy sledováno jak napětí jednotlivých článků, tak teplota a zároveň nepřekročení maximální proudové zatížitelnosti. Tyto parametry budou muset být kontrolovány také z důvodu požadavků stanovených pravidly soutěže Formula Student, zmíněnými v sekci 2.3.2 níže. Na obr. 2.2 je vidět baterie,

kterou bude systém spravovat, i s umístěním teplotních čidel mezi jednotlivými články.



**Obrázek 2.2:** Vyrobená baterie skládající se ze 6 článků a termistorů

## 2.3 Formula Student

### 2.3.1 Popis soutěže

Formula Student je studentská soutěž, ve které se studenti z celého světa snaží zkonstruovat vozy formule. Tyto závody vznikly v roce 1980 na Texaské univerzitě v Austinu. Původně byly pojmenovány Formula SAE, jelikož byly založeny skupinou SAE International (Society of Automotive Engineers). Cílem soutěže je formuli navrhnout, zkonstruovat, otestovat a později s ní závodit. Některé z těchto závodů se konají na prestižních evropských a světových okruzích. Součástí této soutěže je také prezentace fiktivnímu investorovi, během které se týmy snaží prezentovat přípravu malosériové výroby pro amatérské víkendové závodníky. [8]

Celková organizace soutěže je rozdělena do dvou sekcí, každá z nich má své vlastní pravidla a strukturu hodnocení. První jsou takzvané statické disciplíny, mezi které patří: [9]

- Business Plan Event - plán prodeje a marketingu celé série vozidel,
- Cost and Manufacturing Analysis Event - nacenění všech částí formule a všech prostředků nutných k její výrobě,
- Design Event - hodnocení technické stránky vývoje formule.

Další fází jsou tzv. dynamické disciplíny:

- Skid Pad Event - test stability a přilnavosti vozidla v zatáčkách na trati ve tvaru čísla 8,
- Acceleration Event - test zrychlení vozidla na trati dlouhé 75 m,
- Autocross Event - kvalifikace pro poslední disciplínu. Obvykle jízda na trati, která je kratší než 1,5 km, kde se testuje celkový jízdní projev formule,
- Endurance Event - poslední disciplína, závod na 22 km. Jde o vytrvalostní závod, který testuje jak jízdní vlastnosti, tak spolehlivost formule,
- Efficiency Event - samostatná disciplína při závodě Endurance, hodnotí se spotřeba vozu.

Maximální hodnocení je 1000 bodů. Za dynamické disciplíny je možno získat až 675 a za statické až 325 bodů. [9]

Soutěž Formula Student má tři hlavní kategorie. Původní, spalovací, byla v roce 2010 doplněna o elektrickou, Formula Student Electric, a v roce 2017 i o autonomní, Formula Student Driverless. Tým eForce FEE Prague Formula, součástí jehož formule bude tato deska, soutěží v kategorii Formula Student Electric.

Celá soutěž má mnoho pravidel, viz [9], kterými se musí všichni studenti řídit. V evropských závodech se stalo standardem, že většina z nich přebírá pravidla, která jsou vydána soutěží Formula Student Germany. Podle nich musí elektronika ve vozidle splňovat určité podmínky, aby formule mohla být připuštěna k závodům. Speciální podmínky se vztahují na elektroniku, která má na starosti jištění a sbírání informací ohledně baterie.

### ■ 2.3.2 Požadavky na systém vyplývající z pravidel Formula Student Germany

K tomuto projektu se vztahují následující pravidla (přeloženo z anglického jazyka): [9]

- EV 3.2 - Nadproudová ochrana
  - EV 3.2.1 Všechny elektronické obvody musí být jištěny nadproudovou ochranou.
  - EV 3.2.2 Úroveň takové ochrany se stanoví podle prvku s nejmenší proudovou tolerancí v obvodu (pin, použitý vodič nebo další). Pokud je použito více vodičů v konektoru pro přenos proudu paralelně, musí být jištěn každý z nich.
  - EV 3.2.3 Všechny pojistky musí mít maximální rozpojitelný proud větší než je maximální teoretický zkratový proud obvodu, který jistí.
  - EV 3.2.4 Všechny nadproudové ochrany musí mít jmenovité napětí větší než je největší hodnota jakékoliv součástky, kterou jistí.
  - EV 3.2.6 Všechny nadproudové ochrany musí být určeny pro očekávanou hodnotu okolní teploty v rozmezí 0 °C až 85 °C.
- T11.1 - Nízkonapěťový systém
  - T 11.1.1 Nízkonapěťový systém vozidla je definován jako:
    - (vozidla se spalovacím motorem) všechny elektrické obvody vozidla,
    - (vozidla s elektrickým motorem) všechny elektrické systémy, které nejsou součástí trakčního systému vozidla.
  - T 11.1.2 Maximální povolené napětí, které může být naměřeno na dvou bodech v nízkonapěťovém systému, je 60 VDC a nebo 25 VAC<sub>RMS</sub>.
  - T 11.1.4 Nízkonapěťový systém nesmí používat oranžovou barvu vodičů.
  - T 11.1.5 Nízkonapěťový systém musí být uzemněný k šasi formule.
- T11.7 - Nízkonapěťové baterie
  - T 11.7.1 Nízkonapěťové baterie jsou všechny baterie, které jsou připojeny k systému využívajícímu nízké napětí.
  - T 11.7.2 Nízkonapěťové baterie musí být bezpečně připevněny k šasi formule a musí být umístěny vně ochranné konstrukce proti převrácení.

- T 11.7.3 Jakékoliv baterie využívající tekuté elektrolyty, nacházející se v místě pro řidiče, musí být uzavřeny do kontejneru, který je nevodivý, vodě odolný (podle standardu IPX7 nebo vyššího) a odolný vůči kyselinám.
- T 11.7.4 Nízkonapěťové baterie musí mít pevný a odolný kryt.
- T 11.7.5 Neuzemněné terminály baterie musí být izolované.
- T 11.7.6 Nízkonapěťové baterie musí být ochráněny proti zkratování, a to do vzdálenosti menší než 100 mm od neuzemněného terminálu.
- T 11.7.7 Baterie založené na jiném lithiovém chemickém složení než  $\text{LiFePO}_4$ :
  - Musí mít nadproudovou ochranu, která se spustí při překročení maximálního specifikovaného vybíjecího proudu jednotlivých článků.
  - Musí mít žáruvzdorný kryt.
  - Musí zahrnovat ochranu proti vysoké teplotě alespoň pro 30 % všech článků, která sepne, když se jakýkoliv z článků dostane ze specifikovaného maximálního teplotního rozsahu, nanejvýš však  $60^\circ\text{C}$ , na více než 1 s. Při aktivování ochrana odpojí baterii od zátěže.
  - Musí zahrnovat ochranu proti přepětí na všech člancích v baterii, která sepne, pokud jakýkoli z článků přesáhne maximální povolený rozsah, udávaný výrobcem, na víc než 500 ms, a tím ji odpojí od zátěže.

## 2.4 Termistory

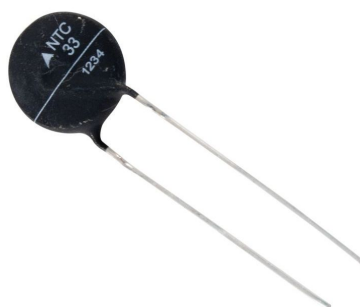
Jsou integrované mikrosenzory, jejichž odpor je teplotně závislý. Termistory mají velmi dobrou teplotní citlivost a vynikají v měření teploty v rozsahu  $30^\circ\text{C}$  až  $60^\circ\text{C}$ , díky jejich velké odporové změně v tomto pásmu. Jejich teplotní charakteristika změny odporu je značně nelineární, viz obr. 2.4, pro linearizaci se používají analogová zapojení z jednoho nebo více rezistorů. [10]

Termistory jsou v praxi velmi často využívány, kvůli jejich citlivosti, k měření teplot. Při měření se musí dbát na udržení proudového zatížení v mezích stanovených výrobcem, aby nedocházelo k zahřívání termistoru a tím ke zhoršení citlivosti. U termistorů se udává teplotní koeficient odporu  $\alpha$ , pro který platí

$$\alpha = -\frac{\beta}{T^2}. \quad (2.1)$$

Termistory je možné podle něj rozdělit na PTC, tedy termistory s kladným teplotním koeficientem, a NTC se negativním teplotním koeficientem. [10]

### 2.4.1 NTC - termistor s negativním teplotním koeficientem



**Obrázek 2.3:** Termistor s negativním teplotním koeficientem [11]

Termistory se negativním teplotním koeficientem zvyšují svůj odpor při klesající teplotě a naopak. Pracují na principu teplotní změny rezistivity u keramických polovodičů, vyrobených z kovových oxidů, jako například specifické směsi oxidů Mn, Co, Ni, Cu a Zn. Tyto látky mají negativní teplotní koeficient. [10]

Pro NTC termistory lze závislost odporu na teplotě vyjádřit přibližně vztahem [12]

$$R_{\text{NTC}} = R_0 \cdot \exp^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (2.2)$$

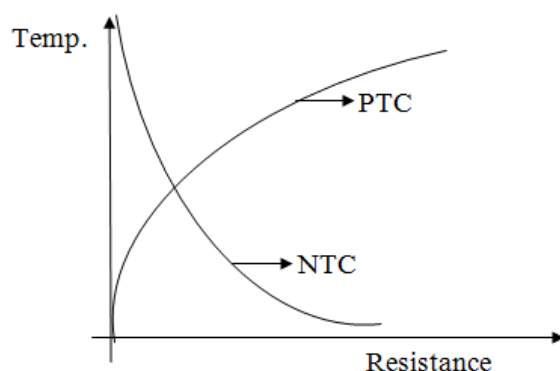
kde  $T$  je teplota,  $\beta$  je teplotní konstanta závislá na materiálu, kde  $R_0$  je odpor termistoru při teplotě  $T_0$  a  $R_{\text{NTC}}$  je současný odpor termistoru při aktuální teplotě  $T$ .

Hodnota konstanty  $\beta$  se pohybuje v rozmezí 3000 K až 4500 K. Odpor při nulovém zatížení a teplotě 25 °C se může pohybovat mezi 500 Ω až 10 MΩ. Typická tolerance termistorů je od ±0,1 °C až ±0,2 °C pro teplotní rozsah od 0 °C do 100 °C. [10]

### 2.4.2 PTC - termistor s pozitivním teplotním koeficientem

PTC, neboli termistory s pozitivním teplotním koeficientem, jsou opakem NTC. Jejich odpor stoupá se stoupající teplotou. Je možné tyto senzory realizovat z lehce dotovaného křemíku nebo využitím tlustovrstvé technologie s použitím tzv. termistorové pasty. Vedle speciálních termistorových past jsou využívány i standardní vodivé a nevodivé pasty. Pomocí past na bázi BaTiO<sub>3</sub> a polymerních uhlíkových past se dosahuje velké změny rezistivity





**Obrázek 2.4:** Porovnání charakteristik NTC a PTC termistorů [13]

při určitých teplotách, čehož se dá využít při realizaci teplotních spínačů nebo proudových omezovačů. [10]

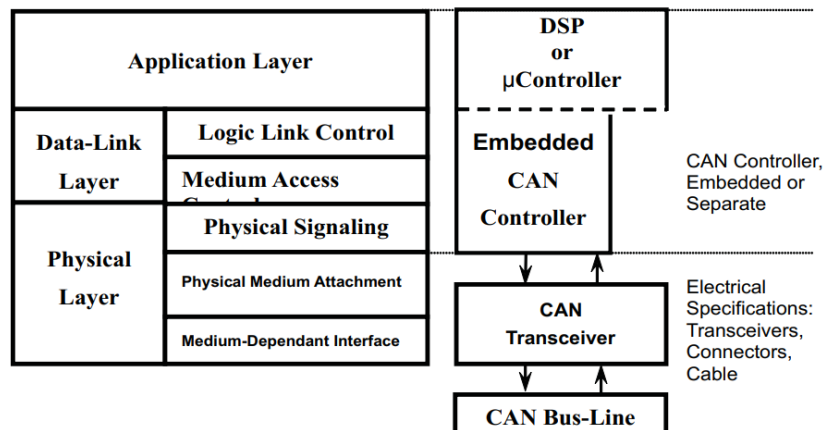
## 2.5 Komunikační protokol CAN

Controlled Area Network je komunikační protokol, který byl vyvinut firmou Robert Bosch GmbH na začátku osmdesátých let dvacátého století. Už od počátku byl vývoj směřován pro využití v robustních aplikacích v automobilech. Na trh byl uveden ve spolupráci s firmou Intel, která vyvinula první CAN kontroléry v roce 1986. V roce 1990 byl Mercedes-Benz první automobilkou, která ho implementovala do svého automobilu v sériové produkci. [14]

V dnešní době se CAN stal rozšířeným standardem pro komunikaci ve většině automobilů, autobusů, nákladních vozidel, elektroniky pro letectví, automatizaci v průmyslu a podobných oblastech. Elektrické parametry jsou specifikovány normou ISO 11898. Maximální teoretická rychlost přenosu je 1 Mb/s.

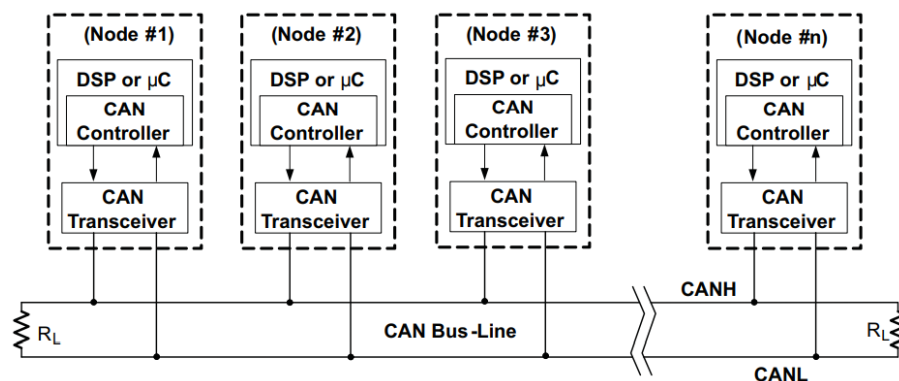
CAN byl vyvinut jako multi-master vysílací systém. To znamená, že na rozdíl od USB nebo Ethernetu, CAN neposílá velké bloky dat z bodu a do bodu B pod dozorem jednoho určitého správce sběrnice. CAN namísto toho posílá spoustu menších zpráv do všech konců, což zaručuje datovou konzistenci napříč jednotkami na této sběrnici. [15] Tedy každý koncový bod, neboli jednotka, může dostat jakoukoli informaci vysílanou dalším bodem na sběrnici.

CAN dokáže také dávat prioritu jednotlivým zprávám před dalšími, což je velká výhoda v systémech s velkou hustotou a rozmanitostí zpráv, zejména pokud je potřeba na některé z nich reagovat rychle.



**Obrázek 2.5:** Struktura vrstev podle standardu ISO 11898 [15]

Na obr. 2.5 je vidět struktura vrstev a zapojení podle standardu ISO 11898. Vše začíná u MCU nebo jiného signálového procesoru, který má buď zabudovaný CAN kontrolér, nebo systém využívá externí. Tento kontrolér komunikuje s CAN vysílačem a přijímačem, což je rozhraní mezi digitálními signály přicházejícími z kontroléru a signály na fyzické sběrnici.



**Obrázek 2.6:** Struktura zapojení jednotlivých koncových bodů na sběrnici CAN [15]

Připojení více jednotek, neboli koncových bodů, na tuto sběrnici je poté realizováno podle diagramu na obr. 2.6. Využívá diferenciálního přenosu mezi dvěma linkami, díky čemuž disponuje relativně velkou odolností proti šumu a chybám. Tento diferenciální signál je balancovaný, což znamená, že dvěma vodiči teče stejný proud, jenom opačným směrem.

Jelikož v této práci nebude toto rozhraní softwarově implementováno do kontroléru, nebudou zde rozebírány další vlastnosti, zejména konkrétní struktury zpráv a detailní popisy jednotlivých vlastností procesů, implementovaných v této sběrnici. Další informace o této problematice je možné získat například v [14] nebo [15].



## Kapitola 3

### Praktická část

Účelem jednotky je zajišťovat napájení veškeré elektroniky v autě vždy, pokud není zapnut vysokonapěťový okruh hlavním spínačem. Jednotka se odpojí, pokud bude zapnut DC/DC měnič v jednotce, která spravuje vysokonapěťový akumulátor. Tím z něj bude celému nízkonapěťovému systému dodáno napájení.

#### 3.1 Požadavky na jednotku

K funkčním požadavkům na jednotku patřily povětšinou funkce vyžadované pravidly, viz sekce 2.3.2. Nad rámec těchto pravidel se tým rozhodl pro komunikaci pomocí sběrnice CAN, která je používána standardně ve vozidle pro komunikaci mezi všemi jednotkami. Kvůli velmi silnému rušení, vycházejícímu ze všech silnoproudých jednotek (např. hlavních měničů), se tým před lety rozhodl celou tuto sběrnici odizolovat. Z tohoto důvodu je tato sběrnice na desce také odizolována.

K hlavním požadavkům tedy patří:

1. řízení vybíjení baterie (a tím realizovaná ochrana proti přepětí a nadproudová ochrana),
2. čtení teplot jednotlivých článků baterie,

3. čtení napětí na jednotlivých člancích baterie,
4. měření celkového proudu baterie,
5. komunikace s ostatními jednotkami, případně s externě připojeným notebookem, pomocí sběrnice CAN.

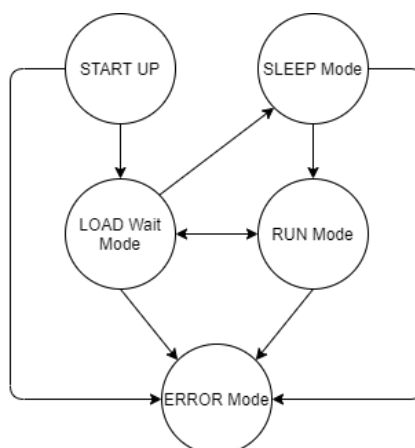
Rozsahy některých těchto požadavků jsou dále specifikovány v tabulce 3.1.

**Tabulka 3.1:** Požadavky týmu na jednotku

Specifika	Hodnota
Maximální vybíjecí proud	15 A
(Případný) Maximální nabíjecí proud	-5 A
Minimální rozlišení pro měření proudu	20 mA/LSB
Maximální výstupní napětí	25,2 V
Minimální výstupní napětí	18 V

## 3.2 Logický diagram rozhodování

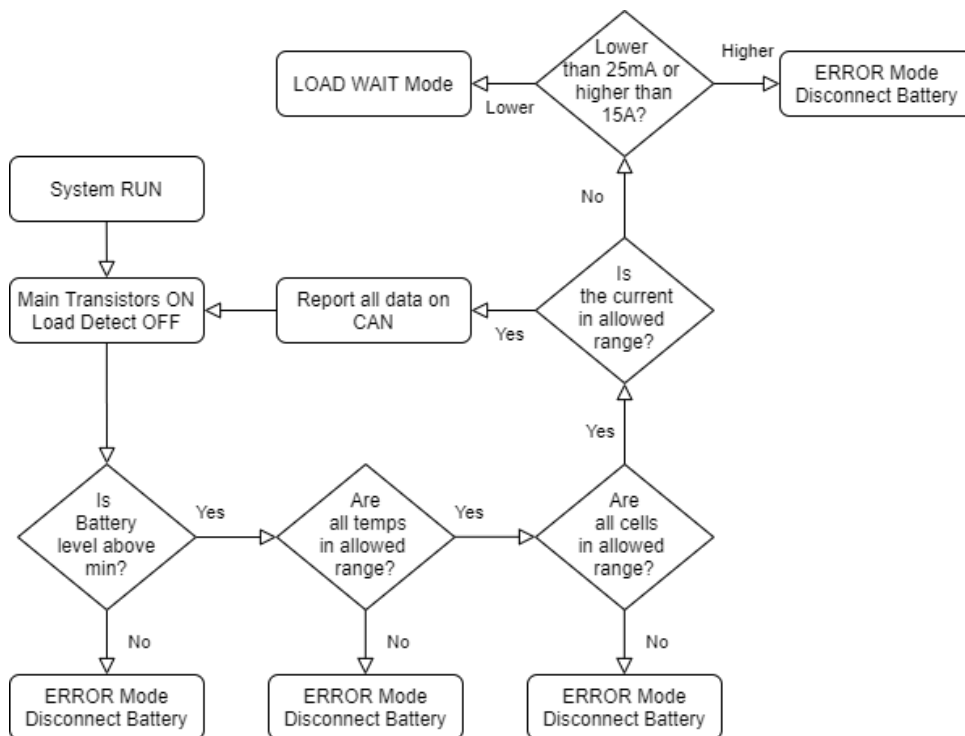
Od tohoto diagramu se bude odvíjet celý návrh elektroniky. Obecný diagram rozhodování je zobrazen na obr. 3.1. Celý systém bude fungovat na principu stavového automatu.



**Obrázek 3.1:** Obecný diagram rozhodování LVB

Celkový počet stavů je pět.

1. **START** - Obsahuje kontrolu parametrů baterie a zapnutí cesty pro zjištění zátěže. Tento stav je výchozí a nedá se do něj dostat jinak, než restartováním systému.
2. **LOAD WAIT Mode** - Stav čekání na zátěž. V tomto stavu je zapnutá veškerá elektronika. Systém kontroluje stav baterie a zapne časovač pro usnutí. Do stavu plného běhu (**RUN Mode**) přejde, pokud proud baterií překročí stanovenou hranici 10 mA, což se kontroluje periodicky společně se stavem baterie a časovačem pro usnutí. Pokud se systém neaktivuje do stanoveného času, přejde do stavu spánku.



Obrázek 3.2: Diagram stavu RUN Mode

3. **RUN Mode** - Stav plného běhu, který je vyobrazen na obr. 3.2. Při přechodu do tohoto stavu je sepnuta hlavní proudová cesta a naopak rozpojena cesta detekce. Je pravidelně kontrolován stav baterie a proud jí tekoucí. V případě poklesu proudu pod 25 mA systém přejde do stavu čekání na zátěž. Pro případ proudu vyššího než 15 A přejde systém do chybového stavu a odpojí baterii kompletně od zátěže. V případě, že všechny parametry se nacházejí ve správných rozmezech, systém odešle data o stavu baterie ostatním jednotkám na CAN.
4. **SLEEP Mode** - Stav usnutí většiny elektroniky na desce. Do tohoto stavu se systém dostane při absenci zátěže po určitý časový úsek, který

bude přesněji určen až praktickým testováním. Jako výchozí bod bylo zvoleno 60 s. Systém se bude v tomto stavu periodicky probouzet podle RTC v MCU a kontrolovat baterii. Tento cyklus může být přerušen překročením hranice proudu pro probuzení systému. Pokud se tak stane, přejde systém do stavu RUN Mode.

5. ERROR Mode - Chybový stav. Elektronika rozpojí hlavní proudovou i detekční cestu a tím odpojí zátěž od baterie. Vyšle chybové hlášení na CAN a poté se uspí, aby šetřila baterii. Z tohoto stavu se nedá dostat jinak, než restartem MCU.

### 3.3 Návrh elektrického schématu zapojení

Návrh začíná u schématu, které slouží k definování elektrických propojení mezi jednotlivými komponenty a tím pádem i jejich funkčnosti. Schéma tak může určit, jestli se jedná o diferenciální zesilovač nebo pouze napěťový sledovač, ale také může obsahovat prvky, které přímo nesouvisí s funkčností, jako například blokovací kondenzátory a ochranné prvky jako diody atd. [16]

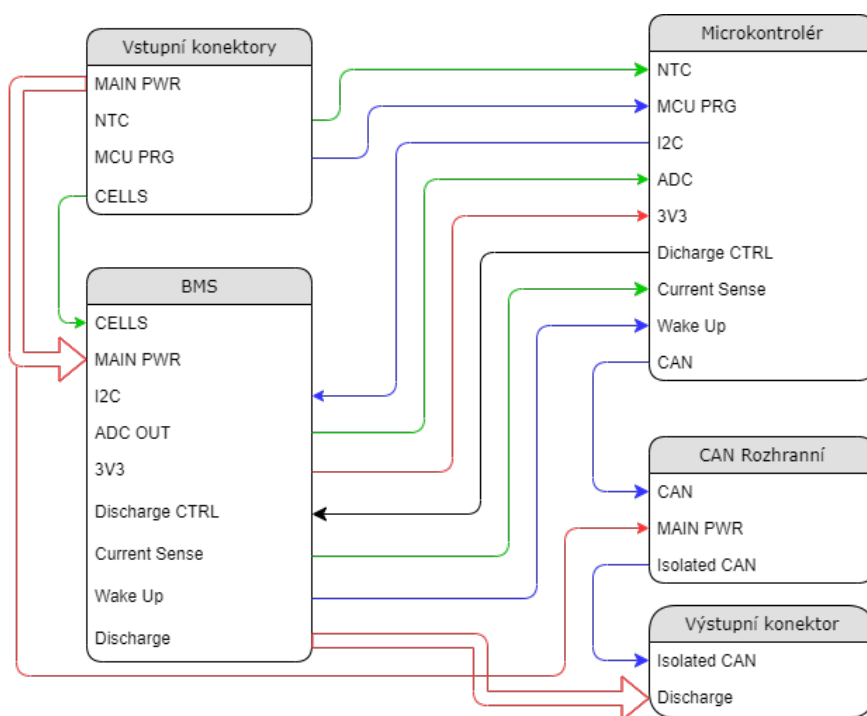
Už ve fázi schématu návrhář přiřazuje k jednotlivým součástkám jejich pouzdro a nejlépe i 3D model, což jsou potřebné věci k návrhu vlastní desky plošných spojů (dále již DPS), v němž návrhář zhotoví fyzickou podobu desky. Musí při tom brát v úvahu vnější vlivy na desku, například vnější teplota a rušení. [16] Formule jako taková je považována za zdroj elektromagnetického rušení.

K návrhu DPS bylo využito programu Altium Designer 19, který mají studenti v rámci týmu eForce Prague FEE Formula k dispozici. Systém se skládá z více částí, které jsou rozděleny do jednotlivých schémat a spojeny podle blokového schématu na obr. 3.3 níže. Červená tlustá šipka zobrazuje hlavní proudovou cestu. Zelené šipky značí analogové propojení a modré šipky digitální propojení a sběrnice.

#### 3.3.1 Blokové schéma

Blokové schéma na obr. 3.3 se skládá s čtyř hlavními částí. Každá z těchto částí je reprezentována jedním schématem. V blokovém schématu jsou pro lepší vizualizaci rozděleny konektory na vstupní a výstupní:





**Obrázek 3.3:** Funkční diagram LVB

- Konektory - schéma obsahuje elektrické zapojení jednotlivých vstupních a výstupních konektorů.
  - Vstupní konektory - obsahuje konektory pro připojení k baterii, které se skládá ze tří konektorů a poté také programovací konektor pro MCU:
    - konektor pro připojení Teplotních senzorů,
    - konektor pro připojení jednotlivých článků,
    - konektor pro připojení hlavní proudové cesty z baterie,
    - konektor pro programování MCU.
  - Výstupní konektor - hlavní výstupní konektor, který v sobě zahrnuje:
    - hlavní vybíjecí cestu,
    - izolovanou komunikační sběrnici CAN,
    - nabíjecí cestu pro externí připojení k nabíječce.
- BMS - schéma zapojení jednotky pro správu baterie a měření výstupního proudu potřebného k probuzení systému. Toto schéma také obsahuje tranzistory kontrolující vybíjení baterie.
- Mikrokontrolér (MCU) - schéma zapojení řídicí jednotky celého systému, procesor firmy STMicroelectronics, konkrétně model STM32F042C6T6. Dále jsou zde podpůrné pasivní komponenty pro zapojení termistorů.

- CAN - schéma obsahující zapojení rozhraní a izolace sběrnice CAN, která obstarává přenos informací o baterii pro všechny jednotky v autě. Díky tomu umožňuje čtení těchto dat pomocí externě připojeného notebooku.

V další sekci bude konkrétní řešení jednotlivých funkčních bloků v blokovém diagramu na obr. 3.3 blíže ukázáno.

### ■ 3.3.2 Battery Management System - systém správy baterie

Systém správy baterie musí umět správně sledovat jednotlivé parametry baterie, které ji udržují ve stavu doporučeném výrobcem, viz tab. 2.1. Spravovaná baterie se skládá z šesti do série spojených bateriových článků Sony VTC5A, které dávají nominální napětí

$$U_{\text{nom}} = 6 \cdot U_{\text{CellNom}} = 6 \cdot 3,6 = 21,6 \text{ V}, \quad (3.1)$$

kde  $U_{\text{CellNom}}$  je nominální napětí na jednom článku baterie. Podobně platí pro maximální napětí baterie

$$U_{\text{max}} = 6 \cdot U_{\text{CellMax}} = 6 \cdot 4,2 = 25,2 \text{ V}, \quad (3.2)$$

kde  $U_{\text{CellMax}}$  je maximální napětí na jednom článku baterie.

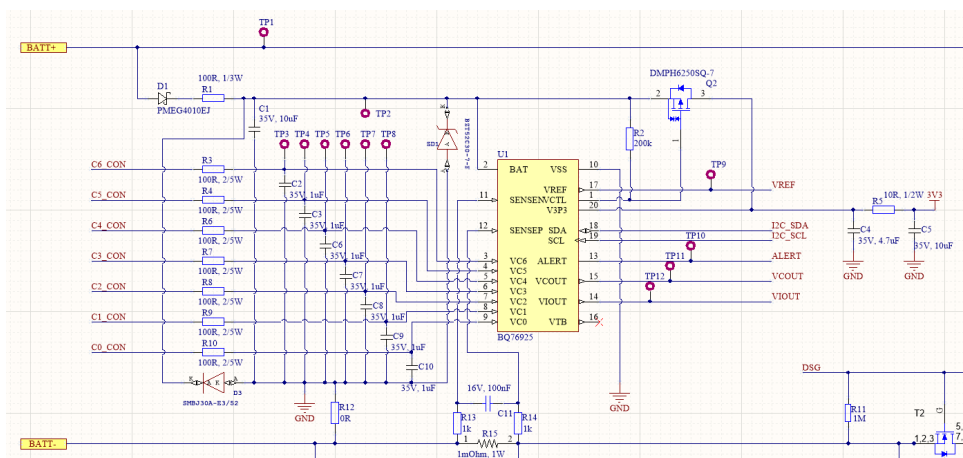
Vybrané komponenty je nutno přizpůsobit jak maximálnímu napětí  $U_{\text{CellMax}}$ , tak napětí minimálnímu, které vychází z také z tab. 2.1. Bohužel je tato konfigurace baterií z hlediska dostupnosti čipů pro správu celkem neobvyklá a výběr jednotek, které by podporovaly šest článků v sérii, je proto úzký. Hlavní požadavky na tento čip jsou:

- měření napětí na jednotlivých člancích,
- balancování,
- měření výstupního proudu baterie,
- malá spotřeba.

Nalezen byl čip BQ76925 firmy Texas Instruments, splňující tyto požadavky a navíc nabízející velké množství funkcionalit, které umožní celkové zjednodušení systému. Jedná se například o řízení externího tranzistoru pro vytvoření lineárního regulátoru, který poskytuje napětí 3,3 V pro řídicí systém na desce.

Má velmi nízkou spotřebu, takže si při provozu tohoto regulátoru dokáže udržet spotřebu pouze 40  $\mu\text{A}$ . Akceptuje vstupní zdrojové napětí již od 4,2 V, což je hluboko pod mezní hodnotou naší baterie, která činí 12 V. Dokáže tedy komunikovat i v takovém stavu baterie, při kterém bude muset být odpojena od zátěže z důvodu velmi nízkého napětí.

Čip je ovládán přes sběrnici I<sup>2</sup>C. Pomocí zápisu do registrů je možné si zvolit, které napětí článku bude zobrazeno na analogovém výstupu V<sub>CO</sub>UT. Navíc je také možné přizpůsobit chování čipu úpravou vnitřních parametrů, jako například zesílení interního zesilovače pro měření proudu nebo hodnoty referenčního napětí, podle kterého bude pracovat analogové rozhraní.

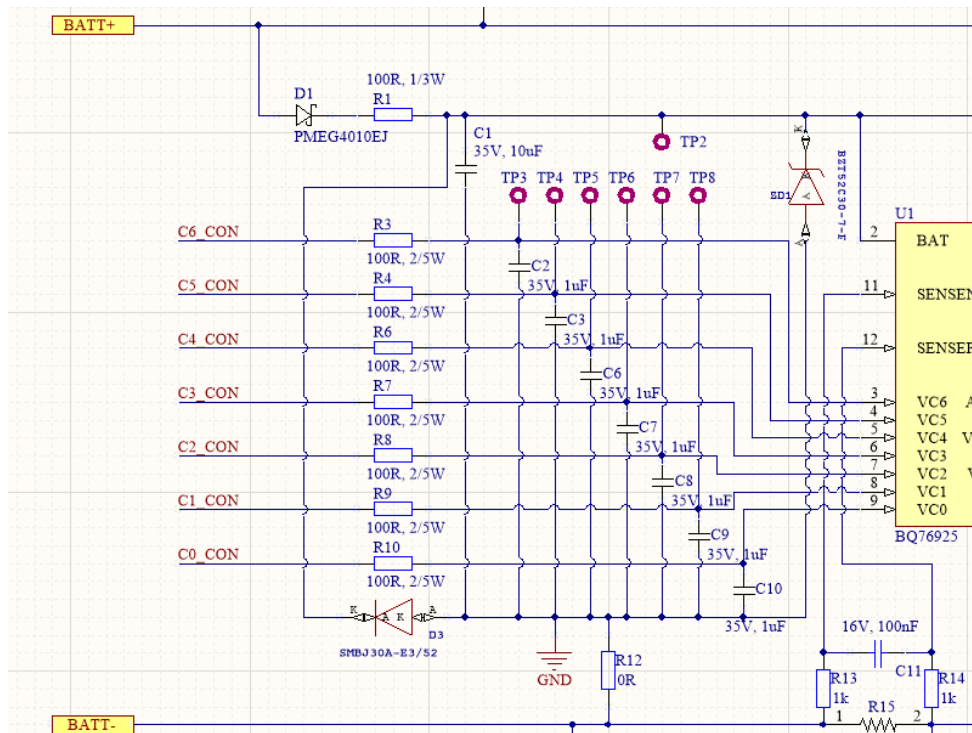


Obrázek 3.4: Zapojení BQ76925 na desce

Tento čip nabízí také analogové rozhraní pro čtení teploty pomocí termistoru nebo zdroj napětí pro napájení odporové sítě obsahující tyto termistory. V neposlední řadě je schopen pasivně balancovat jednotlivé články pomocí vnitřních tranzistorů a vnějších rezistorů podle algoritmu v MCU, který tento proces ovládá prostřednictvím rozhraní I<sup>2</sup>C.

Na obr. 3.4 je vidět elektrické zapojení použité na desce. Vychází z doporučeného zapojení pro tento čip podle schématu v katalogovém listu poskytnutým výrobcem [17].

Na obr. 3.5 je vidět detailní pohled na vstupní část obvodu. Dioda D1 slouží jako ochrana proti přepólování. Rezistor R1 a kondenzátor C1 tvoří vstupní RC filtr, následovaný TVS diodou, která má za úkol ochranu proti napětovým špičkám na vstupu. Nachází se zde také Zenerova dioda ZD1, sloužící jako regulátor pro případ přepětí na vstupním napájecím pinu čipu [17] a v kombinaci s kondenzátorem C1 mající za úkol udržet napětí na napájecím vstupu čipu v mezích deklarovaných výrobcem.



Obrázek 3.5: Zapojení vstupní části BQ76925 na desce

Tato cesta dále vede do lineárního regulátoru na obr. 3.6, tvořeného p-kanálovým tranzistorem MOSFET ovládaným řídicí logikou, nacházející se v čipu BQ76925. Za ním je další RC filtr, tvořený rezistorem R5 a kondenzátorem C5, který má napomáhat izolovat zátěž od zdroje a eliminovat přechodné jevy způsobené stejnými efekty na vstupu regulátoru [18].

Na obr. 3.5 na levé straně jsou také vidět vstupy jednotlivých bateriových článků. Každý z nich má u sebe jeden balanční rezistor a kondenzátor stabilizující napětí a zároveň blokuje vyšší harmonické složky, vzniklé při odpojování baterie od zátěže. Jelikož tento čip poskytuje balancování pasivní metodou, tak přebytečná energie v článku se bude po otevření tranzistoru, náležícího k příslušné cestě, přeměňovat na teplo na rezistorech R3, R4, R6, R7, R8, R9 a R10. Tyto rezistory nastavují balancovací proud, který se určuje podle následujícího vzorce [17]

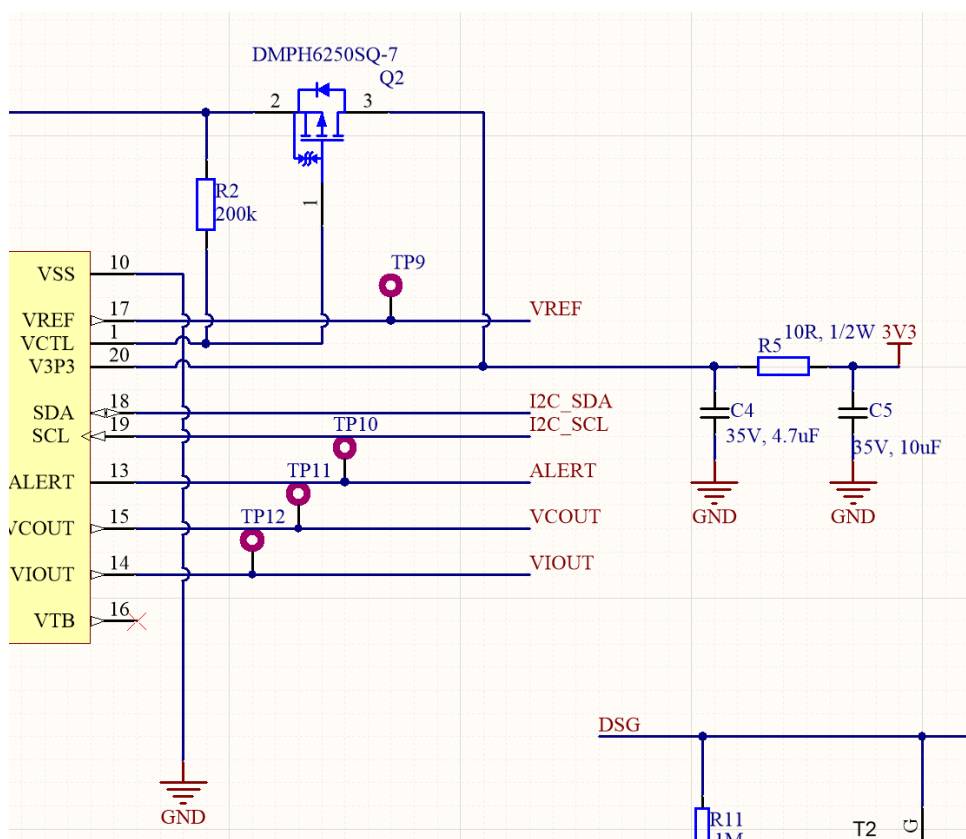
$$R_{InMax} = 0,5 \cdot \frac{U_{CellMax}}{I_{BalMax}} = 0,5 \cdot \frac{4,2}{0,05} = 42 \Omega, \quad (3.3)$$

kde  $I_{BalMax}$  je maximální povolený balancovací proud. Jelikož nebude využívána maximální hodnota tohoto proudu, z důvodu získání většího prostoru pro dlouhodobější balancování a nepřekročení maximální hodnoty tepelného vyzářování čipu, bude proud omezen. Bude-li zvolena hodnota rezistorů  $100 \Omega$ ,

vyjde, že výsledný balancovací proud je roven

$$I_{\text{Bal}} = 0,5 \cdot \frac{U_{\text{CellMax}}}{R_{\text{In}}} = 0,5 \cdot \frac{4,2}{100} = 21 \text{ mA}. \quad (3.4)$$

Ve spodní části obr. 3.5 je vidět zapojení pro měření proudu pomocí úbytku napětí na rezistoru R15. Bohužel pro tento účel je vnitřní zesílení, tím pádem i výsledné rozlišení, nedostatečné, takže nebude tento způsob měření použit. Bude nahrazen externím řešením, které bude popsáno v sekci 3.3.3 níže. V neposlední řadě rezistor R12 slouží k propojení záporného pólu baterie a země řídicí elektroniky. Toto propojení by mělo být co nejbližší vstupnímu konektoru obsahujícímu záporný pól baterie.



Obrázek 3.6: Zapojení výstupní části B76925 na desce

Výstupní část tohoto čipu, na obr. 3.6, se skládá z lineárního zdroje napětí 3,3 V, komunikační sběrnice I<sup>2</sup>C, výstupů analogového rozhraní, ALERT pinu a napájení pro termistor. V této aplikaci nebude použito pouze jedno čidlo, jelikož budou potřeba čtyři. MCU musí být schopen je číst nezávisle na sobě, aby bylo možné zaručit sledování alespoň 60 % článků. Bude tak využito vstupů A/D převodníků v použitém MCU, viz v sekci 3.3.5. ALERT pin

může být použit jako digitální výstup nebo vstup. Je konfigurován pomocí vnitřních registrů, do kterých se zapisuje pomocí I<sup>2</sup>C. Může zastávat buďto funkci upozornění na proud vyšší než je nastavená mez, nebo může, pomocí úrovně log. 1 na tomto pinu, probudit čip ze spánku, pokud byl před tím uspán.

Čip poskytuje informace výhradně po analogových výstupech, které má tři. Všechny tyto signály jsou přivedeny na vstupy A/D převodníku v procesoru. Tyto výstupy jsou následující:

- VCOUT - výstup, na kterém je zobrazeno napětí aktuálně zvoleného článku zápisem do příslušného registru pomocí I<sup>2</sup>C.
- VIOUT - výstup, na kterém je zobrazen aktuální proud vycházející nebo přicházející do baterie.
- VREF - poskytuje referenční napětí pro správně měření pomocí vnějšího A/D převodníku.

### ■ 3.3.3 Měření proudu

Z počátku bylo počítáno s měřením proudu pomocí BMS. Bylo však nutné ověřit, jestli toto řešení bude poskytovat dostatečné rozlišení pro možnost uspání elektroniky na desce. Vnitřní diferenciální zesilovač, do kterého je přivedeno napětí vzniklé průchodem proudu přes rezistor R15, poskytuje pouze zesílení 4 nebo 8. Jelikož bude použit 12bitový A/D převodník v MCU a maximální napětí na analogovém vstupu MCU je 3,3 V, bude k dispozici rozlišení

$$U_{1\text{LSB}} = \frac{U_{\text{Inmax}}}{2^{12}} = \frac{3,3}{4096} = 805,66 \mu\text{V}. \quad (3.5)$$

Bude-li pomocí tohoto napětí vyjádřen detekovaný úbytek napětí na rezistoru R15, který bude získán vydělením výsledku z rov. 3.5 zesílením vnitřního zesilovače, vyjde, že

$$U_{\text{R15}} = \frac{U_{1\text{LSB}}}{8} = \frac{805,66 \cdot 10^{-6}}{8} = 100,7 \mu\text{V}. \quad (3.6)$$

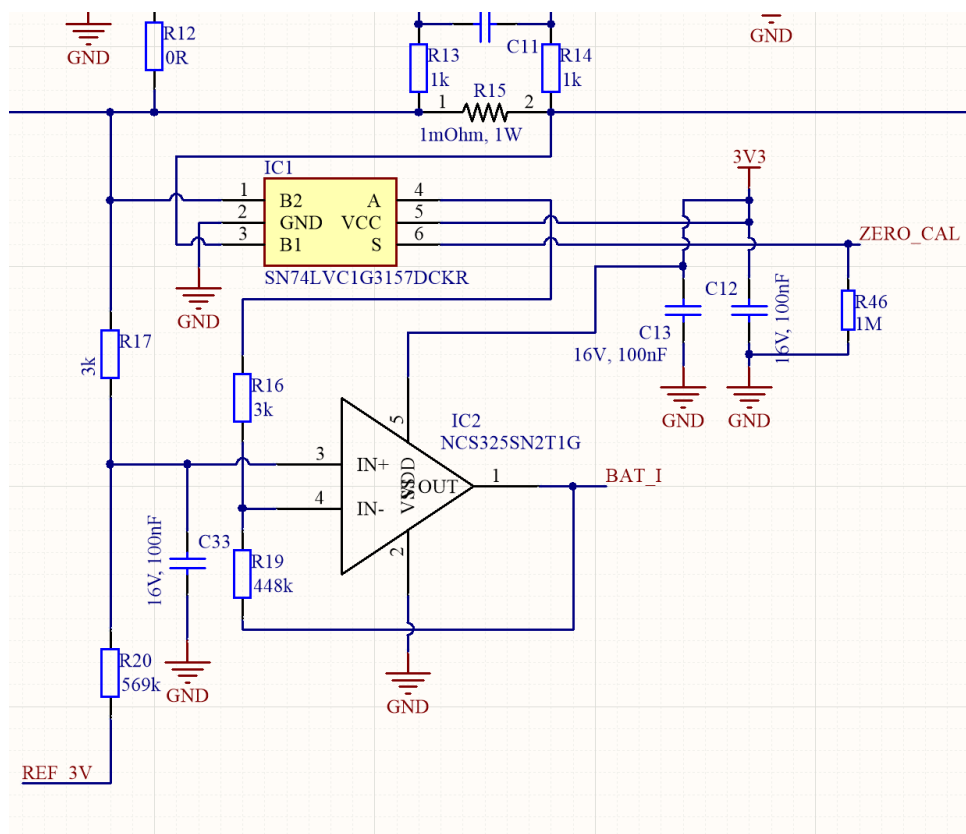
Pokud by byl tento výsledek převeden na proud, tekoucí při takovém úbytku napětí rezistorem R15, který má hodnotu odporu 1 mΩ, vychází dále

$$I_{\text{Bat}} = \frac{U_{\text{R15}}}{R_{15}} = \frac{100,7 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-3}} = 100,7 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 100,7 \text{ mA}. \quad (3.7)$$

To je pro předmětnou aplikaci nedostatečné. Nelze-li totiž měřit proud pod 100,7 mA, může se v extrémním případě stát, že se baterie bude takto vybíjet a dostane se na kritickou hodnotu velmi rychle. Pro probuzení většiny elektroniky na desce byla navíc požadována hranice aspoň 20 mA.

### ■ Externí operační zesilovač

Zmíněný problém bude vyřešen externím diferenciálním zesilovačem, který měří úbytek na stejném rezistoru R15 jako BMS, ale disponuje mnohem větším zesílením. Toto zapojení je možné vidět na obr. 3.7. Jedná se o invertující zapojení, přičemž k tomu, aby bylo možné měřit v obou směrech, je kladný vstup zesilovače posunut do 3/4 rozsahu. Díky tomu bude maximálnímu proudu odpovídat nejnižší hodnota výstupního rozsahu a pro minimální hodnotu proudu to bude naopak. Správným nastavením zesílení lze následně využít celý funkční rozsah převodníku v MCU.



**Obrázek 3.7:** Elektronické zapojení diferenciálního zesilovače pro měření proudu

Požadované zesílení se určí z rozdílu maximálního a minimálního napětí

na vstupu ( $\Delta U_{\text{In}}$ ) a výstupu ( $\Delta U_{\text{Out}}$ ). Úbytek, který lze pro maximální rozsah proudu podle tab. 3.1, tedy od  $-5\text{ A}$  do  $15\text{ A}$ , očekávat na vstupu zesilovače, tedy na rezistoru  $R_{15}$  s hodnotu  $1\text{ m}\Omega$ , se stanoví takto

$$\Delta U_{\text{In}} = \Delta I \cdot R_{15} = (15 - (-5)) \cdot 10^{-3} = 20\text{ mV}. \quad (3.8)$$

Výstupní napětí bude také limitováno, a to maximálním vstupním napětím A/D převodníku v použitém procesoru STM32F042C6T6. V katalogovém listu výrobce je tato hodnota udávána jako vstupní napětí napájení A/D převodníku, které činí  $3,3\text{ V}$ . Z maximální hodnoty musí být odečtena šířka oblasti zkreslení, které nastává pro výstupní napětí blízká se napájecím napětím. V tomto případě bude ubráno na spodní straně rozsahu  $100\text{ mV}$  a v horní části  $200\text{ mV}$  a výsledkem bude výstupní rozsah  $\Delta U_{\text{Out}} = 3\text{ V}$ . Z toho lze určit potřebné zesílení diferenciálního zesilovače

$$A_u = \frac{\Delta U_{\text{Out}}}{\Delta U_{\text{In}}} = \frac{3}{20 \cdot 10^{-3}} = 150. \quad (3.9)$$

Nyní je nutné ověřit rozlišení takového zapojení. Základní rozlišení tohoto A/D převodníku v procesoru, při napájení ze  $3,3\text{ V}$  a použití rov. 3.5, bude

$$U_{1\text{LSB}} = \frac{U_{\text{MaxADC}}}{2^{12}} = \frac{3,3}{4096} = 5,37\text{ }\mu\text{V}, \quad (3.10)$$

pokud by byla tato hodnota přepočtena na proud procházející rezistorem  $R_{15}$ , vyjde

$$I_{1\text{LSB}} = \frac{U}{R_{15}} = \frac{5,37 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} = 5,37\text{ mA}, \quad (3.11)$$

což je velké zlepšení oproti zabudovanému řešení a umožňuje relativně nízkou detekci proudu pro včasné zapnutí a vypnutí systému.

### ■ Nastavení zesílení

Aby bylo docíleno požadovaného zesílení, bude nutné nastavit dělič napětí v záporné zpětné vazbě. Ze standardního vzorce pro zesílení invertujícího zapojení [19] přitom vyplývá

$$A_u = \frac{\Delta U_{\text{Out}}}{\Delta U_{\text{In}}} = -\frac{R_{19}}{R_{16}}. \quad (3.12)$$

Vyjádřením  $R_{19}$  z této rovnice, volbou hodnoty odporu  $R_{16} = 3\text{ k}\Omega$  a dosažením potřebného zesílení vyjde hodnota rezistoru  $R_{19}$

$$R_{19} = A_u \cdot R_{16} = 150 \cdot 3\text{ k}\Omega = 450\text{ k}\Omega. \quad (3.13)$$



Nejbližší dostupná hodnota rezistoru je 448 k $\Omega$ . Bude tedy použita tato hodnota, což samozřejmě ovlivní zesílení. Reálné zesílení lze určit stejným postupem jako v rovnici 3.12 a opravené zesílení je tedy  $A_{u_{\text{real}}} = -149,33$ . Nadále bude počítáno s touto hodnotou.

### ■ Nastavení offsetu

Jelikož je nutné měřit napětí v obou směrech a použité zapojení je inverzní, je třeba ještě nastavit výchozí offset. Poměr velikostí maximálních možných proudů záporného a kladného směru je 1:3. Offset bude nastaven na stejný poměr. Čtvrtina z celkového rozsahu 3 V je 0,75 V, což po odečtení od horní hranice 3,1 V dá výslednou hodnotu pro nulový proud procházející rezistorem R15, ve výši 2,35 V. Vzhledem k tomu, že je využito invertující zapojení, kladný proud (vybíjení) se projeví na výstupu jako pokles napětí a záporný jako zvýšení napětí.

Tento offset bude nastaven pomocí děliče napětí na kladném vstupu operačního zesilovače. Nejdříve je potřeba vypočítat potřebné napětí na vstupu zesilovače

$$U_{\text{OffIn}} = \frac{U_{\text{Zero}}}{A_u} = \frac{2,35}{149,33} = 15,74 \text{ mV}. \quad (3.14)$$

Tato hodnota bude dosazena do známého vzorce pro dělič napětí [19], ze kterého lze určit výslednou hodnotu rezistoru R20. Po zvolení hodnoty rezistoru R17 = 3 k $\Omega$  vychází

$$R_{20} = \left( \frac{U_{\text{Ref}}}{U_{\text{OffIn}}} - 1 \right) \cdot R_{17} = \left( \frac{3}{15,74 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \cdot 3000 = 568\,791,61 \, \Omega. \quad (3.15)$$

Tomuto výsledku nejbližší dostupná hodnota je 569 k $\Omega$ .

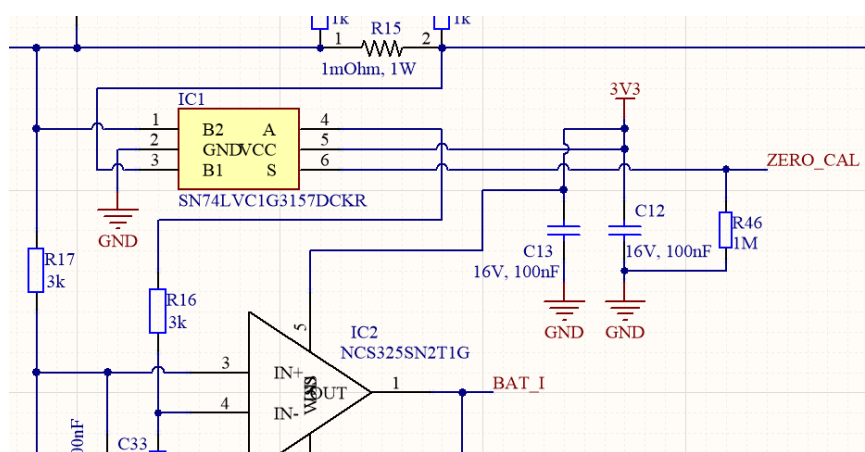
### ■ Přesnost a kalibrace nuly

Jelikož je tato aplikace kritická na přesnost a ve vstupní části záleží na jednotkách  $\mu\text{V}$ , celá tato aplikace musí využívat co nejpřesnější komponenty. Co se týče samotného operačního zesilovače, byl vybrán operační zesilovač NCS325SN2T1G firmy ON Semiconductor. Tento OZ má velmi nízký offset s maximální hodnotou 50  $\mu\text{V}$  a typickou hodnotou 14  $\mu\text{V}$ . I tak se ale jedná o nezanedbatelné číslo, pokud hodnota 1LSB je 5,37  $\mu\text{V}$ .

Aby bylo nastavení nuly co nejpřesnější, je nutné využít přesnou napěťovou referenci. Tato reference, která bude napájena z napájecí větve 3,3 V, bude

mít hodnotu 3V a hodnota jejího klidového vstupního proudu musí být co nejmenší, protože bude stále zapnutá - bude totiž současně využívána zapojením pro buzení MCU, viz sekce 3.3.4. Nakonec byla vybrána napěťová reference firmy Maxim Integrated MAX6129AEUK30+T. Ta se vyznačuje velmi nízkou spotřebou až  $6,75\ \mu\text{A}$ , velmi přesným výstupem s tolerancí maximálně  $\pm 0,4\%$  a nízkým typickým vypínacím napětím  $U_{\text{Out}} + 100\ \text{mV}$ . [20].

Bohužel, vliv na přesnost celého zapojení může mít i teplotní drift jak OZ napěťové reference (i když podle katalogového listu je tento drift u OZ pouze  $0,25\ \mu\text{V}\ ^\circ\text{C}^{-1}$  [21]), tak i pasivních komponentů kolem ní, například rezistorů, viz [22]. Aby nebylo nutné vybírat drahé součástky s co nejnižšími rozptyly klíčových vlastností, bude při každém měření potřebné správně nakalibrovat nulu. Toho bude docíleno pomocí analogového spínače, na obr. 3.8



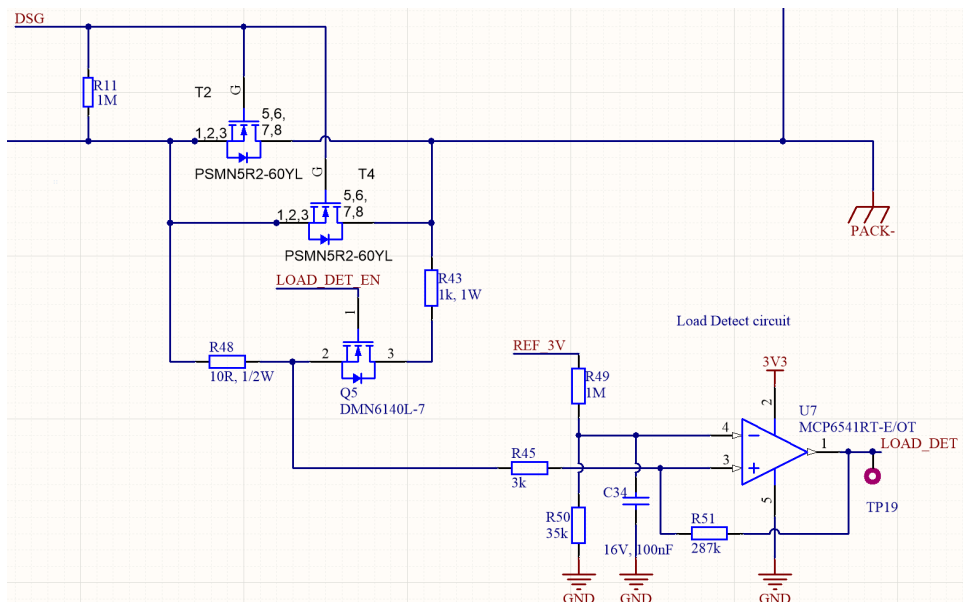
**Obrázek 3.8:** Elektronické zapojení analogového spínače

pojmenovaného jako IC1, který před každým měřením změří také pozici nuly. Toho bude docíleno napojením obou vstupů na stejný (záporný) pól baterie a tato výstupní hodnota poté bude představovat pravou nulu, která bude dále porovnávána s naměřenou výstupní hodnotou po připojení záporného vstupu OZ zpět na opačný pól rezistoru R15 a po změření úbytku na něm. Tato součástka bude ovládána z MCU.

### 3.3.4 Řízení vybíjení a probouzení systému

Důležitou schopností systému monitorování baterie je ve správný čas baterii odpojit, aby se nedostala z parametrů definovaných výrobcem. Proto musí existovat způsob, jak baterii od zátěže odpojit. V tomto případě byla vybrána dvojice n-kanalových tranzistorů MOSFET v paralelním zapojení. Důvodem

je rozdělení proudového zatížení a nepřekročení maximální hodnoty tepelného vyzářování. U výběru těchto tranzistorů také hrálo roli jejich mezní napětí, protože budou ovládány skrze výstupní piny procesoru.



Obrázek 3.9: Zapojení pro řízení vybíjení a probouzení systému

## ■ Řízení vybíjení

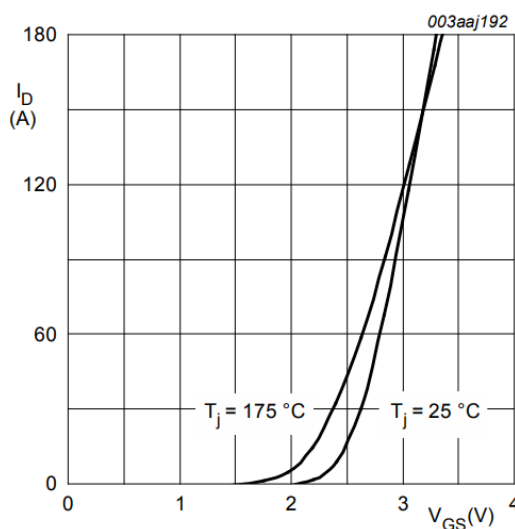
Nejdříve je třeba určit minimální napětí výstupu procesoru pro úroveň log. 1 z katalogového listu. Pro MCU, využitý na této desce, je tato úroveň  $U_{OH} = U_{ddx} - 0,4\text{ V}$  [23], což v případě, kdy pracuje s napájecím napětím  $U_{ddx} = 3,3\text{ V}$ , znamená  $2,9\text{ V}$ . Jako ideální se tedy jeví volba tranzistorů PSMN5R2-60YL, které poskytují jak nízké prahové napětí, tak vysoký možný průchozí proud  $I_D$ . Podle charakteristik vybraného tranzistoru je v nejhorších případech (pro až  $-55^\circ\text{C}$ )  $U_{GS_{th}} = 2,45\text{ V}$  [24], což je pod minimálním napětím produkovaným MCU. V neposlední řadě musí být zkontrolováno, jaký proud je tranzistor při takové úrovni napětí schopný propustit, a to pomocí tabulky č. 8 v katalogovém listu tranzistoru [24], viz obr. 3.10. Podle této charakteristiky je to pro minimální úroveň napětí mnohem více, než je aplikací požadovaná hodnota  $15\text{ A}$ .

Nyní je ještě důležité ověřit nepřekročení maximální schopnosti vyzářování výkonu, jelikož i při otevření mají tranzistory odpor. Z grafu č. 7, v katalogovém listu tranzistoru [24], může být vyčteno, že pro minimální úroveň napětí z MCU bude tato hodnota maximálně  $7,5\text{ m}\Omega$ . Při maximálním proudu  $7,5\text{ A}$ ,

jelikož jsou použity dva tranzistory paralelně, vychází úroveň maximálního vyzářeného výkonu na jednom tranzistoru

$$P_{T2|T4} = I_{D_{\max}}^2 \cdot R_{DS_{\text{on}}} = 7,5^2 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = 421,87 \text{ mW}, \quad (3.16)$$

která se nachází hluboko pod maximální povolenou hodnotou katalogovým listem tranzistoru.

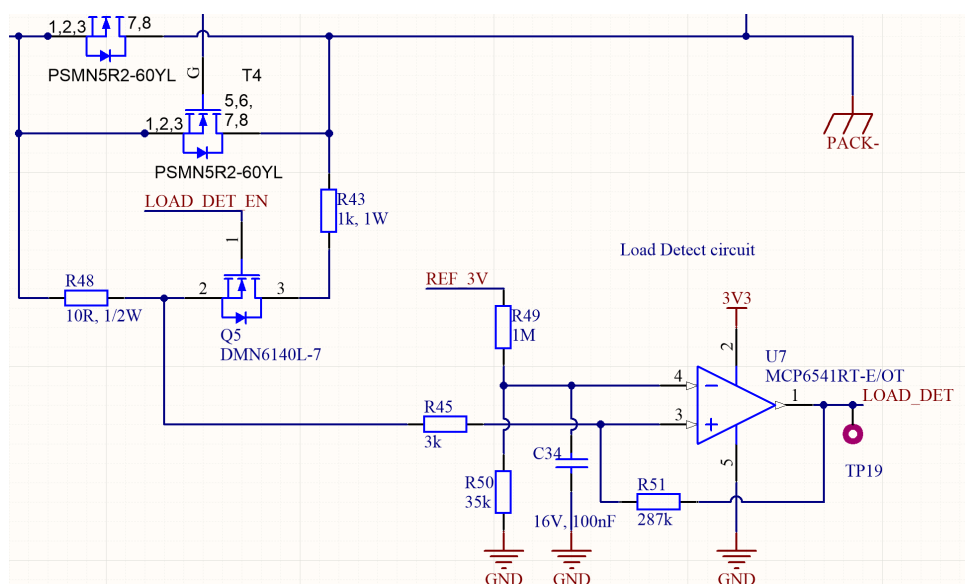


**Obrázek 3.10:** Závislost  $I_D$  vs.  $V_{GS}$  pro tranzistory ovládané vybíjením [24]

### ■ Probouzení systému

Jde o digitální signál, který nabude úrovně log. 1 při průchodím proudu větším než stanovená hranice. Tato hranice probouzení systému byla nastavena na 10 mA, je to ale pouze prvotní odhad, jelikož správné nastavení bude záviset na spotřebě nízkonapětového systému v nečinnosti. Pro potřeby této práce budeme počítat s hranicí zmíněnou výše. Původním záměrem bylo použít výstup z měření proudu, bohužel by se jednalo o tak malou změnu napětí k detekci, že její měření by bylo komplikované. Byla tedy přidána další větev paralelně k vybíjecím tranzistorům, viz obr. 3.11.

Tato větev obsahuje další n-kanálový tranzistor MOSFET, Q5, který otevírá cestu, sloužící pro detekci proudu. Za normálního režimu, pokud bude elektronika v nečinnosti a baterie v normálním stavu, bude tento tranzistor otevřen a zavřeny budou tranzistory T2 a T4. Bude snímán úbytek napětí na rezistoru R48 a toto napětí následně porovnáváno vůči hranici, nastavené děličem napětí, skládajícím se z rezistorů R49 a R50.



Obrázek 3.11: Zapojení probouzení systému

Tento dělič bude také využívat napětovou referenci 3 V, aby měření bylo co nejpřesnější. Zde již nepůjde o tak malé rozdíly, jako v případě obvodu pro měření proudu, nebude tedy nutné kalibrovat nulu. Díky mnohem menšímu proudovému zatížení této cesty je zde využít mnohem větší rezistor, na kterém se bude měřit toto napětí. Proudové omezení nastavuje odpor R43.

Nyní bude popsán postup při návrhu zapojení. Bylo počítáno s maximálním proudem, tekoucím tímto obvodem, ve výši 25,2 mA. Bude nutné ověřit, zda nedošlo k překročení maximální hodnoty vyzářeného výkonu na obou rezistorech. Jelikož byla nastavena proudová limitace předřazeným odporem R43 s hodnotou 1 k $\Omega$ , bude maximální hodnota proudu, která může projít tímto obvodem  $I_{LD}$ , rovna

$$I_{LD} = \frac{U_{Bat_{max}}}{R_{43} + R_{48}} = \frac{25,2}{1000 + 10} = 24,75 \text{ mA.} \quad (3.17)$$

Tento proud poté způsobí výkonovou ztrátu na rezistoru R48

$$P_{R48} = I_{LD}^2 \cdot R_{48} = (24,75 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10 = 6,12 \text{ mW.} \quad (3.18)$$

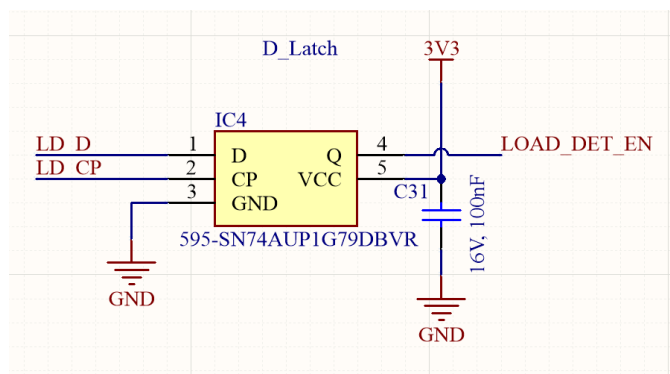
Tato hodnota je velmi nízká, bude tedy stačit standardní rezistor v pouzdře 0603. Podobně bude vypočtena hodnota pro rezistor R43

$$P_{R43} = I_{LD}^2 \cdot R_{43} = (24,75 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1000 = 612,56 \text{ mW.} \quad (3.19)$$

Tento rezistor tedy musí být schopen výrazně většího výkonu, proto bude také největší, a to v pouzdře 2010.

Aby bylo možné zavřít proudovou cestu tranzistory T2 a T4, nechat tranzistor Q5 otevřený pro detekci a poté uspat nepotřebnou elektroniku, bude

dále nutné přidat paměťový prvek. Ten bude udržovat gate tranzistoru Q5 nad jeho mezním napětím  $U_{gs(th)}$ . Tento paměťový prvek musí mít sám o sobě velmi nízkou spotřebu, protože bude stále zapnut. Byl tedy vybrán paměťový prvek typu D firmy Texas Instruments s označením SN74AUP1G79DBVR. Nabízí velmi nízkou spotřebu, a to až  $0,9 \mu A$  [25]. Bude ovládán pomocí dvou výstupů z MCU a jeho výstup bude přímo řídit tranzistor Q5. Zapojení se skládá pouze ze samotného čipu a vstupního blokovacího kondenzátoru, viz obr. 3.12. [25]



Obrázek 3.12: Zapojení paměťového členu

### ■ Návrh obvodu komparátoru

Úbytek napětí na rezistoru R48 bude snímán komparátorem s hysterezí, který obsahuje operační zesilovač U7 v neinvertujícím zapojení. Referenční napětí, nastavené děličem na záporném vstupu OZ, tvořeným rezistory R49 a R50, musí být nastaveno na hranici, jaká odpovídá napětí, které vzniká na rezistoru R48 při stanoveném proudu pro probuzení MCU. Tento proud je  $10 \text{ mA}$  a odpor R48 má hodnotu  $10 \Omega$ , úbytek napětí bude vypočten jako

$$U_{R48} = I_{\text{Wake}} \cdot R_{48} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 100 \text{ mV}. \quad (3.20)$$

U tohoto děliče je důležité, aby proud jím procházející nebyl příliš velký, jelikož bude aktivní stále a mohl by způsobit zrychlené vybití baterie. Proto bude hodnota rezistoru R50 zvolena poměrně vysoko, tedy  $35 \text{ k}\Omega$ . Využitím vzorce pro dělič napětí [19] a vyjádřením hodnoty rezistoru R49 vyjde

$$R_{49} = \left( \frac{U_{\text{Ref}}}{U_{\text{th}}} - 1 \right) \cdot R_{50} = \left( \frac{3}{100 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \cdot 35000 = 1\,015\,000 \Omega. \quad (3.21)$$

Nejbližší katalogová hodnota je  $1 \text{ M}\Omega$ . Díky tomu bude zaručena relativně nízká spotřeba.

Dále bude nutné nastavit hysterezi tohoto komparátoru. Jedná se o horní a spodní hodnoty spínání  $U_{\text{thh}}$  a  $U_{\text{thl}}$ . Ty se budou počítat podle následujících rovnic [26]

$$U_{\text{thh}} = \frac{(R_{45} + R_{51}) \cdot U_{\text{Ref}} - (R_{45} \cdot U_{\text{OL}})}{R_{51}} \quad (3.22)$$

$$U_{\text{thl}} = \frac{(R_{45} + R_{51}) \cdot U_{\text{Ref}} - (R_{45} \cdot U_{\text{OH}})}{R_{51}}. \quad (3.23)$$

Hodnoty napětí pro hranice jednotlivých úrovní budou určeny jako  $U_{\text{thh}} = 0,11 \text{ V}$  a  $U_{\text{thl}} = 0,08 \text{ V}$ . Hodnoty napětí  $U_{\text{OH}}$  a  $U_{\text{OL}}$  byly získány z katalogového listu operačního zesilovače a znamenají úrovně napětí na výstupu při jednotlivých logických stavech. Pro tento obvod byl vybrán operační zesilovač MCP6541RT-E/OT firmy Microchip Technology. Hodnoty těchto napětí, vyplývající z jeho katalogového listu, jsou  $U_{\text{OH}} = U_{\text{dd}} - 0,2 = 3,3 - 0,2 = 3,1 \text{ V}$  a  $U_{\text{OL}} = U_{\text{ss}} + 0,2 = 0 + 0,2 = 0,2 \text{ V}$ . V neposlední řadě musí být určena jedna hodnota rezistoru. Z důvodu udržování užšího listu součástek bude zvolena hodnota odporu  $R_{45} = 3 \text{ k}\Omega$ . Z rov. 3.22 vychází hodnota  $U_{\text{Ref}}$

$$U_{\text{Ref}} = \frac{(R_{51} \cdot U_{\text{thh}} + R_{45} \cdot U_{\text{OL}})}{R_{45} + R_{51}}, \quad (3.24)$$

která bude dosazena do rov. 3.23. Odtud vychází poměr rezistorů

$$\frac{R_{45}}{R_{51}} = \frac{U_{\text{thl}} - U_{\text{thh}}}{U_{\text{OL}} - U_{\text{OH}}} = \left( \frac{0,08 - 0,11}{0,2 - 3,1} \right) = 0,0103448, \quad (3.25)$$

ze kterého dosazením hodnoty odporu  $R_{45}$  lze určit hodnotu posledního rezistoru  $R_{51}$

$$R_{51} = \frac{R_{45}}{0,0103448} = \left( \frac{3000}{0,0103448} \right) = 290\,000,77 \Omega. \quad (3.26)$$

Nejbližší dostupná katalogová hodnota takového rezistoru je  $287 \text{ k}\Omega$ . Tímto byl dokončen návrh obvodu pro probouzení elektroniky. Výstup tohoto komparátoru je přiveden na vstupní pin PA0 MCU a pomocí tohoto pinu se dá probudit ze spánku [23].

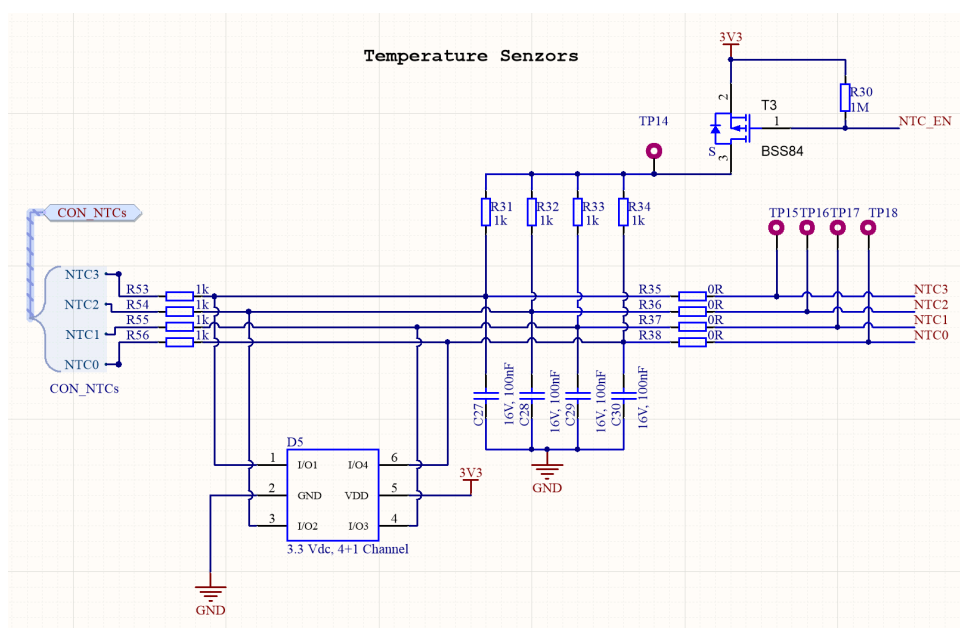
### ■ 3.3.5 Měření teploty

Podle požadavků stanovených pravidly je nutné kontrolovat také teplotu, a to na minimálně 30 % článků v baterii, viz sekce 2.3.2. V tomto systému kontroly a správy baterie bylo rozhodnuto o použití čtyř termistorů s tím, že každý senzor se umístí mezi dva články, což by mělo zajistit kontrolu všech článků. Jako teplotní senzor byl vybrán termistor NTC NJ28MA0302 firmy AVX. Významné charakteristické parametry jsou znázorněny v tab. 3.2.

**Tabulka 3.2:** Charakteristiky termistoru NJ28MA0302 firmy AVX [27]

Specifika	Hodnota
Odpor při 25 °C	3000 Ω
Koeficient $\beta$	3960 K
Maximální výkonové zatížení	160 mW
Operativní teplotní rozsah	-55 °C – 155 °C

Samotné zapojení pro měření teploty je vidět na obr. 3.13. Pro minimalizaci spotřeby systému slouží p-kanálový tranzistor T3, který je ovládán z MCU. Ten bude schopen napájení vypnout, pokud není měření teploty nutné, a tím snížit spotřebu systému. Rezistory R31-34 představují proudové omezení napájení termistorů. Kondenzátory C27-30 plní funkci vstupních filtrů a zároveň poskytují stabilizaci vstupů. Rezistory R53-56 se starají o další proudové omezení, tentokrát pro ESD ochranu vstupů (D5), která má zabránit poškození A/D převodníku v MCU v důsledku přepětí.

**Obrázek 3.13:** Zapojení termistorů

Nejprve bude nutno ověřit, zda nebude pro stanovenou hodnotu proud limitujících rezistorů R31-34 překročeno maximální výkonové zatížení termistorů. K tomu bude potřeba zjistit maximální a minimální odpor. Důležitý je hlavně odpor minimální, při kterém prochází termistorem největší proud a ztrátový výkon je nejvyšší. Minimální odpor nastává při nejvyšší teplotě, jelikož se jedná o negastor. V katalogovém listu lze najít tuto hodnotu jako poměr aktuálního odporu vůči výchozímu při teplotě 25 °C [27]. Pro 150 °C

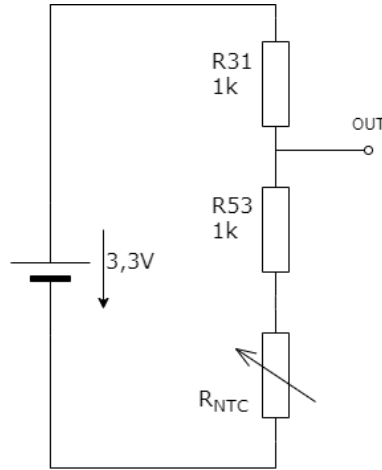


je tento poměr 0,02608 a tedy odpor termistoru bude

$$R_{\text{NTC}_{\text{maxT}}} = 0,02608 \cdot R_0 = 78,24 \Omega \quad (3.27)$$

a naopak, při minimální teplotě bude tento poměr roven 61,21, což odpovídá odporu

$$R_{\text{NTC}_{\text{minT}}} = 61,21 \cdot R_0 = 183,630 \text{ k}\Omega. \quad (3.28)$$



**Obrázek 3.14:** Zjednodušené zapojení jednoho termistoru

Pro hodnotu odporu spočítaného pro maximální teplotu bude vypočten vyzářený výkon a tento bude porovnán s doporučenou maximální úrovní udávanou katalogovým listem termistoru, tedy 160 mW [27]. Celkový odpor, který je při takové teplotě mezi napájením 3,3 V a zemí, je znázorněn na zjednodušeném zapojení na obr. 3.14. V cestě (například u prvního termistoru) jsou ještě proud limitující 1 k $\Omega$  odpory, tedy R31 a R53. Celkový odpor potom činí

$$R_{\text{total}_{\text{min}}} = R_{\text{NTC}_{\text{maxT}}} + R_{53} + R_{31} = 78,24 + 1000 + 1000 = 2078,24 \Omega. \quad (3.29)$$

Podle toho bude určen maximální proud, který může procházet termistorem

$$I_{\text{NTC}_{\text{max}}} = \frac{U_{\text{dd}}}{R_{\text{total}_{\text{min}}}} = \frac{3,3}{2078,24} = 1,58 \text{ mA} \quad (3.30)$$

a z toho již může být vypočítán maximální výkon vyzářený na termistoru

$$P_{\text{NTC}_{\text{max}}} = I_{\text{NTC}_{\text{max}}}^2 \cdot R_{\text{total}_{\text{min}}} = (1,58 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2078,24 = 5,18 \text{ mW}. \quad (3.31)$$

Výkonová stránka návrhu byla tímto ověřena, nyní bude popsán způsob vyhodnocení.

Vyhodnocení proběhne pomocí parametrů, které máme k dispozici, viz tab. 3.2. Budou použity v následujících výpočtech, které slouží ke stanovení teploty.

Podle rov. 2.2 pro výpočet odporu termistoru za teploty  $T$ , koeficientu  $\beta$  a odporu  $R_0$  za teploty  $T_0$  vychází, že

$$R_{\text{NTC}} = R_0 \cdot \exp^{\beta \cdot (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}. \quad (3.32)$$

Z této rovnice lze vyjádřit okamžitou teplotu  $T$  vztahem

$$T = \frac{\beta \cdot T_0}{\ln \left( \frac{R_{\text{NTC}}}{R_0} \right) \cdot T_0 + \beta}. \quad (3.33)$$

Nyní je pouze nutno vyjádřit poslední neznámou v rovnici na pravé straně, okamžitý odpor termistoru  $R_{\text{NTC}}$ , pomocí napětí měřeného na vstupu A/D převodníku. Zjednodušený obvod prvního NTC článku je zobrazen na obr. 3.14. Výpočet bude vycházet ze vzorce pro dělič napětí, kam budou dosazeny hodnoty odporů v použitém zapojení. Z toho vychází, že

$$U_{\text{Out}} = \frac{R_{53} + R_{\text{NTC}}}{R_{53} + R_{\text{NTC}} + R_{31}} \cdot U_{\text{dd}}. \quad (3.34)$$

Z této rovnice bude vyjádřena hodnota  $R_{\text{NTC}}$ , tedy

$$R_{\text{NTC}} = \frac{U_{\text{dd}} \cdot R_{53} - (R_{53} + R_{31}) \cdot U_{\text{Out}}}{U_{\text{Out}} - U_{\text{dd}}}, \quad (3.35)$$

kterou lze následně dosadit do rov. 3.33, aby byl získán finální vzorec pro výpočet teploty v jednotkách K

$$T = \frac{\beta \cdot T_0}{\ln \left( \frac{U_{\text{dd}} \cdot R_{53} - (R_{53} + R_{31}) \cdot U_{\text{Out}}}{(U_{\text{Out}} - U_{\text{dd}}) \cdot R_0} \right) \cdot T_0 + \beta}. \quad (3.36)$$

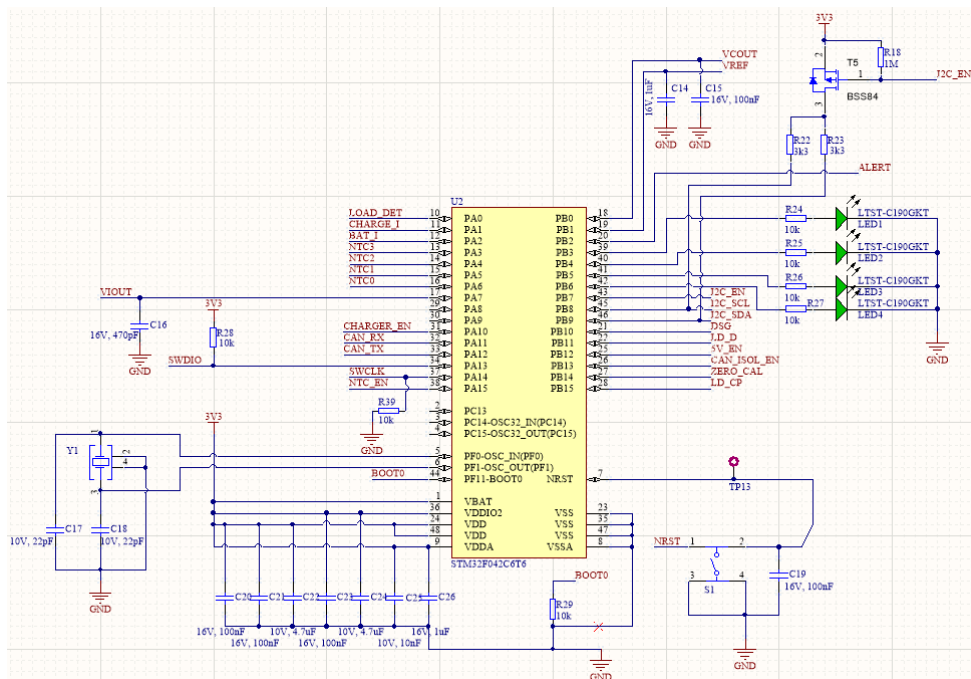
Pro potřeby srovnávání je nutno následně provést převod na °C, což uděláme pouze odečtením 273,15 K. Tímto jsou splněny požadavky pravidel na správu baterie.

### ■ 3.3.6 Mikrokontrolér

Pro zpracování byl vybrán mikrokontrolér firmy STMicroelectronics STM32-F042C6T6. Jedná se o malý, velmi univerzální mikrokontrolér, který dokáže komunikovat pomocí sběrnice CAN, I<sup>2</sup>C nebo třeba UART. Prodává se ve velkém množství pouzder a nabízí až 10 analogových vstupů. Na obr. 3.15 je vidět zapojení MCU, které vychází z doporučeného zapojení v katalogovém listu výrobce [23].

Využívá 8 MHz krystal, Y1, jako zdroj hodin. Vstupní kondenzátory C20-26 slouží jako filtrační pro napájecí vstupy MCU. Dále je zobrazeno připojení

všech periférií od analogových výstupů z BMS se svými filtračními kondenzátory C14-C16, připojení programovacích linek (SWCLK, SWDIO, NRST), připojení kontrolních signálů až po výstupní komunikaci CAN. Zapojení také obsahuje čtyři LED diody pro testovací účely. Děle také připojení sběrnice I<sup>2</sup>C a vypínatelné pull-up rezistory.

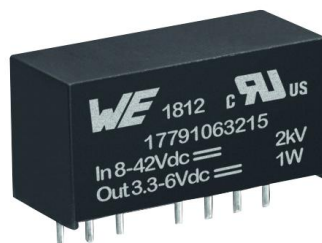


Obrázek 3.15: Zapojení mikrokontroléru

### 3.3.7 Izolované rozhraní CAN

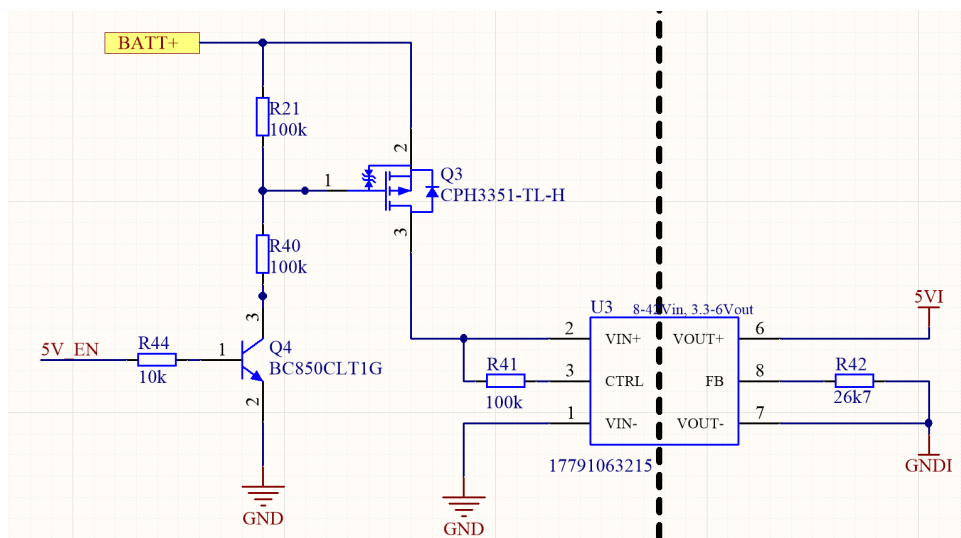
Další důležitou částí, která musí být navržena, je výstupní komunikační rozhraní CAN. Bylo rozhodnuto, kvůli problémům s výrazným rušením na této sběrnici, že všechny jednotky, které komunikují přes tuto sběrnici, budou odizolovány. Proto i v této jednotce bude příslušná část odizolována. Napojení na tuto sběrnici umožní každé jednotce ve vozidle vidět stav baterie a případně zareagovat. Zapojení se skládá z izolovaného zdroje pro vytvoření napájení pro CAN vysílač a přijímač, a dále z izolace samotné komunikace, která zároveň funguje jako překladač úrovní. V izolované části je dále umístěn samotný vysílač a přijímač, který působí jako rozhraní mezi protokolem CAN a fyzickou sběrnici.

## Izolované napájení



**Obrázek 3.16:** Izolovaný zdroj 17791063215 od Würth Elektronik [28]

Izolované napájení zajišťuje variabilní izolovaný zdroj firmy Würth Elektronik z rodiny MagI<sup>3</sup>C Power s označením 17791063215. Tento zdroj disponuje výstupním výkonem až 1 W při výstupních napětích v rozmezí 3,3 V až 6 V a je tedy schopný dodat proud až 300 mA. Hlavní předností tohoto zdroje je velmi široký rozsah vstupního napětí, a to od 8 V do 42 V. Tento zdroj má také velmi silnou izolační bariéru, schopnou ustát až 2 kV DC [29]. Obsahuje také zabudované vstupní a výstupní blokovací kondenzátory. Zapojení tohoto zdroje je možné vidět na obr. 3.17.



**Obrázek 3.17:** Zapojení izolovaného zdroje pro rozhraní CAN

Zdroj je sice vybaven vypínacím pinem, uvádějícím ho do spánku, při kterém si ovšem řekne o 500  $\mu$ A, což je ale, bohužel, stále příliš, takže tato funkcionality nebude využívána a bude nutné zdroj v případě neaktivity nebo usnutí systému vypínat pomocí přerušení napájení.

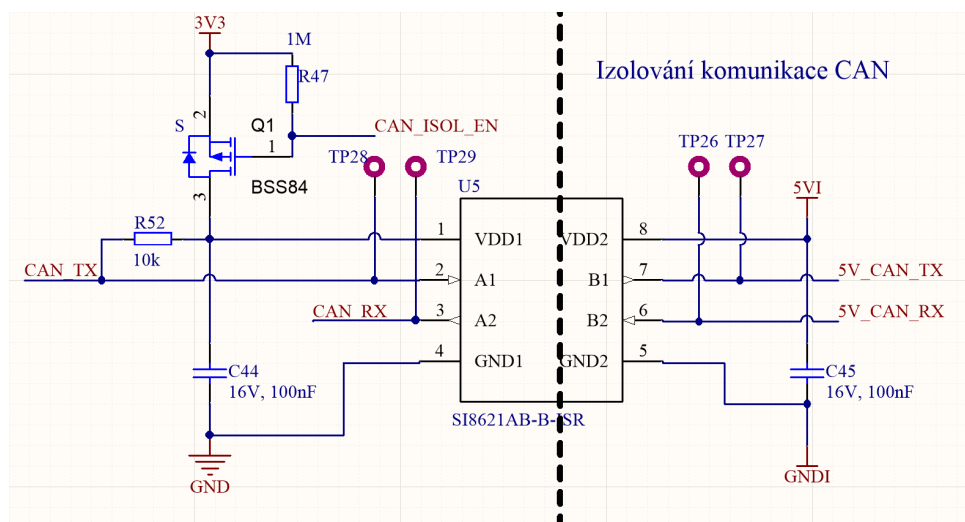
K tomu slouží dvojice tranzistorů Q4 a Q5. Jelikož spínané napětí je již poměrně velké, až 25,2 V, bylo nutné použít dva tranzistory místo jednoho,

protože MCU by nebyl schopný samotný p-kanálový MOSFET sepnout. Proto je zde další tranzistor, tentokrát bipolární NPN, jehož úkolem je propojit dělič napětí, tvořený z rezistorů R21 a R40, se zemí. Tím pádem se na gate tranzistoru Q3 dostane poloviční napětí než na source. Vznikne tak napětí  $V_{sg}$  větší, než je mezní hranice udávaná v katalogovém listu výrobce, která činí maximálně 2,6 V [30].

Na výstupní straně zůstává pouze nastavení výstupního napětí přes rezistor R42. Jeho hodnota je určena katalogovým listem výrobce a činí 26,7 k $\Omega$  [29].

### Izolace komunikace

Izolace samotné komunikace je provedena pomocí digitálního CMOS izolátoru od společnosti Silicon Labs s označením SI8621AB-B-ISR. Tento izolátor nabízí jednu vstupní a jednu výstupní linku, což jej dělá ideálním pro izolování sériové komunikace. Poskytuje izolaci až 2,5 kV RMS [31]. Zapojení tohoto izolátoru je vidět na obr. 3.18. Skládá se ze samotného čipu a vstupních



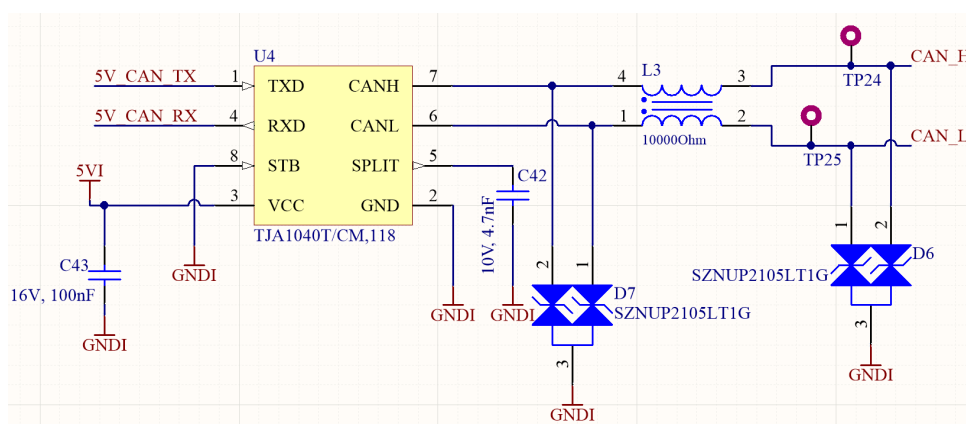
Obrázek 3.18: Zapojení izolace komunikace pro rozhraní CAN

a výstupních blokovacích kondenzátorů. Na vstupní straně se také nachází tranzistor Q1, který bude čip při nečinnosti vypínat, aby bylo možné redukovat spotřebu systému. Stejně jako tranzistory u izolovaného zdroje bude i tento tranzistor řízen z MCU.

## Rozhraní CAN

Poslední součástí je přijímač a vysílač, který zajišťuje převod komunikace mezi ovladačem Controlled Area Network a fyzickou sběrnici CAN. Ta totiž pracuje s vyššími napětími, než je schopný typický MCU zpracovávat. Pro tento účel byl vybrán čip firmy Philips Semiconductors s modelovým označením TJA1040T. Tento čip je primárně určený do komunikačních jednotek osobních automobilů a poskytuje schopnost diferenciálního přenosu a diferenciálního přijímání do řadiče CAN [32]. Zapojení čipu je vidět na obr. 3.19.

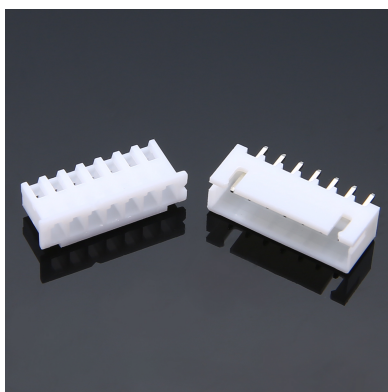
V tomto zapojení se vedle samotného čipu nachází vstupní blokovací kondenzátor a na výstupu tlumivka souhlasného napětí, přičemž z obou jejích stran jsou umístěny ochrany před elektrostatickými výboji, přímo určené pro rozhraní CAN.



Obrázek 3.19: Zapojení CAN Transceiveru TJA1040T

### 3.3.8 Vstupní konektory

Pro vstupy jednotlivých článků a NTC byly vybrány konektory JST-XH. Z důvodu zajištění větší flexibility během testování bylo rozhodnuto o rozdělení do dvou konektorů. Pro NTC se použije varianta obsahující 5 vodičů a pro články ta, která obsahuje 7 vodičů. Hlavní proudová cesta je přivedena do jednotky pomocí konektoru XT60, což společně s JST-XH vytváří velmi rozšířenou kombinaci konektorů, používanou u většiny nabíječek baterií a tedy umožňující případnou kompatibilitu s externí nabíječkou.



**Obrázek 3.20:** Konektor B7B-XH-A firmy JST [33]

Vstupní konektor pro hlavní proudovou cestu, XT60, je velmi oblíbený pro svou velkou proudovou zatížitelnost, která činí až 30 A [34], a také pro svou robustnost. Proto je pro tuto aplikaci optimální.



**Obrázek 3.21:** Konektor XT60 firmy AMASS [35]

### 3.3.9 Výstupní konektor

U výstupního konektoru byl naopak kladen důraz na robustnost a jednoduchost. Požadavky při výběru zahrnovaly, kromě splnění specifikací pro průchozí proud zmíněných v tabulce 3.1, zejména přítomnost silového a datového vodiče v jednom konektoru, možnost zajištění proti vypadnutí a jako nepovinnou preferovanou vlastnost alespoň základní úroveň vodotěsnosti. Tato kombinace požadavků se nakonec ukázala jako velmi obtížná k nalezení. Většina existujících konektorů, pokud již měla možnost kombinace silových a slaboproudých pinů, nebyla k dispozici se zakončením na jedné straně do desky a na druhé straně do konektoru, tedy konektor-deska, ale pouze jako propojení konektor-konektor nebo deska-deska.

Nakonec byl vybrán konektor firmy Norcomp, Inc. Tento konektor používá standardní rozměr A (15 vodičů) konektorů z rodiny D-SUB, se kterým je

možné se setkat například v počítačích, kde se používá pro připojení monitorů pomocí VGA. Konektor je ale upravený a obsahuje místo patnácti menších vodičů dva velké, silnoproudé, a 5 menších vodičů určených pro přenos méně proudově náročných cest. Tento konektor je možné vidět na obr. 3.22 níže.



**Obrázek 3.22:** Konektor D-SUB POWER-D 9 pin 7W2 firmy Norcomp, Inc. [36]

Klíčové vlastnosti tohoto konektoru:

- obsahuje jak silové, tak signálové vodiče,
- umožňuje uchycení konektoru k zástrčce pomocí šroubů,
- vykazuje značnou robustnost,
- garantuje vodotěsnost podle standardu IP67.

Klíčové elektrické vlastnosti jsou popsány v tabulce 3.3 [37]. Z těchto vlastností je pro tuto aplikaci hlavní možnost nést až 40 A na silových vodičích a až 5 A na signálových vodičích tohoto konektoru, což jej dělá ideální i pro případné rozšíření o nabíjení jednotky.

**Tabulka 3.3:** Klíčové elektrické vlastnosti konektoru

Specifikace	Hodnota
Maximální proud silovým vodičem	40 A
Maximální odpor kontaktu silového vodiče	1 m $\Omega$
Maximální proud signálovým vodičem	5 A
Teplotní rozsah	-55 °C až 125 °C

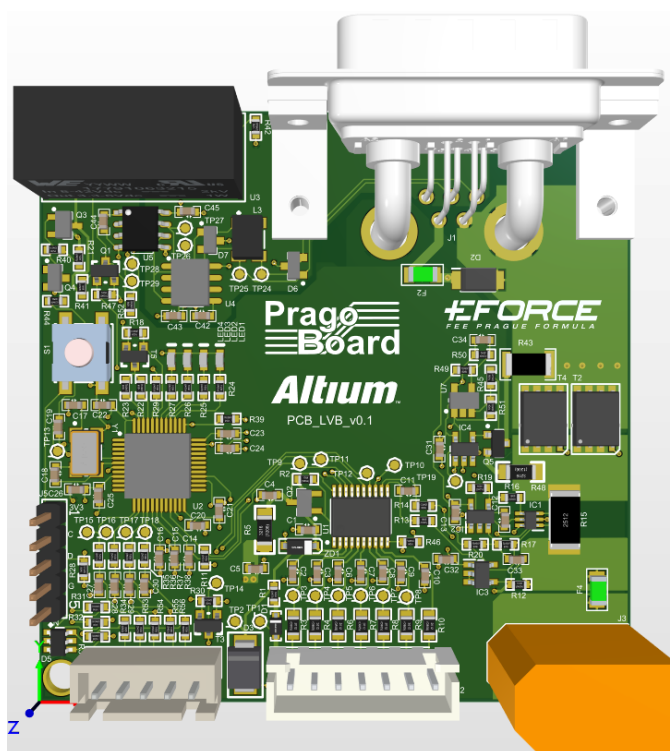
Celkový set konektoru obsahuje tuto zástrčku v provedení "male", poté zásuvku, těsnění do panelu, potřebné mechanické komponenty a kryt na zástrčku a kabeláž, viz tab. 3.4 níže.



**Tabulka 3.4:** Potřebné součástky pro úspěšné sestavení setu a zástavbu do kabeláže

Jméno	Označení výrobce
Zásuvka D-SUB, 9 vodičů, 7W2, Pravý úhel, do desky	684S7W2103L461
Zástrčka D-SUB, 9 vodičů, 7W2, Rovná, Pájecí žlábků	680S7W2203L401
Těsnění pro zástavbu do panelu a potřebné mechanické součástky	SF6715
Ochranný kryt na zástrčku pro 15 pin D-SUB, IP67	967-009-010R011

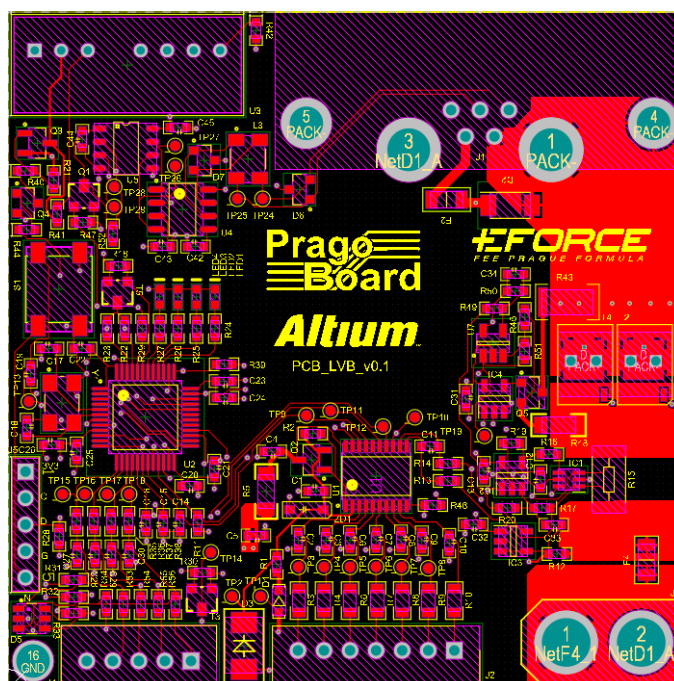
### 3.4 Návrh desky plošných spojů

**Obrázek 3.23:** Pohled na model DPS shora

Po zkompletování schématu je nutné navrhnout desku plošných spojů. Rozměry této desky byly určeny zejména velikostí baterie, která má rozměry 66 mm × 61 mm × 40 mm. Deska bude v jedné krabici s touto baterií, díky čemuž se její rozměry uzpůsobily této skutečnosti. Nakonec byly vybrány rozměry 65 mm × 65 mm s tím, že baterie musí v jednom směru přesahovat tak, aby bylo možné zasunout do zásuvek zástrčky, a to kvůli výšce konektorů XT60 a JST-XH.

Díky značnému množství komponentů a přítomnosti cest s vysokým proudovým zatížením bylo rozhodnuto o využití čtyřvrstvé desky, což umožní větší hustotu komponentů a zároveň poskytne potřebnou kapacitu pro přenesení proudu. Komponenty budou umístěny pouze na jedné straně, aby se zjednodušilo testování a zlevnila výroba desky. Totéž bude platit o popisících na desce, tzv. silk masce. Na obr. 3.23 je vidět, jak deska vypadá ve 3D modelu.

Návrh této desky začal logickým rozvržením bloků, které vyústilo v návrh zobrazený výše. Hlavní proudová cesta je vedena po pravé straně desky, kde postupně přechází přes hlavní pojistku, poté následují odpor na měření proudu hlavní proudovou cestou a řídicí tranzistory. Cesta dále pokračuje k hlavnímu výstupnímu konektoru D-SUB. Jelikož je vybíjení řízeno pomocí tranzistorů umístěných na záporném pólu baterie, je tato cesta vedena po prvních dvou vrstvách a naopak cesta kladného pólu baterie jde vrstvou číslo tři a čtyři.



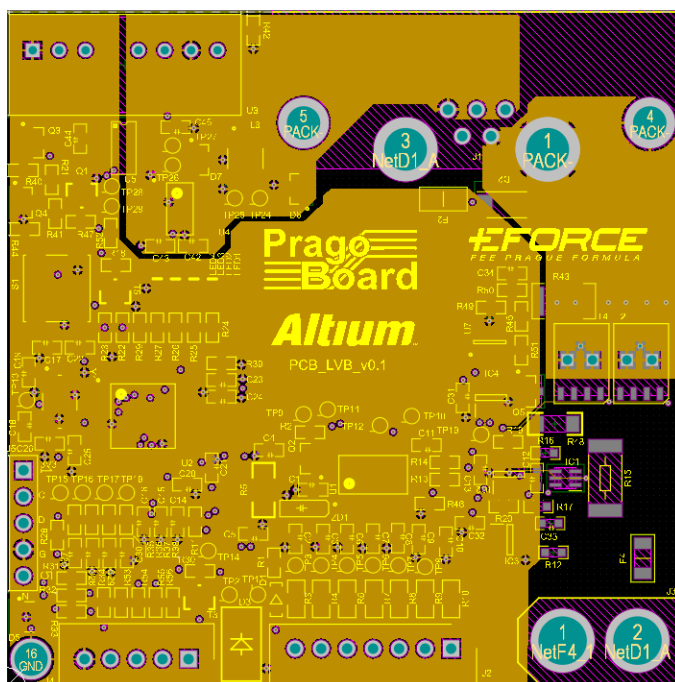
Obrázek 3.24: Vrchní vrstva DPS se skrytými zbylými vrstvami

Paralelně s touto proudovou cestou je také umístěna elektronika pro měření proudu, a to nalevo od rezistoru pro čtení proudu. Vedle řídicích tranzistorů je umístěn obvod budící mikrokontrolér.

Vedle vstupního konektoru pro hlavní proudovou cestu je dále umístěn sedmi-pinový konektor JST-XH pro připojení článků baterie. Z tohoto konektoru vedou jednotlivé cesty přes balanční rezistory a blokovací kondenzátory do BMS čipu. Na levé straně konektoru pro články začíná cesta napájení čipu

BMS a následně i lineárního regulátoru, který vytváří napájení 3,3 V. Ten se nachází na levé straně BMS. Na pravé straně BMS lze dále postřehnout napojení čipu na rezistor, sloužící k měření proudu, a na vrchní straně BMS pak výstupy, kterými bude komunikovat s MCU. Na obr. 3.24 je vidět zvýrazněná vrchní vrstva, ve které se nachází většina spojů. Ostatní vrstvy jsou skryty.

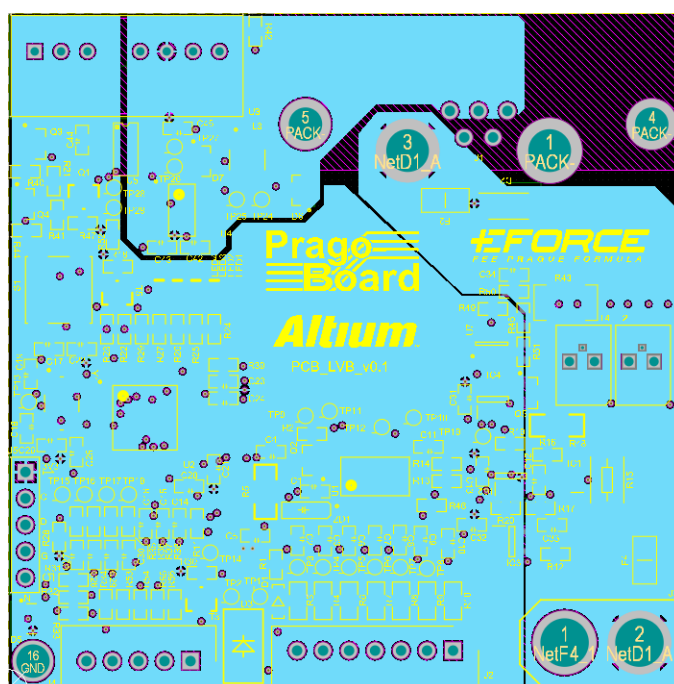
Vedle připojení jednotlivých článků je umístěn konektor pro teplotní čidla. Nad ním jsou limitující odpory a blokové kondenzátory, mající po stranách obvod řídicí napájení NTC. Tento blok přechází do připojení k MCU. Vedle pasivních součástek pro teplotní čidla se nachází poslední konektor, programovací, napojený do MCU. Nad ním je dislokován krystal se zatěžujícími kondenzátory. Jelikož má MCU napájecí piny z každé strany, jsou v jeho blízkosti na každé straně umístěny blokové kondenzátory, jejichž funkcí je, kromě filtrace vyšších harmonických složek, rovněž vyhlazovat poklesy napětí na regulátoru, aby nedošlo k nechtěnému vypnutí MCU. [16]



Obrázek 3.25: Vrchní vnitřní vrstva DPS určená pro zem

Nad MCU se nachází informační LED diody pro testovací účely. Vlevo od nich je spínač pro manuální restartování MCU a nad ním tranzistory a pasivní prvky, řídicí napájení k izolačním komponentům, tedy izolovanému zdroji a izolátoru komunikace. Vpravo od této elektroniky jsou obvody pro komunikaci pomocí CAN, vysílač a přijímač, a dále ochranné a filtrační prvky. Z těchto obvodů dále vedou dvě cesty do menších pinů výstupního konektoru, představujícího fyzické napojení na sběrnici CAN.

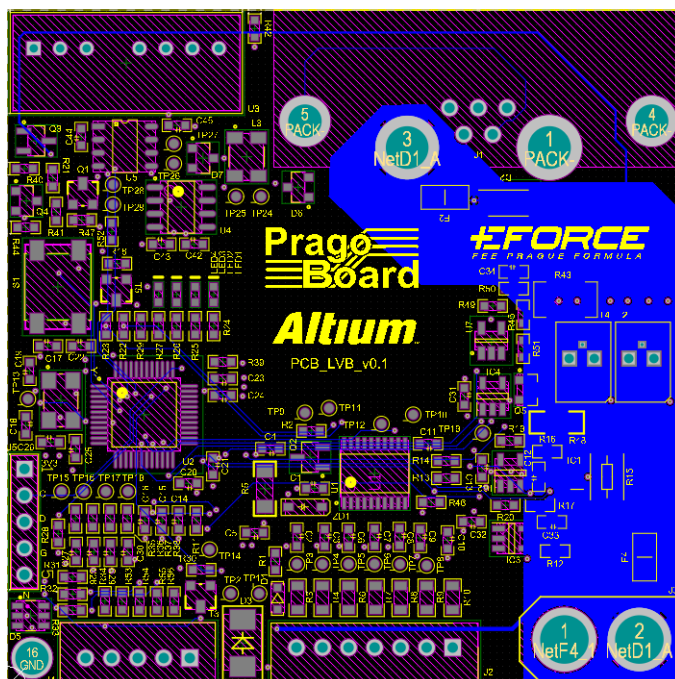
Celá tato elektronika izolátorů napětí a komunikace má svojí vlastní izolovanou zemnicí plochu, nacházející se pod těmito součástkami. Tato zemnicí plocha je umístěna ve druhé vrstvě. Tuto vrstvu je možné vidět na obr. 3.25. V druhé vrstvě se nachází tři významné oblasti rozlité mědi. První, nejmenší a nejvíce vpravo, je podpůrná cesta pro hlavní proudovou cestu záporného pólu baterie. Druhá, největší, je zem pro veškerou elektroniku na desce, starající se o baterii. Poslední, třetí, je již zmíněná izolovaná zem pro obvody obstarávající komunikaci pomocí CAN. Tato vrstva je umístěna ve středu horní části desky.



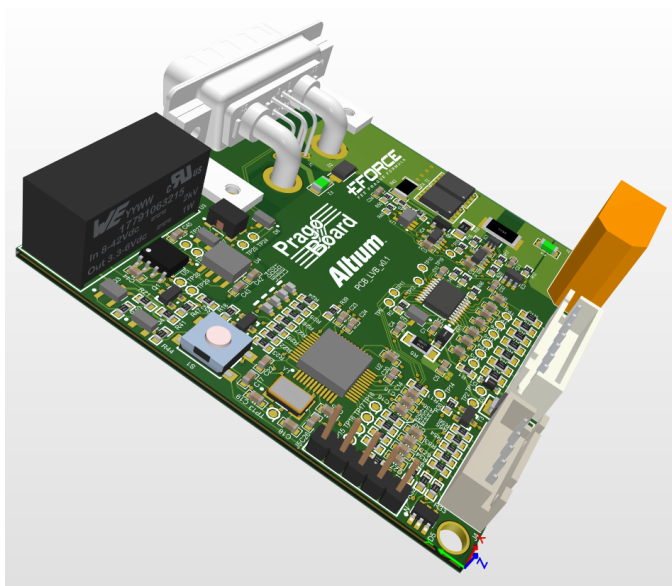
**Obrázek 3.26:** Spodní vnitřní vrstva DPS určená pro napájení

Třetí vrstva v pořadí je určena pro vedení napájení. Je také rozdělena na tři segmenty, viz obr. 3.26. Pravá část slouží jako pomocná paralelní cesta pro hlavní proudovou, která míří ke kladnému pólu baterie. Opět v levé spodní části se nachází největší část této vrstvy, vylitá měď. Ta je určena pro distribuci napájení 3,3 V. Nad ní se nachází plocha pro izolovaných 5 V k napájení obvodu pro komunikaci po sběrnici CAN.

Spodní, tedy poslední vrstva DPS slouží pro signály, které už nemohly být vedeny na horní vrstvě. Také se v ní nachází jeden větší polygon, sloužící jako hlavní proudová cesta, která přísluší kladnému pólu baterie. Tato vrstva je vyobrazena na obr. 3.27. Finální pohled na 3D model DPS z boku se všemi komponenty představuje obr. 3.28.



Obrázek 3.27: Spodní vrstva DPS



Obrázek 3.28: Boční pohled na 3D model DPS

### 3.5 Osazování a ověření funkčnosti

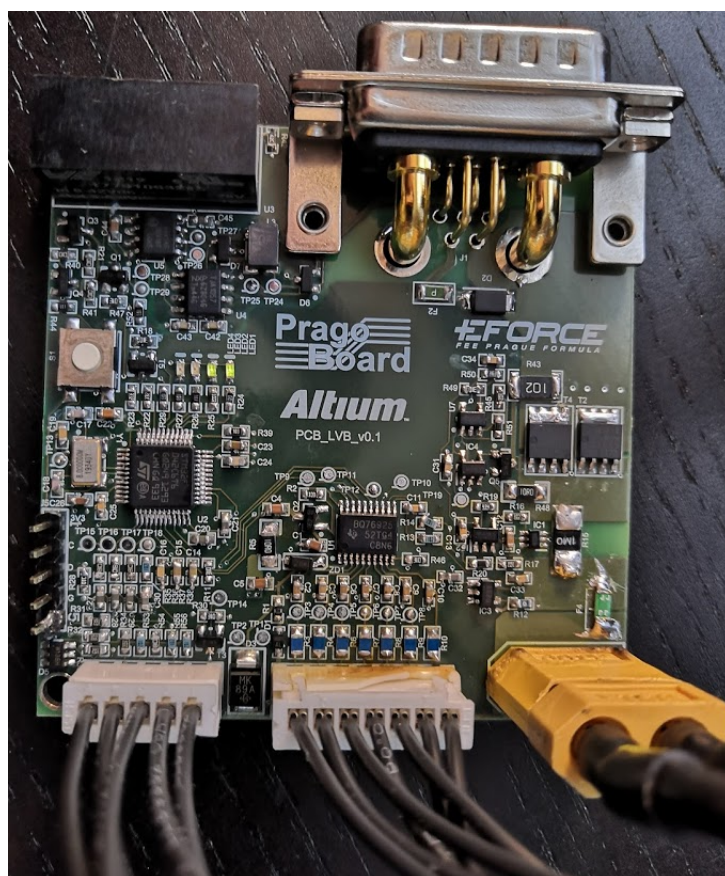
Osazování bylo provedeno ručně s využitím mikropájky a horkovzdušné pájky. Osazovalo se postupně po blocích, které mohly být postupně funkčně

otestovány. Postup byl následující:

1. Osazení BMS - bylo započato hlavním čipem, poté přišly na řadu pasivní komponenty a nakonec konektor jednotlivých článků a hlavní konektor. Osadil se též regulátor pro 3,3 V. Poté byla zapojena baterie a prověřeno, že regulátor má na výstupu správné napětí.
2. Osazení MCU - bylo pokračováno komponenty pro MCU. První byl čip MCU, následně byly osazeny pasivní komponenty kolem a odzkoušeny informační LED diody. Poté byla osazena část vstupu teplotních čidel.
3. Osazení CAN - byl osazen izolovaný zdroj a změřeno napětí na výstupu. Poté byla osazena kompletní elektronika pro komunikaci CAN a znovu zapnut zdroj. Byla sledována možná změna teploty desky, která nenastala. Chování tedy bylo v normálu. Komunikace jako taková bude odzkoušena až po naprogramování MCU a ověření funkčnosti všech zbylých funkcí. Nic přitom nenasvědčovalo potížím z hardwarového hlediska.
4. Dále byla osazena elektronika řízení vybíjení. Ta byla vyzkoušena připojením testovacího odporu na výstup, poté byl přiložen zdroj napětí na gate hlavních tranzistorů a byl změřen proud připojeným ampérmetrem. Řízení tranzistorů pro vybíjení bylo rovněž otestováno.
5. Poté byla vyzkoušena také detekce proudu. K tomu již bylo nutné naprogramovat procesor, který zapsal do paměťového prvku a otevřel tak detekční cestu. Obvodem začal protékat proud, který byl měřen ampérmetrem, a na výstupu komparátoru se objevila úroveň log. 1. Tím byl otestován tento obvod.
6. Jako poslední bylo odzkoušeno měření proudu. Ručním multimetrem bylo změřeno napětí na výstupu diferenciálního zesilovače při odpojené baterii od zátěže. Toto napětí odpovídalo základní nastavené hodnotě pomocí offsetu na kladném vstupu zesilovače. Poté byla otevřena proudová cesta a byla měřena změna napětí. Tato změna odpovídala předpokládané změně napětí, čímž byla otestována tato část obvodu.

Tímto byly otestovány všechny hardwarové funkcionality na této desce. Plně osazenou desku se zapojenou baterií je možno vidět na obr. 3.29.





**Obrázek 3.29:** Osazená DPS s baterií ze shora





## Kapitola 4

### Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout, vyrobit a otestovat funkčnost elektronického systému pro správu a monitorování nízkonapěťové baterie, který bude využit v nové generaci formule FSE.09, zkonstruované studenty z týmu eForce Prague FEE Formula na FEL ČVUT. V této práci bylo dosaženo následujících výsledků:

- V úvodu práce byly popsány jednotlivé používané technologie baterií, byly nastíněny jejich výhody a nevýhody. Byl popsán výběr baterie a jednotlivé parametry, které budou monitorovány. Byla představena soutěž Formula Student a její pravidla, která budou ovlivňovat návrh tohoto systému. Poté byl vysvětlen komunikační protokol CAN a způsob měření teploty použitý v této práci.
- Byly definovány hlavní požadavky na systém, v návrhovém programu Altium Designer 19 bylo vytvořeno schéma a detailně popsán způsob návrhu zapojení obvodů jednotlivých funkcionalit včetně výběru klíčových komponent.
- Byly prostudovány principy a pravidla elektronického návrhu a byla navržena deska plošných spojů tohoto systému.
- Desky byly ručně osazeny součástkami a byla otestována hardwarová funkčnost jednotlivých bloků. Z tohoto testování plyne, že jednotka LVB je schopná spravovat a monitorovat baterii, a to včetně správného měření proudu.

Vývoj této desky umožňuje týmu nasadit vozidlo v závodech Formula Student pro letošní sezónu. Zajistí napájení elektroniky vozu dříve, než bude zapnut hlavní vysokonapěťový okruh, který následně toto napájení převezme. Tým tak bude schopen obstát u náročných technických kontrol, vyžadujících popsany postup pro kontrolu nízkonapěťové elektroniky.

Do budoucna by tento systém mohl být dále rozšířen o nabíjecí čip, který by při zapnutí hlavního vysokonapěťového okruhu umožnil nabíjení baterie z hlavního akumulátoru napájením nízkonapěťového okruhu, vytvořeného elektronikou hlavního akumulátoru. Tato úprava by osamostatnila jednotku, v důsledku čehož by se eliminovala závislost na pravidelném manuálním dobíjení.



## Použitá literatura

1. RAHN, Christopher D. a Chao-Yang WANG. *Battery Systems Engineering*. The Pennsylvania State University, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2013. ISBN 978-1119979500.
2. BUCHMANN, Isidor. *BU-201: How does the Lead Acid Battery Work* [online] [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://batteryuniversity.com/learn/article/lead\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries).
3. BUCHMANN, Isidor. *BU-203: Nickel-based Batteries* [online] [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries).
4. CETL, Tomáš. *Aplikace elektrochemických zdrojů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02859-3.
5. BUCHMANN, Isidor. *BU-204: How do Lithium Batteries Work* [online] [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries).
6. *Sony VTC5A Battery* [online] [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.aku-bat.cz/gi/3642/1502113171/Baterie\\_Li\\_Ion\\_18650\\_Sony\\_VTC5\\_2600mAh\\_3\\_7V\\_30A\\_US18650VTC5.jpg](https://www.aku-bat.cz/gi/3642/1502113171/Baterie_Li_Ion_18650_Sony_VTC5_2600mAh_3_7V_30A_US18650VTC5.jpg).
7. *Sony VTC5A Battery Katalogový list* [online]. Sony Energy Devices Corporation [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.imrbatteries.com/content/sony\\_us18650vtc5a.pdf](https://www.imrbatteries.com/content/sony_us18650vtc5a.pdf).
8. *Formula SAE* [online] [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Formula\\_SAE](https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE).

9. *Pravidla - Formula Student Germany* [online]. Formula Student Germany [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-Rules\\_2020\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf).
10. HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: Academia, 2008. ISBN 978-80-200-1478-8.
11. *NTC* [online]. TDK Corporation [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.gme.cz/data/product/1024\\_1024/pctdetail.118-030.1.jpg](https://www.gme.cz/data/product/1024_1024/pctdetail.118-030.1.jpg).
12. *NTC thermistor* [online]. EETech Media, LLC [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.resistorguide.com/ntc-thermistor/>.
13. KUFRE, Jack. *NTC vs. PTC Charakteristika* [online] [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Kufre\\_Jack/publication/309267235/figure/fig1/AS:418904481517578@1476886019947/The-thermistor-temperature-characteristic-curve-In-Figure-1-the-thermistor-temperature.png](https://www.researchgate.net/profile/Kufre_Jack/publication/309267235/figure/fig1/AS:418904481517578@1476886019947/The-thermistor-temperature-characteristic-curve-In-Figure-1-the-thermistor-temperature.png).
14. LAWRENZ, Wolfhard. *CAN System Engineering: From Theory to Practical Applications*. London: Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-1-4471-5612-3.
15. *Introduction to the Controller Area Network (CAN)* [online]. Texas Instruments, Inc. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>.
16. ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-2.
17. *BQ76925 Katalogový list* [online]. Texas Instruments, Inc. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76925.pdf?ts=1587931749137>.
18. *SLUA619B - Application Report - Getting started with the BQ76925* [online]. Texas Instruments, Inc. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slue619b/slue619b.pdf?ts=1588023714180>.
19. VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika*. Praha: GRADA, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.
20. *MAX6129AEUK30+T Katalogový list* [online]. Maxim Integrated, GmbH [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/256/MAX6129-1389239.pdf>.
21. *NCS325SN2T1G Katalogový list* [online]. ON Semiconductor [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/NCS325-D-1067140.pdf>.
22. *Temperature Coefficient of Resistance* [online]. EETech Media, LLC. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.resistorguide.com/temperature-coefficient-of-resistance/>.

23. *STM32F042C6T6 Katalogový list* [online]. STMicroelectronics [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/SGST/SGST-S-A0002862944/SGST-S-A0002862944-1.pdf?hkey=52A5661711E402568146F3353EA87419>.
24. *DPSMN5R2-60YL Katalogový list* [online]. NEXPERIA B.V. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/916/PSMN5R2-60YL-1320598.pdf>.
25. *SN74AUP1G79DBVR Katalogový list* [online]. Texas Instruments, Inc. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74aup1g79.pdf>.
26. *Curing Comparator Instability with Hysteresis* [online]. Reza Moghimi [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-34/number-1/articles/curing-comparator-instability-with-hysteresis.pdf>.
27. *NTC termistor NJ28MA0302 Katalogový list* [online]. AVX [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/catalog/supplier/library/pdf/AVXThermistors.pdf>.
28. *VISP MagI<sup>3</sup> C Power module 17791063215 Katalogový list* [online]. Würth Elektronik GmbH [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://cz.farnell.com/productimages/large/en\\_GB/3050537-40.jpg](https://cz.farnell.com/productimages/large/en_GB/3050537-40.jpg).
29. *VISP MagI<sup>3</sup> C Power module 17791063215 Katalogový list* [online]. Würth Elektronik GmbH [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/445/17791063215-1715724.pdf>.
30. *CPH3351-TL-H Katalogový list* [online]. ON Semiconductor [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/CPH3351-D.PDF>.
31. *SI8621AB-B-ISR Katalogový list* [online]. Silicon Labs [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/368/si86xx-1Mbps-datasheet-1522773.pdf>.
32. *TJA1040T Katalogový list* [online]. NXP Semiconductors N.V. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/TJA1040-1127931.pdf>.
33. *JST-XH 7 pin* [online] [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.chinaexpress.cz/cs/item/25-set-jst-xh-2-54mm-terminal-housing-pcb-header-wire-connectors-6-7-8-9-10-pins-awg-24-32/32837169569.html>.
34. *XT60 AMASS Katalogový list* [online]. Changzhou Amass Electronics Co.Ltd. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/2d152ced3b7a446066e6c419d84bb460/XT60%5C%20SPEC.pdf>.
35. *XT60 AMASS Konektor* [online]. Changzhou Amass Electronics Co.Ltd. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.uzitecnosti.cz/fotky73231/fotos/\\_vyr\\_728\\_H38200.jpg](https://www.uzitecnosti.cz/fotky73231/fotos/_vyr_728_H38200.jpg).

36. *D-SUB POWER-D Mixed 9 pin konektor* [online]. NorComp [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://media.digikey.com/Photos/Norcomp%20Photos/684S7W2103L461.jpg>.
37. *D-SUB POWER-D Mixed 9 pin - Katalogový list* [online]. NorComp [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://content.norcomp.net/rohspdfs/PowerD-ComboD/SEAL-D/684S/684S7W2103L461.pdf>.

## Přílohy

### A Soupis součástek

**Tabulka 4.1:** Soupis součástek použitých na desce LVB

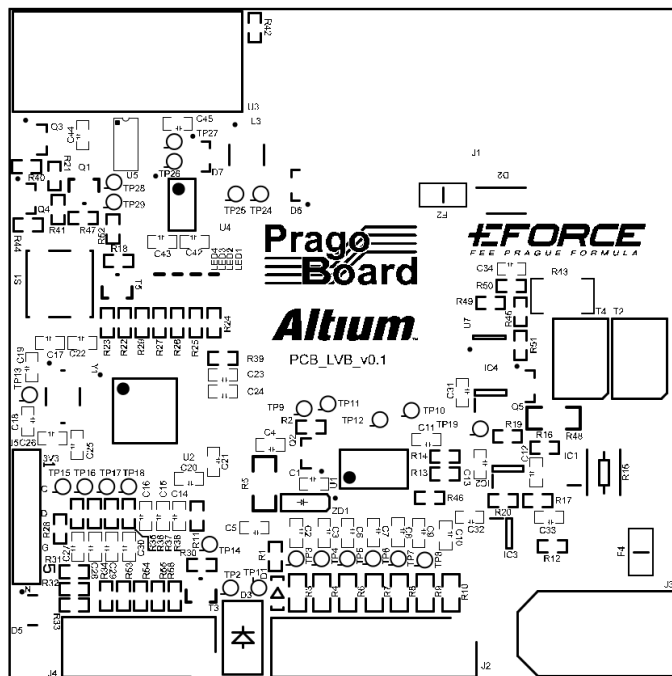
Součástka	Reference	Popis	Pouzdro	Počet
Kondenzátor	C1, C5	10 $\mu$ F, 35 V	0603	2
Kondenzátor	C2, C3, C6, C7, C8, C9, C10	1 $\mu$ F, 35 V	0603	7
Kondenzátor	C4	4,7 $\mu$ F, 35 V	0603	1
Kondenzátor	C11, C12, C13, C15, C19, C20, C21, C23, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C43, C44, C45	100 nF, 16 V	0603	19
Kondenzátor	C14, C26	1 $\mu$ F, 16 V	0603	2
Kondenzátor	C16	470 pF, 16 V	0603	1
Kondenzátor	C17, C18	22 pF, 10 V	0603	2
Kondenzátor	C22, C24	4,7 $\mu$ F, 10 V	0603	2
Kondenzátor	C25	10 nF, 10 V	0603	1
Kondenzátor	C42	4,7 nF, 10 V	0603	1
Schottky Diode	D1	PMEG4010EJ	SOD-323F	1
Schottky Diode	D2	PMEG6030EP115	SOD-128-2	1
TVS Diode	D3	SMBJ30A-E3/52	DO-214AA-2	1

WE-TVS-High Speed Diode	D5	824013	SOT23-6L	1
CAN Bus Protector	D6, D7	SZNUP2105LT1G	SOT-23	2
SMD pojistka 3 A	F2	504-CC12H3A-TR	1206	1
SMD pojistka 20 A	F4	3413.0331.22	1206	1
Analogový Spínač	IC1	SN74LVC1G3157-DCKR	SC70-6	1
Operační Zesilovač	IC2	NCS325SN2T1G	TSOP-5	1
Napěťová reference 3V	IC3	MAX6129AEUK30	SOT-23-5	1
D-type Flip Flop	IC4	SN74AUP1G79-DBVR	SOT-23-5	1
D-SUB 7W2 R/A	J1	684S7w2103L461	D-SUB 7W2	1
JST-XH 7-pin	J2	B7B-XH-A(LF)(SN)	JST-XH 7-pin	1
XT60	J3	XT60	XT60PCB	1
JST-XH 5-pin	J4	B5B-XH-A(LF)(SN)	JST-XH 5-pin	1
Pin Header 5-pin	J5	61300511121	5-pin, 2,54 mm	1
LED Green	LED1, LED2, LED3, LED4	LTST-C190GKT	0603	4
P-type MOSFET	Q1, T3, T5	BSS84	SOT-23m	1
P-type MOSFET	Q2	DMPH6250SQ-7	SOT-23-3	1
P-type MOSFET	Q3	CPH3351-TL-H	SOT-23-3	1
NPN BJT	Q4	BC850CLT1G	SOT-23-3	1
N-type MOSFET	Q5	DMN6140L-7	SOT-23-3	1
N-type MOSFET	T2, T4	DMN6140L-7	Power PACK SO-8	2
Rezistor	R1	100 $\Omega$ , 0,33 W	0603	1
Rezistor	R2	200 k $\Omega$	0603	1
Rezistor	R3, R4, R6, R7, R8, R9, R10	100 $\Omega$ , 0,4 W	0805	7
Rezistor	R5, R48	10 $\Omega$ , 0,5 W	1206	2
Rezistor	R11, R18, R30, R46, R47, R49	1 M $\Omega$	0603	6
Rezistor	R12, R35, R36, R37, R38	0 $\Omega$	0603	5

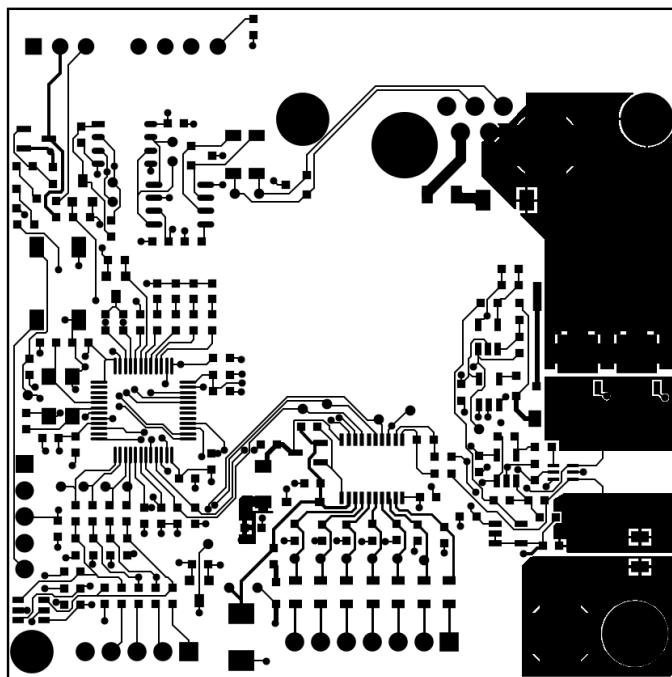


Rezistor	R13, R14, R31, R32, R33, R34, R53, R54, R55, R56	1 k $\Omega$	0603	10
Rezistor	R15	1 m $\Omega$ , 1 W	2512	1
Rezistor	R16, R17, R45	3 k $\Omega$	0603	3
Rezistor	R19	448 k $\Omega$	0603	1
Rezistor	R20	569 k $\Omega$	0603	1
Rezistor	R21, R40, R41	100 k $\Omega$	0603	3
Rezistor	R22, R23	3,3 k $\Omega$	0603	2
Rezistor	R24, R25, R26, R27, R28, R29, R39, R44, R52	10 k $\Omega$	0603	9
Rezistor	R42	26,7 k $\Omega$	0603	1
Rezistor	R43	1 k $\Omega$ , 1 W	2010	1
Rezistor	R50	35 k $\Omega$	0603	1
Rezistor	R51	287 k $\Omega$	0603	1
Spínač	S1	430471025826		1
BMS	U1	BQ76925	TSSOP-20	1
MCU	U2	STM32F042C6T6	LQFP-48	1
MagI <sup>3</sup> C-VISM	U3	17791063215	SIP-8	1
CAN Transceiver	U4	TJA1040T/CM,118	SOT-96	1
Data Isolator	U5	SI8621AB-B-ISR	SOIC-8	1
Comparator	U7	MCP6541RT-E/OT	SOT23-5	1
Crystal 8 MHz	Y1	830055663	CFPX-104	1
Zener Diode	ZD1	BZT52C30-7-F	SOD-123	1

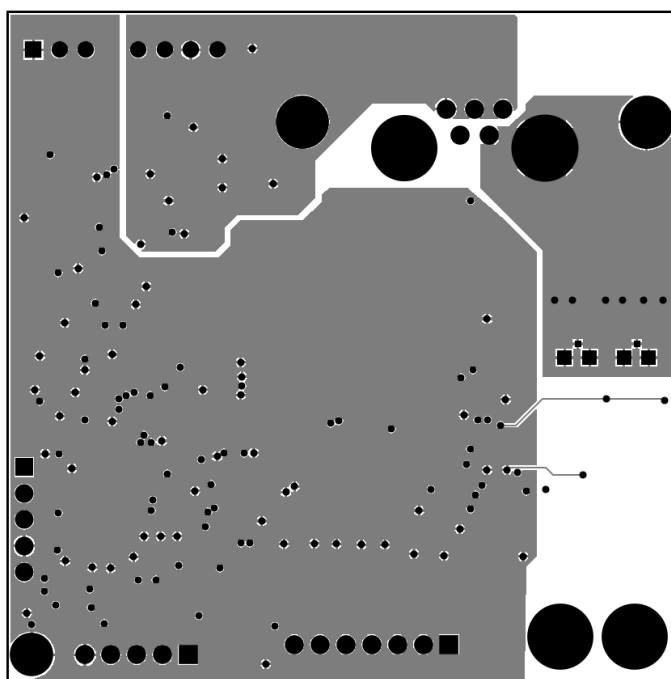
## B Výkresy jednotlivých vrstev DPS



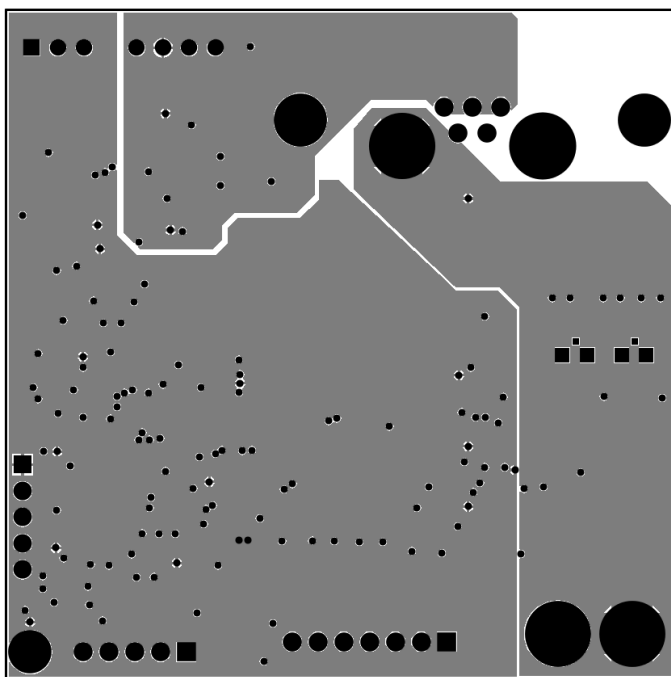
Obrázek 4.1: Potisk přední vrstvy DPS jednotky LVB



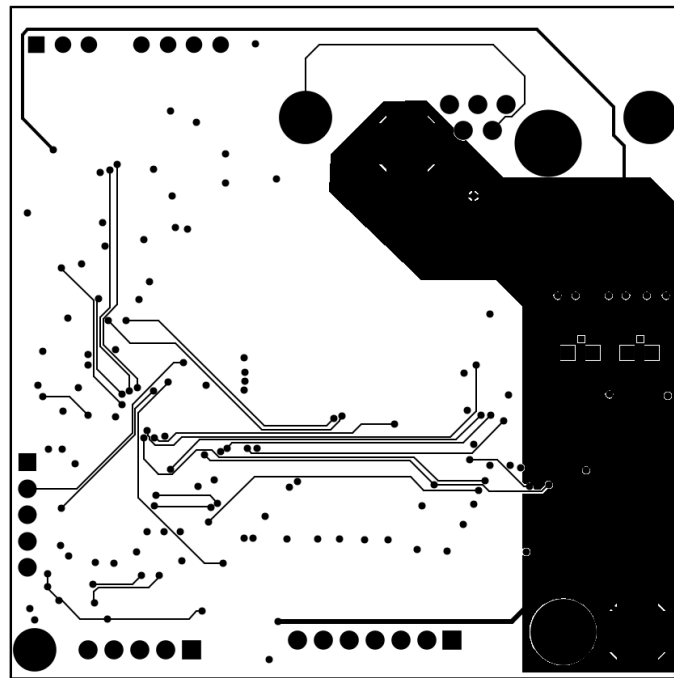
Obrázek 4.2: Motiv spojů přední vrstvy DPS jednotky LVB



Obrázek 4.3: Motiv vrstvy země DPS jednotky LVB



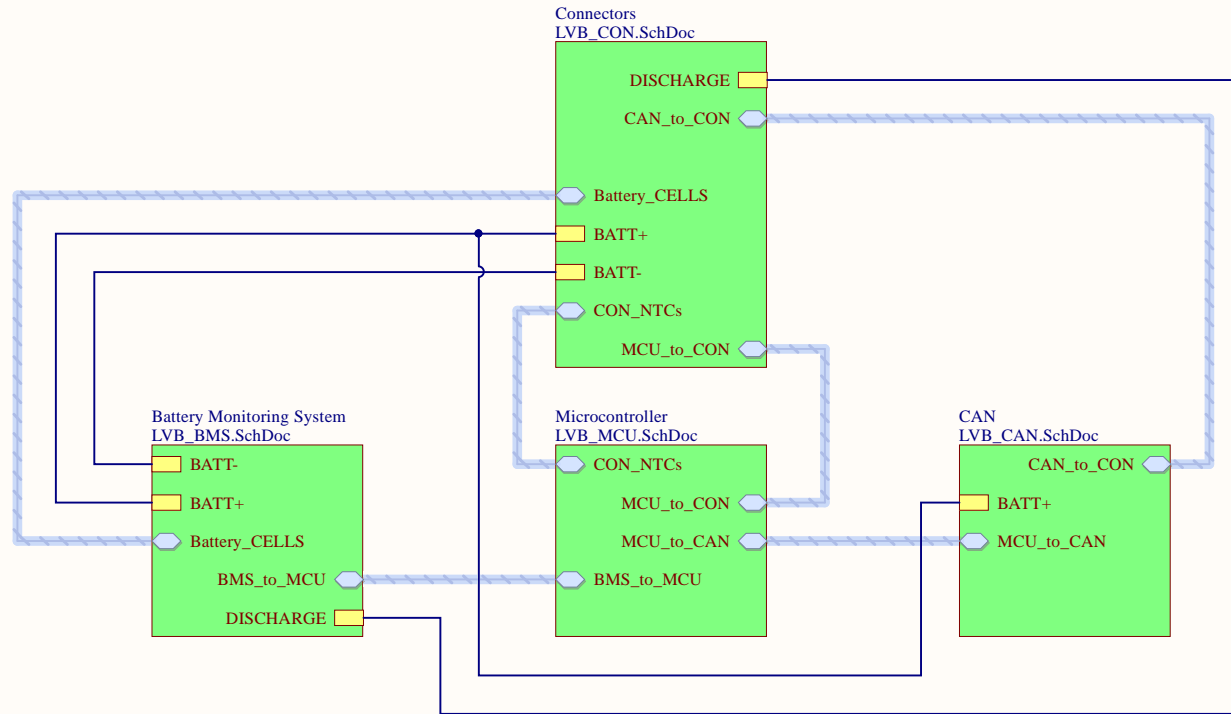
Obrázek 4.4: Motiv vrstvy napájení DPS jednotky LVB



Obrázek 4.5: Motiv spojů spodní vrstvy DPS jednotky LVB

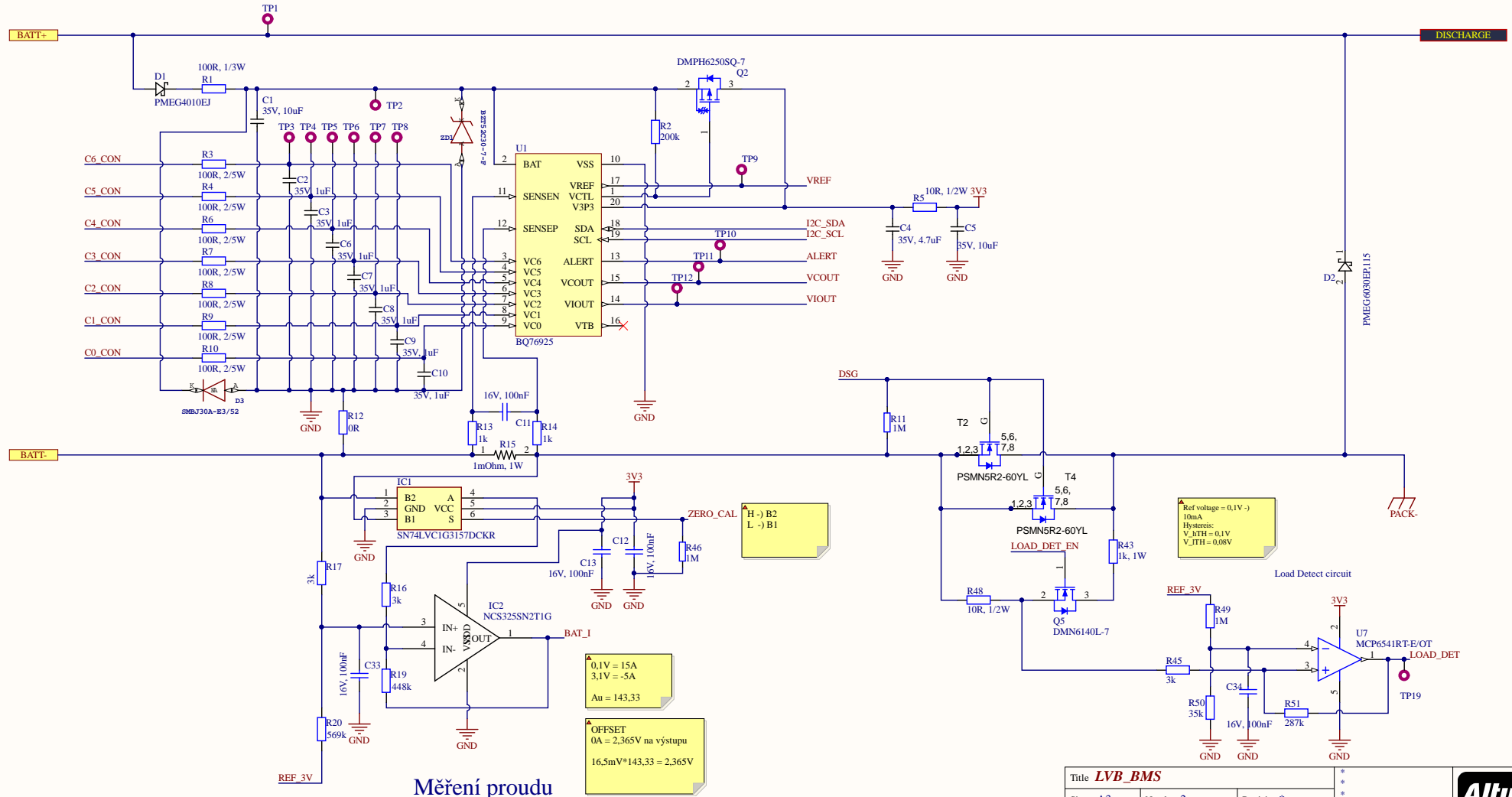
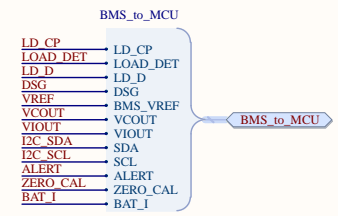
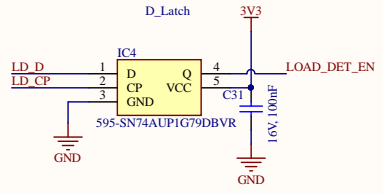
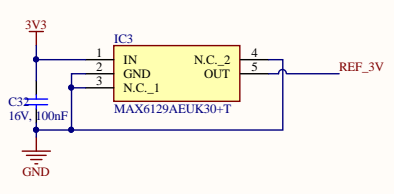
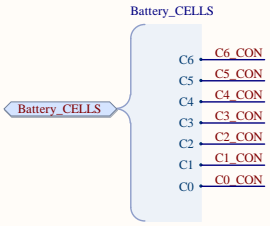
## ■ C Schéma LVB

# Low Voltage Battery Management



Title <b>Blocks</b>			*
Size: A4	Number:1	Revision:*	*
Date: 13.5.2020	Time: 2:10:17	Sheet 1 of 5	*
File: C:\Users\Tom\Documents\Altium eForce\LVB_v0.1\Blocks.SchDoc			*



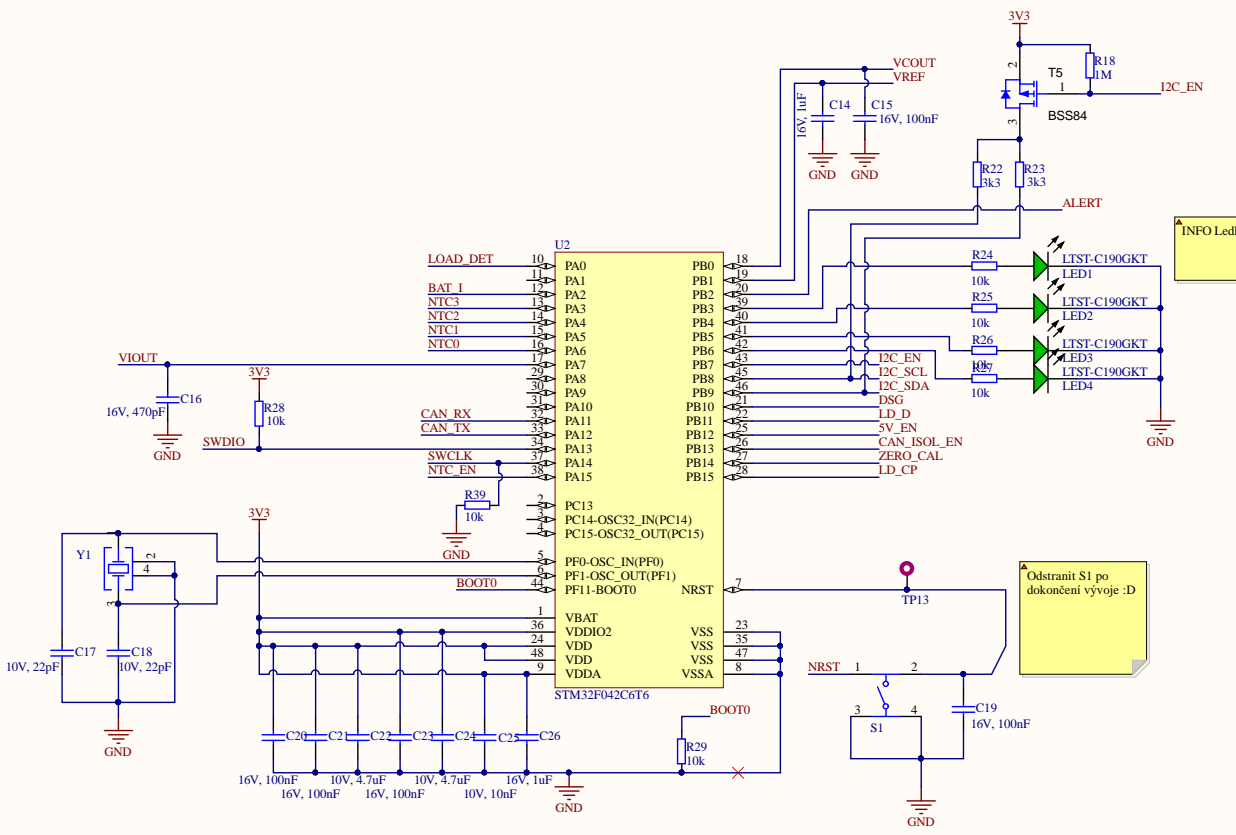
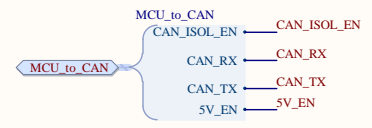
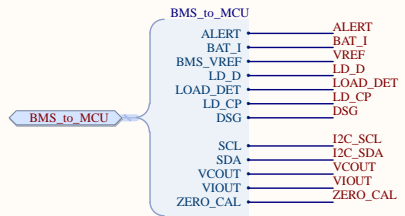


Měření proudu

0,1V = 15A  
3,1V = -5A  
Au = 143,33

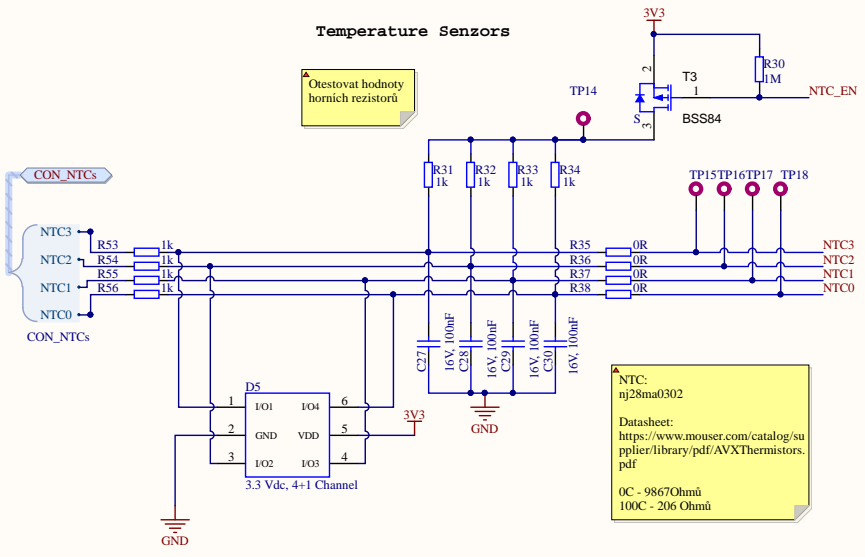
OFFSET  
0A = 2,365V na výstupu  
16,5mV\*143,33 = 2,365V

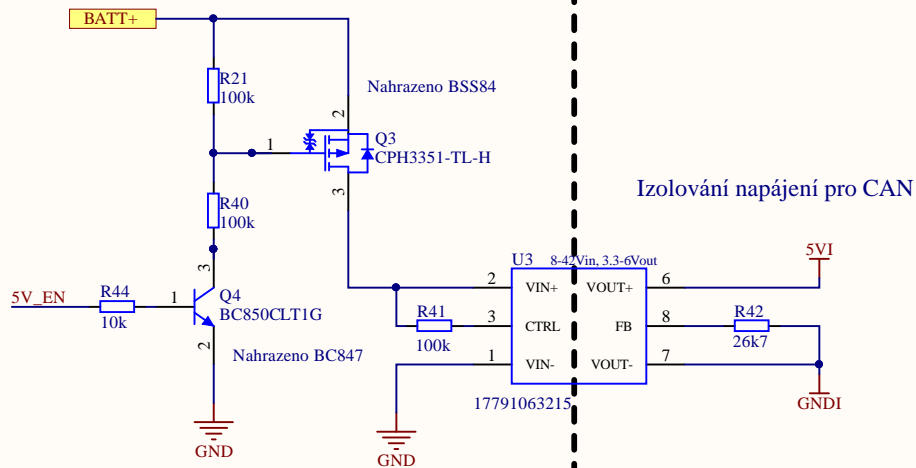
Ref voltage = 0,1V -  
10mA  
Hysteresis = 0,1V  
V\_I,TH = 0,08V



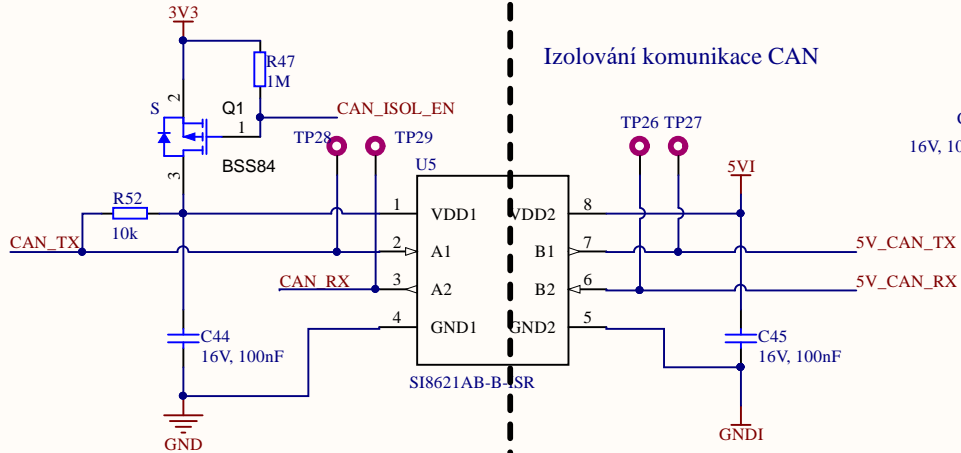
**Temperature Sensors**

Otestovat hodnoty horních rezistorů

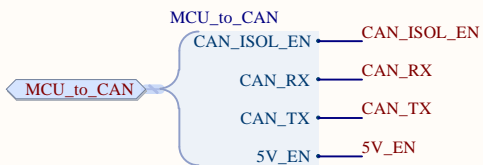
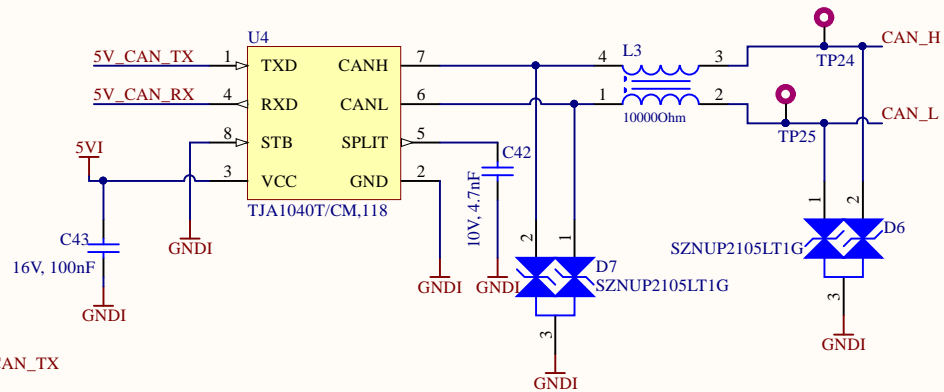
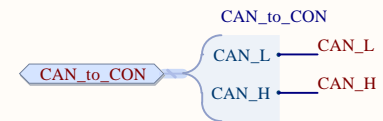




Izolování napájení pro CAN



Izolování komunikace CAN

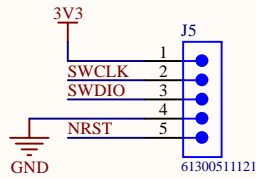


Title <b>LVB_CAN</b>		
Size: A4	Number: 4	Revision: *
Date: 13.5.2020	Time: 2:10:17	Sheet 4 of 5
File: C:\Users\Tom\Documents\Altium eForce\LVB_v0.1\LVB_CAN.SchDoc		

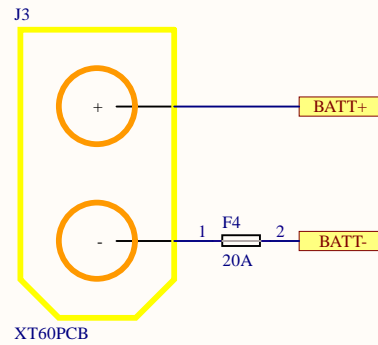




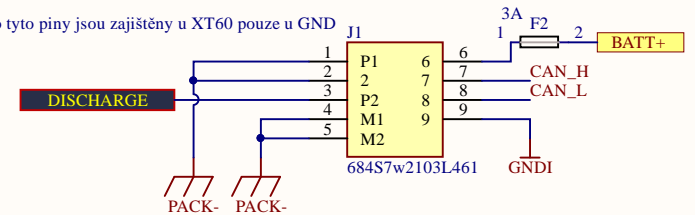
Programovací konektor



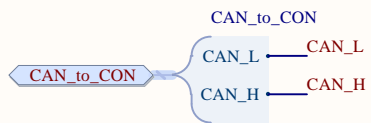
Main Battery Power Conn



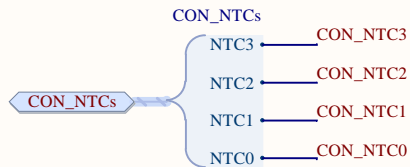
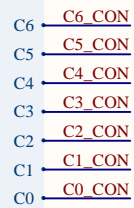
Pojistky pro tyto piny jsou zajištěny u XT60 pouze u GND



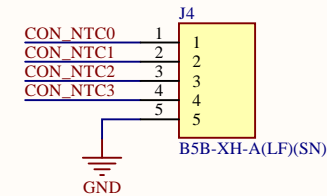
6 = Reserved for Charge



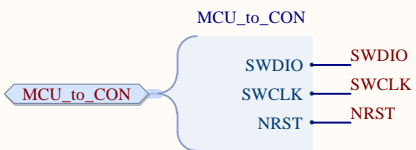
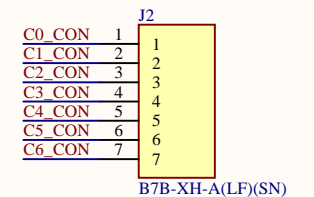
Battery\_CELLS



Battery NTCs conn



Battery balancing conn



Title **LVB\_CON**

Size: A4

Number:5

Revision:\*

Date: 13.5.2020

Time: 2:10:18

Sheet5 of 5

File: C:\Users\Tom\Documents\Altium eForce\LVB\_v0.1\LVB\_CON.SchDoc

