



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## BATERIOVÝ MONITOROVACÍ SYSTÉM PRO FORMULI STUDENT

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR FORMULA STUDENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Maroš Macko

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2021



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Maroš Macko

**ID:** 211233

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Bateriový monitorovací systém pro Formuli Student

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

V rámci bakalářské práce navrhnete a realizujete distribuovanou správu bateriového systému pro studentskou elektrickou formuli VUT. Systém navrhnete tak, aby umožňoval monitorování napětí a teploty jednotlivých článků baterie a komunikaci s nadřazenou měřicí jednotkou. Tato jednotka bude dále vyhodnocovat signály z dalších bezpečnostních obvodů a musí umět odstavit přívod elektrické energie z baterie. S řídicím systémem formule (není součástí této práce) bude měřicí jednotka komunikovat pomocí sběrnice CAN.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 3.6.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto práca sa zaoberá správou batérie pre monopost Formula Student. Súčasť práce je návrh a implementácia tohoto monitorovacieho systému. Systém používa distribuovanú topológiu, je rozdelený na riadiaci subsystém a podradené. Je popísaný návrh riadiaceho subsystému a výber vhodných súčiastok. Ďalej sú navrhnuté podradené subsystémy, kde sa opisuje princíp merania jednotlivých napätí článkov a teploty. Je tiež implementovaný firmvér, ktorý komunikuje so zvyškom auta. Systémy sú otestované a spĺňajú pravidlá súťaže Formula Student.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

Monitorovací systém batérie, BMS, AMS, Li-ion, Formula Student, TU Brno Racing, Dragon e1

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on battery management for Formula Student monopost. Part of the work is the design and implementation of this monitoring system. The system uses a distributed topology, is divided into the main subsystem and subordinate subsystems. The main subsystem and the selection of suitable components are described. Furthermore, subordinate subsystems are designed, and the fundamentals of battery voltage and temperature measurement are explained. Control firmware is implemented and it is able to communicate with the rest of the car. All systems were tested and they comply with the rules of the Formula Student competition.

## **KEYWORDS**

Battery Management System, BMS, AMS, Li-ion, Formula Student, TU Brno Racing, Dragon e1

---

MACKO, Maroš. *Batériový monitorovací systém pre Formula Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2021, 86 s. Semestrální práce. Vedúci práce: doc. Ing. Pavel Štefan, Ph.D.

## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Maroš Macko  
**VUT ID autora:** 211233  
**Typ práce:** Semestrálna práca  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma záverečnej práce:** Batériový monitorovací systém pre Formula Student

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/ceho záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúceho autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi doc. Ing. Pavlovi Šteffanovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie a podnetné návrhy k práci. Tiež by som sa chcel poďakovať tímu TU Brno Racing a jeho sponzorom za finančnú podporu a členom sekcie Electric Powertrain za konzultácie a pomoc, bez ktorých by táto práca nevznikla. V neposlednom rade ďakujem bratovi Martinovi za pomoc pri renderovaní umeleckých náhľadov DPS.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Návrh systému</b>	<b>11</b>
1.1 Výber článkov a konfigurácia batérie . . . . .	11
1.2 Topológia batériového systému . . . . .	14
1.3 Popis funkcie subsystému Master . . . . .	16
1.4 Výber komponentov a návrh dosky Master . . . . .	18
1.5 Popis funkcie subsystému Slave . . . . .	21
1.6 Výber komponentov a návrh subsystému Slave . . . . .	22
1.7 Popis funkcie subsystému Hat . . . . .	29
1.8 Výber komponentov a návrh dosky Hat . . . . .	32
<b>2 Implementácia systému</b>	<b>35</b>
2.1 Testovanie segmentu a systému Slave . . . . .	35
2.2 Testovanie článkov a skladanie batérie . . . . .	41
2.3 Firmware pre systém BMS . . . . .	47
2.4 Cena systému BMS . . . . .	49
2.5 Plány na zlepšenie systému pre Dragon e2 . . . . .	50
<b>Záver</b>	<b>52</b>
<b>Literatúra</b>	<b>53</b>
<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>56</b>
<b>Zoznam príloh</b>	<b>58</b>
<b>A Schéma systému Master</b>	<b>59</b>
<b>B Schéma systému Slave</b>	<b>65</b>
<b>C Schéma systému Hat</b>	<b>70</b>
<b>D Návrh DPS Slave</b>	<b>74</b>
<b>E Návrh DPS Master</b>	<b>77</b>
<b>F Návrh DPS Hat</b>	<b>80</b>
<b>G Pravidlá BMS pre Formula Student</b>	<b>83</b>

# Zoznam obrázkov

1	Tím TU Brno Racing počas sezóny 2018/2019 . . . . .	10
1.1	Porovnanie chémie rôznych batériových článkov, upravené [1] . . . . .	11
1.2	Porovnanie Sony VTC6 a VTC5A pri 10 a 30 a vybíjaní, upravené [2] . . . . .	13
1.3	Blokový diagram BMS . . . . .	15
1.4	Prúdový senzor LEM HTFS-200P . . . . .	17
1.5	Simulácia detekovania resetovacieho tlačidla v programe MicroCap . . . . .	19
1.6	Návrh DPS Master . . . . .	21
1.7	Pasívne balansovanie článkov a meranie napätia . . . . .	22
1.8	Bloková schéma funkcie Delta-Sigma prevodníka . . . . .	23
1.9	Závislosť potrebného rozlíšenia A/D prevodníka na teplote pre detekciu zmeny o 0.1 °C . . . . .	27
1.10	Izolácia CANbus pomocou integrovaného obvodu ISO1050, upravené [3] . . . . .	28
1.11	Návrh DPS Slave . . . . .	29
1.12	SCS výstup systému Hat . . . . .	31
1.13	Návrh DPS BMS Hat . . . . .	33
2.1	Šablóna a osadzovanie DPS Slave do pasty . . . . .	35
2.2	Výkonový odpor na testovanie segmentu . . . . .	36
2.3	Grafické užívateľské rozhranie Dragon GUI počas testu systému BMS . . . . .	37
2.4	Kontrolné meranie počas testovania segmentu . . . . .	38
2.5	Systém BMS Slave upevnený na batériovom segmente . . . . .	38
2.6	Časový priebeh napätia na článkoch počas zaťažovania segmentu . . . . .	39
2.7	Časový priebeh teploty na článkoch počas zaťažovania segmentu . . . . .	40
2.8	Snímka termokamerou počas zaťažovania segmentu . . . . .	41
2.9	Testovacie pracovisko na meranie článkov . . . . .	42
2.10	Histogram výsledkov merania vnútorného odporu článkov . . . . .	43
2.11	Histogram výsledkov merania kapacity článkov . . . . .	44
2.12	Bodový graf korelácie vnútorného odporu a kapacity testovaných článkov . . . . .	45
2.13	Simulácia kapacity batérie Monte Carlo pri náhodnej konfigurácii článkov . . . . .	46
2.14	Detail prostredia STMCubeMX pri úprave BMS Master konfigurácie . . . . .	48



# Zoznam tabuliek

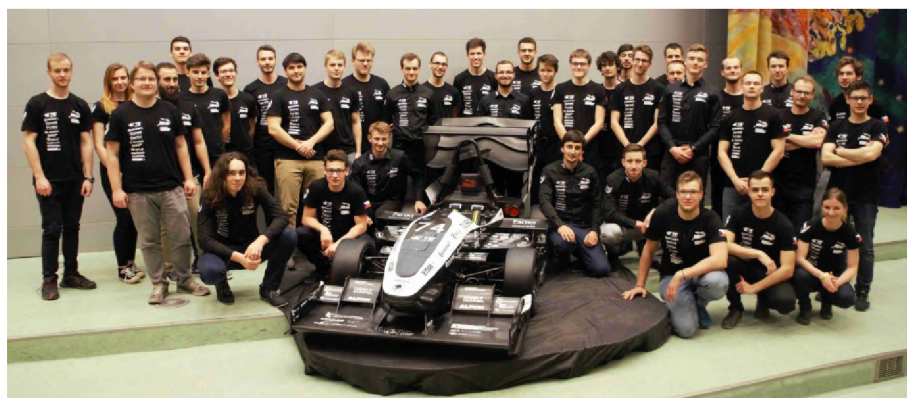
1.1	Porovnanie článkov (Ceny 11/2020, 18650battery.com) . . . . .	12
1.2	Porovnanie dostupných integrovaných obvodov na správu článkov . . .	24
1.3	Porovnanie možných zapojení 24 teplotných čidiel (Ceny 12/2020 Mouser.com) . . . . .	25
1.4	Porovnanie A/D prevodníkov (Ceny 12/2020 Mouser.com) . . . . .	26
1.5	Určenie žiadaných stavov pre logiku IMD . . . . .	32
2.1	Súhrn cien jednotlivých subsystémov . . . . .	50
G.2	Vyžadovaná vzdialenosť medzi TS a LVS . . . . .	84

# Úvod

Batériový monitorovací systém, alebo v skratke BMS (angl. Battery Management System - batériový monitorovací systém), je dôležitou súčasťou jednočlánkových batérií a úplnou nevyhnutnosťou viacčlánkových batérií. Táto práca sa zaoberá vývojom monitorovacieho a riadiaceho systému pre účely závodenia elektrickej formuly univerzitného tímu Formula Student TU Brno Racing. Systém bude viesť monitorovať napätia jednotlivých článkov a ich teplotu. So zvyškom auta bude komunikovať po zbernici CANbus. Ak sú všetky systémy v poriadku, spína výstup z batérie pomocou relé, ktoré v prípade núdze vie vypnúť a úplne tým odstaviť výstup z batérie. Musí tiež spĺňať všetky technické a bezpečnostné požiadavky Formula Student, aby prešlo technickou kontrolou na súťažiach.

Formula Student (FS) je študentská súťaž, v ktorej je cieľom postaviť jednmiestne závodné auto, ktoré je schopné závodit' s ďalšími tímami po celom svete. Vznikla ako európska verzia americkej súťaže Formula SAE, ktorá funguje od roku 1981 a do Európy prišla v roku 1998. Súťaž nie je len o postavení čo najrýchlejšieho auta, ale takisto o obhájení celkového konceptu, cieľov a finančného plánovania. Tímy sú posudzované profesionálmi, dodávateľmi a výrobcami z oblasti automobilového priemyslu a motor-športu. [4]

TU Brno Racing funguje ako Formula Student už od roku 2010 pod záštitou Fakulty strojného inžinierstva VUT a každý rok od svojho vzniku postaví nový monopost pre túto súťaž. Tím patrí medzi svetové špičky, v sezóne 2018/2019 sa umiestnil v svetovom rebríčku na 9. mieste. Začal a stále pokračuje vo vývoji auta so spaľovacím motorom, no posledný rok (2019/2020) začal aj s vývojom formuly na elektrický pohon. [5]



Obr. 1: Tím TU Brno Racing počas sezóny 2018/2019

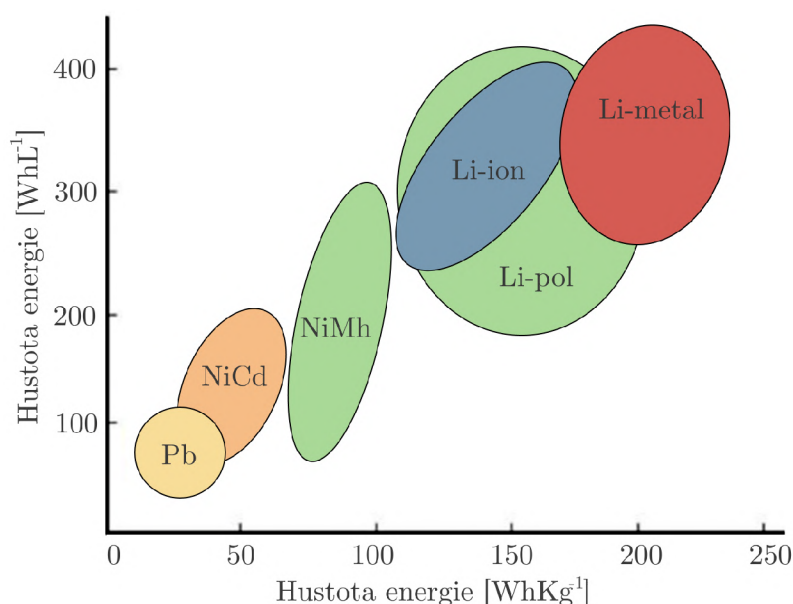
Formuly TU Brno Racing na spaľovací pohon nesú názvy Dragon 1 až 10 (D1 až DX) a prvý „Dragon“ na elektrický pohon nesie názov eD1 (resp. Dragon e1).

# 1 Návrh systému

Pre potreby elektrickej formuly musí byť batéria čo najmenšia a najľahšia. Jej veľkosť určuje tvar a šírku celkového rámu a nadmerná veľkosť by ovplyvňovala aerodynamické vlastnosti. Takisto sa podľa pravidiel musí batéria nabíjať mimo auta a teda musí byť navrhnutá na jednoduché vyberanie.

## 1.1 Výber článkov a konfigurácia batérie

Hmotnosť je ďalšia dôležitá vlastnosť závodného auta, pretože aj stovky gramov vedia ušetriť potrebné zlomky sekúnd počas závodu. Pre tieto dôvody ani nemá zmysel pozeráť sa (v súčasnej dobe) na iné batériové technológie, ako tie na báze lítia (obr. 1.1).



Obr. 1.1: Porovnanie chémie rôznych batériových článkov, upravené [1]

Lítiové batérie sú dostupné v rôznych tvaroch a prevedeniach. Na výber je štandardizovaná cylindrická batéria formátu 18650 (18 mm priemer, 650 mm výška), alebo vlastné veľkosti prizmatických článkov podľa výrobcu. Tie sú ďalej rozdelené na mäkké články, vreckové (angl. pouch) články a na články s tvrdým obalom (angl. hard case). Ak by sme mohli bez ohľadu na cenu a dostupnosť vybrať typ článkov, určite by to boli prizmatické články, pre svoj omnoho menší interný odpor (a s tým spojené menšie straty v batériách, čím odpadá nutnosť dodatočného chladenia) a jednoduchšiu zástavbu a management (menej teplotných senzorov, menej obvodov na balansovanie sériovo zapojených článkov počas

nabíjania). Avšak z hľadiska ceny a všeobecnej dostupnosti (a tiež možnosti dostať ich od sponzora) boli zvolené štandardné články typu 18650, aspoň na prvú elektrickú formulu - eD1.

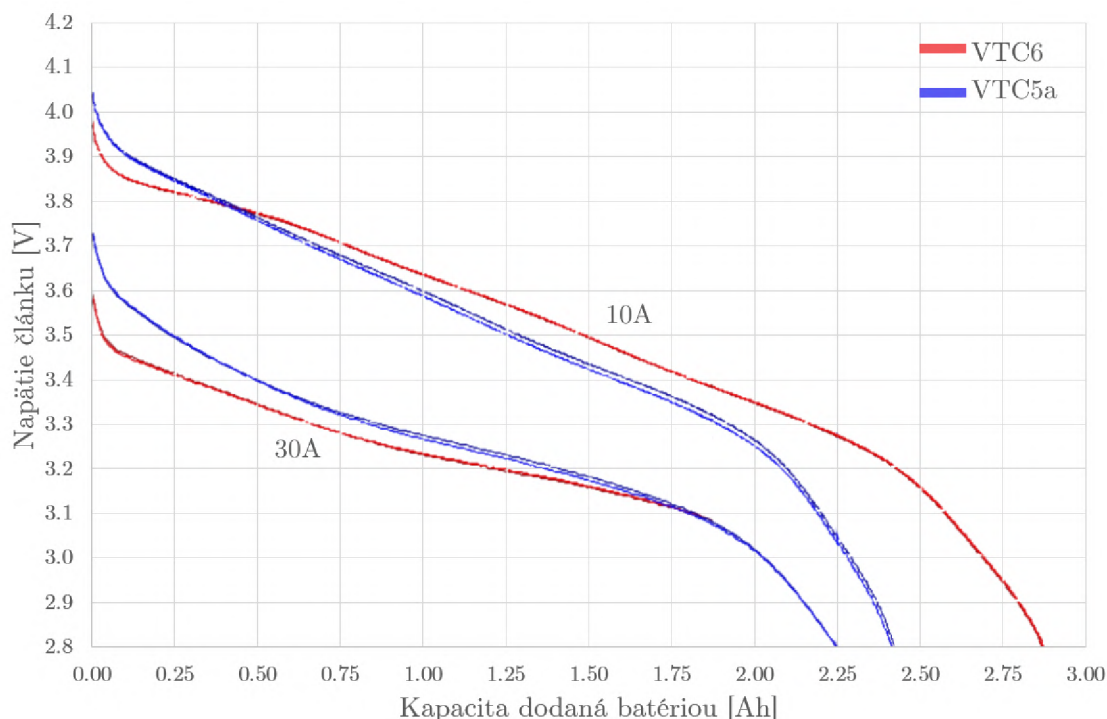
Výber konkrétneho modelu článku bol iteratívny proces, ktorý zahŕňal zmenu konfigurácie článkov a segmentov (berúc do úvahy pravidlá, kde bola limitujúca maximálna energia segmentu). Nakoniec boli vybrané články vyrábané spoločnosťou SONY / Murata, model VTC6. Ich nominálna kapacita je 3120 mAh a počiatočný vnútorný odpor sa pohybuje okolo 8 až 18 mΩ [6]. Na rozdiel od iných modelov ako VTC5 a VTC5A má síce menší trvalý prúd, podľa testovania sa viac zahrieva, ale takisto má väčšiu kapacitu. Podľa testov portálu lygte-info sa napriek tomu batéria VTC6 dá pulzne používať na 40 A > 44 s, 55 A > 19 s a 80 A > 6 s (testované do vypínacej teploty 80 °C, ale podľa pravidiel nesmieme presiahnuť bezpečnejšiu hranicu 60 °C). Na vývoj prototypového auta je teda maximálny prúd dostačujúci a môžeme s formulou jazdiť a testovať dlhšie, ako keby sme používali vysokoprúdové články. V tabuľke 1.1 sú porovnané ďalšie dostupné články podobné použitej VTC6.

Tab. 1.1: Porovnanie článkov (Ceny 11/2020, 18650battery.com)

Názov	VTC6	VTC5A	INR18650-25R	NCR18650GA
Kapacita	3000 mAh	2600 mAh	2500 mAh	3300 mAh
Max. trvalý prúd	<20 a	>30 a	<20 a	10 a
Vnútorný odpor	13 mΩ	13 mΩ	13 mΩ	38 mΩ
Cena	8 \$	7 \$	4 \$	5 \$

Ako vidno na obrázku 1.2, článok VTC6 má síce papierovo rovnaký odpor ako VTC5, avšak daný maximálny prúd má vplyv na vybíjaciú krivku. Z grafu vieme usúdiť, že odpor a teplota článkov VTC6 je viac závislá na prúde, ako pri článkoch VTC5A. Pri vybíjacom prúde 10 A vidíme, že VTC6 má väčšiu využitú kapacitu o 400 mAh, avšak pri prúde 30 A sa ani nedostane na koniec testu. Usporiadanie batériového boxu bude vo vnútri na tesno, aby bol čo najmenší a zmestil sa do rámu auta a zároveň musí byť aj vodeodolný počas skúšky „rain test“ (skúška dažďom) na súťažiach. Preto bude náročné chladiť tieto batérie bez pomoci a budú potrebné ventilátory ovládané batériovým systémom.

Výberom typu článku SONY VTC6 vieme určiť ďalšiu konfiguráciu batérie - koľko článkov bude v segmente. Toto nám limituje pravidlo EV 5.3.2. Maximálnu povolenú váhu 12 kg (nerátajúc ostatné súčasti segmentu) by sme prekročili použitím vyše 240 kusov článkov. Limitáciu maximálnej energie segmentu musíme dopočítať. Model VTC6 má maximálne napätie 4.2 V a kapacitu 3000 mAh.



Obr. 1.2: Porovnanie Sony VTC6 a VTC5A pri 10 a 30 a vybíjaní, upravené [2]

$$E[\text{MJ}] (= [\text{MW} \cdot \text{s}]) = n * C[\text{A} \cdot \text{h}] * U_{\text{max}}[\text{V}] * 3600[\text{s}] * 10^{-6} \quad (1.1)$$

$$n = \frac{E[\text{MJ}]}{C[\text{A} \cdot \text{h}] * U_{\text{max}}[\text{V}] * 3600[\text{s}] * 10^{-6}} \quad (1.2)$$

$$n = \frac{6}{3 * 4.2 * 3600 * 10^{-6}}$$

$$n = 132$$

Každý segment teda môže mať maximálne 132 článkov. Zvyšok obvodu trakčného systému (TS - Trakčný Systém, vid. príloha s pravidlami) je dimenzovaný na maximálne pracovné napätie 450 V DC. Samotné spínacie prvky IGBT v meniči (IXYS IXXN110N65B4H1 [7]) vydržia napätie až 650 V, musíme si však nechať dostatočnú napäťovú rezervu pre prechodné javy. Tiež chceme zmenšiť opotrebovanie a únavu týchto prvkov. Dosiahnutím nominálneho napätia 450 V, čo je pre nás ideálny prípad (väčšie napätie batérie = kvadraticky menšie straty), maximálny prúd z batérie by bol podľa limitácií pravidiel

$$\frac{80000[\text{W}]}{450[\text{V}]} \approx 178[\text{A}].$$

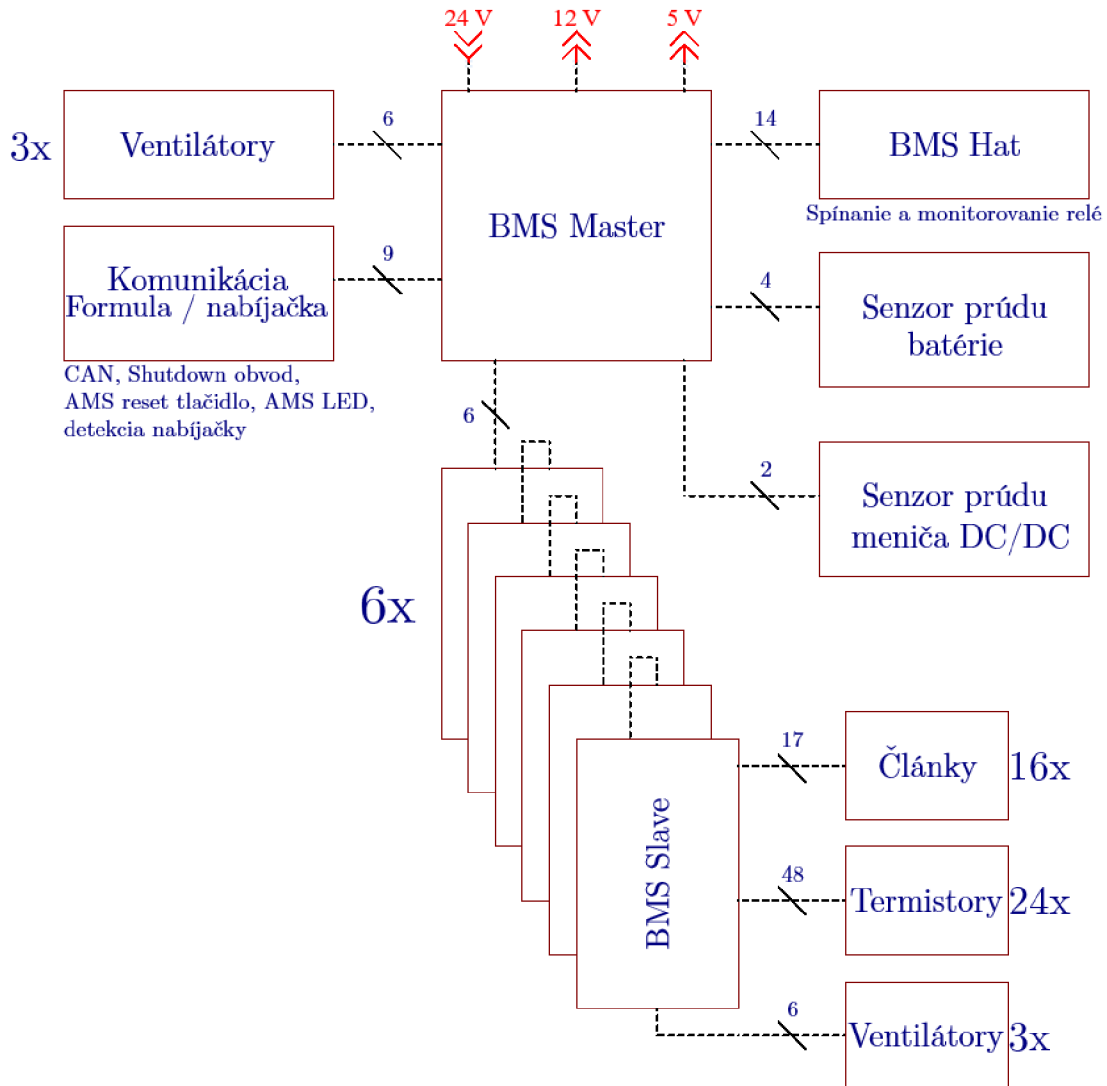
To je matematicky necelých 9 batérií v paralelnom zapojení, ak by sme tento prúd chceli udržiavať kontinuálne. Maximálny počet 132 ( $2^2 \cdot 3 \cdot 11$ ) článkov môžeme použiť v konfigurácii 4P, 6P alebo 11P, čo nie je veľmi optimálne. 131 je prvočíslo, 130 ( $2 \cdot 5 \cdot 13$ ) a 129 ( $3 \cdot 43$ ) takisto nie sú optimálne paralelné kombinácie. 128 ( $2^7$ ) vieme zapojiť v konfigurácii 16S8P na každý segment, čo nám neumožní zatažovať formulu permanentne na plný výkon a budeme viac limitovaní teplotou, ale priblížime sa najväčšej možnej kapacite segmentu. Takto môžeme poskladať do auta maximálne 6 segmentov do série, orientované pozdĺžne - kladným, resp. záporným pólom k nosu auta a dosiahnuť maximálne napätie TS Akumulátora  $16 \cdot 6 \cdot 4.2 \text{ V} = 403.2 \text{ V}$ . To vyhovuje aj tvaru formuly, keďže viac paralelných segmentov by nadmerne rozšírilo rám a zhoršilo by ďalšie jazdné vlastnosti.

Inou alternatívou by bolo urobiť mnoho menších segmentov a poukladať ich priečne - pólmi segmentov na boky auta. Pravdepodobne by sme vedeli optimalizovať napätie bližšie maximálnym možným 450 V, väčší počet segmentov by však priniesol viac problémov ako osuhu, hlavne pre prvý koncept elektrickej formuly. Okrem nutnosti vzájomne izolovať viac segmentov (ďalšia hmotnosť a stratený objem) a monitorovať každý segment svojím BMS by bol problém s elektrickým spájaním segmentov. Veľké vodiče alebo bus-bary by sa na každom segmente nachádzali na kraji batérie a muselo by sa pre ne uvoľniť hluché miesto a zbytočne rozširovať celý TS kontajner. Zvolená konfigurácia šiestich segmentov v konfigurácii 16S8P (celkovo teda 96S8P) je kompromisom mechanických a elektrických požiadavok.

## 1.2 Topológia batérového systému

Výber topológie BMS priamo ovplyvňuje cenu, spoľahlivosť, jednoduchosť inštalácie, údržbu a presnosť merania akumulátora. Vzťah medzi monitorovacím a ovládacím systémom nám rozdeľuje topológiu BMS na centralizovanú alebo distribuovanú. V centralizovanej topológii je monitorovacia aj ovládací časť BMS na jednej doske plošných spojov (DPS). Oproti tomu distribuovaný BMS má riadiacu časť (zodpovednú za bezpečnosť, spínanie výstupu, ovládanie nabíjania a vybíjania či komunikáciu s hlavnou riadiacou jednotkou auta) oddelenú od monitorovacej časti, ktorá je distribuovaná v segmentoch a je zodpovedná za meranie napätí článkov a ich teplotu. [8] Centralizovaná topológia je vhodná na použitie v malých akumulátoroch s nízkym počtom článkov, kde sa celá batéria neskladá z viacerých segmentov a takto vieme ušetriť na celkovej cene. Na druhej strane, ak batériu zväčšujeme, väčší zmysel začne mať distribuovaný systém, kde s časťami batérie komunikuje hlavná BMS jednotka a týmto redukuje množstvo a dĺžku kabeláže k jednotlivým článkom. Takisto vieme lepšie kontrolovať

a lokalizovať možné chyby počas prevádzky. Blokový diagram BMS je znázornený na obr. 1.3.



Obr. 1.3: Blokový diagram BMS

Keďže nám pravidlá priamo určujú nutnosť segmentácie batérie, nemá zmysel prakticky uvažovať o centralizovanom systéme. Distribuovaný BMS systém rozdelíme na hlavnú jednotku (ďalej BMS Master, slov. pán) a podriadené jednotky (ďalej BMS Slave, slov. sluha). Každý segment bude mať svoju DPS na meranie napätí, teploty a hlavnému systému podradené ovládanie nabíjania. Pre obsluhu ďalších systémov v batérii (ako je napríklad IMD - Insulation Monitoring Device - zariadenie monitorujúce elektrickú izoláciu) a pre meranie vysokého napätia TS bude na DPS Master umiestnená pomocná analógová doska Hat.

Ako komunikačný protokol bola zvolená zbernica CANbus (Controller Area Network), ktorý sa používa aj na komunikáciu so zvyškom auta. Táto zbernica má

veľa výhod, vrátane automatického predchádzania kolízií a prioritizácie správ. Pre kompatibilitu bol zvolený štandard 2.0B s maximálnou rýchlosťou 1 Mbit/s, oproti novšiemu štandardu CAN FD (Flexible Data Rate). Ten ponúka vyššie prenosové rýchlosti (do 5 Mbit/s) a flexibilnú dĺžku jednotlivých paketov.[9] To znamená menšiu réžiu pri posielaní dlhých správ (ktoré musia byť v štandarde CAN 2.0B rozdelené na viacero paketov so svojou hlavičkou, kontrolným CRC súčtom atď). Je ale zatiaľ menej zaužívaný a má horšiu hardvérovú a softvérovú podporu. Batéria bude mať svoj vlastný izolovaný CANbus okruh medzi jednotkami Master a Slave.

V tíme TU Brno Racing sú zaužívané 32-bitové mikrokontroléry od firmy STMicroelectronics (skrátene ST alebo STM), hlavne z rady STM32F1 a STM32F4. Fungujú na architektúre ARM, konkrétne Cortex-M3 (STM32F1), respektíve Cortex-M4 (STM32F4). Poskytujú širokú škálu periférií, ktoré je možné podľa potreby presúvať medzi viacerými vývodmi na puzdre. Majú zabudovanú hardvérovú podporu pre protokol CAN (1x pri F1 a 3x pri F4). K tomu poskytujú viackanálové 12-bitové A/D (Analog - Digitál (prevodník)) a D/A (Digitál - Analog (prevodník)) prevodníky, komplexný systém vnorených prerušovaní, niekoľko rozhraní USART, I<sup>2</sup>C, SPI spolu s veľkým množstvom 16 aj 32-bitových čítačov. Pracovnú frekvenciu majú maximálne na 64 (F1) až 100 (F4) MHz, pričom je samozrejmosťou komplexný časovací systém s jednotkou PLL, ktorá zaručí dostupnosť takmer ľubovoľného želaného kmitočtu procesoru a periférií, pri použití kryštálu alebo oscilátoru pracujúceho na nižšej frekvencii (najčastejšie napr. 8 MHz).

### 1.3 Popis funkcie subsystému Master

Subsystém BMS Master komunikuje so všetkými subsystémami BMS Slave cez zbernicu CAN a takisto aj so zvyškom auta cez druhú CAN zbernicu. V prípade odpojenia batérie od formuly a zapojenia do nabíjačky ju je schopný detekovať a prepnúť nastavenia CAN. Komerčná nabíjačka komunikuje protokolom CAN s rýchlosťou 500 kbit/s a v prípade zbernice CAN je potrebné túto skutočnosť vedieť a prestaviť nastavenie periférie v mikrokontroléri, narozdiel od iných synchronných protokolov ako SPI alebo I<sup>2</sup>C, kde je hodinový signál prenášaný spolu s dátami.

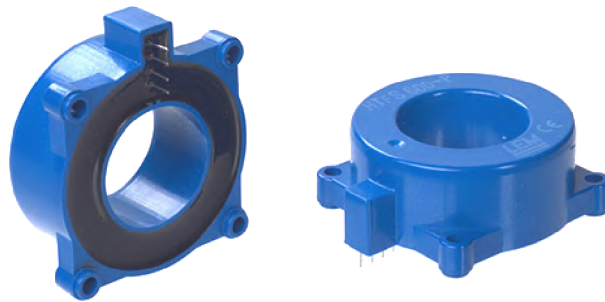
Master DPS bude napájaná z hlavného meniča DC/DC, ktorý sa nachádza v batérii a znižuje trakčné napätie na 24 V DC pre celé auto. Preto sa tu budú nachádzať dva znižujúce meniče, na 12 V DC schopný dodať prúd 2 ampéry a na 5 V DC schopný dodať 3 ampéry. Na 5-voltovej vetve bude klasický 3.3 V DC lineárny regulátor na napájanie logických obvodov a mikrokontroléru na doske. Pomocné napájania 5 a 12 V DC budú napájať dosky BMS Slave, ako aj pomocnú



analogovú dosku Hat pre spínanie AIR-ov (Accumulator Isolation Relay - izolačné relé akumulátora, vid. príloha s pravidlami), spätnú väzbu ich mechanického stavu a merania trakčného napätia. Takisto ako dosky Slave, Master bude tiež napájať a regulovať ďalšie ventilátory z rovnakej 24-voltovej vetvy.

Na Master DPS bude upevnená pomocná analogová doska Hat. Tá meria vysoké napätie, na pokyn BMS Master spína relé (so sériovým odporom) na prednabíjanie kondenzátorov v meniči pre motory, ako aj hlavné kladné a záporné AIR-y s pomocnými kontaktmi, ktorými sa zisťuje mechanický stav relé (či sa napríklad navzájom nezavariili alebo či sa správne zopli). Tieto informácie vracia naspäť do Master dosky na spracovanie. BMS Master poskytuje tejto doske napájanie 12 a 5 V DC.

Ako prúdový senzor batérie bol zvolený prúdový prevodník HTFS-200P značky LEM (obr. 1.4)[10]. Funguje na báze Hallového senzoru, ktorým dokáže merať jednosmerné, striedavé aj pulzné prúdy nominálne do  $\pm 200 A_{RMS}$ , maximálne do  $\pm 300 A$ . Má svoju vlastnú DPS (nie je súčasťou tejto práce) a je priechodný pre vodič do priemeru 22 mm. Je napájaný 5 V a prúd prevádza lineárne na výstupné napätie, kde pri prúde 0 A je výstupné napätie rovné referenčnému napätiu, predvolené na polovicu napájacieho napätia ( $\approx 2.5 V DC$ ). Tieto napätia je potrebné merať a správne previesť na hodnotu prúdu tečúcu akumulátorom. Pre zvýšenú presnosť je nutné kalibrovať nulovú hodnotu prúdu po umiestnení senzoru na jeho finálne miesto v batérii.



Obr. 1.4: Prúdový senzor LEM HTFS-200P

Podľa pravidiel doska BMS takisto spína aj bezpečnostný vypínací obvod auta (SC - Shutdown Circuit - bezpečnostný vypínací obvod auta). Spínanie musí byť implementované mechanickým relé. Tento obvod prechádza celým autom a na viacerých miestach má možnosť byť prerušený napríklad núdzovými tlačidlami na boku auta či inými systémami. Obvod končí znovu v batérii a musí byť použitý ako napájacie napätie pre AIR relé (vid. pravidlá v prílohe).

V prípade vypnutia auta spôsobené systémom BMS (nadmerný prúd, teplota, odpojené senzory napätia článkov, vybitá batéria, ...) sa musí rozsvietiť indikačná dióda a auto môže byť opätovne spustené len po vyriešení chyby (napr. vychladnutí baterky) a stlačení resetovacieho tlačidla. Toto tlačidlo musí byť chránené pred falošnou detekciou stlačenia spôsobeného skratom kabeľáže na napájacie napätie aj na zem (viď. pravidlá v prílohe, T 11.9.2).

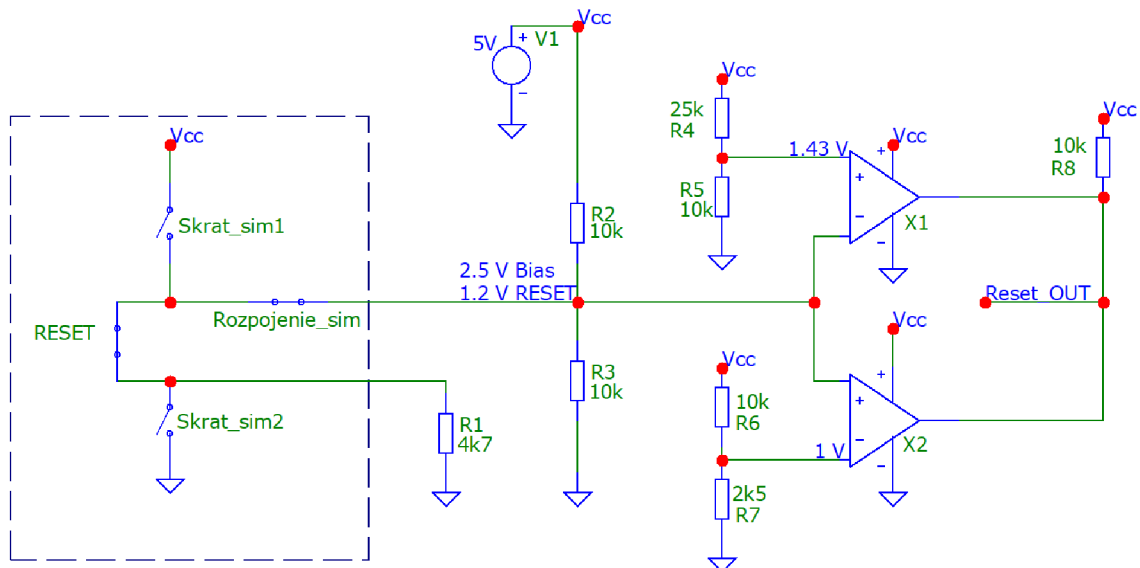
Programovanie systému Master je navrhnuté cez vlastný programovací konektor, ktorý sa jednotne zaužíval v tíme TU Brno Racing. Obsahuje programovacie rozhranie SWD (Serial Wire Debug) určené pre nahrávanie firmvéru a ladenie ARM mikroprocesorov. Okrem toho konektor obsahuje vyvedený sériový port, určený na vlastné monitorovanie a dorozumievanie sa so systémom, testovanie, či prípadnú kalibráciu. Využíva 8-vývodový konektor DuraClik od spoločnosti Molex s rozstupom 2 mm medzi vývodmi a implementovaným pozitívnym uzamykaním (angl. positive locking) zabraňujúcim náhodnému odpojeniu alebo vymykaniu. To pri samotnom programovacom konektore nie je veľmi podstatné, ale tento typ konektora sa jednotne používa aj na všetky ostatné nízkoпрúdové spojenia. Napájacie konektory (alebo konektor k doske Slave obsahujúci aj napájanie aj dátové vodiče), používajú konektory Mini-Fit tiež od firmy Molex, známe napríklad z kabeľáže používanej na napájanie v osobných počítačoch. Tie sú schopné viesť prúd až 13 ampérov na jednom pine (ak je použitý zodpovedajúci priemer vodičov).

## 1.4 Výber komponentov a návrh dosky Master

Systém Master je postavený okolo 32-bitového ARM mikrokontroléru z rady STM32F4. Bol vybraný najvýkonnejší a najviac pokročilý model zo „základnej“ rady - STM32F413. Oproti „Advanced“ (pokročilej) rade je dostupný aj v užívateľsky priateľskejších puzdrách LQFP aj pre menší počet nožičiek. Momentálne pre projekt postačuje 64-vývodová verzia (10x10 mm). Do budúca je tento istý mikroprocesor v prípade potreby dostupný v puzdre LQFP aj v 100 a 144-vývodových verziách [11]. Napriek použitému menšiemu puzdru ostávajú dostupné všetky periférie, ktoré sa dajú presúvať v rámci pridelenia vývodov pomerne ľubovoľne. Mikroprocesor vie pracovať na frekvencii až 100 MHz, má 1.5 MiB flash pamäte a 320 kiB internej SRAM pamäte. Obsahuje dva 12-bitové D/A prevodníky a jeden 12-bitový SAR A/D prevodník s maximálnou rýchlosťou 2.4 MSPS (miliónov vzorkov za sekundu) a maximálnym počtom 16 kanálov. Takisto má 16 16-bitových a dva 32-bitové časovače, niektoré s možnosťou generovania PWM signálu, dva Watchdog časovače (nezávislý a oknový), DMA (Direct Memory Access - priamy prístup do pamäte) pre procesorovo nezávislé

fungovanie napr. sériového portu a D/A periférií a podporu až troch CAN zberníc (z toho 2 nezávislé).

Resetovací obvod, ako bol predstavený v popise funkcií subsystému BMS Master, je potrebné urobiť analógovo. Detekovanie skratu na napájanie a zem je implementované nastavením jednej strany tlačidla na polovicu napájacieho napätia (2.5 V DC), druhá strana tlačidla sa ďalším rezistorom pripojí na zem. Výstup resetovacej logiky je správny iba vtedy, ak je vstupné napätie tlačidla medzi 1 a 1.43 V. Akékoľvek iné napätie (skrat na 5 V, skrat na 0 V) spôsobí, že aspoň jeden z komparátorov má na výstupe nulu. Aby mohli mať komparátory spojené výstupy, je potrebné použiť modely s výstupom typu otvorený kolektor, resp. otvorený drain. Tým je zaistené, že na výstupe vedú len sťahovať dodané napätie ku zápornej vetve (zemi) a teda nevedia samé poskytovať napájanie na výstup a skratovať sa navzájom. Obvod je znázornený spolu so spínačmi simulujúcimi jednotlivé možné chyby na obrázku 1.5.



Obr. 1.5: Simulácia detekovania resetovacieho tlačidla v programe MicroCap

Na vytváranie pomocných napájacích napätí 12 V a 5 V je vzhľadom na veľké prúdy (2 A a 3 A) potrebné implementovať spínaný zdroj. Lineárny zdroj by spôsobil veľké straty (pri plnom požadovanom prúde až 24 W na 12 V vetve a až 95 W na 5 V vetve). Táto problematika nie je úplne zameraním tejto práce a je veľmi obširna. Preto bol na zjednodušenie návrhu použitý nástroj WEBENCH® Power Designer [12] od spoločnosti Texas Instruments (skr. TI). Vieme zadať základné aj rozširujúce parametre ako minimálne, nominálne a maximálne vstupné napätie (DC alebo AC), výstupné napätie a (nominálny a maximálny) výstupný prúd či zvlnenie výstupného napätia v percentách. Nástroj vie návrh optimalizovať

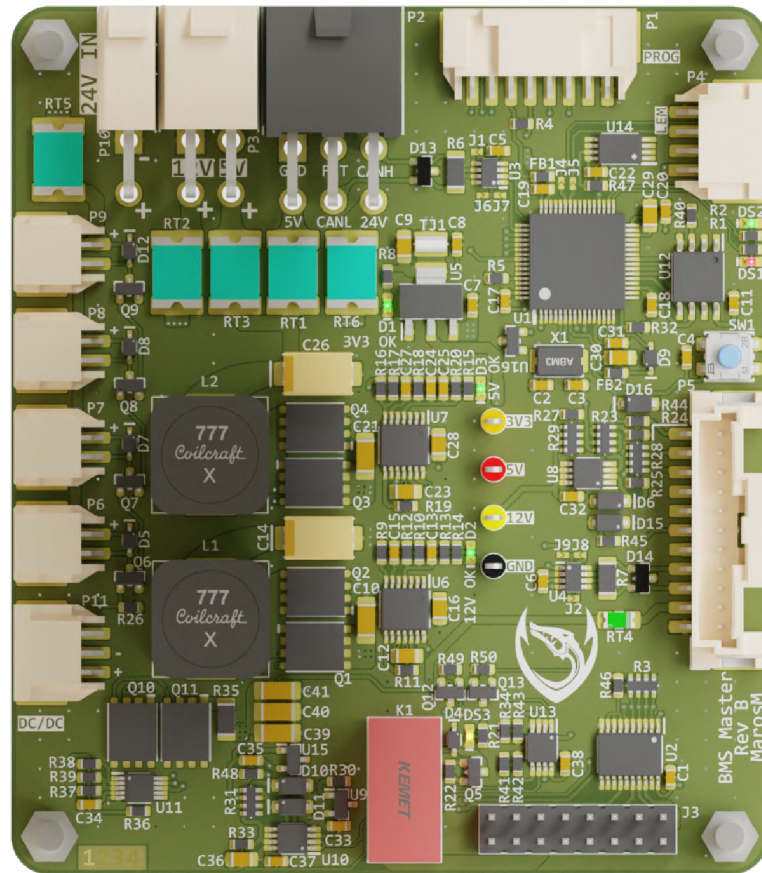
pre cenu, efektívitu alebo rozmery, kde mu vieme zadať aj minimálnu veľkosť puzdra pasívnych súčiastok. Takisto vieme zadať ich najväčšiu vertikálnu veľkosť a pracovnú teplotu. Nasledovne vidíme zoznam možných zapojení používajúce spínacie obvody od TI. Vieme si ich ďalej filtrovať pomocou parametrov ako efektívnosť, celkový počet súčiastok, celková plocha návrhu či orientačná cena návrhu. Bol zvolený integrovaný obvod a zapojenie tak, aby sa mohlo použiť pre oba znižujúce meniče najviac spoločných súčiastok. Nástroj tiež priamo umožňuje zmenu ostatných súčiastok, ako sú spínacie MOSFET-y, kondenzátory a pod. Tieto boli pozmenené tak, aby boli znovu pre oba meniče identické. Menší počet typov rôznych súčiastok je vždy pozitívny, znižuje cenu celkového zariadenia, nároky na skladovanie a hľadanie alternatív, ručné osadzovanie je rýchlejšie a strojové osadzovanie má menšie požiadavky na počet podávačov. Po týchto zmenách vie nástroj znovu prepočítať všetky kľúčové parametre a následne vygenerovať štatistiky a grafy efektivity prevodu či pracovného cyklu.

Najvhodnejším kompromisom bol integrovaný obvod LM3150. Jeho cieľom je umožniť jednoduché návrhy tým, že je veľmi robustne postavený, umožňuje pracovnú frekvenciu až 1 MHz, implementuje ochranu pri nadprúde a vysokej teplote, nevyžaduje kompenzáciu spätnej väzby a zvláda veľmi rýchle prechodné deje na vstupe aj na záťaži. Vie pracovať so širokým vstupným napätím v rozsahu 6 až 42 V a výstupné napätie vie znižovať až na 0.6 V. Používa dva externé spínacie MOSFET-y a cievku, preto maximálny výstupný prúd na tomto integrovanom obvode nezáleží. Prúd sa dá limitovať pomocou snímacieho rezistora. Naše navrhnuté spínacie zdroje dosahujú maximálnu efektívnosť 93 (5 V) až 96 (12 V) percent - pri maximálnom navrhovanom prúde.

Na doske Master sa tiež nachádza 16 Mbit SPI Flash pamäť W25Q16JVSSIQ od firmy Winbond [13] a EEPROM pamäť M9551 od firmy STMicroelectronics [14]. Flash pamäť je určená na aktualizáciu firmvéru cez zbernicu CAN. To umožní nahrávanie cez počítač aj vtedy, keď budú všetky dosky v uzatvorenej batérii alebo aj priamo v aute. Táto flash pamäť sa bude používať vo všetkých projektoch TU Brno Racing, aby bol kód na prehrávanie firmvéru navzájom kompatibilný. EEPROM pamäť je vhodná na ukladanie kalibračných hodnôt alebo nastavení, ktoré chceme meniť potenciálne často, aj napr. za chodu auta.

Pre systém Master bola použitá 4-vrstvá doska plošných spojov. V prvej prototypovej verzii bol návrh vtlesnený do dvoch vrstiev, no napriek menšej cene má dvojvrstvový návrh viacero nevýhod. Okrem ťažšieho postupu pri návrhu DPS je pri väčšej hustote súčiastok kompromitovaná kvalita napájacích napätí a hlavne zeme. Prúd tečúci do rôznych častí dosky spôsobuje napäťový pokles, ktorý je často nekonzistentný a časom kolíše, čím spôsobuje nepresné analógové merania. Takisto je pri dvojvrstvom návrhu zhoršená integrita digitálnych signálov a je

viac miesta na potenciálne problémy s elektromagnetickou kompatibilitou. [15] Návrh schémy a DPS (bez vnútorných vrstiev) BMS Master sa nachádza v prílohách. Na obrázku 1.6 je počítačový render dosky.

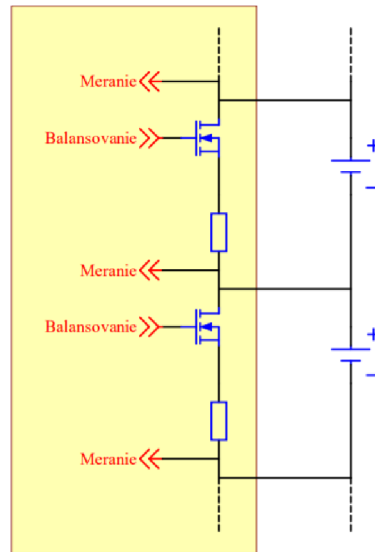


Obr. 1.6: Návrh DPS Master

## 1.5 Popis funkcie subsystému Slave

Subsystém BMS Slave musí monitorovať napätia všetkých sériovo zapojených článkov, ako aj ďalšie teplotné senzory rozmiestnené po segmente. Podľa pravidiel (EV 5.8.2, vid. príloha) musí formula rovnomerne monitorovať teploty minimálne 30% všetkých článkov v batérii. Jeden segment bude mať 128 článkov a umiestnením čidla blízko medených spojov článkov môžeme považovať, že jeden senzor efektívne meria 2 články. Z toho vyplýva, že potrebujeme minimálne  $128 * 0.3/2 = 19.2$ , teda aspoň 20 senzorov. Počas nabíjania článkov je potrebné balansovanie jednotlivých článkov v sérii, aby sa všetky články s drobnými rozdielmi v nabíjacej charakteristike, prechodovom odpore a rozdielnej nominálnej kapacite dostali na rovnakú úroveň a aby sa pritom ostatné neprebíjali. Vzhľadom

k požiadavkám na čo najmenšiu hmotnosť a veľkosť plošného spoja bude BMS používať pasívne balansovanie článkov (obr. 1.7).



Obr. 1.7: Pasívne balansovanie článkov a meranie napätia

Oproti aktívnemu balansovaniu je jednoduchšie, menšie, ale má nižšiu efektívnosť a teda väčšie tepelné straty počas nabíjania, s ktorými musíme počítať. Takisto musí podľa pravidiel umožniť jednoduché odpojenie (jedného zo) senzorov teploty a napätia článku pre overenie detekcie takejto chyby.

Vstupné napájanie bude 5 V DC, ktoré bude nutne galvanicky izolované, keďže potenciál narastá s každou doskou o napätie segmentu (48 až 67 V). Takisto je nutné galvanicky izolovať aj zbernicu CAN. Ďalej bude táto doska regulovať až 3 ventilátory napájané z 24 V DC vetvy pomocou PWM. Toto napájanie je neizolované, z hlavného DC/DC prevodníka z batérie. Je teda potrebné galvanicky izolovať riadiaci PWM signál a spínanie previesť na strane so spoločnou zemou.

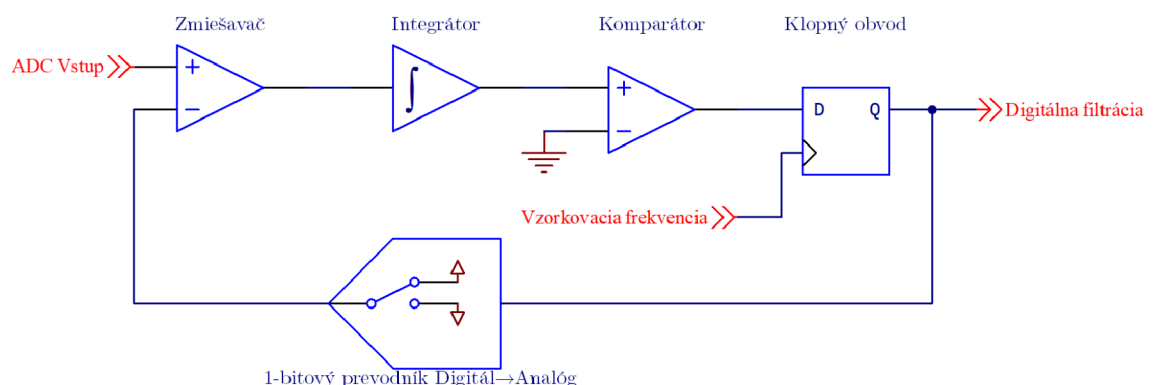
## 1.6 Výber komponentov a návrh subsystému Slave

Hlavným stavebným blokom, ktorý nám bude určovať výber ďalších komponentov, je samotný integrovaný obvod na správu viacčlánkovej batérie. Na trhu je ich veľké množstvo a ponúkajú rôznu mieru a kvalitu merania napätí a integrácie ovládania balansovania článkov počas nabíjania. Pre našu konfiguráciu batérie 16S sú k dispozícii tri integrované obvody: MAX14921 od Maxim Integrated, bq76PL455A od Texas Instruments a LTC6813 (schopný zapojenia do 18S) od Linear Technology (v súčasnosti odkúpené spoločnosťou Analog Devices). MAX14921 avšak sám o sebe neobsahuje A/D prevodník ani napätovú referenciu,

je to len integrovaný obvod, ktorý vzorkuje napätia jednotlivých článkov na externé kondenzátory a spínacou logikou postupne sprístupňuje externému A/D prevodníku napätia jednotlivých článkov bez kumulovaného jednosmerného napätia. Takisto neposkytuje kvalifikáciu pre automobilový priemysel (ostatné spĺňajú AEC-Q100). Obvod bq76PL455A používa 14-bitový SAR (Successive Approximation - postupná aproximácia) prevodník, pričom LTC6813 používa 16-bitový Delta-Sigma ( $\Delta\Sigma$ ) prevodník s dodatočným programovateľným filtrom a dobou vzorkovania.

Prevodník využívajúci Delta-Sigma ( $\Delta\Sigma$ ) moduláciu je oproti prevodníku s postupnou aproximáciou pre našu aplikáciu výhodnejší. SAR prevodník je schopný vyšších rýchlostí pri prevode napätia, avšak chyba mu akékoľvek filtrovanie, keďže funguje na princípe „sample and hold“, teda na každé meranie si uloží (navzorkuje - sample) momentálne vstupné napätie na interný vzorkovací kondenzátor (uloženie napätia - hold), odpojí vstup a následne postupnou aproximáciou porovnáva s výstupnou digitálnou hodnotou. Oproti tomu Delta-sigma prevodník vstupné napätie v priebehu vzorkovania integruje, čím poskytuje istú úroveň filtrovania.

Delta-sigma prevodník funguje na princípe prevodu napätia s nízkou frekvenciou (a potenciálne veľkou bitovou hĺbkou) na binárne napätie (1-bitová hĺbka), ale s vysokou frekvenciou. Vstup prevodníka delta-sigma sa integruje, po čom je komparátorom prevádzaný na digitálny signál (a ďalej spracovávaný digitálne) a cez jednobitový prevodník zápornou spätnou väzbou naspäť na vstupný operačný zosilňovač (obrázok 1.8). Následne sa tento digitálny signál filteruje a je implementované prevzorkovanie (angl. oversampling), teda vytváranie priemeru viacerých vzoriek na vytvorenie jedného výsledku. Tu môže byť implementovaná ďalšia rada digitálnych transformácií, ako napríklad nastaviteľný filter dolnej priepusti v prípade LTC6813.



Obr. 1.8: Bloková schéma funkcie Delta-Sigma prevodníka

Vlastnosti A/D prevodníka v integrovanom obvode pre správu batérie (resp. jeho neprítomnosť pri MAX14921) a nemožné navýšenie v budúcnosti z 16S konfigurácie na 17S alebo 18S konfiguráciu pri súčiastke od Texas Instruments nás presvedčil o voľbe súčiastky od Analog Devices. Zhrnuté rozdiely sú v tabuľke 1.2.

Tab. 1.2: Porovnanie dostupných integrovaných obvodov na správu článkov

	MAX14921	bq76PL455A	<b>LTC6813-1</b>
Max. článkov v sérii	16	16	18
A/D prevodník	-	14-bit SAR	16-bit Delta-Sigma
Puzdro	64-pin TQFP	80-pin TQFP	64-pin eLQFP
Veľkosť	10x10 mm	12x12 mm	10x10 mm
Cena (odber 10 ks)	7.14 €	14.30 €	7.00€ *

\* Tento integrovaný obvod je relatívne nový (prvá zmienka je z roku 2018) a možno preto nie je v zozname nami používaných predajcov (Mouser, Farnell, TME) ani nie je na sklade u žiadneho iného predajcu (5/2021, Octopart). Avšak firma Linear Technology je veľmi ochotná pri poskytovaní demo dosky aj priamo integrovaných obvodov pre nás ako študentskému projektu zadarmo. Preto je táto cena skôr orientačná, keďže v podstate sa k tomuto integrovanému obvodu momentálne nedá ľahko (alebo rýchlo) dostať. Spoločnosť Analog Devices nedávno (1/2021) vydala nový integrovaný obvod ADBMS1818, ktorý sa síce k tomu nepriznáva, ale podľa technického listu [16] je prakticky zhodný s nami použitým obvodom (avšak momentálne takisto skladovo nedostupný).

Ako teplotné čidlá boli zvažované klasické NTC termistory (angl. Negative Temperature Coefficient, teda termistor so záporným teplotným koeficientom), napríklad vyhovujúci 10 k $\Omega$  NTC NXFT15XH103FA2B100 od firmy Murata a digitálne teplotné senzory komunikujúce pomocou zbernice 1-Wire ako MAX31820 od Maxim Integrated. Výhodou digitálnych senzorov je jednoduchosť merania, keďže nemusíme implementovať A/D prevodník a starať sa o merania v mikrokontroléri (alebo pomocou externého prevodníka). Avšak všetky senzory by boli v sérii (inak sa stráca ich význam) a tým by výrazne klesla spoľahlivosť systému. Stačilo by, aby sa vodič poškodil na jednom mieste alebo aby mal jeden senzor kritickú poruchu a celé auto by bolo nepojazdné a chyba by sa hľadala a opravovala veľmi ťažko. Takisto je veľmi odlišná aj cena, kde v tabuľke 1.3 vidíme, že NTC termistory sú 3-krát lacnejšie. Preto boli nakoniec zvolené klasické NTC termistory s individuálnou kabelážou. Keďže ich potrebujeme aspoň 20 a toľko kanálov nemá ani mikrokontrolér ani bežné externé A/D prevodníky, musia sa vstupy z čidiel pred prevodníkom multiplexovať. Aby sme mali istú rezervu, či už sa to týka nerovnomernosti rozloženia teplotne kritických miest



alebo kompenzovania prípadného poškodenia kabeláže či senzorov, použijeme 24 NTC termistorov. Oproti digitálnym čidlám je to cenový rozdiel na celú batériu takmer 300 Eur.

Tab. 1.3: Porovnanie možných zapojení 24 teplotných čidiel (Ceny 12/2020 Mouser.com)

Teplotné čidlo	MAX31820	NXFT15XH103FA2B100
Typ	Digitálne	NTC termistor
Počet vodičov	2 alebo 3	48
Rozlíšenie	9 až 12 bit	-
Tolerancia	$\pm 0.5$ °C	$\pm 1\%$ odporu
Zapojenie	Sériové	Paralelné
Vzájomný vplyv čidiel	Závislé	Nezávislé
Veľkosť	od 5x5x4 mm	od 2x1x1mm
Cena (odber 100 ks)	1.26 €	0.40 €

NTC termistory sú napájané pomocou zdvíhacieho (angl. pull-up) rezistoru a tak budú tvoriť napäťový delič. Tento pull-up rezistor bude mať rovnakú hodnotu, ako má termistor nominálnu hodnotu, čiže 10 k $\Omega$ . Chceme merať odpor NTC termistora, ktorý zisťujeme z napätia na tomto deliči. To ale je priamo závislé od napájacieho napätia. Keďže môže napájacie napätie časom kolísať, je potrebné, aby sme to ošetrili, inak nám výsledky z deliča napätia budú dávať nepresné merania. To vieme dosiahnuť dobrým izolovaním tejto analógovej časti od ostatných, hlavne digitálnych súčiastok, pomocou dobrej filtrácie napájania aj správnym postupom uzemňovania pri návrhu DPS. Ak je pri meraní použité stabilné referenčné napätie, je absolútne nevyhnutné pravidelne merať aj napájacie napätie, ktoré môže kolísať krátkodobo aj dlhodobo. Tým zaistíme to, že nemeráme len precízne napätie na termistore (ktoré je nám samo o sebe zbytočné), ale aj jeho pomer k napájaciemu napätiu, z ktorého počítame odpor (a teda teplotu) termistora.

Podľa pravidiel (EV 5.8.6, viď. prílohy) je potrebné vypnúť výstup batérie vtedy, ak teploty prekročia povolené maximá na viac ako jednu sekundu (toto musí brať do úvahy aj neistotu merania). Aby sme teda mali nejakú toleranciu na zle odmeranú hodnotu alebo na špičkovu prekročenú hodnotu, meranie všetkých teplôt by nemalo zabráť viac ako 500 milisekúnd. Na 24 teplotných čidiel vieme použiť jednoduché 4-kanálové analógové multiplexory a stačí 6 vstupov do A/D prevodníka. Na zmenšenie počtu súčiastok sa použil duálny 4-kanálový multiplexor MAX4582, ktorý zvláda spínať 8 termistorov. Interne zdieľa prívody na voľbu adresy, čím sa zmestí do 16-vývodového puzdra.

Použitý je externý A/D prevodník na minimalizovanie presluchu a rušenia, ktoré bude v okolí a na mikroprocesore, okrem iného aj kvôli tomu, že toľko vstupov na samotnom STM32F103 mikroprocesore nemáme. Na výber sú viaceré externé A/D prevodníky, ktoré vedia jednoducho komunikovať s mikrokontrolérom, napríklad po zbernici SPI alebo I<sup>2</sup>C. Podobne ako pri meraní napätí jednotlivých článkov, aj pri teplotách radi využijeme vlastnosti  $\Delta\Sigma$  prevodníka na filtráciu vstupného napätia, keďže nám nejde o rýchle, ale o presné vzorkovanie pomaly sa meniacej veličiny. V tabuľke 1.4 vidíme porovnanie parametrov a cien vyhovujúcich A/D prevodníkov aktívnych vo výrobe a bežne skladovo dostupných.

Tab. 1.4: Porovnanie A/D prevodníkov (Ceny 12/2020 Mouser.com)

	ADC128D818	AD7124-8	LTC2428
Výrobca	Texas Instruments	Analog Devices	Linear Technology
Rozlíšenie	12-bit	24-bit	20-bit
Rozhranie	I2C	SPI	SPI
Prog. zosilňovač	Nie	1 - 128	Nie
Puzdro	16-pin TSSOP	32-pin LFCSP	28-pin SSOP
Veľkosť	5x4.4mm	5x5mm	10x5.5mm
Cena (odber 25 ks)	3.80 €	8.50 €	6.40 €

Vidíme jasné prednosti  $\Delta\Sigma$  prevodníkov - veľmi vysoké rozlíšenie, až 24 bitov a relatívne dostupná cena. Pozrime sa bližšie na požadovanú presnosť prevodníka, teraz zo strany bitovej hĺbky a nie princípu vzorkovania. Na výpočet teploty z meraného odporu NTC (vypočítaného v mikrokontroléri z nameraného napätia na deliči) potrebujeme vedieť parametre daného NTC. Na veľmi precízne merania sa dá teplota aproximovať Steinhart-Hart rovnicou, publikovanou v roku 1968 (rovnica 1.3), pomocou ktorej vieme skutočnú charakteristiku aproximovať až na 0.02 °C [17]. Koeficienty a B a C sa dajú vypočítať z rozmerov a materiálových parametrov termistora alebo sa určujú pomocou experimentálnych meraní. Modifikovaním rozsahu platnosti aproximácie vieme dosiahnuť lepšiu (menší rozsah), resp. horšiu (väčší rozsah) presnosť.

$$\frac{1}{T} = a + B \cdot \ln R + C \cdot (\ln R)^3 \quad (1.3)$$

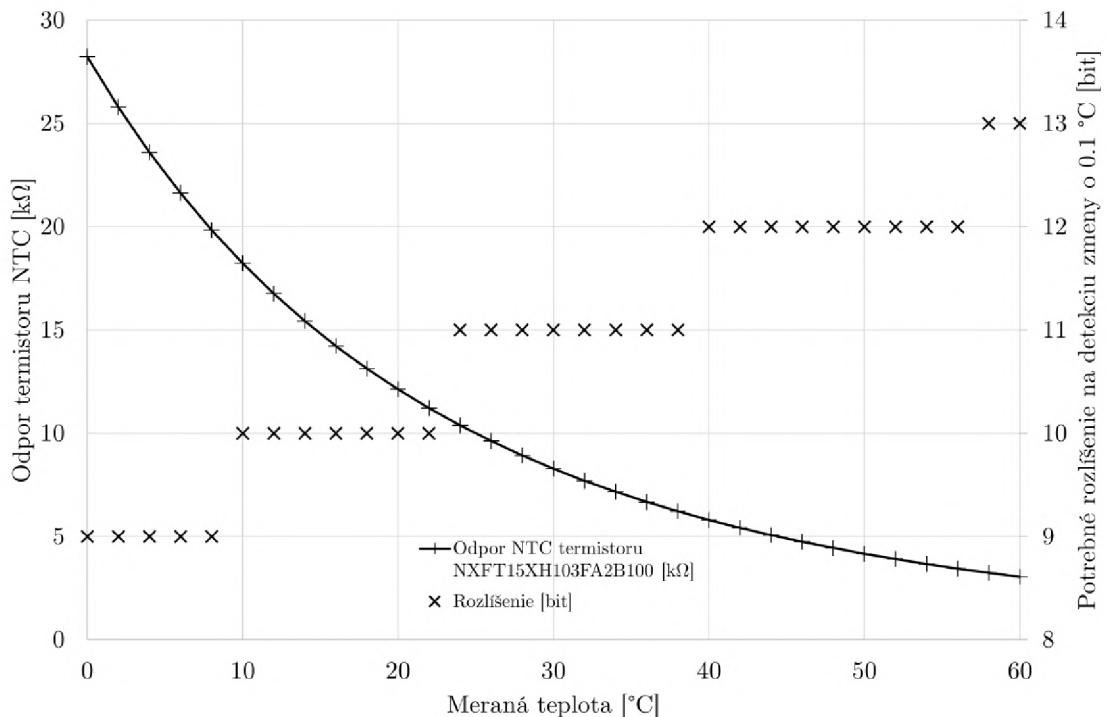
Výrobcovia (vrátane Muraty, výrobcu nami zvoleného senzoru) však častejšie v technickom liste uvádzajú iba  $\beta$  (alebo B) konštantu, použiteľnú v upravenej rovnici 1.5. Na výpočet finálnej teploty vieme niektoré výrazy zjednodušiť a v mikrokontroléri uložiť ako konštanty, alebo sa často implementuje (ak je

dostatok miesta v pamäti) vyhľadávacia tabuľka (angl. Look-up table alebo LUT) pre jednoduchú a rýchlu interpoláciu hodnoty z A/D prevodníka na teplotu.

$$R(T) = R(T_0) * e^{\beta * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (1.4)$$

$$T = \frac{\beta}{\ln \frac{R}{R(T)} + \frac{\beta}{T_0}} \quad (1.5)$$

Aplikovaním rovnice používajúcej parameter  $\beta$  a získaním hodnôt pre nami použitý termistor ( $\beta = 3380$ ,  $T_0 = 25$  °C)[18] si vieme vyniesť závislosť odporu (a teda aj meraného napätia na deliči) na teplote. Potrebné rozlíšenie A/D prevodníka si teda vieme odvodiť, ak si stanovíme napríklad vzťah medzi zmenou najmenej významného bitu (angl. LSB) a zmenou teploty, ktorá tomu korešponduje. Zvolili sme si pre vizualizáciu želaný krok 0.1 °C a vyniesli závislosť do grafu (obr. 1.9). Potrebné rozlíšenie je zaokrúhlené smerom nahor.



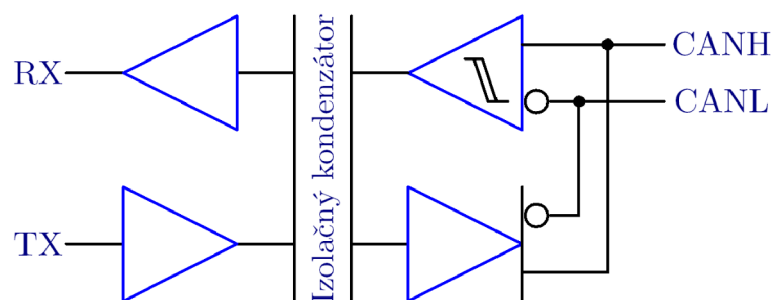
Obr. 1.9: Závislosť potrebného rozlíšenia A/D prevodníka na teplote pre detekciu zmeny o 0.1 °C

Vidíme, že pre väčšinu rozsahu je 12-bitový prevodník viac než dostačujúci, ale kvôli silne nelineárnej charakteristike je ku koncu grafu (58 - 60 °C) tesne nedostačujúci na rozlíšenie rozdielu o desatinu stupňa Celzia. Napriek tomu sme ho do návrhu vybrali, pretože je omnoho lacnejší ako ostatné a pri 20

a 24-bitových rozlíšeníach by sme efektívne posledných 7 až 11 bitov z merania zahadzovali. Meranie na termistore je takisto ovplyvňované samotnou toleranciou hodnoty  $\beta$ , toleranciou odporov tvoriacich merací delič napätia a kvôli teplotnej stabilite súčiastok (ppm/°C) aj zahrievaním samotnej dosky. Preto je pre presné výsledky potrebná ďalšia kalibrácia. Merané teploty majú pre nás viac informačný charakter a priblížením k 60 °C aj bezpečnostný charakter. Túto neistotu merania teda musíme zabudovať podľa pravidiel (v prílohe) aj do riadiaceho algoritmu, aby pri (skutočných, nie nameraných) 60 °C na mieste kontaktu termistoru bola formula bezpečne vypnutá.

Podľa pravidiel (EV 5.8.10, viď. príloha) musí byť možné individuálne odpojiť jeden zo senzorov pre meranie napätia aj teploty, pričom túto chybu musí systém vedieť bezprostredne identifikovať. Toto je implementované jednoduchým prerušením jednej z ciest ku článku a k NTC termistoru, kde bol pridaný konektor s vývodmi v skrate. Pri návrhu dosky plošných spojov bol vybraný prerušený vodič tak, aby to čo najmenej ovplyvňovalo celkový návrh a nespôsobovalo komplikácie v signálových cestách a usporiadaní súčiastok.

Jednotlivé DPS Slave je od seba potrebné galvanicky izolovať. Začneme výberom oddelovača napájacieho napätia. Zo subsystému BMS Master bude poskytnutých 5 V DC (a 24 V DC pre ventilátory). Na DPS Slave potrebujeme takisto napájanie 5 V a 3.3 V (ktoré si presne a bez zbytočného spínacieho šumu vytvoríme jednoduchým lineárnym regulátorom LM1117 v 3.3 V verzii). Dostupná je rada rôznych 5V-5V izolátorov zaliatych v puzdre v SMT alebo THT prevedení. Bol vybraný izolátor TEA 1-0505 od firmy TRACO Power, keďže sa už úspešne používal v iných projektoch na aute. Je v malom (6x12 mm, 10 mm na výšku) THT puzdre, je stavaný na izoláciu 1500 V DC a izolačný odpor má minimálne 1 G $\Omega$ . Spína na frekvencii 100 kHz a zvládne výstupnú kapacitu 470  $\mu$ F.



Obr. 1.10: Izolácia CANbus pomocou integrovaného obvodu ISO1050, upravené [3]

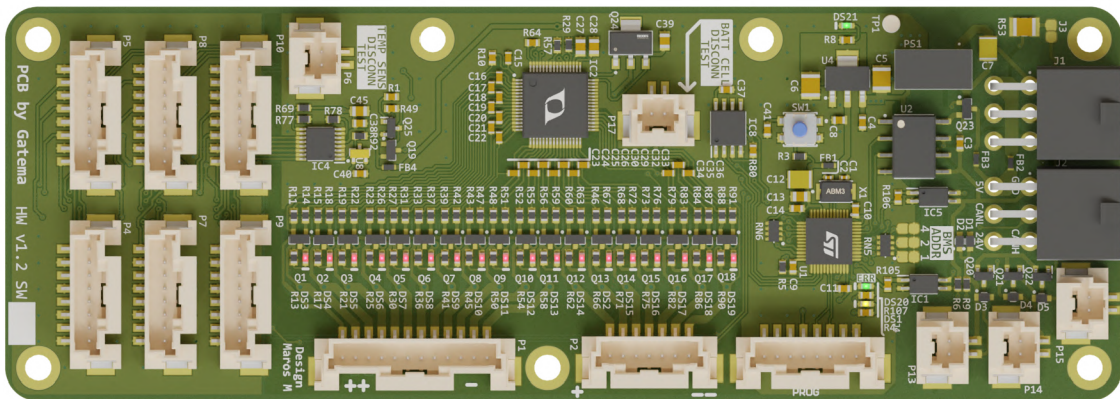
Takisto je potrebné galvanicky izolovať zbernicu CANbus. Je možné diskkrétne odizolovať osobitne TX a RX linky za obyčajným neizolovaným CANbus príjmačom-vysielačom (angl. Transciever). To by sme ale zbytočne používali ďalšie integrované

obvody ako optočleny a rezistory pre ich diódy a fototranzistory. Na trhu existuje hotové riešenie a to priamo izolovaný CAN transceiver (vysielač-prijímač) ISO1050 od spoločnosti Texas Instruments. Na izoláciu používa kapacitnú väzbu (obr. 1.10). Ponúka izoláciu až do 2500 (resp. 5000 pri 16-vývodovej súčiastke)  $V_{RMS}$  a pokrýva všetky rýchlosti zbernice až do použitej 1 Mbit/s.

Systém Slave obsahuje 16 Mbit SPI Flash pamäť W25Q16JVSSIQ od firmy Winbond [13] určenú na nahrávanie firmvéru cez zbernicu CAN, rovnakú ako systém Master.

Na odladovanie firmvéru je použitý rovnaký konektor ako pri doske BMS Master, SWD protokol s pridanými linkami pre sériovú komunikáciu s počítačom.

Návrh schémy a DPS BMS Slave sa nachádza v prílohách. Na obrázku 1.11 je počítačový render dosky.



Obr. 1.11: Návrh DPS Slave

## 1.7 Popis funkcie subsystému Hat

Na implementáciu koncového ovládania prvkov batérie a meranie vysokého napätia na batérii je určená pomocná DPS s názvom BMS Hat (z anglického výrazu používaného pre rozšírenia na raspberry Pi - Hardware Attached on Top - hardvér umiestnený na vrchu, alebo doslovný preklad ako čiapka). Je umiestnená pomocou dištančných stĺpikov na DPS BMS Master. Prepojené sú pomocou klasického konektora s rozstupom 2.54 mm, ktorý prenáša všetky potrebné signály a napájanie. Master má na sebe konektor typu samec (male) a Hat typu samica (female) a po správnom zarovnaní do seba zapadnú a je možné ich zaistiť skrutkami M3.

Podľa pravidiel (v prílohe) musíme nezávislo monitorovať napätie pred aj za izolačnými relé batérie (AIR). To je implementované pomocou dvoch osobitne

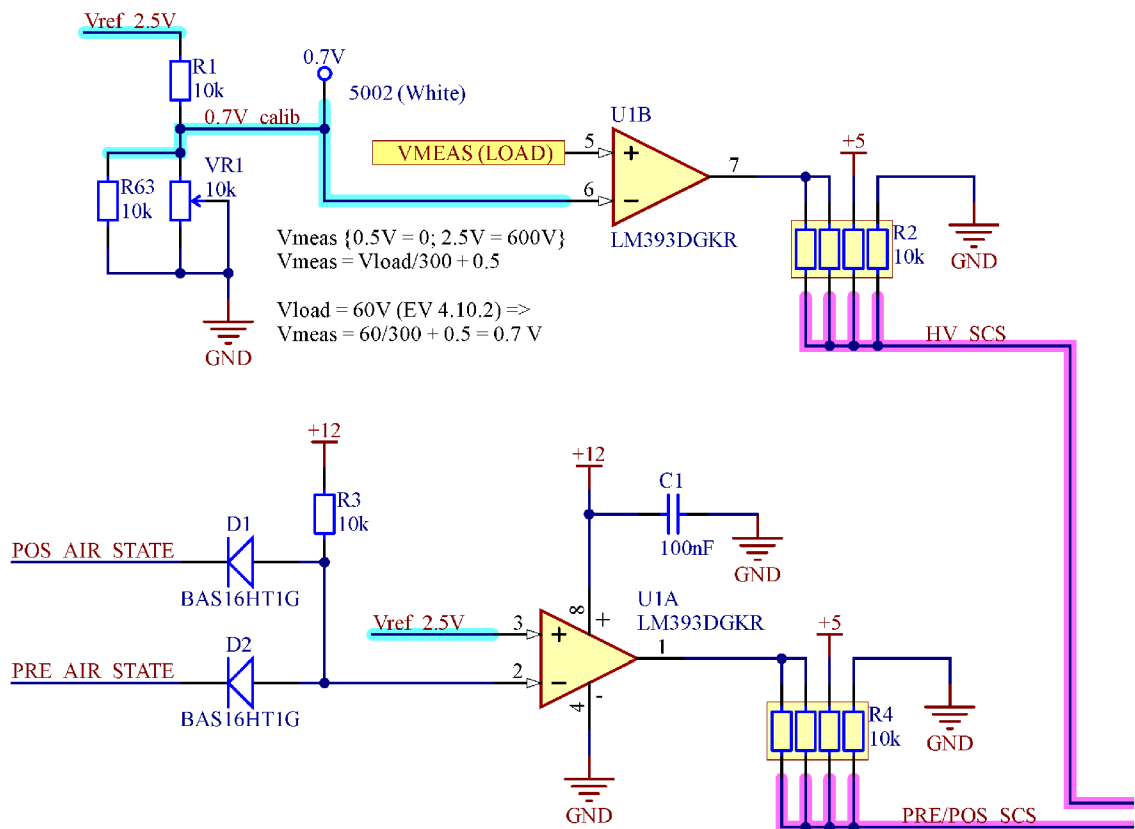
galvanicky napájaných operačných zosilňovačov AMC1311. Tie vedia preniesť napätie zo vstupu v rozsahu od 0 do 2 V na galvanicky oddelený diferenčný výstup. Ak je vstup v chybnom stave, na výstupe sa nachádza záporné diferenčné napätie, čím sme schopní chybu detekovať a nemeríme napríklad len falošnú nulovú hodnotu. Ich napájanie izolujeme rovnakými DC/DC meničmi, ako sú použité na BMS Slave. Výstupné diferenčné napätie premeníme na jednokoncové (angl. single-ended) napätie, aby sme ho mohli merať mikrokontrolérom. To doplníme o 0.5 V prepätie (offset), čím zmeníme validný rozsah na 0.5 - 2.5 V. Prípadnú chybu merania (odpojenie, skrat na napájanie na zem alebo záporné (invalidné) diferenčné napätie z operačného zosilňovača) môžeme ľahko detekovať.

Na doske sú tiež umiestnené spínacie prvky napájania AIR a prednabíjacieho relé spolu s nadprúdovou ochranou (pomocou PTC „polyfuse“ termistoru). Všetky relé majú sekundárny (angl. AUX - Auxiliary - pomocný) výstup, ktorý je mechanicky spojený s hlavnými kontaktmi. Na ňom sledujeme skutočný mechanický stav (želaného alebo neželaného) zopnutia kontaktov. Na jednu stranu kontaktu je napojený pull-up rezistor s paralelnou signalizačnou LED diódou, ktorý je priamo monitorovaný mikrokontrolérom (vidí digitálnu jednotku). Ak je relé uzatvorené, kontaktom stiahne výstupné napätie na zem, rozsvieti signalizačnú LED diódu a mikrokontrolér vidí na digitálnom vstupe nulu.

V batérii je takisto nutné obslúžiť obvod IMD (Insulation Monitoring Device - zariadenie monitorujúce elektrickú izoláciu), ktorý periodicky kontroluje izolačný odpor (galvanickú izoláciu) vysokonapäťového TS systému od nízkonapäťového LVS napájania. Podľa pravidiel súťaže musíme používať zariadenie ISOMETER® IR155-3203 / IR155-3204 od spoločnosti Bender [19]. Pri zistení nedostatočnej izolácie (podľa pravidiel aspoň  $500 \Omega / V$ , v našom prípade od výroby naprogramované na 250 k $\Omega$ ) musí viesť výstupný signál z IMD odpojiť vypínací obvod SC - Shutdown Circuit - bezpečnostný vypínací obvod auta. Pre reset poruchy je nutné, aby bol systém IMD opäť mimo chybového stavu a resetovací obvod musí byť rovnako ošetrený ako pri resetovaní BMS systému (detekcia skratu na napájanie a zem).

Stavy relé a prítomnosť vysokého napätia na strane konektoru batérie sú nutné pre ďalší obvod v aute - tzv. TSAL - Tractive System Active Light - kontrolka zapnutého trakčného systému (nie je súčasťou tejto práce), ktorý pomocou neprogramovateľnej logiky ovláda bezpečnostné svetlo na viditeľnej časti auta. Bliká na červeno, ak sa na strane auta nachádza vysoké napätie. Svieta na zeleno, ak sú všetky systémy vysokého napätia vypnuté a je bezpečné pracovať na aute, nehrozí elektrický šok alebo pohnutie auta. Pri chybe je svetlo vypnuté (napr. nesprávne logické hodnoty vstupov alebo nezhoda hláseného napätia medzi meničom a výstupom batérie). Tu je potrebné implementovať SCS výstup,

podobne ako bol implementovaný vstup tlačidla. Ako logickú nulu nazveme signál s napätím 1.25 V a ako logickú jednotku signál s napätím 2.5 V. Takto vieme detekovať správny stav týchto signálov v systéme TSAL jednoduchými oknovými komparátormi. TSAL potrebuje z batérie 3 takéto signály - stav zopnutia záporného AIR relé, kladného alebo prednabíjacieho relé a prítomnosť napätia >60 V na výstupnom konektore do auta (druhá strana AIR relé). Tieto logické stavy sú implementované jednoduchým deličom napätia a zaťažovacím komparátorom s otvoreným kolektorom na výstupe. Zapojenie implementujúce komparátor pre >60 V a logické spojenie stavov relé je znázornené na obrázku 1.12.



Obr. 1.12: SCS výstup systému Hat

Na batérii musí byť (pravidlo EV 5.4.8 v prílohe) indikátor napätia väčšieho ako 60 V a toto meranie musí byť úplne nezávislé od batérie (či ma napríklad zapnuté napájanie hlavného DC/DC meniča). To je preto, aby detekovalo aj prípadné zvyškové vysoké napätie zo strany meniča, ktoré sa napríklad nesprávne vybililo. Toto sa na súťažiach môže kontrolovať aj pripojením externého napájania na meracie vývody, ktoré sa na aute musia nachádzať. Tento indikátor musí byť jasne viditeľný aj na priamom slnku. Použitie napr. Zenerovej diódy a odporu by aj pri malých prúdoch spôsobovalo obrovské tepelné straty (až 8 W pri 20 mA).

Takisto by bola výzva s potrebnou galvanickou izoláciou indikátora, keďže veko batérie je spojené s nízkonapäťovou zemou. Preto bol zvolený postup vytvorenia vlastného miniatúrneho DC/DC meniča, ktorý bude napájaný priamo výstupnou stranou AIR relé a zvládne presne fungovať v rozmedzí 60 až 600 V (aby bol návrh vhodný aj pre ďalšiu generáciu auta, ktoré pravdepodobne bude mať vyššie napájacie napätie).

## 1.8 Výber komponentov a návrh dosky Hat

Obsluha systému IMD musí byť podľa pravidiel implementovaná neprogramovateľnou logikou. V tabuľke 1.5 sme odvodili žiadané stavy pre všetky logické vstupy. Jeden zo vstupov je spätná väzba z výstupu, aby logika vedela predchádzajúci stav, či bol v chybe alebo nie.

Tab. 1.5: Určenie žiadaných stavov pre logiku IMD

Stav IMD	Reset	Výstupný register	Nový stav	Popis stavu
0	0	0	0	Chybový stav
0	0	1	0	Prepnutie do chybového stavu
0	1	0	0	Pokus o reset počas aktívnej chyby
0	1	1	0	Prepnutie do chybového stavu
1	0	0	0	Čakanie na reset chyby
1	0	1	1	Funkčný stav
1	1	0	1	Prechod do funkčného stavu
1	1	1	1	Funkčný stav (stlačený reset)

Po odvodení jednotlivých stavov môžeme výstupnú funkciu OUT definovať nasledovne:

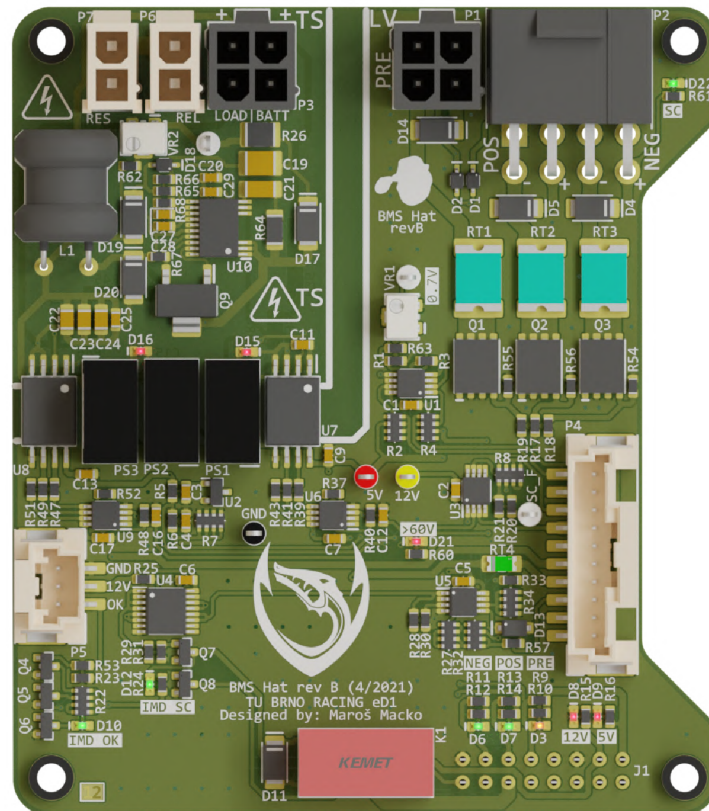
$$\text{OUT} = \text{Stav IMD} \& (\text{Reset} \mid \text{Výstupný register})$$

$$\text{OUT} = (\text{Stav IMD} \& \text{Reset}) \mid (\text{Stav IMD} \& \text{Výstupný register}) \quad (1.6)$$

Na implementovanie logiky pre obsluhu IMD bol vybraný multifunkčný logický obvod CD4048 [20] nakonfigurovaný ako dva štvorvstupé AND hradlá nasledovne zapojené do OR hradla. Logická funkcia bola odvodená z tabuľky požiadavok a nasledovne bol vybraný najvhodnejší obvod, ktorý zvládne implementáciu v jednom puzdre a nie je potrebné spájanie viacerých typov integrovaných obvodov.



Zároveň jeho flexibilita umožňuje jednoduché znovuvyužitie v ďalších projektoch alebo verziách. Jeho výstup nasledovne pomocou relé spína vypínací obvod SC a takisto má vyhradený MOSFET ako open-drain vstup do mikrokontroléru pre monitorovanie tohoto stavu. Ním je zaručený chybový stav po zapnutí (je potrebný reštart) a takisto znemožňuje vynútenie funkčného stavu držaním resetovacieho tlačidla, ak je obvod IMD v chybe.



Obr. 1.13: Návrh DPS BMS Hat

Na implementáciu indikátoru vysokého napätia existuje unikátny integrovaný obvod priamo pre túto aplikáciu - LT8316 od spoločnosti Analog Devices. Je to spínací kontrolér pre meniče s flyback topológiou bez optočlenu. Zvláda vstupné napätie 16 až 560 V (špičkovo 600 V, s pomocnou zenerovou diódou takmer ľubovoľne viac). Má tiež nastaviteľnú UVLO funkcionality (angl. under-voltage lockout - vypnutie obvodu pri nízkom napätí), čím vieme doladiť spodnú hranicu, aby fungoval až od 60 V. Vie pracovať v izolovanom režime (s transformátorom) aj v neizolovanom režime (s transformátorom alebo obyčajným induktorom). Pre jednoduchosť zapojenia a takisto menšiu veľkosť bola zvolená neizolovaná alternatíva (s cievkou) a výstupné napätie 12 V, ktoré sa až nasledovne galvanicky oddelí pomocou hotového izolovaného modulu, podobného ako pri BMS Slave a pri napájaní operačných zosilňovačov (TME-1212S). Obvod bol simulovaný

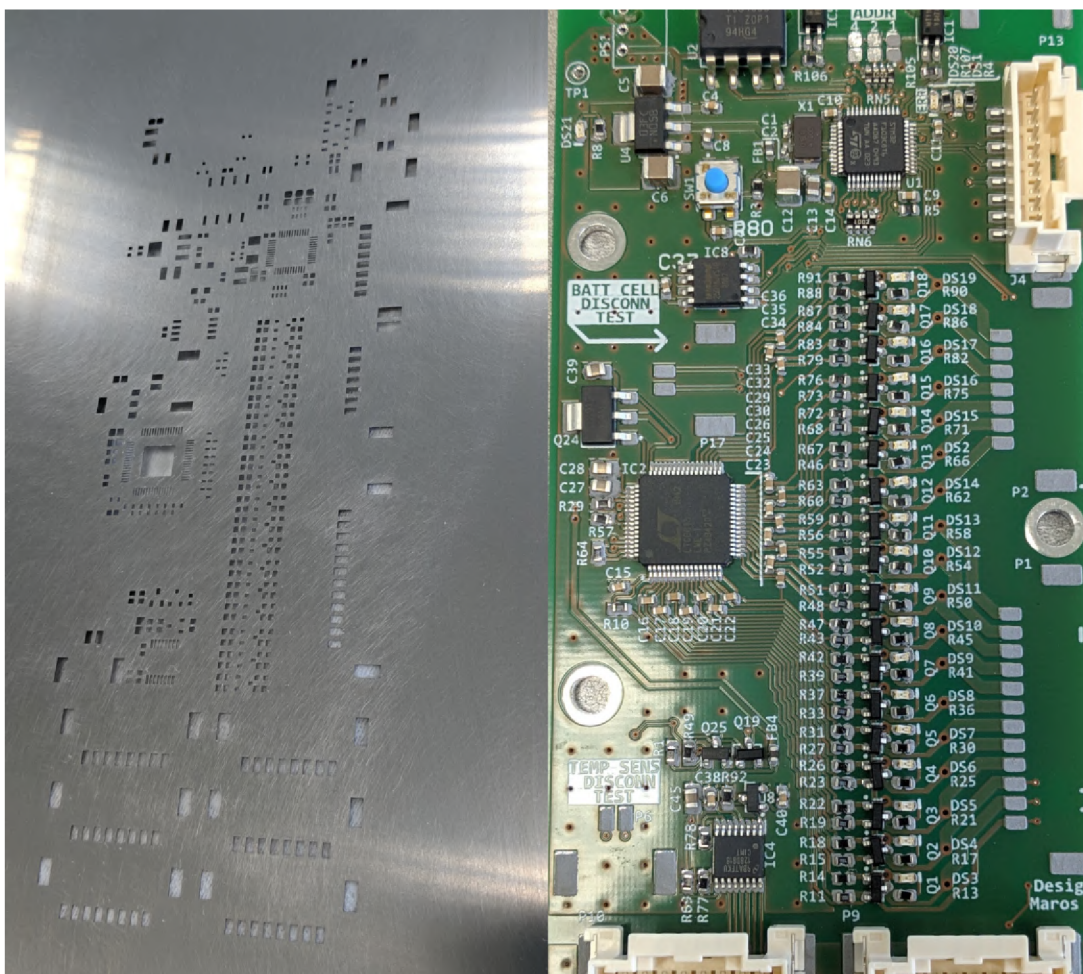
v programe LTSpice a boli vyladené hodnoty súčiastok. Pri prvom prototype sa objavili problémy s nadmerným šumom a často sa obvod LT8316 dostával do chybového stavu a vypínal gate tranzistora predčasne. Toto bolo vyriešené použitím magneticky tieneného induktora a vylepšením návrhu DPS - preusporiadanie súčiastok (na úkor kompaktnosti), opatrnejšie vedenie cesty pre spätnú väzbu, hrubšie spínacie cesty so špičkovými prúdmi a opatrné vylíatie zeme.

Návrh schémy a DPS BMS Hat sa nachádza v prílohách. Na obrázku 1.13 je počítačový render dosky.

## 2 Implementácia systému

### 2.1 Testovanie segmentu a systému Slave

Keďže je v aute šesť DPS Slave (plus jedna do rezervy), oplátilo sa ušetriť si opakovanú prácu a nechať vyrobiť šablónu (angl. stencil) pre nanosenie pasty (obr. 2.1). Potom stačilo osadiť súčiastky a dosky sme nechali pretaviť.

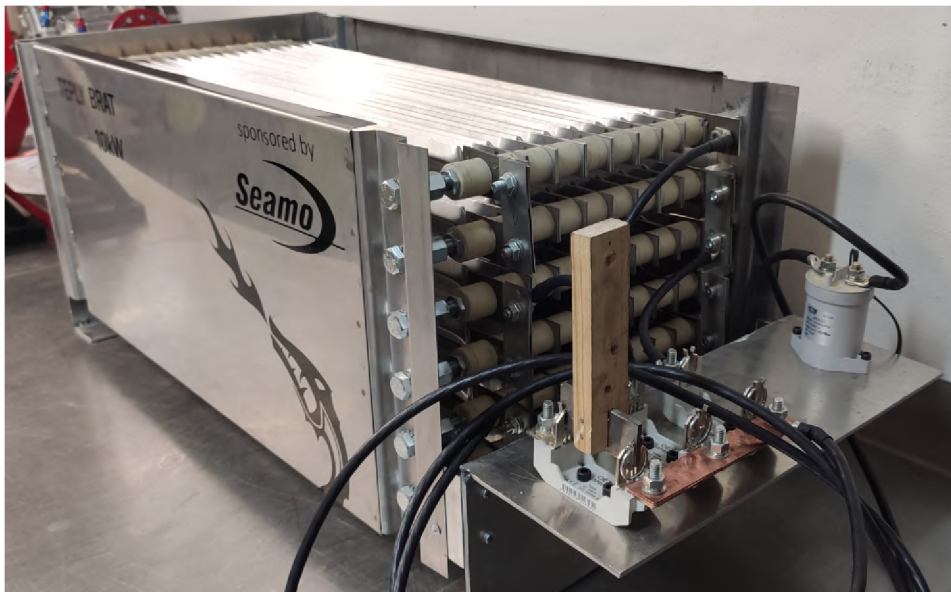


Obr. 2.1: Šablóna a osadzovanie DPS Slave do pasty

Keďže DPS obsahuje súčiastky hlavne na vrchnej strane a nemáme extrémne požiadavky na rovnosť dosky (ako pri BGA puzdrach), stačí osadenú DPS nechať pretaviť na tzv. hotplate - nahrievanej doske. Oproti pretaveniu v posuvnej peci má výhodu, že celý proces pretavenia sledujeme a môžeme manuálne opraviť prípadné chyby alebo posuny súčiastok. Takisto nie je nutné ladiť teplotu a rýchlosť posuvníka, na doske vidíme, kedy je zliatina dostatočne pretavená. Dosky sme osadzovali v trojiciach alebo pároch pomocou pomocného zariadenia

s ramenom a vákuovým prenášačom súčiastok alebo ručne s pinzetou. Veľký dôraz bol kladený na správne nanosenie pasty, aby sme dodržali zásadu z praxe „dobře natisknuto = z poloviny zapájeno“ [21]. Pri nedokonale zarovnanom nanosení pasty sme radšej pastu dali preč a naniesli znovu. Keďže sme túto zásadu poctivo dodržali, počas výroby všetkých siedmich dosiek sme mali len zopár menších skratov na niektorých vývodoch, ktoré sa veľmi jednoducho opravili.

Okrem časti batériového segmentu, ktorému sa venuje táto práca (systém Slave) sa museli viacerí členovia tímu zaoberať spoločne aj mechanickou a technologickou časťou segmentu. Pre tento účel sme potrebovali urobiť prvý, testovací segment, na ktorom sa vyskúšala technológia bodovania článkov na nikel, bodovanie niklu a medi, pripievňovanie koncových bus-barov a elektrické a ohňovzdorné izolovanie segmentu. Batériové články boli náhodne vyberané a prebehla len základná kontrola ich funkcie - či nie sú vadné z výroby a majú svoje nominálne napätie. Nasledovne boli vzájomne pasívne vybalansované (paralelným zapojením, každý článok so svojim balansovacím odporom) na rovnaké napätie tak, aby mohli byť priamo bodované paralelne. Ak by mali veľmi rozdielne napätie (a teda momentálnu kapacitu), pri zapojení by cez ne pretekala neštandardne vysoký prúd, ktorý by robil väčší problém článku s menším napätím, keďže by sa nabíjal omnoho rýchlejšie, ako je doporučené.



Obr. 2.2: Výkonový odpor na testovanie segmentu

Po mechanickom dokončení segmentu batérie sa testoval systém BMS Slave, programoval a testoval firmvér (popísaný neskôr) a takisto schopnosti batérie dodávať želaný prúd, správanie pri vysokej záťaži a schopnosť odvádzať, respektíve zadržiavať teplo. Špeciálne pre účely a požiadavky testovania záťaže batériového

segmentu bol v spolupráci so sponzorom vyrobený vysokovýkonový odpor s nominálnym odporom  $1.3 \Omega$  a zaťažením 10 kW (Obr. 2.2).

Tento odpor sa ešte dá skokovo ladit pomocou presúvania vývodov na rôzne úrovne. Nevýhodou je jeho relatívne vysoký teplotný koeficient, kvôli ktorému sa po zahriatí výrazne zvyšuje jeho odpor, čo môžeme neskôr vidieť aj na testovacích dátach.



Obr. 2.3: Grafické užívateľské rozhranie Dragon GUI počas testu systému BMS

Testované údaje boli merané priamo systémom Slave a Master, odkiaľ boli cez zbernicu CAN odosielané do počítača, kde sme tieto hodnoty naživo sledovali v tímovom grafickom užívateľskom rozhraní pre testovanie a nastavovanie auta (Dragon GUI, obr. 2.3).

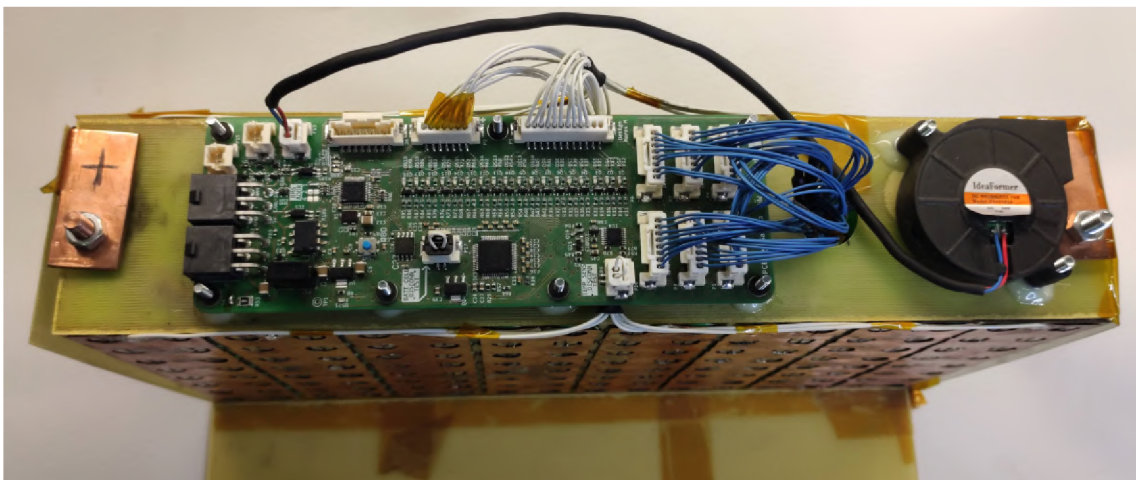
Z tohoto softvéru boli dáta vzorkované a uložené s menšou frekvenciou, ako sa odosielali. Odosielanie dát je tak časté ako jeho meranie, to pomáha počas testovania a živého náhľadu na batériu, avšak s takouto frekvenciou a dĺžkou dát ich nevie bežný softvér (ako napr. Microsoft Excel) graficky spracovať. Presnosť merania napätia bolo overované kalibrovaným multimetrom Fluke 87 V a prúd bol overovaný kliešťovým ampérmetrom s rozsahom 600 A (obr. 2.4).

Jeden z testov na batérii, kde sme testovali aj presnosť merania dosiek, sa vykonávala s teplotne uzatvoreným segmentom (obr. 2.5). Zo všetkých strán bol segment obložený sklolaminátom FR-4, ktorý je aj vo finálnej batérii použitý ako izolačný nehorlavý materiál. Otvory ventilátorov boli taktiež zaclonené s materiálom FR-4. Cieľom bolo otestovať vlastnú termálnu kapacitu batérie a zistiť rozloženie teplôt a ich rozdiely v batérii.

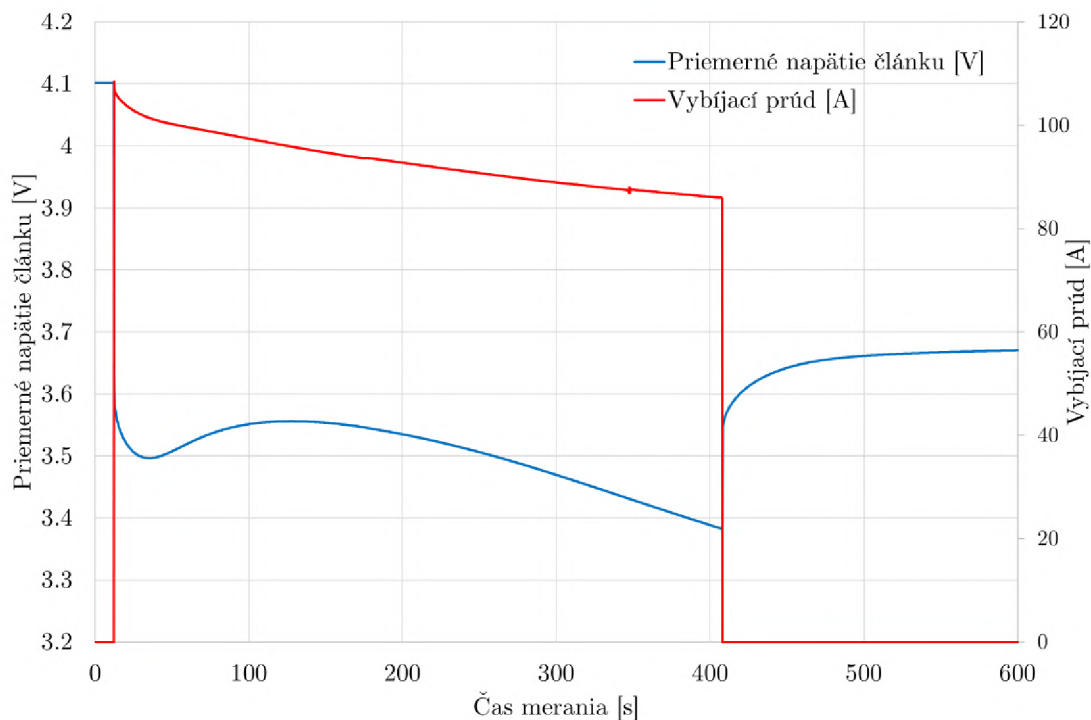


Obr. 2.4: Kontrolné meranie počas testovania segmentu

Záťažový odpor bol nakonfigurovaný na  $0.5 \Omega$ , ku koncu testovania jeho odpor vzrástol až na  $0.65 \Omega$ . Na obrázku 2.6 vidíme priebeh zmeny napätia článku počas vybíjania. Znázornené je priemerné napätie článkov, keďže sa vzájomne trochu odlišovali vďaka nedokonalnej zhodnosti článkov. Zo začiatku vidíme prudký pokles na  $3.5 \text{ V}$ , ktorý s poklesom prúdu stúpne na  $3.55 \text{ V}$ , odkiaľ znovu klesá až do konca merania pod  $3.4 \text{ V}$ . Krátky nárast napätia je spôsobený ohrevom pasívnej záťaže, na ktorej sa zvýšil teplotným koeficientom odpor. Takto rýchly ohrev, napriek tomu, že výkon nepresiahol  $7 \text{ kW}$ , bol spôsobený nevyužitím celého rozsahu odporu, ale iba jeho jednej vetvy, ktorú sme preťažovali nad nominálny výkon.



Obr. 2.5: Systém BMS Slave upevnený na batériovom segmente

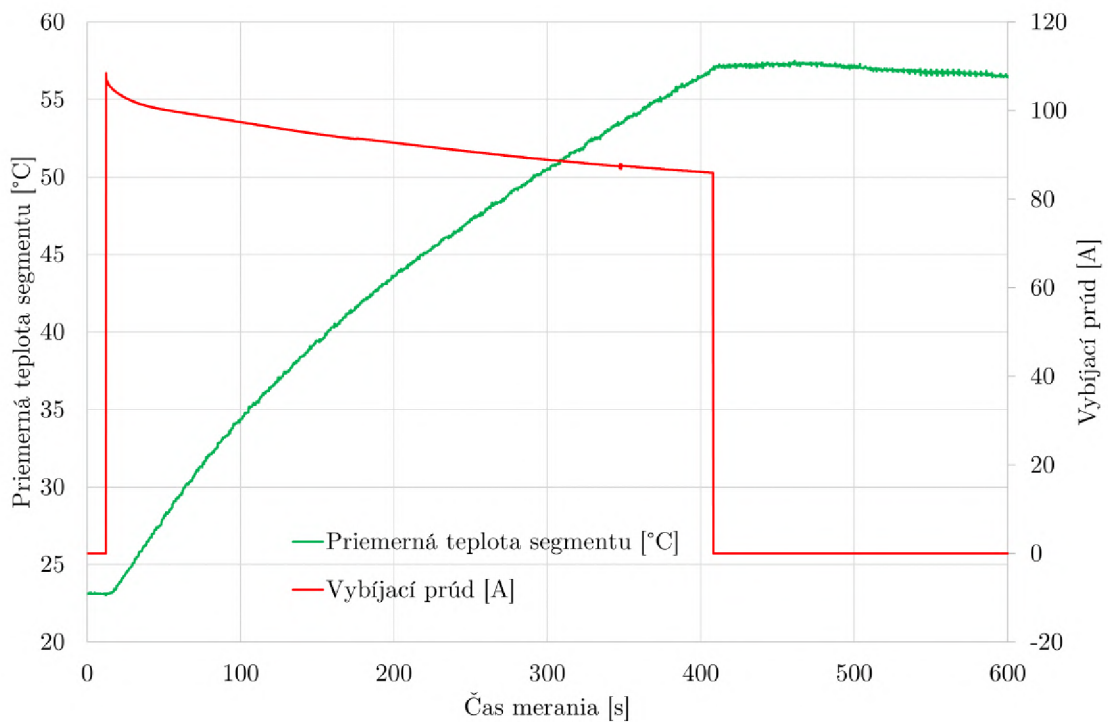


Obr. 2.6: Časový priebeh napätia na článkoch počas zafažovania segmentu

Po vypnutí záťaže sa napätie behom desiatok sekúnd vrátilo na napätie 3.67 V. Takýto pomalý nábeh napätia znamená, že sa počas závodovania nemôžeme spoliehať na napätie batérií ako ukazovateľa stavu nabitia, ale musí byť implementovaná iná metóda. Pravdepodobne najjednoduchšie je použiť tzv. „Coulomb counting“ metódu, čo je v podstate integrovanie odoberaného prúdu za čas. Táto metóda bola implementovaná do systému Master, ktorý spojitie integrovanie nahrádza pravidelným vzorkovaním a sumáciou prúdu z batérie. Takto vie predpokladať súčasný stav SoC (State of Charge - stav nabitia). Táto metóda nie je veľmi presná, vyžaduje znalosť počiatočného stavu nabitia (ktoré môžeme nastaviť aj manuálne po nabíjacom cykle a pri vypnutí auta si ho zaznamenať do pamäte EEPROM) a je závislá na neistote merania prúdu. Okrem toho sa kapacita batérie môže meniť s časom (degraduje) alebo teplotou (väčšie straty)[8]. Na prvý prototyp auta je avšak pre informačné účely dostatočná a necháva priestor pre vylepšenia do ďalších sezón.

Priebeh teplôt počas nabíjania (Obr. 2.7) zobrazujeme ako priemer všetkých termistorov. Testovanie bolo ukončené, keď jeden zo senzorov dosiahol 60 stupňov Celzia, napriek tomu, že priemerná teplota bola iba 57 °C. To nám ešte viac poukazuje na nevhodné balansovanie jednotlivých článkov a sériových vrstiev, ktoré sme vyriešili podrobným testovaním článkov (popísané neskôr).

Na segment sme sa mohli pozrieť a overiť teploty z NTC termistorou aj

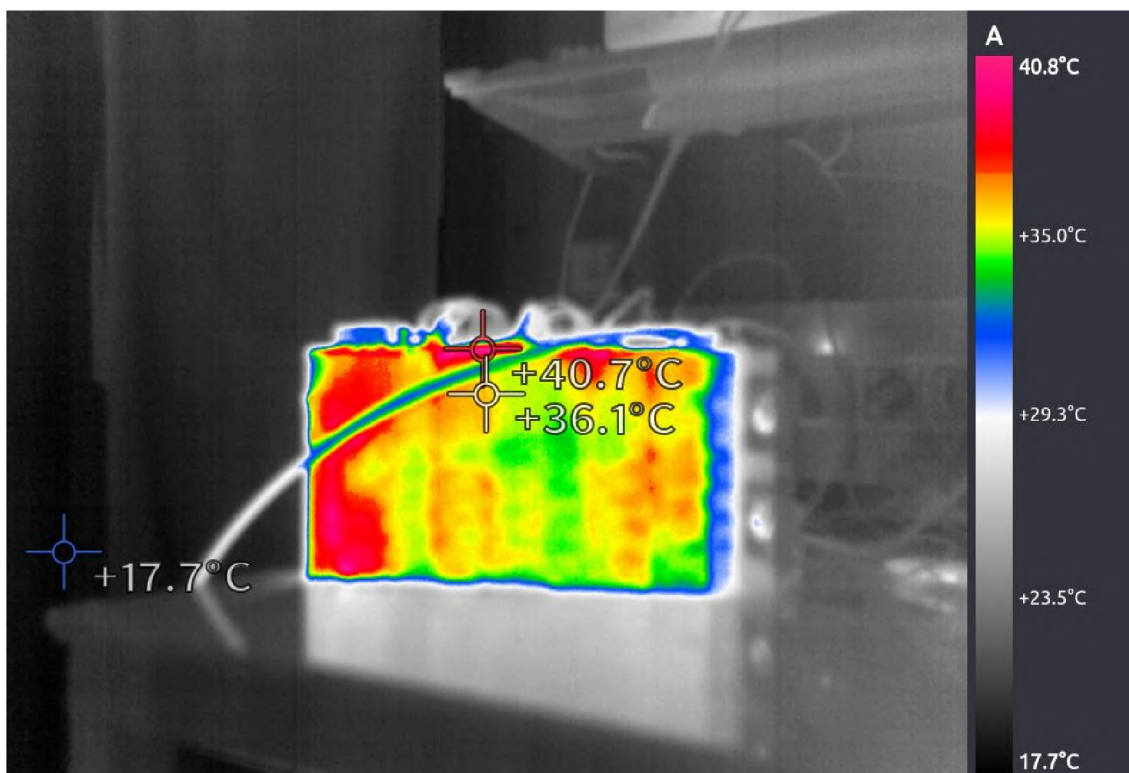


Obr. 2.7: Časový priebeh teploty na článkoch počas zatažovania segmentu

pomocou termálnej kamery (obr. 2.8) počas testu so zapojenými ventilátormi. Tu je vidno vplyv uzavretia batérie, kde nasáva vzduch dvoma ventilátormi a vyfukuje iba jedným otvorom na vrchu segmentu. Články zo začiatku batérie dostávajú najchladnejší vzduch a majú najlepší prietok vzduchu, oproti posledným článkom (vľavo dole), ktoré sú len jemne ofukované okoloidúcim teplým vzduchom, ktorý sa snaží dostať k výstupnému ventilátoru na vrchu segmentu.

Po otestovaní všetkých DPS boli jednotlivé natreté konformným povlakom, ktorý zvýši odolnosť pred kontamináciou povrchu. Tá by mohla znížiť izolačný odpor medzi LVS a TS (dôležité pri systémoch Slave a Hat) alebo urýchliť vplyv okolitých podmienok. [21] Izolačný odpor bol overený testerom RS PRO RS5500, ktorý pri najväčšom možnom kontrolnom napätí (1000 V) nevedel určiť hodnotu izolačného odporu, čo znamená, že bol väčší ako 2 GΩ. To je viac ako dostačujúce, funkčné auto musí mať celkovú izoláciu väčšiu ako 250 kΩ.





Obr. 2.8: Snímka termokamerou počas zafažovania segmentu

## 2.2 Testovanie článkov a skladanie batérie

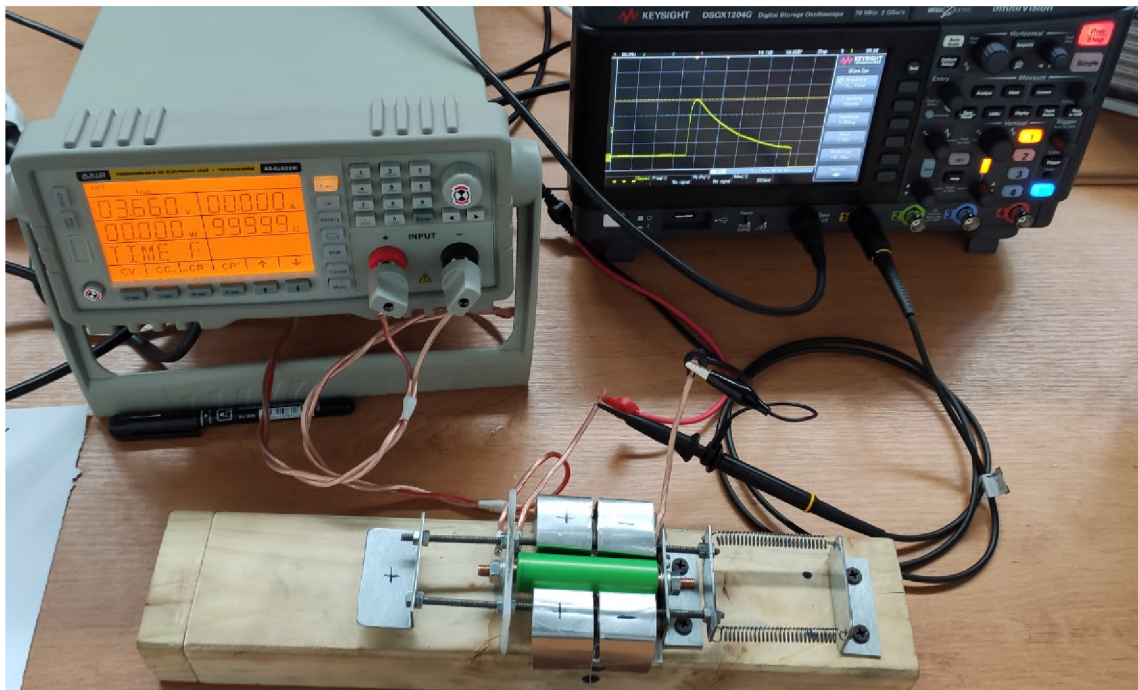
Po počiatočných testovaniach segmentu batérie bolo jasné, že pre vyskladanie najlepšieho akumulátoru nebude stačiť veriť konzistentnosti parametrov jednotlivých článkov. V rámci paralelných zapojení článkov sa ich kapacita spočítava, spájaním článkov do série už nemeňme kapacitu, ale len napätie batérie. Paralelné spojenie s najmenšou kapacitou bude ovplyvňovať celkovú kapacitu akumulátoru. Stačí jedno paralelné spojenie „slabších“ článkov a hoci zvyšné články budú mať počas vybíjania dostatočnú kapacitu, najslabší článok batérie určí úroveň, kedy už batériu ďalej nemôžeme používať. Pri vybíjaní to bude znamenať nevyužitie plnej kapacity všetkých článkov, pri nabíjaní to bude znamenať dlhý balansovací proces. Pre najlepšie zosúladenie článkov na vytvorenie batérie, ktorú vieme rovnomerne využiť na 100%, musíme odmerať kapacitu a ideálne aj interný odpor jednotlivých článkov. Boli vyskúšané viaceré komerčné nabíjačky, avšak ich testovanie vnútorného odporu bolo veľmi nekonzistentné. Tie, ktoré podporovali meranie kapacity, nevedeli merať viac batérii v sérii súčasne. Preto bol zvolený postup vlastnej metodológie na meranie článkov pre našu potrebu.

Meranie 768 článkov na batériu (plus rezerva na vylučovanie najslabších

článkov) je časovo veľmi náročné, obzvlášť meranie ich kapacity, kde sa jedna batéria vybíja podľa nastavení aj desiatky minút. Ak sa jedna batéria vybíja 20 minút, potom celkový potrebný čas pre meranie je vyše 250 hodín. Preto bola vymyslená jednoduchá metodológia, podľa ktorej mohli pomôcť merať tieto články aj ostatní členovia tímu TU Brno Racing tak, aby popri meraní mohli robiť aj iné činnosti a nedochádzalo k chybným meraniam.

Nabíjanie článkov prebiehalo pomocou nabíjačiek určených pre batérie do RC modelov. Podporovali pripojenie dvoch, resp. štyroch nezávislých batérií v konfigurácii 1S až 6S. K nim boli vyrobené držiaky pre naše 18650 články spojené do série s vyvedenými balansovacími kontaktmi. Nabíjačky vedeli nabiť články na želanú hodnotu 4.200 V len málokedy (kontrolované kalibrovaným multimetrom), preto sa určila hranica nabitia na 4.180 V.

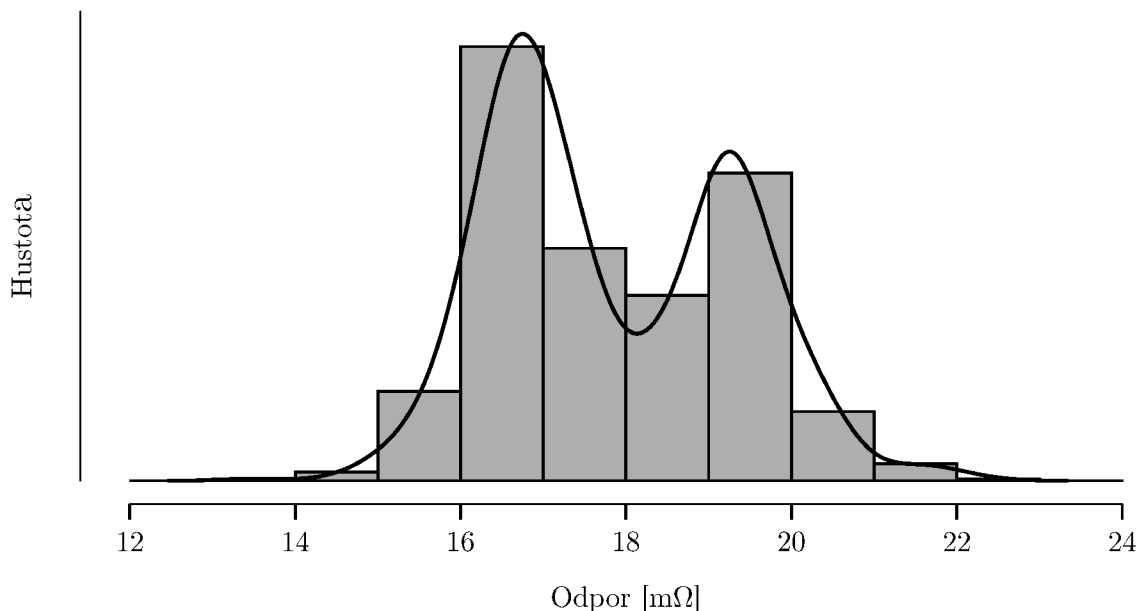
Nasleduje meranie vnútorného odporu (obr. 2.9). Pre toto meranie bol vyrobený vlastný držiak batérie s kontaktmi pre štvor-vodičové meranie. To nám umožnilo precízne meranie odporu na batérii a elimináciu odporu vodičov od záťaže. Ideálne by sme pre meranie napätia na článku mali použiť úplne osobitné kontakty, to bolo avšak príliš technicky náročné na dosiahnutie dobrej opakovateľnosti merania.



Obr. 2.9: Testovacie pracovisko na meranie článkov

Na vývody batérie bola pripojená elektronická záťaž AXIOMET AX-EL300W60A nastavená na prechodné impulzy o veľkosti 10 A a dĺžku impulzu 50 ms (nástupná a zostupná hrana 0.25 ms, najmenšia možná). Tieto impulzy boli

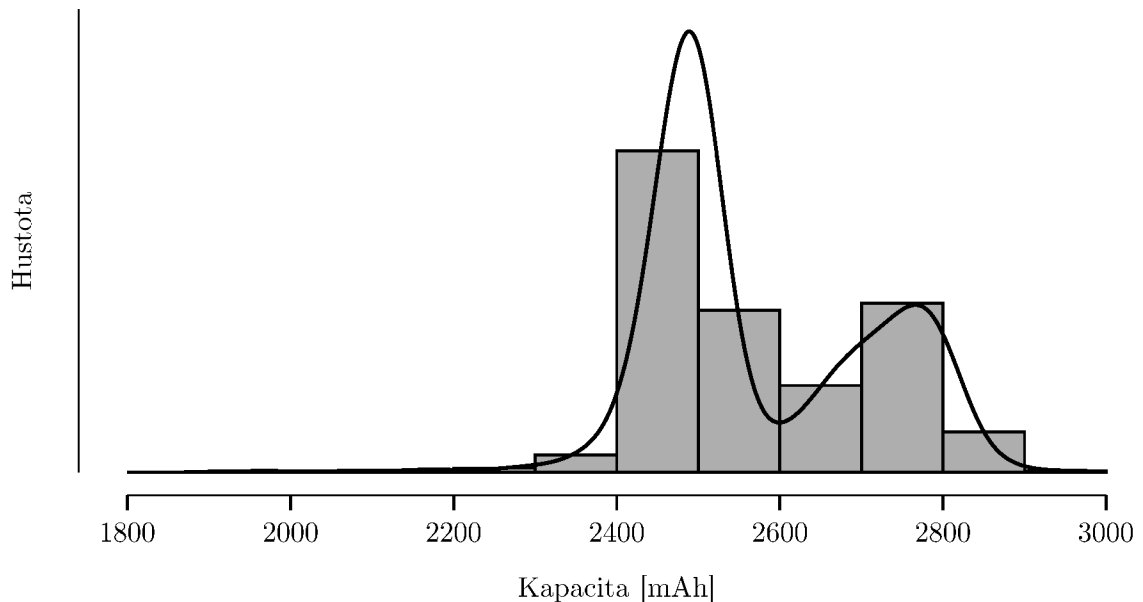
spúšťané funkčným generátorom s frekvenciou 0.7 Hz. Na napäťové svorky merania bol pripojený osciloskopom, ktorý v striedavej väzbe sledoval v podstate deriváciu priebehu napätia. Pomocou vstavanej funkcie measure bolo odčítavané špičkové napätie tohoto prechodu v milivoltoch, ktoré bolo po delení 10 zapísané do tabuľky ako hodnota interného odporu v miliohmoch. Príklad:  $175 \text{ mV}/10 \text{ A} = 17.5 \text{ m}\Omega$ . Metóda merania bola ľahko opakovateľná, pri ďalšom vložení tej istej batérie (popríklad pri jej pootočení v držiaku) sa menila hodnota odporu maximálne o niekoľko desiatín miliohmu. Pre eliminovanie merania so zlým kontaktom sa batéria niekoľkokrát pootočila v držiaku a zapísala sa najmenšia meraná hodnota. Keďže je meranie odporu veľmi rýchle, takto sa spolu odmeralo aspoň 6 článkov (tolko vie nabíjačka nabiť v sérii), ktoré nasledovne čakali na meranie kapacity. Výsledky sú zobrazené na obrázku 2.10. Všetky údaje boli štatisticky a graficky spracované v programe JASP [22].



Obr. 2.10: Histogram výsledkov merania vnútorného odporu článkov

Meranie kapacity článkov prebiehalo s prestavenou záťažou na režim meranie batérie, ktoré je automatizované. Zvolí sa nominálny vybíjací prúd a tzv. „cutoff“ (vypínacie) napätie a prúd. Na konci merania sa na displeji záťaže zobrazí celková kapacita batérie. Počas tohoto testovania musí mať záťaž presnú informáciu o napätí na batérii, preto je štvorvodičové zapojenie takisto použité a zapojené do záťaže namiesto do osciloskopu. Ten pre toto meranie nie je potrebný. Čím menší vybíjací prúd by sme zvolili, tým menej by boli výsledky skreslené hodnotou vnútorného odporu, avšak meranie by zároveň trvalo dlhšie. Pri vysokom vybíjacom prúde by sme ale riskovali nadbytočné prehrievanie článkov či priveľkú

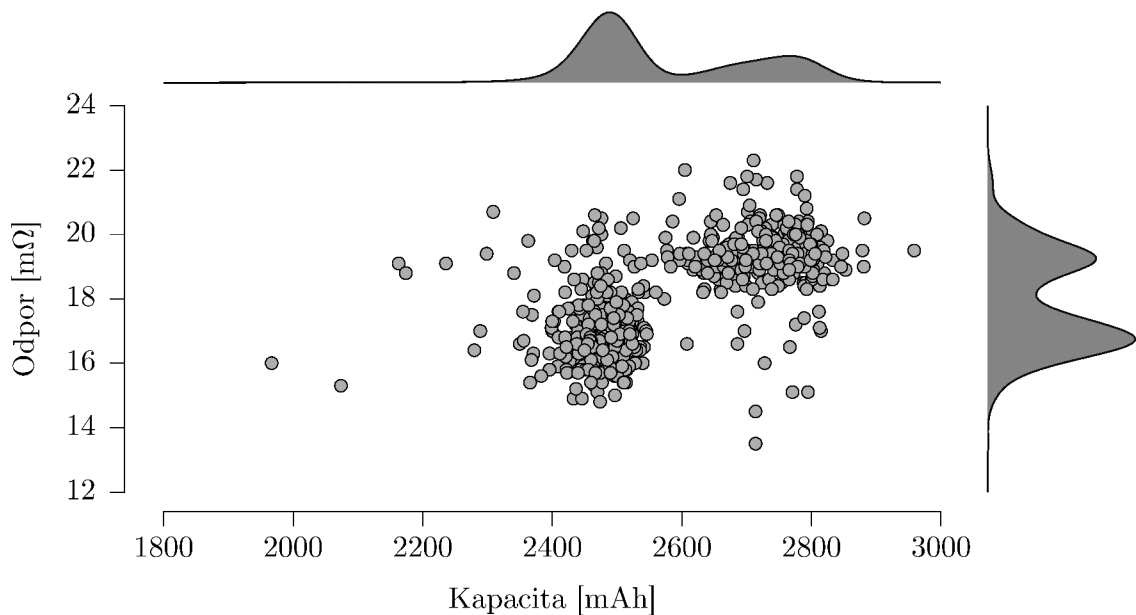
koreláciu hodnoty vnútorného odporu s nameranou kapacitou. Kompromisom bol zvolený vybíjací prúd na 10 A (3.3 C), koncové napätie na 3 V a koncový vybíjací prúd na 2 A. Výsledky kapacity z tohoto merania teda nevieme porovnať napríklad s nominálnou kapacitou alebo s inými meraniami, ktoré boli urobené za iných podmienok, avšak sú perfektne porovnateľné navzájom. Výsledky sú zobrazené na obrázku 2.11.



Obr. 2.11: Histogram výsledkov merania kapacity článkov

Po odmeraní vnútorného odporu a kapacity bolo každému článku priradené identifikačné číslo, ktoré naňho bolo napísané pre neskoršie dohľadanie. Niektoré články, ktoré boli zjavne chybné (dvojnásobný vnútorný odpor, extrémne podbitie od výroby) sa do tabuľky ani nezapisovali a boli vylúčené z testovania. Z 815 testovaných článkov sme takto vyradili hneď 15 chybných kusov. Korelácia vnútorného odporu a kapacity je znázornená na obrázku 2.12. Vidíme dve hlavné skupiny článkov. Prvá početnejšia skupina má menší vnútorný odpor, ale aj menšiu kapacitu, druhá skupina má väčšiu kapacitu aj vnútorný odpor. Zopár odľahlých článkov pozorujeme hlavne v oblasti s menšou celkovou kapacitou, avšak aj s relatívne nízkym odporom.

Po odmeraní všetkých článkov môžeme nájsť optimálnu konfiguráciu rozloženia jednotlivých článkov do segmentu. Pre tento účel vytvoril člen tímu algoritmus a program (nie je súčasťou tejto práce) na nájdenie tejto najlepšej konfigurácie. Takto vieme vyskladať batériu o celkovej kapacite 20.6 Ah (7.1 kWh, ak počítame s nominálnym napätím 345 V) a s celkovým vnútorným odporom (nepočítajúc spojovací materiál) 213.3 mΩ. Hodnota kapacity batérie vychádza z reálne

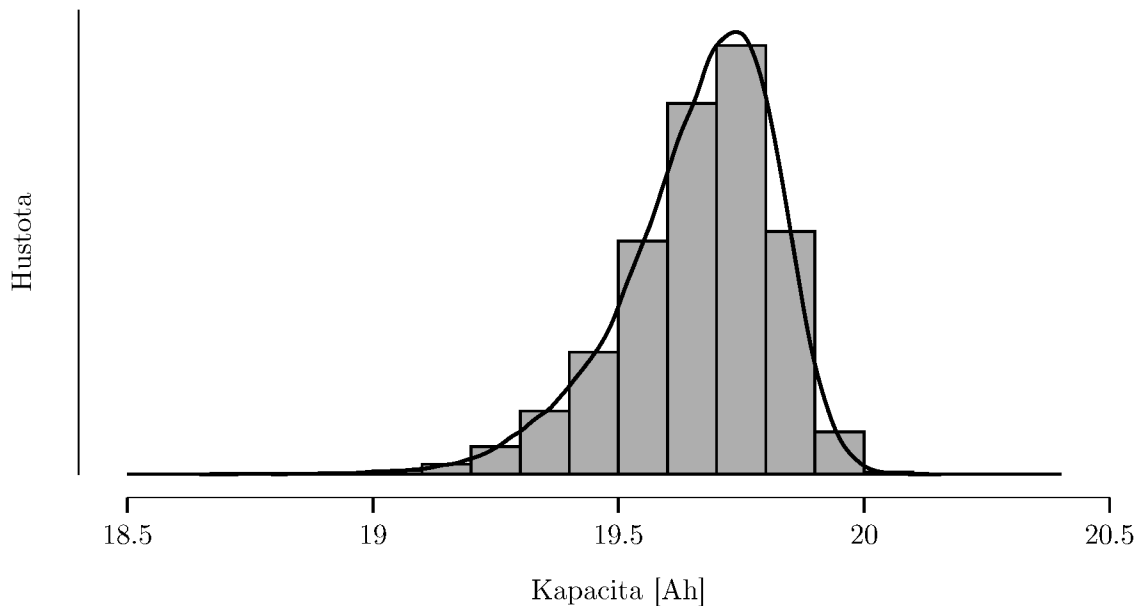


Obr. 2.12: Bodový graf korelácie vnútorného odporu a kapacity testovaných článkov

odmeraných dát pri laboratórnych podmienkach (2575 mAh na článok). Podľa technického listu by kapacita bola 24 Ah. Tú by sme možno dosiahli pri menšom vybijacom prúde. Rozdiel je avšak značný aj pri pomerne pomalom vybijaní. Testovanie článkov pri 10 A prúde je ekvivalentné celkovému vybijaciemu prúdu 80 A, alebo pri nominálnom napätí ekvivalentné výkonu 27.6 kW, čo je zhruba 35% maximálneho povoleného výkonu.

Ak by sme sa rozhodli, že nebudeme merať žiadne články (ich vnútorný odpor a kapacitu) a vyradzovali by sme iba od výroby články s nízkym napätím, naskytuje sa otázka, o koľko horšiu batériu by sme vyrobili. Pre tento účel sa dá využiť jednoduchá Monte Carlo štatistická metóda. Máme údaje o všetkých článkoch a budeme náhodne skladat segmenty batérie. Ako výstupná premenná bude celková kapacita batérie, ktorá je určená najslabším paralelným spojením ôsmich článkov. Histogram pre 100 000 náhodných výpočtov batérie je na obrázku 2.13. Stredná hodnota je 19.662 Ah a smerodajná odchýlka 158.37 mAh. Najhoršia konfigurácia vyšla v simulácii na 18.69 Ah, najlepšia nájdená má iba 20.11 Ah (oproti našej algoritmicky nájdenej 20.6 Ah). S pravdepodobnosťou 95% ( $2\sigma$ ) by sme dostali batériu niekde medzi 19.34 Ah a 19.98 Ah. Určite teda môžeme hovoriť o 3 až 6 % navýšení kapacity batérie.

Monte Carlo dáta sú napriek tomu viac optimistické, ako by mali byť, keďže články s veľmi veľkým odporom boli vyradzované ihneď pri meraní. Stalo sa, že celá dodaná šarža batérii (100+) vykazovala nadmerný odpor, často nad 30 mΩ, takmer dvojnásobok nominálneho vnútorného odporu. Tieto skutočnosti sme



Obr. 2.13: Simulácia kapacity batérie Monte Carlo pri náhodnej konfigurácii článkov

konzultovali aj priamo s výrobcou, články sme vrátili a po niekoľkých (aspoň čiastočne) zlých šaržiach sme našli dostatok batérií na dobrú konfiguráciu batérie. Ak by sme netestovali ani odpor, batéria mohla skončiť omnoho horšie.

Samotné balansovanie avšak nie je len o využiteľnej kapacite, ale aj o celkovom rozložení silných a slabých článkov či dobe nabíjania. Pri extrémne nevybalansovanej batérii sa doba nabíjania bude predlžovať, keďže sa rýchlo dostaneme na bod, kedy sú isté články plne nabité a iné nie. Takisto skupinky „slabších“ článkov koncentrované na jednom mieste môžu spôsobovať lokálne prehrievanie batérie. Tomuto sme sa poctivým meraním článkov aspoň do istej miery určite vyhli.

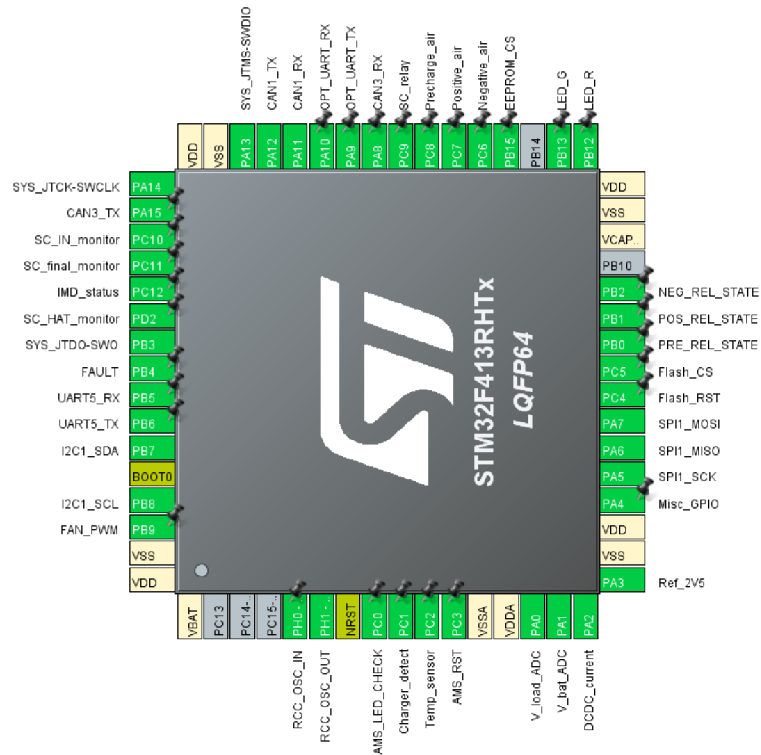
Súťažná disciplína akcelerácia pozostáva s meraného zrýchlenia na trati dlhej 75 m, tam si teda budeme môcť dovoliť vyťažiť batériu na plný výkon, teplotná kapacita batérií to podľa testovaní zvládne bez problémov. Pri disciplíne skidpad sa testuje celková stabilita auta a jazdia sa „osmičky“ s vnútorným polomerom 7.6 m, tam auto nebude schopné ísť na plný výkon bez straty stability. Najviac zatažiť batériu na stredný výkon a teploty budeme môcť pravdepodobne pri disciplíne Autocross, kde trať môže mať až 1.5 km, ktorá sa zvyčajne prejde za dobu 60 až 90 sekúnd [23]. Trať je veľmi technická, má veľa zákrut aj krátkych roviniek, takisto ako disciplína Endurance. To znamená prakticky striedanie prudkej akcelerácie s prudkým brzdením. Takáto doba neznie ako dlhá, avšak cez letné mesiace môže batéria začínať na pokojovej teplote vyššie 30 stupňov Celzia a takýmto vzduchom sa bude chladieť aj počas závodu. Pri dlhšie trvajúcej disciplíne nebudeme v priemere tento výkon presahovať, keďže nám pôjde viac

o celkovú spotrebu, aby sme došli do cieľa. Najdlhšia disciplína - Endurance má dĺžku 22 km a jej prejedenie môže trvať 25 až 30 minút, čím dostávame z našej kapacity batérie stredný výkon maximálne 14.2 kW (ak zanedbáme rekuperáciu energie späť do batérie). Batéria bude trvalo vyťažovaná, avšak prúdy budú relatívne nízke a straty tým pádom malé. To sú ale zatiaľ iba domnienky a skutočné testovanie bude možné až po finálnej kompletizácii auta, počas testovania a počas závodov. Všetky teploty batérie, ako aj prúdy, napätia a nastavenia ventilátorov nás budú zaujímať počas vyhodnocovania údajov po sezóne, preto sú tieto hodnoty posielané po CAN zbernici do hlavnej riadiacej jednotky s dataloggerom, ktorý ich uloží na neskoršiu analýzu, keď bude funkčná celá formula.

## 2.3 Firmvér pre systém BMS

Firmvér pre obe zariadenia s mikrokontrolérom - BMS Master a BMS Slave je implementovaný v jazyku C s asistenciou konfiguračného softvéru STM32CubeMX (obr. 2.14) a knižníc HAL. V tomto programe vieme graficky prideliť jednotlivé vývody mikrokontroléra k interným perifériám. Nastavenia periférií, ako aj komplexného hodinového stromu sa robia tiež v tomto programe, z ktorého si nasledovne vieme vygenerovať C kód, kde sú všetky periférie pred vstupom do hlavnej slučky inicializované (ale nemusia byť spustené). Ak upravujeme kód vo vyhradených miestach (alebo najjednoduchšie, iba si importujeme svoje súbory do hlavnej slučky), pri pregenerovaní kódu (napr. ak chceme zmeniť parametre periférií) nám CubeMX ponechá naše úpravy nedotknuté. Takto vygenerovaný kód sme upravovali vo vývojovom prostredí CLion a ladili pomocou rozhrania OpenOCD. Kód bol spravovaný pomocou VCS (Version Control Systems - systémy pre správu verzií) Git.

Systém Slave sa správa čisto ako jednotka odosielajúca dáta na zbernicu a mala by obsahovať čo najmenej logiky a čo najväčšiu flexibilitu ovládania pomocou jednotky Master. Pravidelne meria teploty a napätia batérie, ktoré posiela periodicky alebo na vyžiadanie jednotky Master. Takisto periodicky kontroluje stav NTC termistorov a vodičov vedúcim ku článkom, či sa nejaký neodpojil. V prípade zistenia takejto vážnej chyby ihneď samovoľne informuje jednotku Master. Meranie teplôt je implementované pomocou časovača, ktorý po pretečení vyvolá prerušenie a spustí sa obslužná funkcia. Tá vyčíta surové hodnoty z A/D prevodníka a prepne multiplexory na ďalšiu radu termistorov. Po odmeraní všetkých termistorov sa zavolá funkcia, ktorá prevedie všetky namerané hodnoty na teploty a odošle ich na zbernicu CAN. Meranie napätí článkov je periodicky spúšťané v hlavnej kontrolnej slučke. Vždy po odmeraní napätí sa spustí rutina na kontrolu odpojených vodičov



Obr. 2.14: Detail prostredia STMCubeMX pri úprave BMS Master konfigurácie

ku článkom. Postupným pripájaním pull-up a pull-down vie integrovaný obvod zistiť, či je pripojený k článku, alebo meria len falošné plávajúce napätie na filtračných kondenzátoroch. Takto splňame bezpečnostnú požiadavku v pravidlách súťaže (v prílohe). Systém Slave vie byť prepnutý systémom Master do nabíjacieho režimu, kde je umožnené zapínanie vybíjajúcich rezistorov. Ovládanie týchto rezistorov má na starosti systém Master, keďže teoreticky môže nastať situácia, kedy by boli v jednom segmente zapnuté všetky balansovacie rezistory naraz.

Každá jednotka Slave má na DPS pevne nastavené identifikačné číslo (pomocou skratovania prepojek). Takto každá vie, na aké príkazy má počúvať alebo ako má posilať údaje. Všetka komunikácia prebieha po zbernici CAN, preto je každá správa jedinečná a môže ju odosielať práve jedno zariadenie. V kóde je určená pre každú CAN správu prednastavené ID, ku ktorému každá Slave jednotka pripočíta svoje vlastné identifikačné číslo a správu odošle.

Systém Master je naprogramovaný ako stavový automat s piatimi stavmi - OK, BOOT, WAITING, FAULT a CHARGE. Po zapnutí systému prejde do stavu BOOT, kde skontroluje dostupnosť všetkých Slave modulov, mechanický stav vysokonapäťových relé (nemali by byť zaseknuté v zapnutej pozícii) a zabliká kontrolkou na palubnej doske, aby naznačil funkčnosť indikátora chyby. Nasledovne prechádza do stavu WAITING, kde čaká na signál od vodiča (stlačenie



tlačidla na volante) pre zapnutie AIR relé. Po príchode tohoto signálu zapína relé pre záporný pól batérie a pre prednabíjací obvod (sériový odpor s kladným pólom batérie na pomalé nabitie kondenzátorov v meniči motora). Po nabití medziobvodu v meniči sa zopne hlavné AIR relé kladného pólu a vypne sa prednabíjacie relé. Ak sa prednabíjanie dokončilo za dostatočne krátky čas a ak sa všetky zapínania a vypínania relé uskutočnili podľa príkazov, Master prechádza do stavu OK. V opačnom prípade prechádza do chybového stavu FAULT. V stave OK systém Master kontroluje a zbiera dáta od jednotiek Slave, robí z nich štatistiku (priemerná teplota, maximálna teplota článku, celkové napätie) a odosiela ich na hlavnú CAN zbernicu auta. Podľa zvolenej disciplíny, teploty batérie a prúdu batérie nastavuje chod ventilátorov. Takisto počíta spotrebovanú, resp. regenerovanú energiu a odhaduje zostávajúci SoC (State of Charge - stav nabitia).

V chybovom stave FAULT systém Master odpojí vypínací obvod, čím rozosvieti kontrolku o chybe BMS a čaká na stlačenie resetovacieho tlačidla, umiestneného na boku auta. Po prijatí resetovacieho signálu sa systém Master reštartuje, čím znova pri zapínaní prejde cez počiatočné kontroly.

Do stavu CHARGE sa systém Master dostane po pripojení batérie k nabíjačke, kedy je skratovaný detekčný vodič na zem. V tomto stave sa prestaví periféria CAN na rýchlosť 250 kbit/s, akú používa kupovaná nabíjačka. Podľa aktuálneho stavu nabitia si systém Master vyžiada od nabíjačky chcené nabíjacie napätie a prúd a reguluje balansovacie odpory pomocou systémov Slave.

## 2.4 Cena systému BMS

Systém BMS bol financovaný tímom TU Brno Racing a spoluprácou so sponzormi, ako napríklad firma Gatema Holding s.r.o., ktorá poskytla prototypovú výrobu DPS s rýchlym doručením, keďže majú výrobné priestory v Boskoviciach, neďaleko Brna. V priebehu vývoja systému bolo vyrobených viacero prototypov jednotlivých dosiek, ktoré boli revizované kvôli menším chybám v návrhu, nesplneniu požiadaviek (ako presunutie A/D prevodníka na externú dosku) alebo kvôli zmenám požiadaviek na systém (ako počet termistorov alebo obsluha viacerých funkcií v batérii).

V tabuľke 2.1 sú zhrnuté orientačné ceny systémov pre výrobu jedného systému (t.j. bez významných množstevných zliav). Ako externé súčasti sú zarátané komponenty, ktoré sa nenachádzajú priamo na DPS, ale sú nevyhnutné pre funkciu (ako NTC termistory alebo protikusy na konektory). Nie sú zarátané náhradné dosky, nadbytočné súčiastky (pre prípad straty pri osadzovaní), ani vývoj alebo prototypy.

Vývoj začal koncom roka 2019 a posledná DPS sa zadávala do výroby v máji 2021, preto je veľmi náročné odhadnúť čas (a teda aj cenu) vývoja. Môžeme povedať, že

vývoj architektúry, schém, DPS a osadzovanie, oživovanie, programovanie a ladenie dosiek zabralo niekoľko stoviek hodín, kým sa dosiahla plná funkčnosť a kým sa vyladili drobnosti a zvýšila spoľahlivosť systémov a ich komunikácie.

Tab. 2.1: Súhrn cien jednotlivých subsystémov

	Master	Slave	Hat	Spolu
Súčiastky	84 €	6x 143 €	75 €	1017 €
Externé súčasti	6 €	6x 40 €	7 €	253 €
DPS	30 €	6x 18 €	15 €	153 €
Spolu	120 €	6x 201 €	97 €	<b>1423 €</b>

## 2.5 Plány na zlepšenie systému pre Dragon e2

Systém Slave pracuje s dostatočnou presnosťou meraných dát. V ďalšej verzii je možné vylepšiť zástavbu, zmenšiť veľkosť DPS, znížiť cenu, spotrebu alebo použitím lepšieho A/D prevodníka zvýšiť presnosť merania na testovacie účely.

Z testovania článkov a segmentu je jasné, že ak chceme vytiahnuť z batérie maximálny možný výkon, je potrebné nájsť vhodnejšie články ako použité VTC6. Cylindrické články 18650 majú nevýhodu vo svojej vnútornej kompozícii, ktorú tvoria dve dlhé zrolované elektródy, ktoré prispievajú k pomerne veľkému vnútornému odporu. Oproti tomu prizmatické alebo „pouch“ články ponúkajú omnoho menšie hodnoty vnútorného odporu. Ako prípravy na plánovanie stavby nového monopostu eD2 bolo potrebné určiť články použité na ďalšiu generáciu, aby sa mohli odhadnúť veľkosti batérového obalu a zadnej časti auta. Po podrobnom prieskume trhu a po hľadaní článkov na stránkach výrobcov v Českej republike aj priamo v ázijských krajinách boli vybraté vysokonapäťové články od spoločnosti Grepow. Nadviazala sa s ňou komunikácia a spoločnosť bola ochotná poskytnúť nám konzultácie, ako aj parametre batérie, ktoré ani nemajú voľne dostupné na webových stránkach, spolu so vzorkami na testovanie. Po sezóne plánujeme tieto vzorky otestovať a porovnať s tabuľkovými hodnotami, čím určíme ďalší postup návrhu.

Určite ale chceme zvýšiť napätie batérie, čím zmenšíme celkový prúd a teda aj ohmické straty na vodičoch a samotných článkoch. Podľa pravidiel (v prílohe) môžeme používať trakčné napätie najviac 600 V. S vysokonapäťovými článkami Grepow (ktoré sa nabíjajú na 4.35 V a nominálne napätie majú 3.8 V) vieme dosiahnuť maximálne napätie 592 V pri konfigurácii 136S, s nominálnym napätím 517 V. Takto vieme dosiahnuť pravidlami dovoľený výkon 80 kW úplne bez problémov, prúd by nepresahoval 160 A. Pri návrhu tejto verzie BMS sa myslelo

na potenciálne budúce zvyšovanie napätia až na 600 V, toto napätie zvládnu všetky zariadenia a budú fungovať korektne. Preto na ďalšie verzie nebudú nutné veľké úpravy v návrhu.

Cieľom generačných vylepšovaní prvkov na závodnom aute je vždy aj znižovanie hmotnosti. Celková hmotnosť šiestich dosiek BMS Slave je 370 gramov, čo je 62 gramov na dosku. V porovnaní s ostatnými súčastami batérie to je relatívne zanedbateľná hmotnosť. Napriek tomu sa dá v ďalších verziách zapracovať na veľkosti DPS a použitých súčiastkach. Ak to dovoľí rozpočet, prechod na 4 vrstvy systému Slave umožní značnú úsporu plochy aj hmotnosti plošných spojov. Takisto to vylepší celkovú integritu digitálnych a analógových signálov.

# Záver

Výsledkom bakalárskej práce je návrh systému, schém a dosiek plošných spojov pre jednotlivé časti systému pre správu batérie formuly na elektrický pohon. Architektúra a jednotlivé komponenty boli zvolené po podrobnom prieskume trhu a požiadaviek. Všetky časti návrhu boli prispôsobené potrebám a konceptu auta Dragon e1 tímu TU Brno Racing a pravidlám medzinárodnej súťaže Formula Student.

Použitím distribuovanej topológie správy batérie bol systém funkčne rozdelený do troch subsystémov - Master (hlavná riadiaca časť), Hat (pomocná analógová doska) a Slave (meranie napätí a teplôt na článkoch, ovládanie balansovania pri nabíjaní). Subsystém Slave sa nachádza na každom segmente batérie, celkovo šesťkrát.

Systém vie monitorovať napätia jednotlivých článkov a ich teplotu s dostatočnou presnosťou. Spína výstup z batérie pomocou relé, ovláda ventilátory v batérii a sleduje prúd hlavným DC/DC meničom. Meria prúd trakčného systému batérie a ďalšie napätia potrebné na správnu funkciu bezpečnostných systémov. Spĺňa všetky technické a bezpečnostné požiadavky súťaže Formula Student, aby prešlo technickou kontrolou na súťažiach.

Je implementovaný a otestovaný riadiaci firmvér pre všetky jednotky, ktorý vie komunikovať so zvyškom auta a s počítačom pre ladiace a kontrolné účely. Takisto je implementovaný algoritmus balansovania článkov pri nabíjaní a komunikácia s externou nabíjačkou.

Systém je pripravený na použitie v pojazdnom aute Dragon e1 a odosiela všetky potrebné veličiny dataloggeru, aby bolo možné ďalej zlepšovať akumulátor, ako aj riadiaci systém BMS do ďalších sezón.

Pomocou batériového systému sa vykonali záťažové testy segmentov batérie a načrtli sa plány pre vylepšenia batérie na ďalšiu sezónu pre formulu Dragon e2. Určili sa súčasné nedostatky a vybrali sa batériové články s lepšími parametrami a menšími stratami, aby batéria nebola limitujúcim faktorom na závodoch.

# Literatúra

- [1] Mahammad A. Hannan, Md. Murshadul Hoque, Aini Hussain, Yushaizad Yusof, and Pin Jern Ker. State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *IEEE Access*, 6:19362–19378, 2018. doi:10.1109/ACCESS.2018.2817655.
- [2] Henrik Kjær Jensen. Battery test 18650, comparator. [Online]. Pravidelne aktualizované, [cit. 15.11.2020]. URL: <https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Common18650comparator.php>.
- [3] Texas Instruments. ISO1050 Isolated CAN Transceiver - datasheet. [Online], September 2019. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso1050.pdf>.
- [4] TU Brno Racing. Formula student. [Online], 2020. [cit. 7.11.2020]. URL: <https://tubrnoracing.cz/en/1746-2/formula-student/>.
- [5] TU Brno Racing. Achievements. [Online], 2020. [cit. 7.11.2020]. URL: <https://tubrnoracing.cz/en/1746-2/achievements/>.
- [6] Henrik Kjær Jensen. Sony US18650VTC6 3000mAh review. [Online], July 2016. [cit. 15.11.2020]. URL: [https://lygte-info.dk/review/batteries2012/SonyUS18650VTC63000mAh\(Green\)UK.html](https://lygte-info.dk/review/batteries2012/SonyUS18650VTC63000mAh(Green)UK.html).
- [7] IXYS CORPORATION. XPTTM 650V IXXN110N65B4H1 GenX4TM w/ Sonic Diode. [Online], 2019. Datasheet. URL: [https://m.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/discrete\\_igbts/littelfuse\\_discrete\\_igbts\\_xpt\\_ixxn110n65b4h1\\_datasheet.pdf](https://m.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/discrete_igbts/littelfuse_discrete_igbts_xpt_ixxn110n65b4h1_datasheet.pdf).
- [8] Rui Xiong. *Battery Management Algorithm for Electric Vehicles*. Springer, 2020.
- [9] Esparza O., Leichtfried W., González F., Microchip Technology Inc. Transitioning applications from CAN 2.0 to CAN FD. *iCC 2015: CAN in Automation*, 2015. URL: [https://www.can-cia.org/fileadmin/resources/documents/proceedings/2015\\_esparza.pdf](https://www.can-cia.org/fileadmin/resources/documents/proceedings/2015_esparza.pdf).
- [10] LEM. Current Transducer HTFS 200 ... 800-P - datasheet. [Online], August 2020. URL: [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/htfs\\_200\\_800-p.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/htfs_200_800-p.pdf).
- [11] STMicroelectronics. STM32F413xG STM32F413xH Datasheet - production data. [Online], September 2017. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f413rh.pdf>.

- [12] Texas Instruments. WEBENCH® POWER DESIGNER. [Online]. URL: <https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator>.
- [13] Winbond. 3V 16M-bit serialflash memory with dual/quad SPI - datasheet. [Online], September 2019. URL: <https://www.winbond.com/resource-files/w25q16jvspirevd08122016.pdf>.
- [14] STMicroelectronics. M95512 512-Kbit serial SPI bus EEPROM. [Online], November 2018. Datasheet - production data. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/m95512-df.pdf>.
- [15] P.G. André and K. Wyatt. *EMI Troubleshooting Cookbook for Product Designers*. Electromagnetic Waves. Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [16] Analog Devices. ADBMS1818: 18-Cell Battery Monitor with Daisy Chain Interface. [Online], January 2021. datasheet. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adbms1818.pdf>.
- [17] Keysight Technologies. Practical Temperature Measurements (Application Note). [Online], 2020. URL: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-06789/application-notes/5965-7822.pdf>.
- [18] Murata Manufacturing Co., Ltd. NTC Thermistors. [Online], March 2020. URL: <https://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/thermistor/ntc/r44e.ashx?la=en-us>.
- [19] Bender GmbH & Co. KG. Insulation monitoring device (IMD) for unearthed DC drive systems (IT systems) in electric vehicles. [Online], 2021. Datasheet. URL: [https://www.bender.de/en/products/insulation-monitoring/isometer\\_ir155-3203ir155-3204](https://www.bender.de/en/products/insulation-monitoring/isometer_ir155-3203ir155-3204).
- [20] Texas Instruments. CD4048: CMOS Multifunction Expandable 8-Input Gate. [Online], October 2003. datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4048b.pdf>.
- [21] Petr Kahle Jiří Starý. Plošné spoje a povrchová montáž. Elektronické skriptá, 2003.
- [22] JASP Team. JASP (Version 0.14.1)[Computer software], 2020. URL: <https://jasp-stats.org/>.
- [23] Formula Student Czech Republic. Event 2019 results. [Online], 2019. URL: <https://www.fsczech.cz/2019/index.php>.

- [24] Formula Student. Formula Student Rules 2020, Version: 1.0, Rev-1fcc153. [Online], 2020. [cit. 1.11.2020]. URL: [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).

## Zoznam symbolov a skratiek

<b>A/D</b>	Analóg - Digitál (prevodník)
<b>AIR</b>	Accumulator Isolation Relay - izolačné relé akumulátora
<b>AMS</b>	Accumulator Management System - synonymum BMS
<b>AUX</b>	Auxiliary - pomocný
<b>BMS</b>	Battery Management System - batériový monitorovací systém
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>D/A</b>	Digitál - Analóg (prevodník)
<b>DC</b>	Direct Current - jednosmerný prúd
<b>DPS</b>	Doska Plošných Spojov
<b>DMA</b>	Direct Memory Access - priamy prístup do pamäte
<b>EEPROM</b>	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
<b>FS</b>	Formula Student
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor - bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom
<b>IMD</b>	Insulation Monitoring Device - zariadenie monitorujúce elektrickú izoláciu
<b>I2C</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>LUT</b>	Look-up table - náhľadová tabuľka
<b>LVS</b>	Low Voltage System - nízkonapäťový systém
<b>NTC</b>	Negative Temperature Coefficient - záporný teplotný koeficient
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board (DPS)
<b>ppm</b>	parts per million - milióntina
<b>PTC</b>	Positive Temperature Coefficient - kladný teplotný koeficient
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation - pulzno-šírková modulácia
<b>SAR</b>	Succesive Approximation - postupná aproximácia

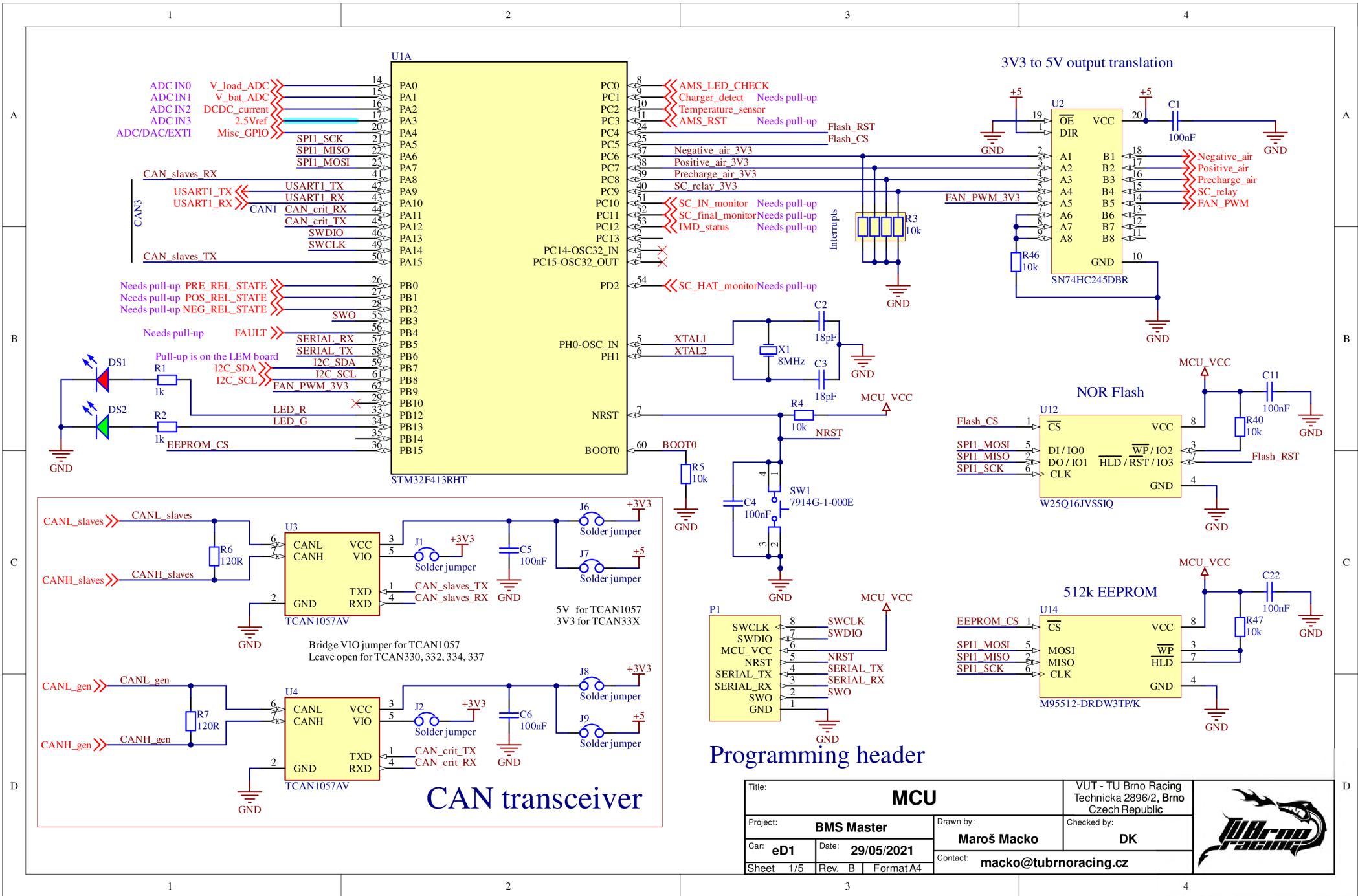


<b>SC</b>	Shutdown Circuit - bezpečnostný vypínací obvod auta
<b>SCS</b>	Safety Critical Signal - signál kritický pre bezpečnosť
<b>SMT</b>	Surface Mount Technology - technológia povrchovej montáže
<b>SoC</b>	State of Charge - stav nabitia
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>SRAM</b>	Static Random-Access Memory
<b>THT</b>	Through-Hole technology - technológia priechodného otvoru
<b>TS</b>	Trakčný Systém
<b>TSAL</b>	Tractive System Active Light - kontrolka zapnutého trakčného systému
<b>UL</b>	Underwriters Laboratories
<b>VCS</b>	Version Control Systems - systémy pre správu verzií

# Zoznam príloh

A Schéma systému Master	59
B Schéma systému Slave	65
C Schéma systému Hat	70
D Návrh DPS Slave	74
E Návrh DPS Master	77
F Návrh DPS Hat	80
G Pravidlá BMS pre Formula Student	83

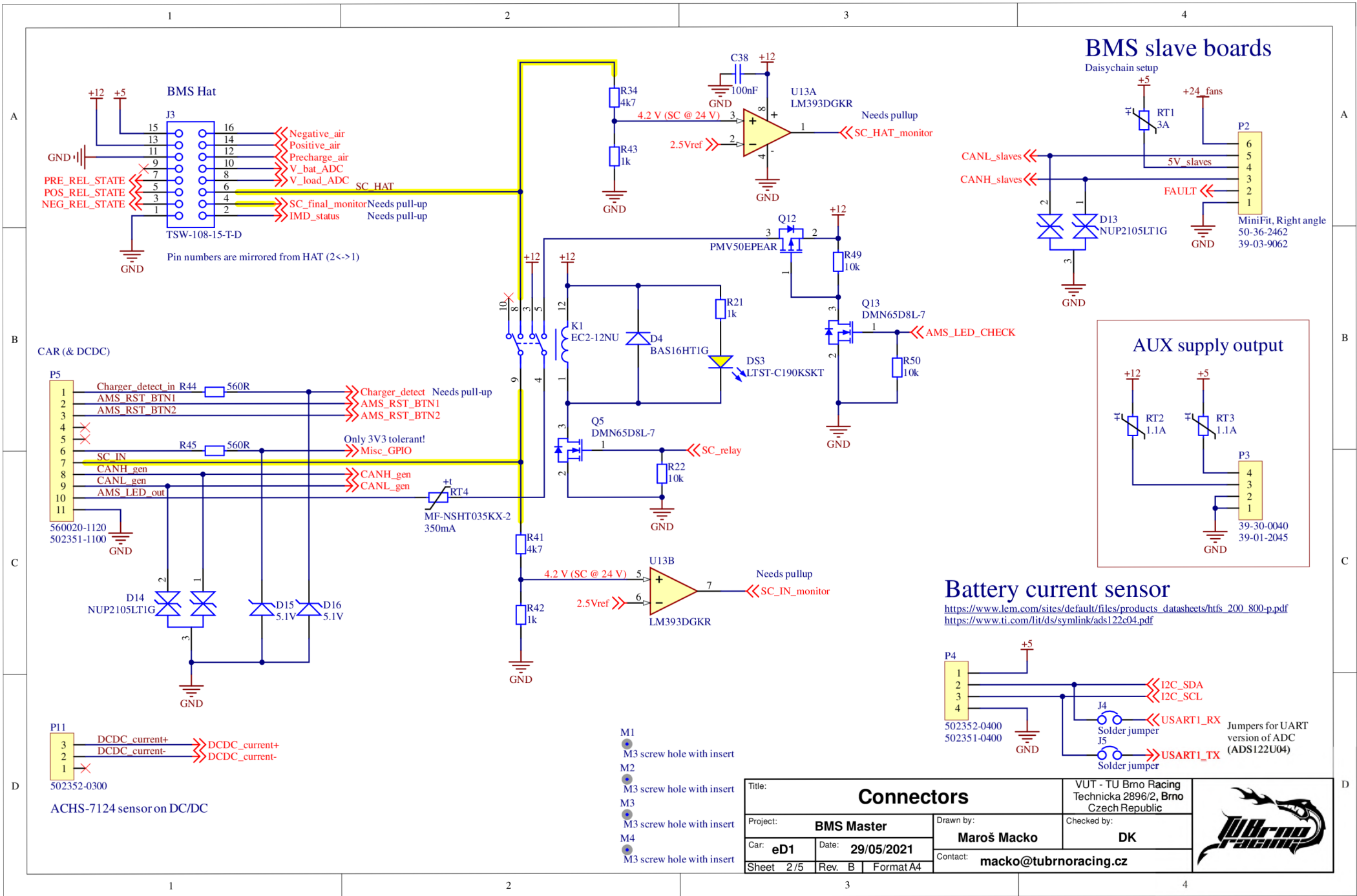
# **A Schéma systému Master**

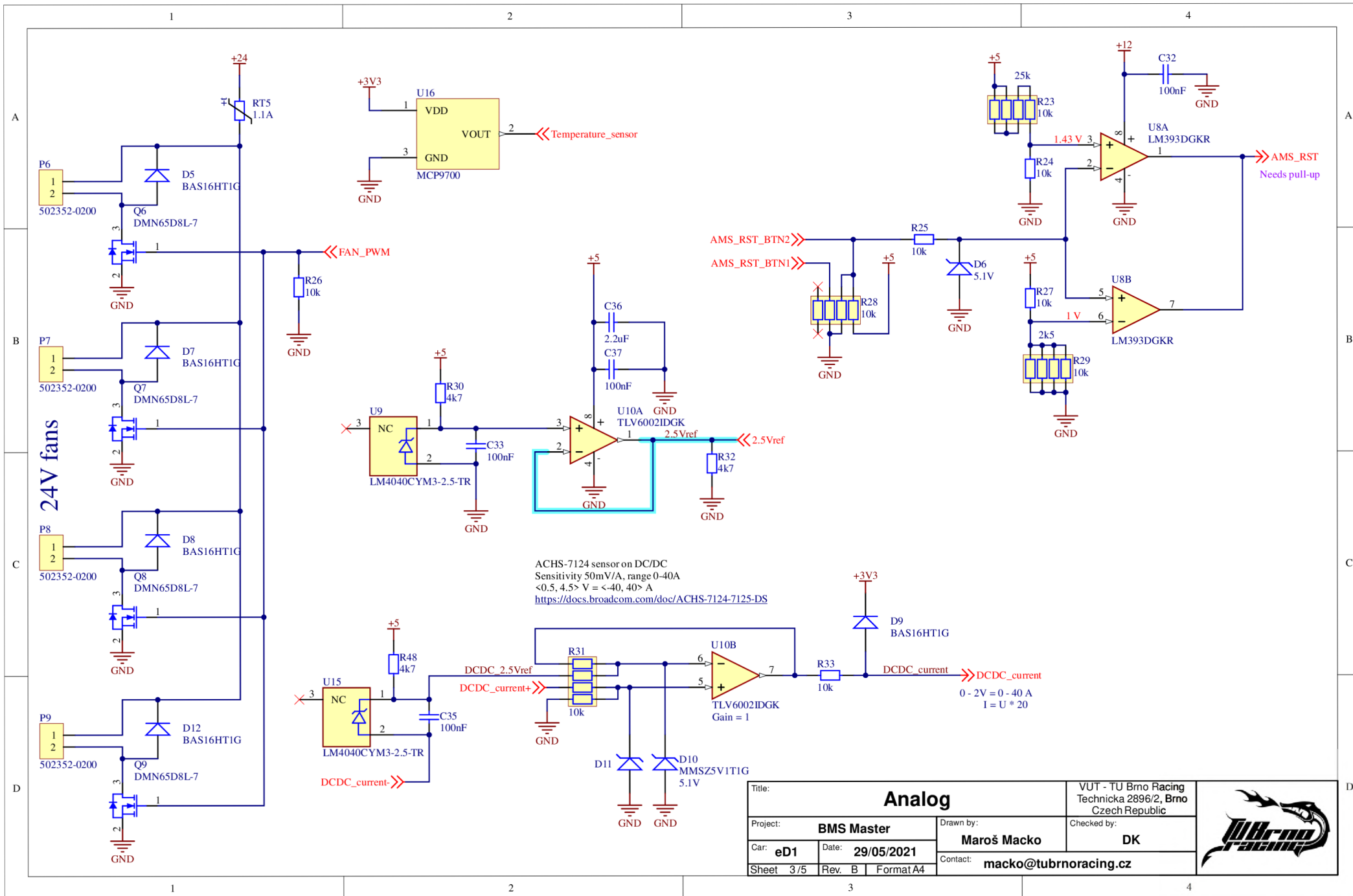


### Programming header

Title: <b>MCU</b>		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Master</b>	Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>DK</b>	
Car: <b>eD1</b>	Date: <b>29/05/2021</b>	Contact: <b>macko@tubnracing.cz</b>	
Sheet 1/5	Rev. B	Format A4	

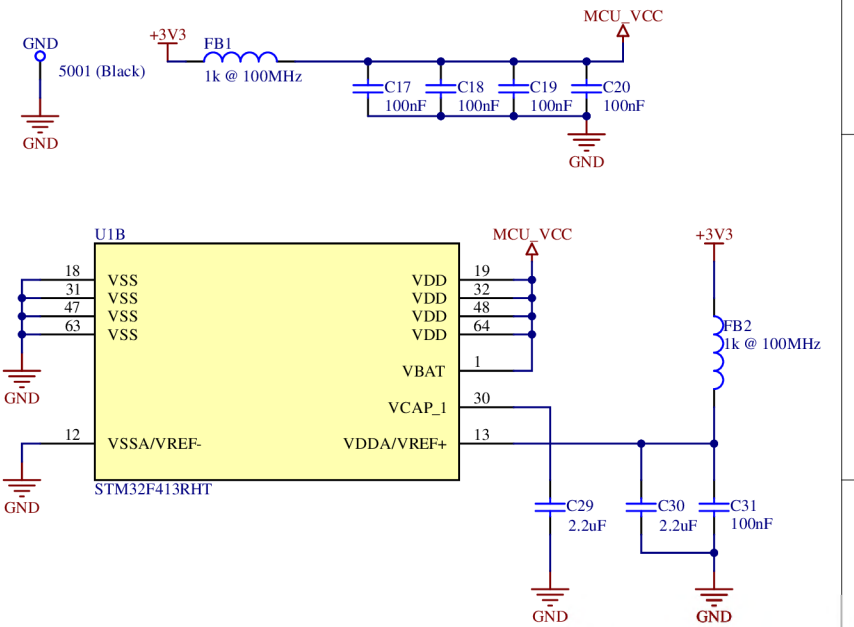
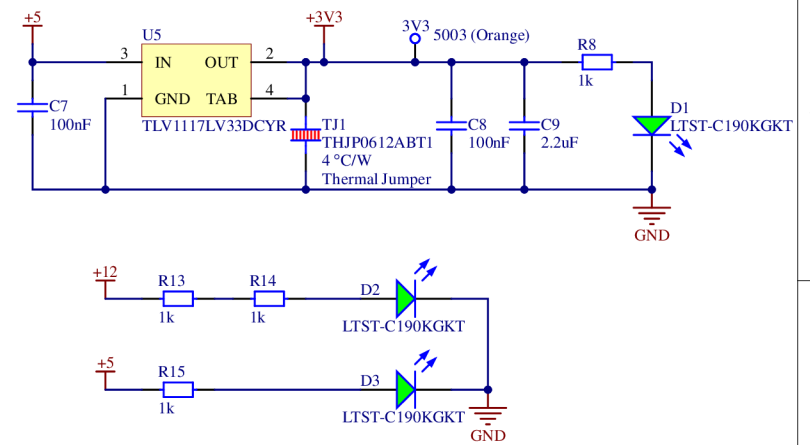
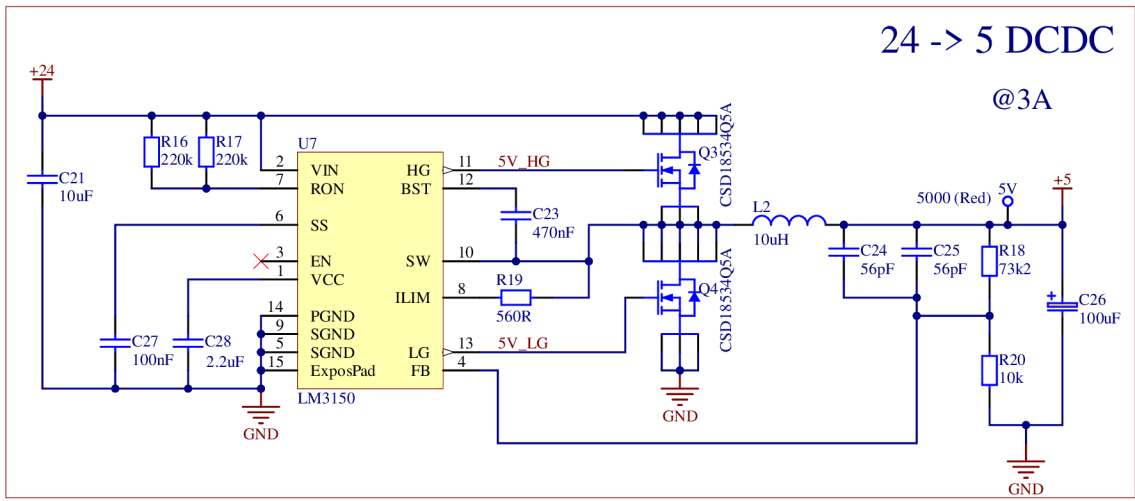
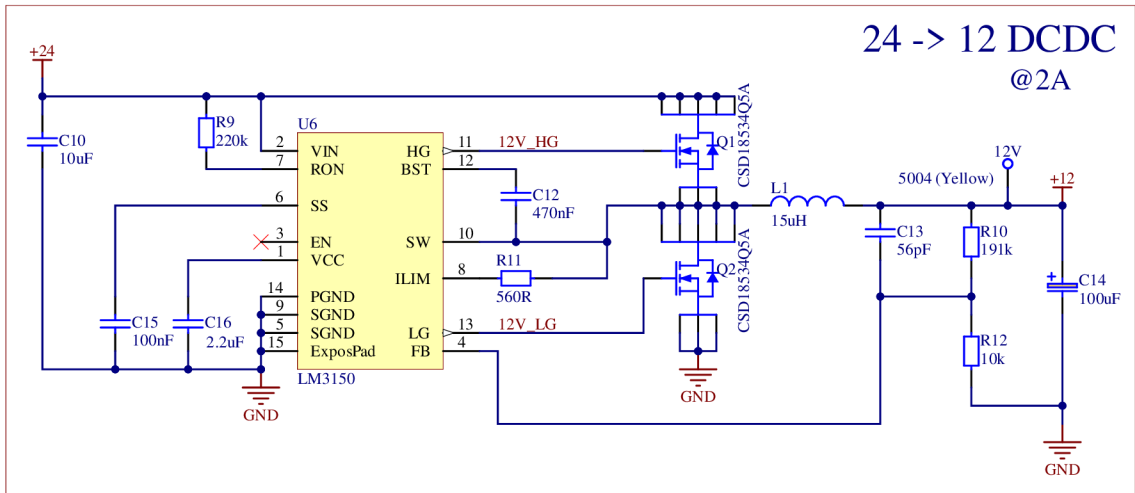




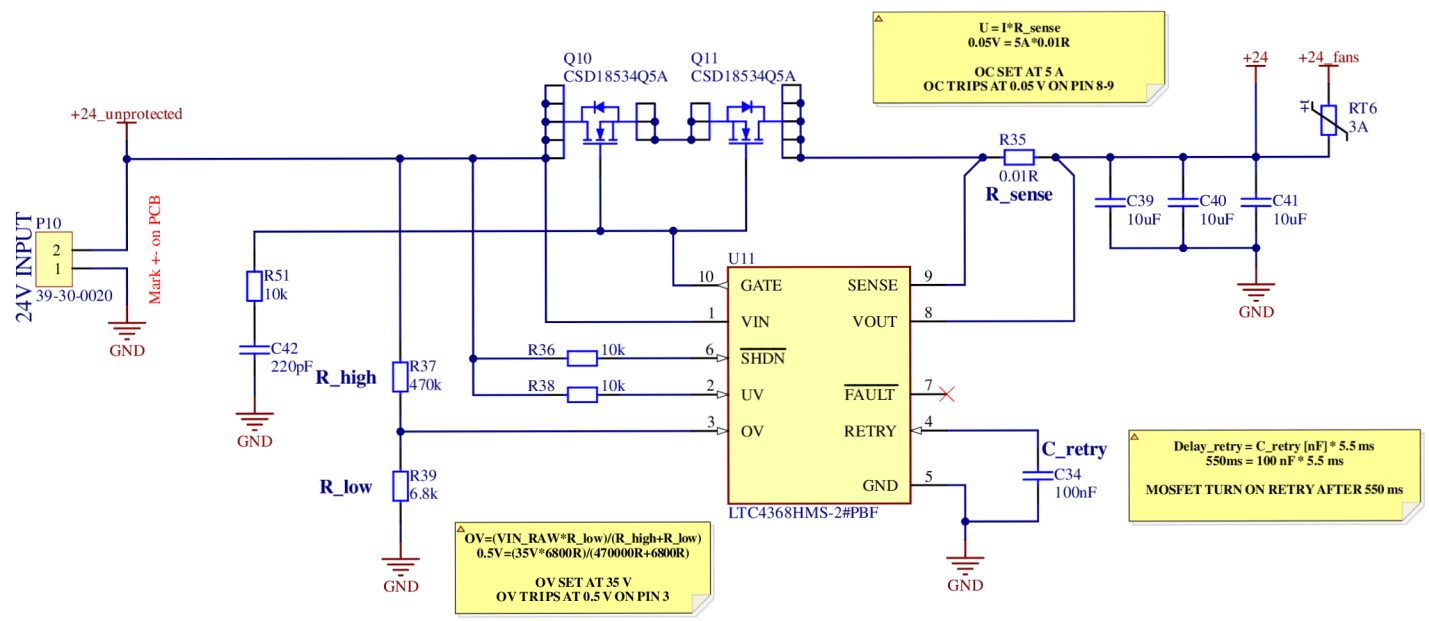


Title: <b>Analog</b>		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Master</b>	Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>DK</b>	
Car: <b>eD1</b>	Date: <b>29/05/2021</b>	Contact: <b>macko@tubnracing.cz</b>	
Sheet 3/5	Rev. B	Format A4	





Title: <b>Power</b>			VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Master</b>		Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>DK</b>	
Car: <b>eD1</b>	Date: <b>29/05/2021</b>	Contact: <b>macko@tubnracing.cz</b>		
Sheet 4/5	Rev. B	Format A4		



$U = I \cdot R_{sense}$   
 $0.05V = 5A \cdot 0.01R$   
**OC SET AT 5 A**  
**OC TRIPS AT 0.05 V ON PIN 8-9**

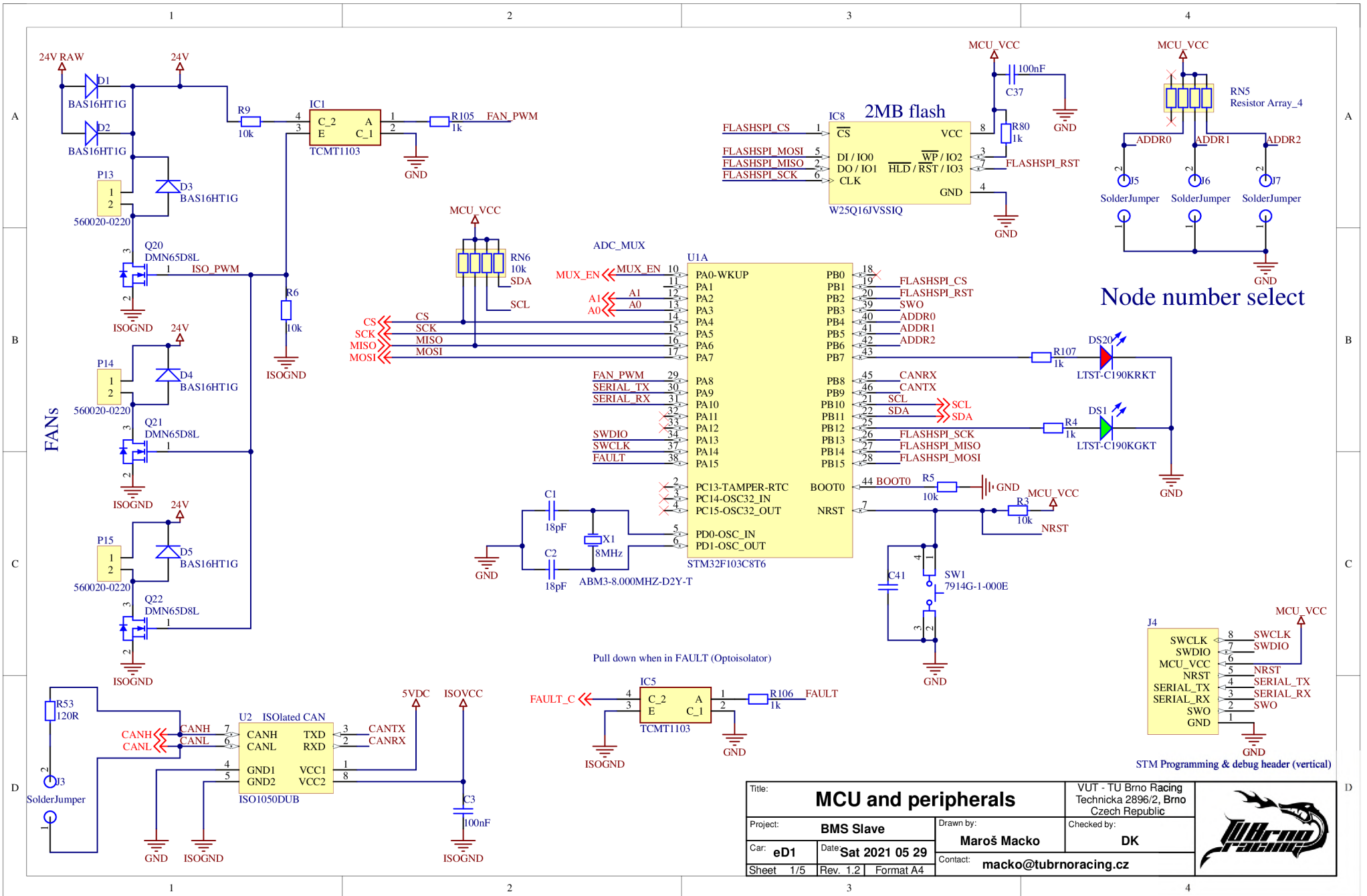
$OV = (VIN_{RAW} \cdot R_{low}) / (R_{high} + R_{low})$   
 $0.5V = (35V \cdot 6800R) / (47000R + 6800R)$   
**OV SET AT 35 V**  
**OV TRIPS AT 0.5 V ON PIN 3**

$Delay_{retry} = C_{retry} [nF] \cdot 5.5 ms$   
 $550ms = 100 nF \cdot 5.5 ms$   
**MOSFET TURN ON RETRY AFTER 550 ms**

Title: <b>Power Input Protection</b>			VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Master</b>		Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>DK</b>	
Car: <b>eD1</b>	Date: <b>29/05/2021</b>	Contact: <b>macko@tubnoracing.cz</b>		
Sheet 5/5	Rev. B	Format A4		

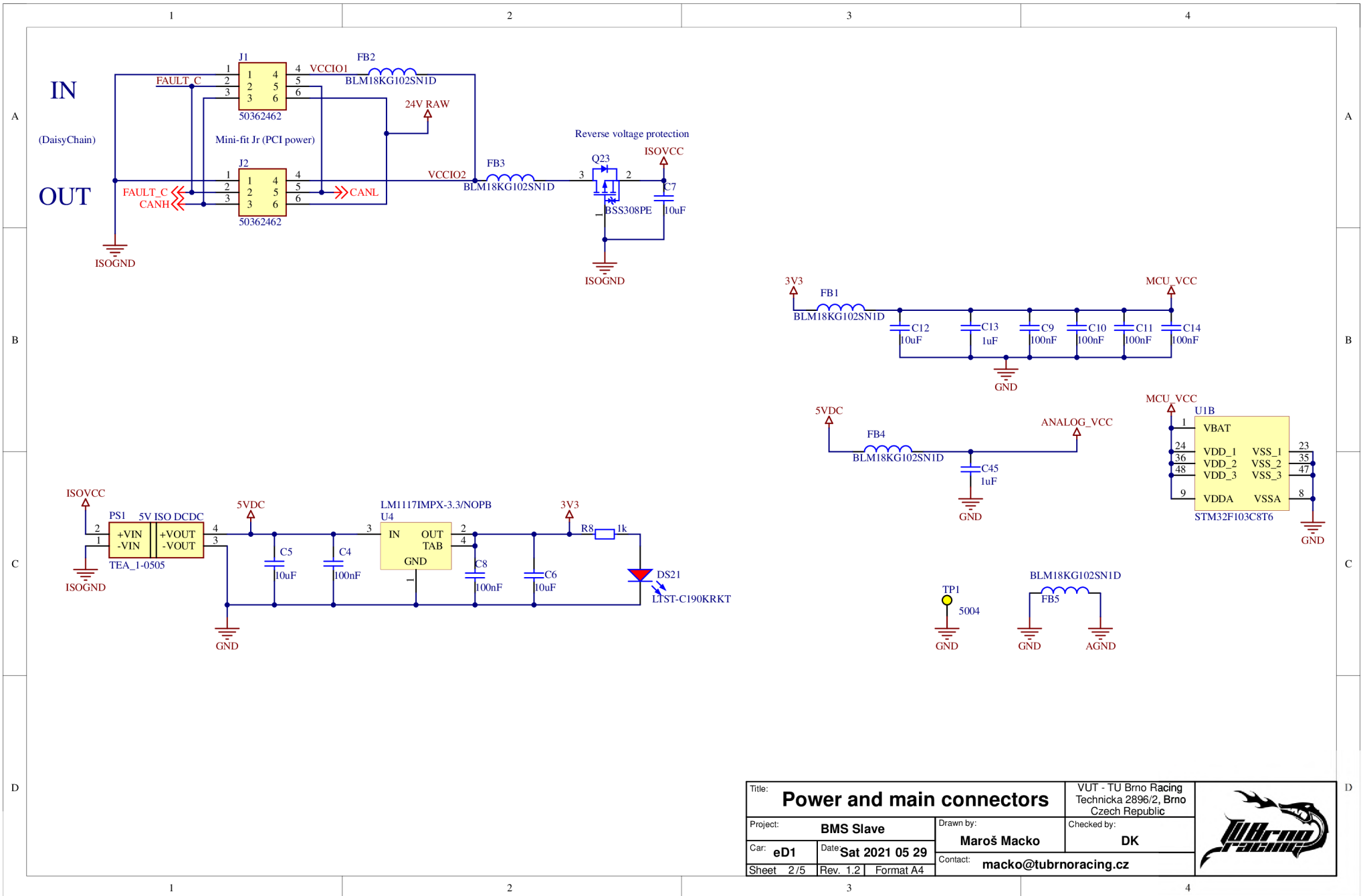



## **B Schéma systému Slave**

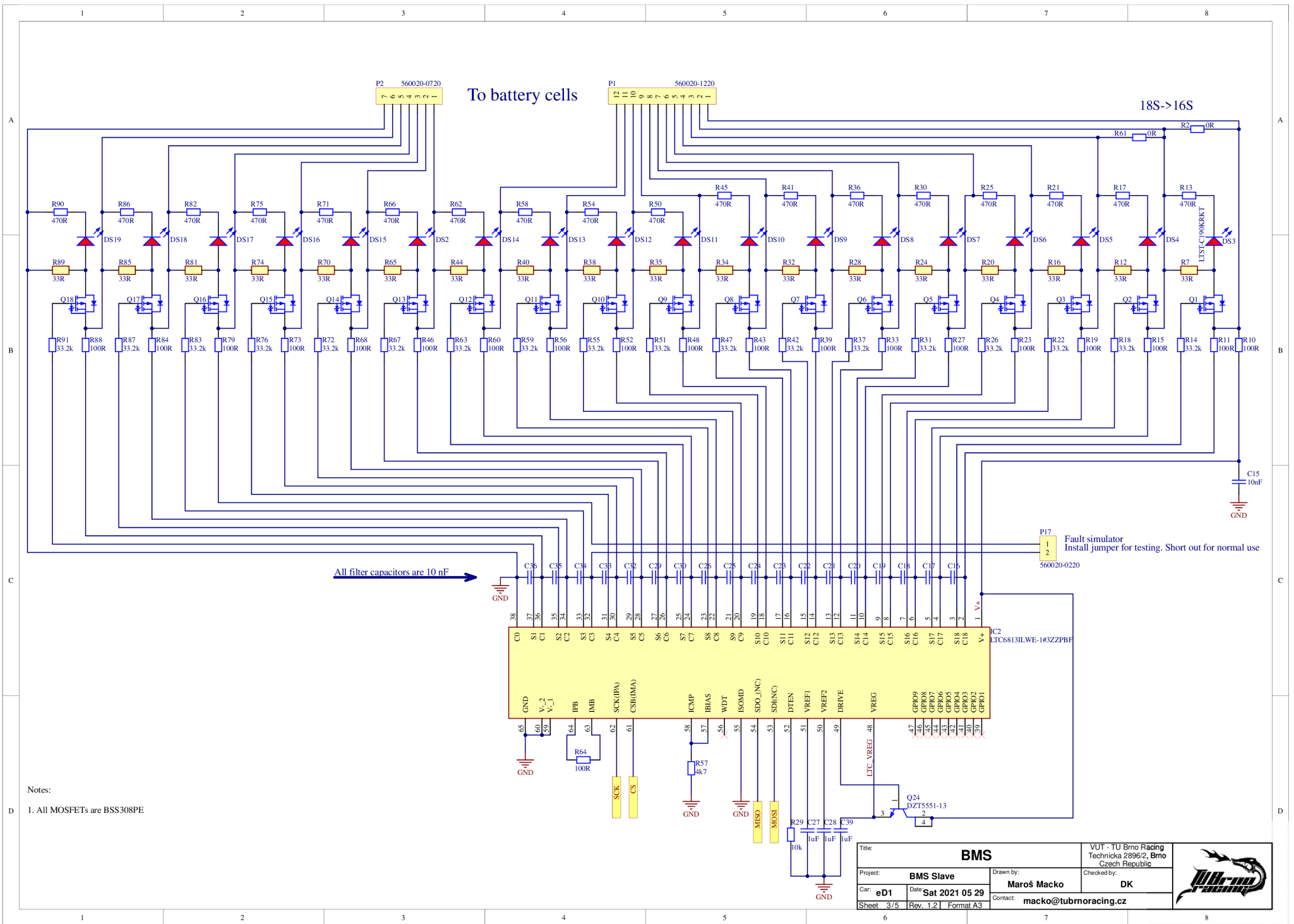


Title: <b>MCU and peripherals</b>		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Slave</b>	Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>DK</b>	
Car: <b>eD1</b>	Date: <b>Sat 2021 05 29</b>	Contact: <b>macko@tubrnoracing.cz</b>	
Sheet 1/5	Rev. 1.2   Format A4		





Title: <b>Power and main connectors</b>		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic		
Project: <b>BMS Slave</b>	Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>DK</b>		
Car: <b>eD1</b>	Date: <b>Sat 2021 05 29</b>	Contact: <b>macko@tubnracing.cz</b>		
Sheet: <b>2/5</b>	Rev: <b>1.2</b>	Format: <b>A4</b>		

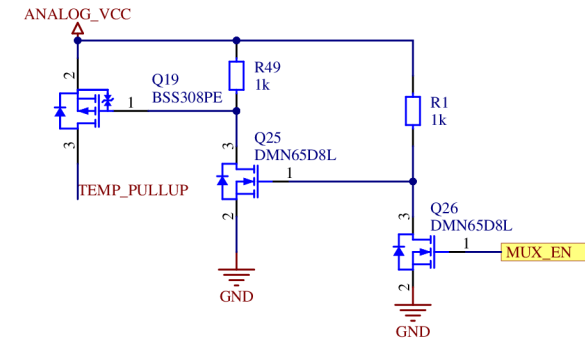
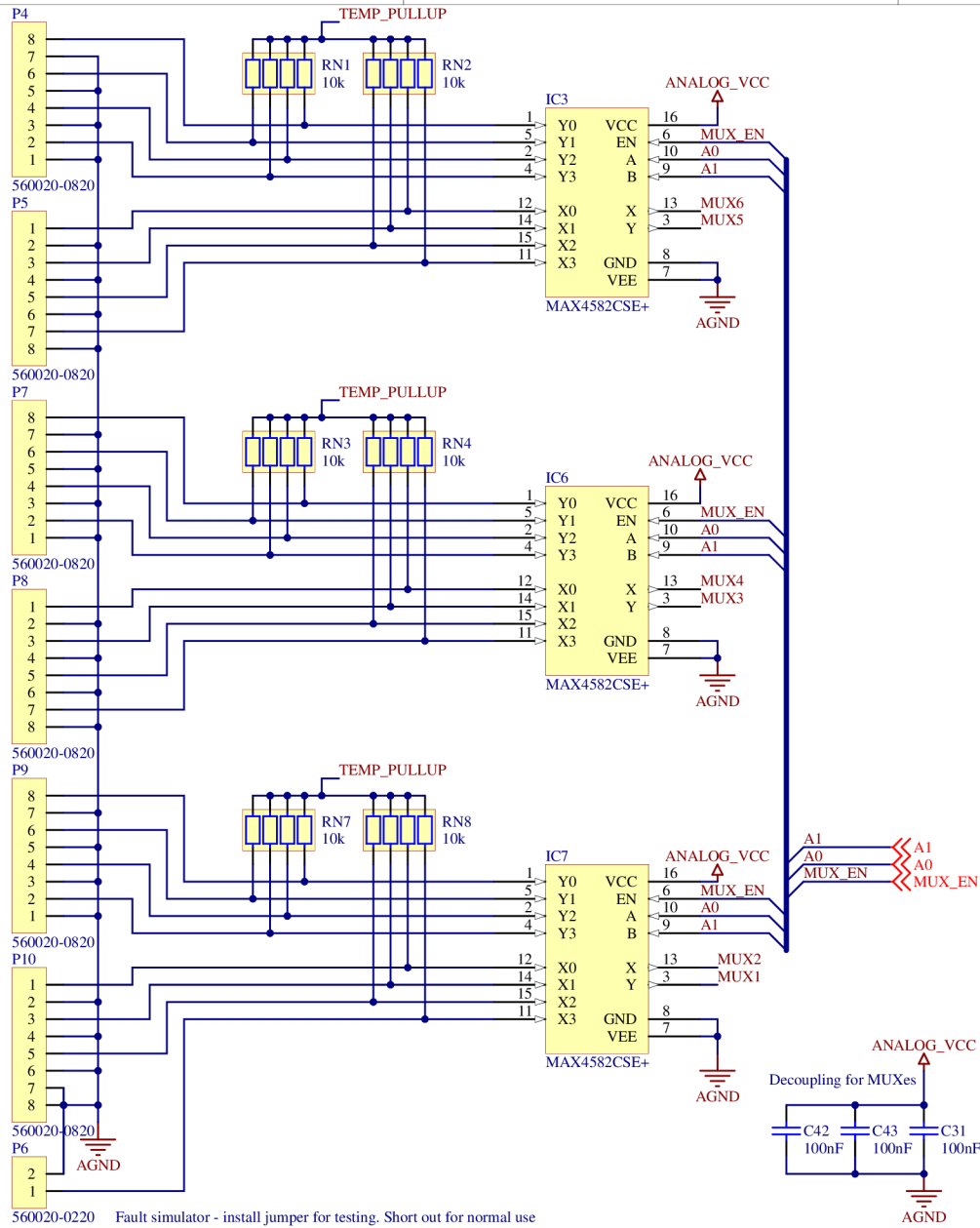


- Notes:
- All MOSFETs are BSS308PE

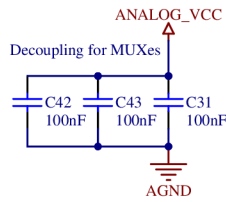
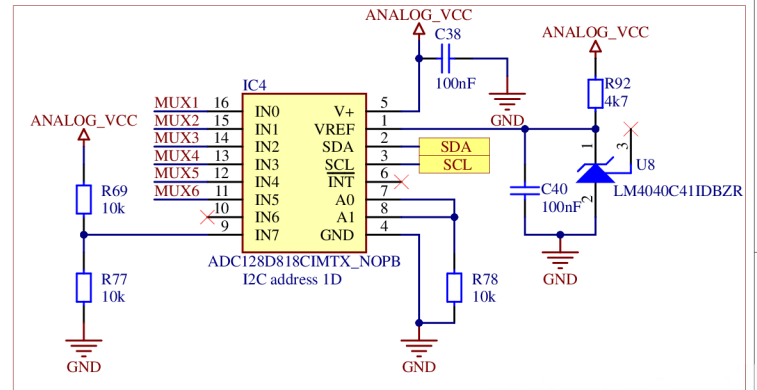
<b>BMS</b>		VUF - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project:	BMS Slave	Drawn by:	Maroš Macko
Car:	eD1	Date:	Sat 2021 05 29
Sheet:	3/5	Rev:	1.2   Format A3
		Contact:	macko@tubmoracing.cz
		Checked by:	DK




# To 10k NTC thermistors

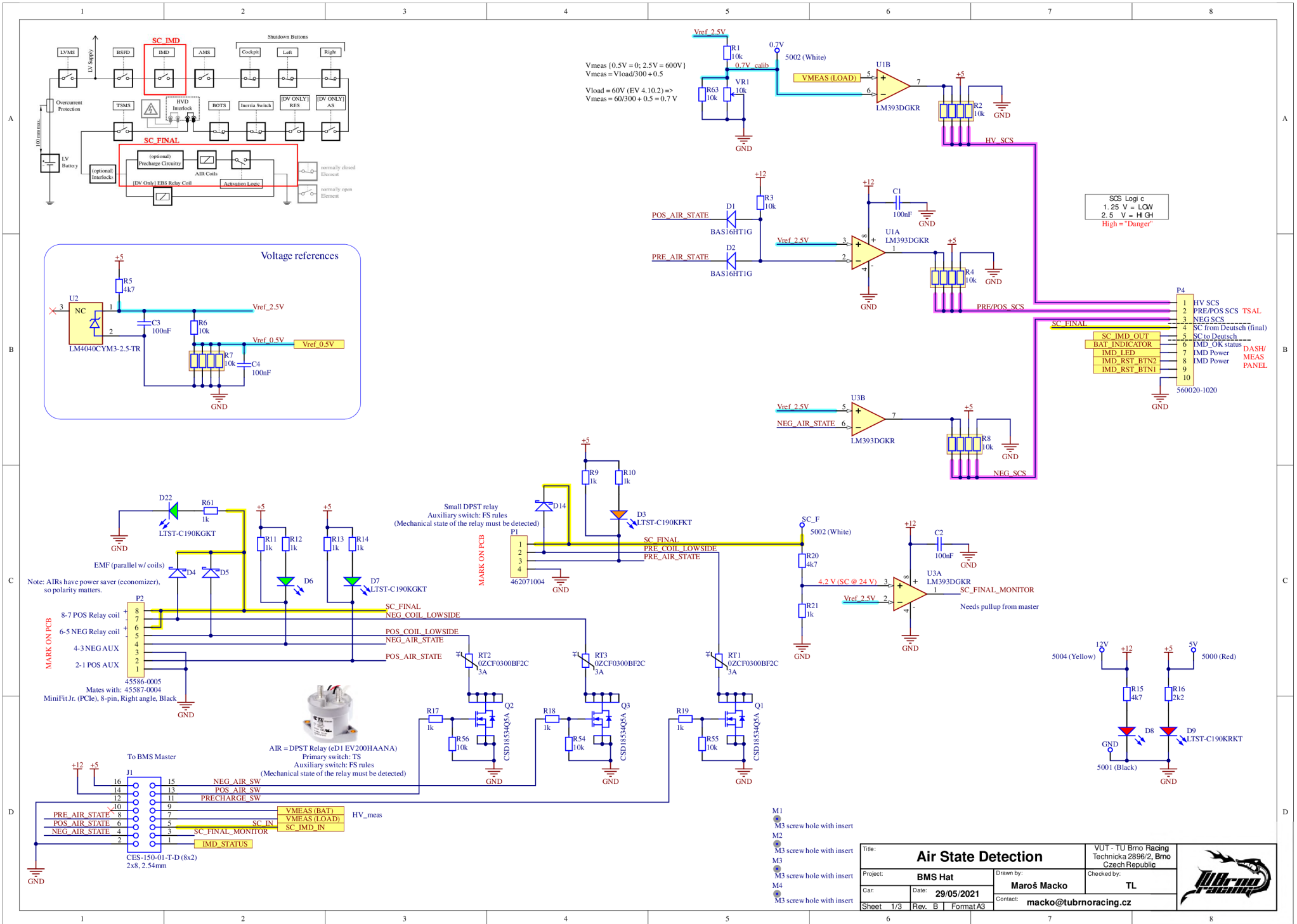



## ADC for thermistors

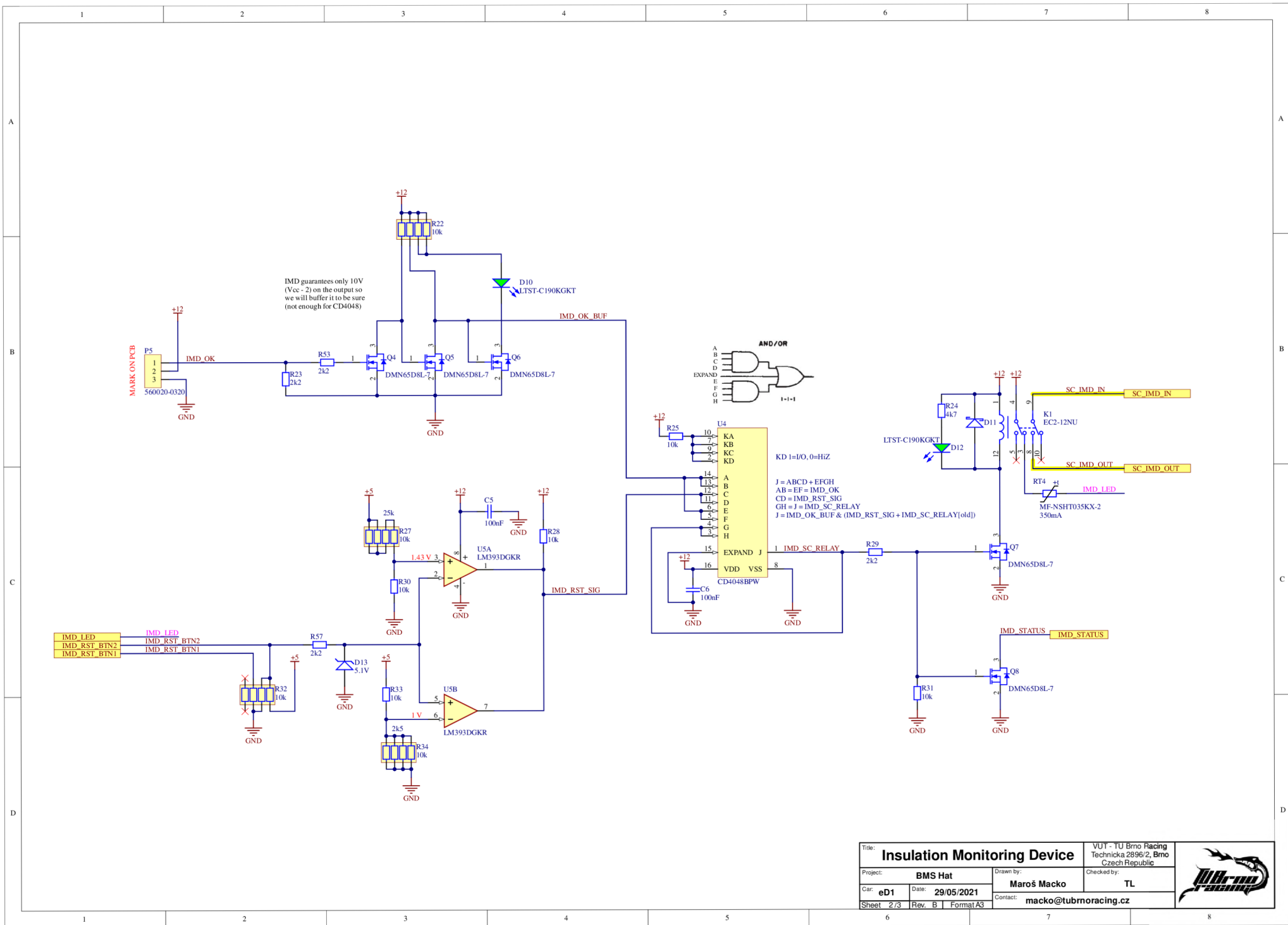


Title: <b>Thermistors</b>		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Slave</b>	Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>DK</b>	
Car: <b>eD1</b>	Date: <b>Sat 2021 05 29</b>	Contact: <b>macko@tubnracing.cz</b>	
Sheet: 4/5	Rev.: 1.2   Format: A4		

## **C Schéma systému Hat**



<b>Air State Detection</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Hat</b>	Date: <b>29/05/2021</b>	Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>TL</b>
Car:	Rev: <b>B</b>	Contact: <b>macko@tubnoracing.cz</b>	
Sheet: 1/3	Format: A3		

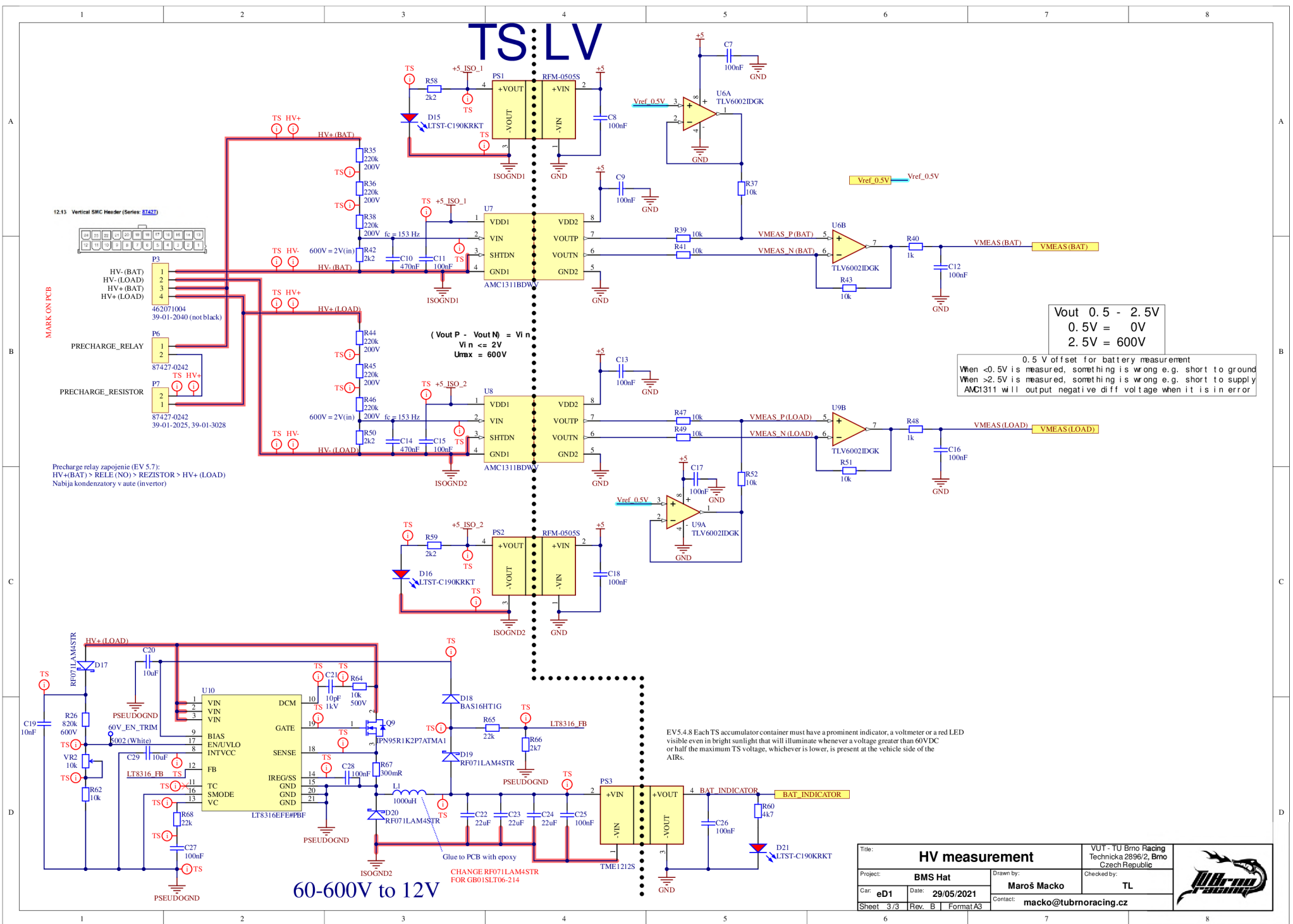


Title: <b>Insulation Monitoring Device</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Hat</b>	Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>TL</b>	
Car: <b>eD1</b>	Date: <b>29/05/2021</b>	Contact: <b>macko@tubnoracing.cz</b>	
Sheet: <b>2/3</b>	Rev: <b>B</b>	Format: <b>A3</b>	





# TS LV



12.13 Vertical SMC Header (Series: 8742)

MARK ON PCB  
 HV-(BAT)  
 HV-(LOAD)  
 HV+(BAT)  
 HV+(LOAD)  
 PRECHARGE\_RELAY  
 PRECHARGE\_RESISTOR

Precharge relay zapojenie (EV 5.7):  
 HV+(BAT) > RELE (NO) > REZISTOR > HV+ (LOAD)  
 Nabija kondenzatory v aute (inverter)

$$(V_{out} - V_{outN}) = V_{in}$$

$$V_{in} \leq 2V$$

$$U_{max} = 600V$$

Vout 0.5 - 2.5V  
 0.5V = 0V  
 2.5V = 600V

0.5 V offset for battery measurement  
 When <0.5V is measured, something is wrong e.g. short to ground  
 When >2.5V is measured, something is wrong e.g. short to supply  
 AMC1311 will output negative diff voltage when it is in error

60-600V to 12V

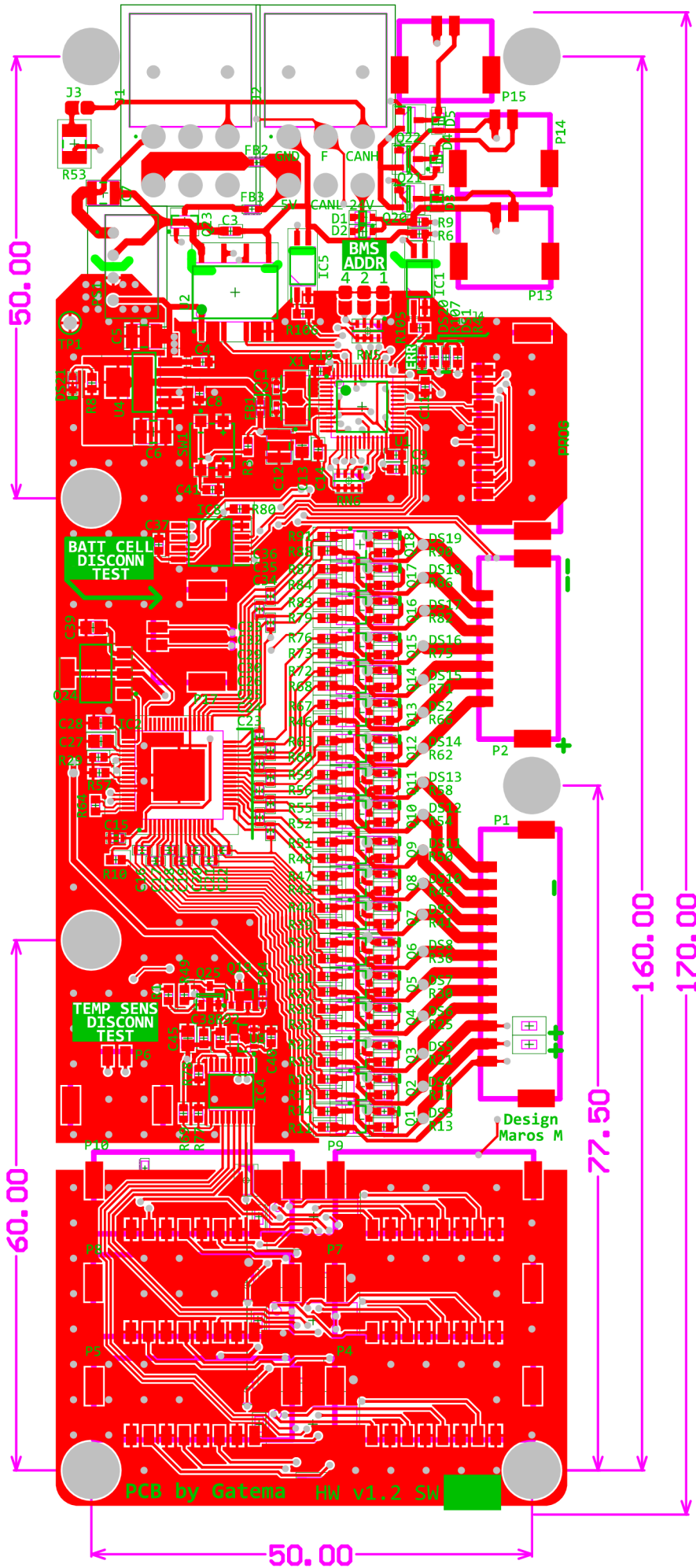
EV5.4.8 Each TS accumulator container must have a prominent indicator, a voltmeter or a red LED visible even in bright sunlight that will illuminate whenever a voltage greater than 60VDC or half the maximum TS voltage, whichever is lower, is present at the vehicle side of the A/Rs.

CHANGE RF071LAM4STR FOR GB01SLT06-214

Title: <b>HV measurement</b>		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>BMS Hat</b>	Date: <b>29/05/2021</b>	Drawn by: <b>Maroš Macko</b>	Checked by: <b>TL</b>
Car: <b>eD1</b>	Rev: <b>B</b>	Contact: <b>macko@tubnoracing.cz</b>	
Sheet: <b>3/3</b>	Format: <b>A3</b>		



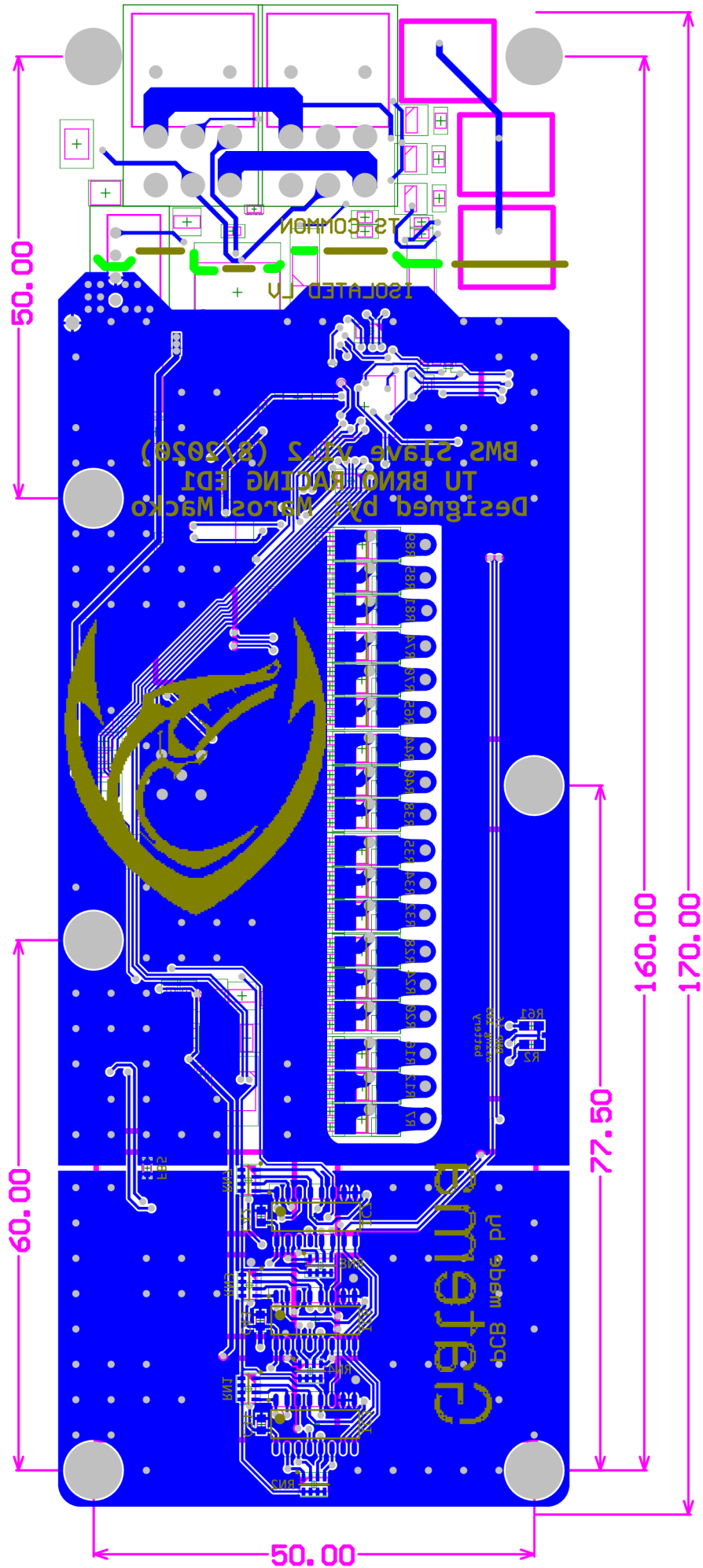
## **D Návrh DPS Slave**



All screw holes are 4mm (M3 with insert)

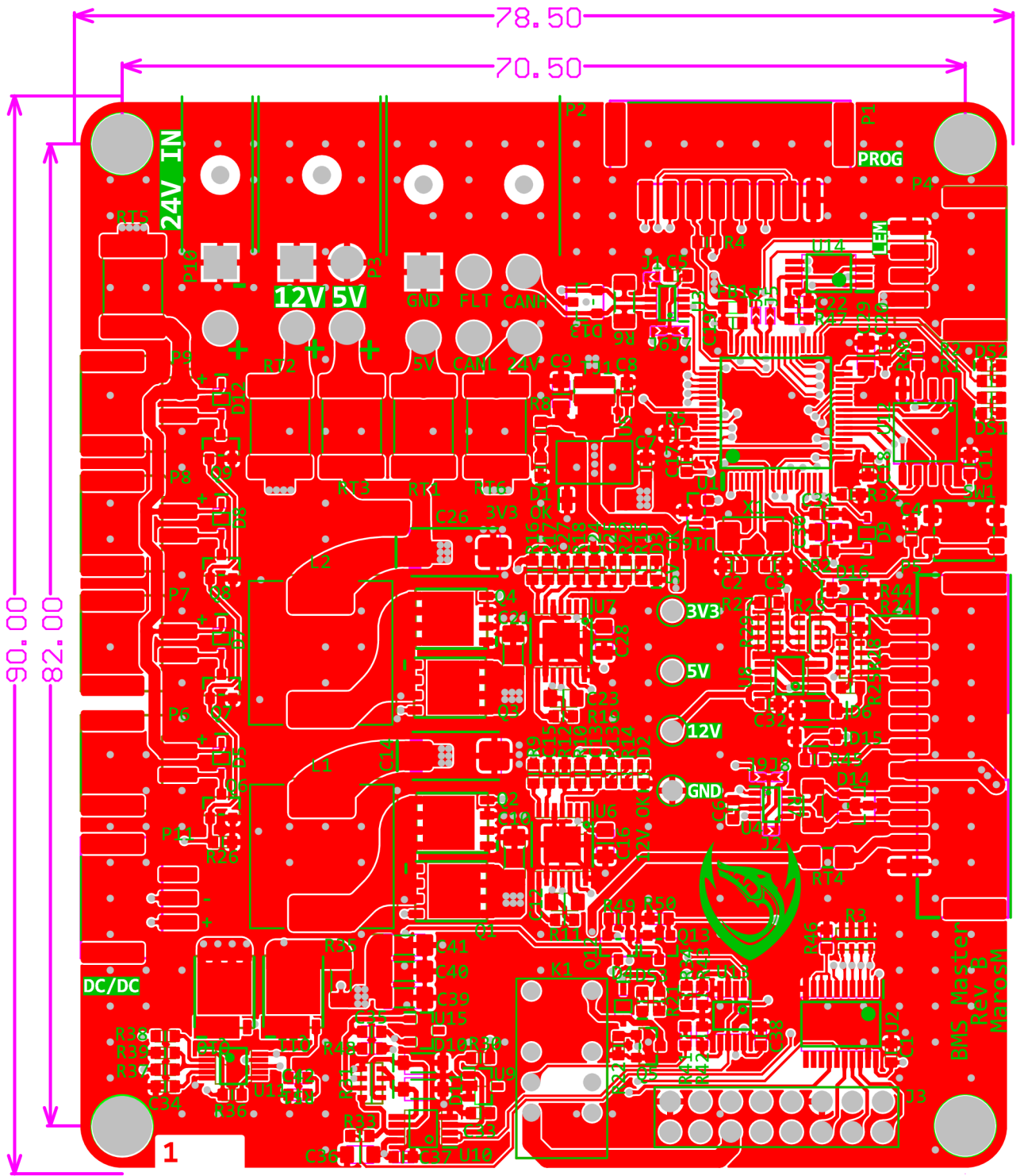
PCB by Gatena HW v1.2 SW

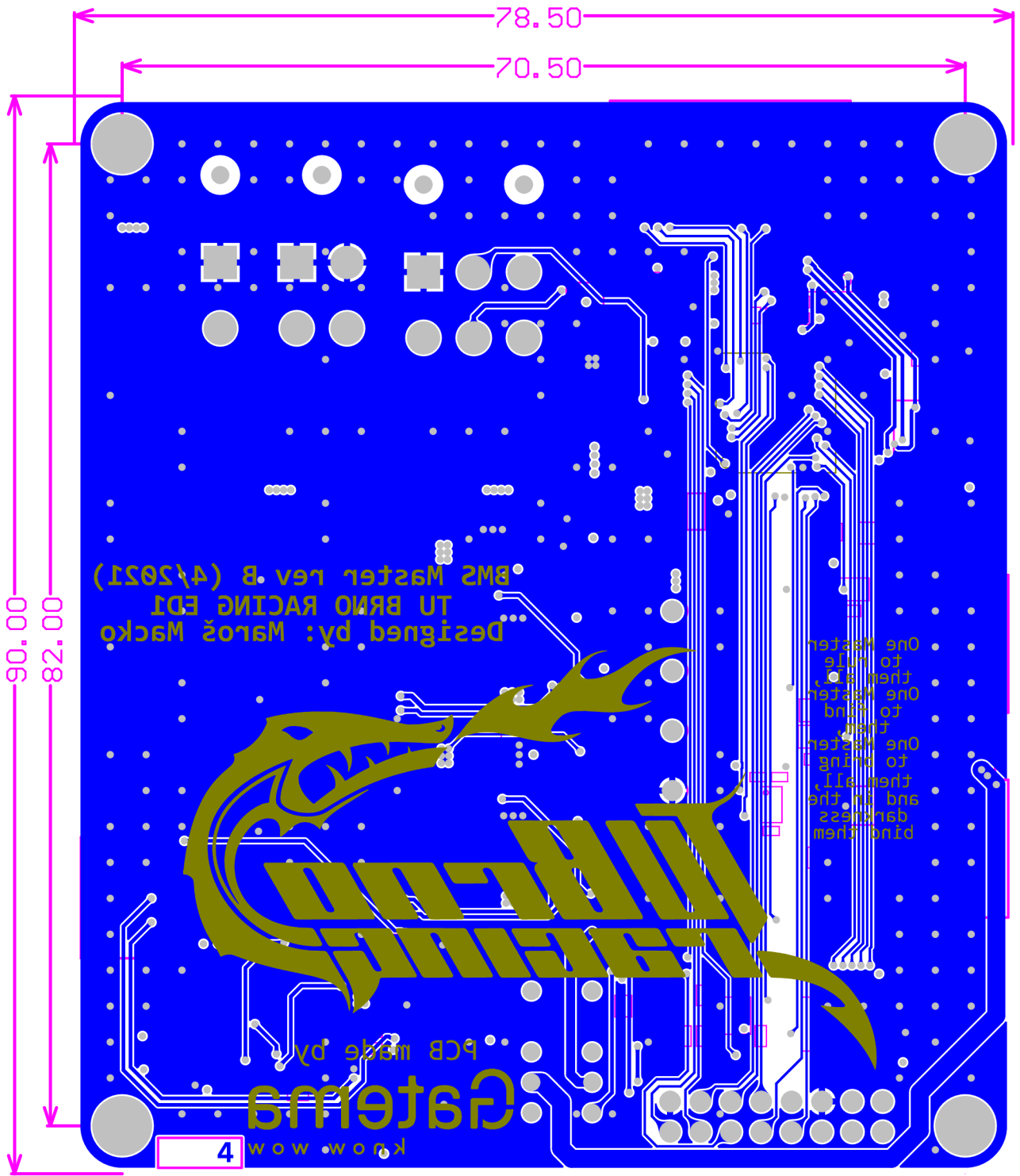
Design Maros M



All screw holes are 4mm (M3 with insert)

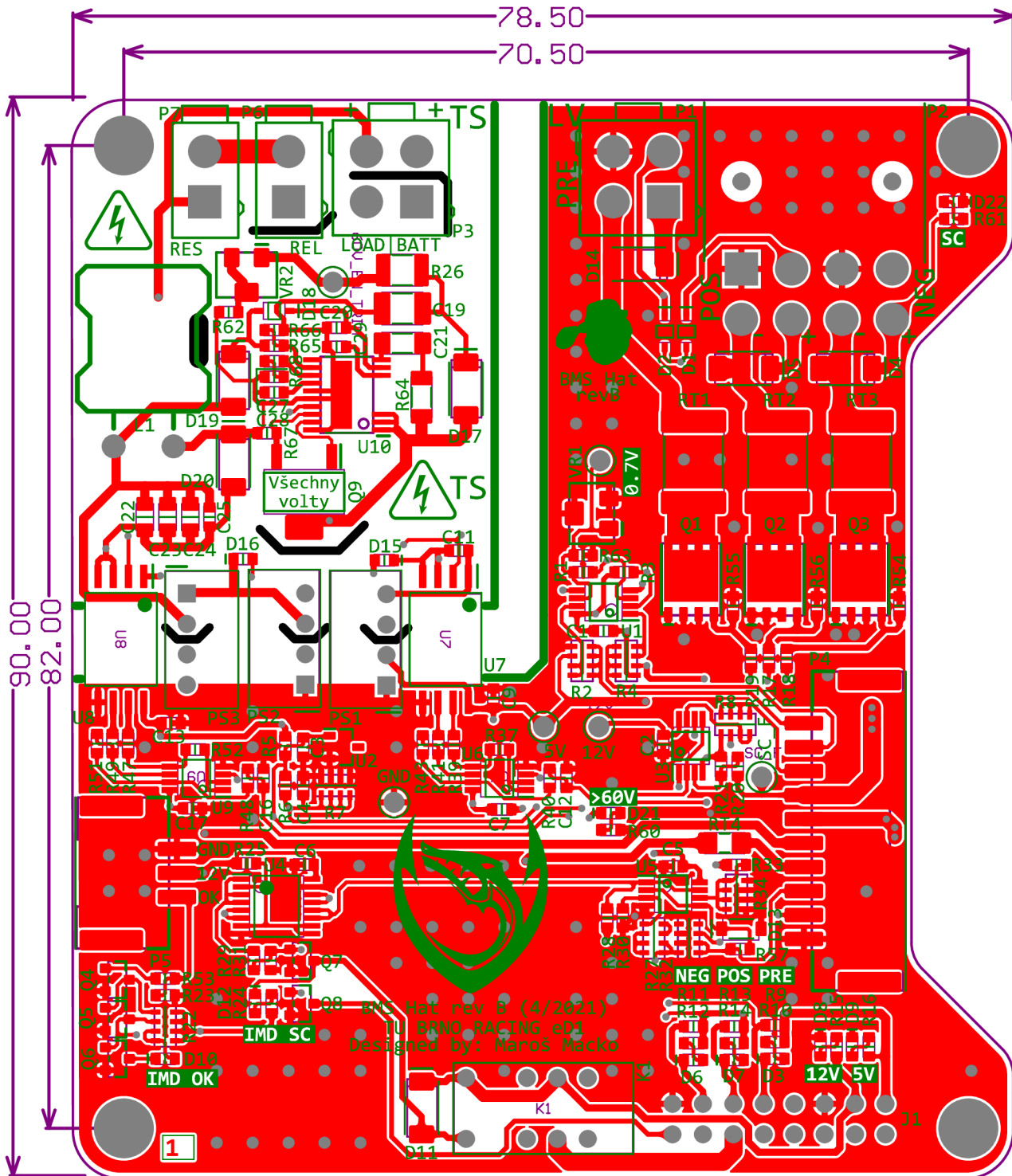
## **E Návrh DPS Master**





## **F Návrh DPS Hat**



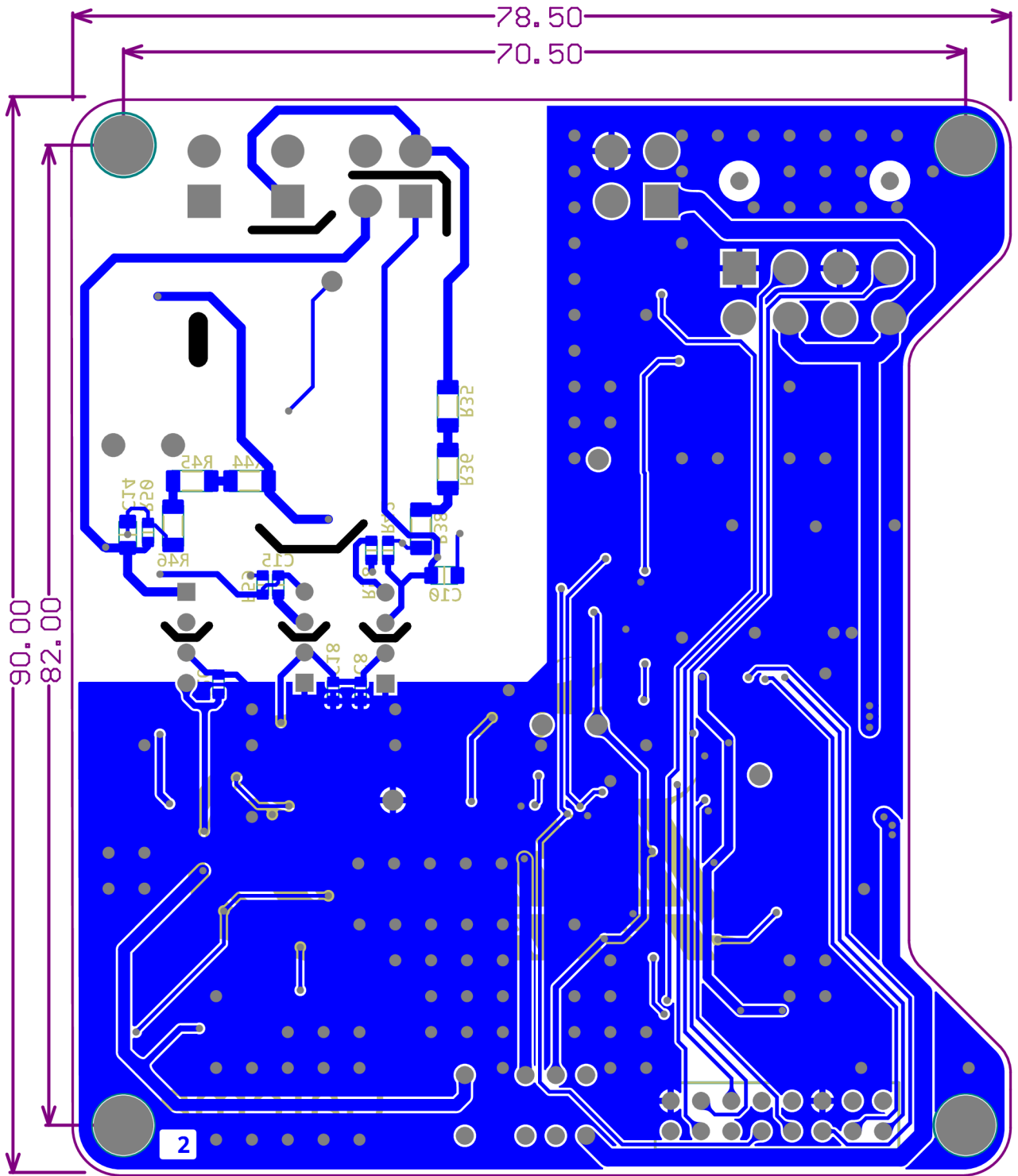


1

BMS Hat rev B (4/2021)  
BRNO RACING eD1  
Designed by: Miroš Macko

NEG POS PRE

12V 5V



## G Pravidlá BMS pre Formula Student

Uvádzame preklad niektorých relevantných pravidiel súťaže Formula Student pre konštrukciu BMS [24]:

- EV 1.1.1 Trakčný Systém TS - každá časť, ktorá je elektricky pripojená k motoru/motorom a TS akumulátoru.
- EV 1.2.1 Galvanická izolácia - dva elektrické obvody sú definované ako galvanicky izolované, ak platí: Odpor medzi oboma obvody je  $\geq 500 \Omega / V$  voči maximálnemu TS napätiu, testované maximálnym TS napätím alebo 250 V, čokoľvek je väčšie; a maximálne napätie, ktoré obvody medzi sebou vydržia, je vyššie ako trojnásobok napätia TS alebo 750 V, čokoľvek je väčšie.
- EV 2.2.1 Výkon TS na výstupe TS akumulátoru nesmie presiahnuť 80 kW.
- EV 2.2.2 Regenerácia energie je povolená a neobmedzená.
- EV 3.2.1 Všetky elektrické systémy musia mať vhodnú nadprúdovú ochranu.
- EV 3.2.2 Hodnota kontinuálneho prúdu nadprúdovej ochrany nesmie byť vyššia, ako je hodnota maximálneho kontinuálneho prúdu cez chránenú komponentu, napr. kábel, busbar alebo iný vodič.
- EV 3.2.4 Všetka nadprúdová ochrana musí byť dimenzovaná na najvyššie napätie systému, ktorý chráni. Musia byť špecifikované pre jednosmerný prúd - DC.
- EV 3.2.5 Nadprúdová ochrana TS sa nesmie spoliehať na programovateľnú logiku. Nadprúdová ochrana nemoifikovaných komerčne dostupných kontrolérov / meničov sa môže spoliehať na programovateľnú logiku.
- EV 3.2.6 Nadprúdová ochrana musí byť navrhnutá pre očakávaný teplotný rozsah, najmenej od 0 °C do +85 °C.
- EV 3.2.7 Cesty vysokého prúdu TS cez akumulátor(y) musia byť istené poistkou.
- EV 4.1.1 Maximálne povolené napätie medzi dvoma elektrickými spojmi nesmie presiahnuť 600 V DC, pre interné súčasti signálov kontroléra / meniča 630 V DC.
- EV 4.1.2 Všetky komponenty v TS musia byť dimenzované na maximálne TS napätie. TS oblasť DPS je považovaná za jednu komponentu. Každý vstup pripojený na TS musí byť dimenzovaný na maximálne TS napätie.
- EV 4.1.3 Všetky TS komponenty musia byť dimenzované na maximálnu možnú teplotu, ktorá môže počas používania nastať.

- EV 4.3.1 Celý TS musí byť galvanicky oddelený (EV 1.2.1) od LVS (Low Voltage System - nízkonapäťový systém).
- EV 4.3.2 TS a LVS musia byť fyzicky oddelené tak, aby nešli cez rovnaké vedenie alebo konektor (okrem interlocku).
- EV 4.3.3 Ak je TS a LVS v jednom kryte, musia byť separované izolačnými bariérami vyrobenými z vlhku-odolného izolačného materiálu uznávaného UL (Underwriters Laboratories) alebo ekvivalentného, ktorý je dimenzovaný na 150 °C alebo viac. Alternatívne, musí dodržiavať odstup cez vzduch alebo po povrchu nasledovne: 10 mm pre (DC)  $U < 100$  V, 20 mm pre  $100$  V  $< U < 200$  V a 30mm pre  $U > 200$  V.
- EV 4.3.5 Ak je TS a LVS na rovnakej DPS, musia byť na doske jasne separované a každá oblasť musí byť jasne popísaná ako „TS“, resp. „LVS“. Izolačná medzera musí byť naznačená. „Konformný náter“ zahŕňa povlakový izolátor, nespájkovateľná maska sa nepočíta. Ak sú na oddelenie použité integrované obvody ako optočleny, ktoré sú navrhnuté na(d) maximálne použité napätie, ale nespĺňajú požiadavky v tabuľke G.2, môžu sa použiť a pre túto súčiastku pravidlá neplatia.

Tab. G.2: Vyžadovaná vzdialenosť medzi TS a LVS

Napätie	Po povrchu	Cez vzduch	Konformný náter
0 V až 50 V	1.6 mm	1.6 mm	1.0 mm
50 V až 150 V	6.4 mm	3.2 mm	2.0 mm
150 V až 300 V	9.5 mm	6.4 mm	3.0 mm
300 V až 600 V	12.7 mm	9.5 mm	4.0 mm

- EV 5.1.1 Článok - batériový článok alebo superkapacitor.
- EV 5.1.2 Energia článku - maximálne napätie krát nominálna hodnota použitého článku.
- EV 5.1.3 TS Akumulátor - všetky články, ktoré uskladňujú elektrickú energiu využívanú TS.
- EV 5.1.4 Kontajner TS Akumulátoru - Samotná krabica, ktorá obsahuje TS Akumulátor.
- EV 5.1.5 Segmenty TS Akumulátoru - Pod-časti TS Akumulátoru.
- EV 5.2.1 Všetky typy článkov okrem roztavených solí a termálnych článkov sú povolené.
- EV 5.2.2 Palivové články sú zakázané.

- EV 5.3.2 Žiaden segment TS Akumulátoru nesmie presiahnuť maximálne statické napätie 120 V DC a maximálnu energiu 6 MJ a váhu 12 kg.
- EV 5.3.6 TS Akumulátor sa musí dať otvoriť na technickú inšpekciu.
- EV 5.4.2 Každý akumulátor musí obsahovať aspoň jednu poistku a aspoň dva AIR-y (Accumulator Isolation Relay - izolačné relé akumulátora).
- EV 5.4.3 LVS smie byť v akumulátore iba tam, kde je nevyhnutne potrebný. Výnimky majú AIR-y, DC/DC menič/e, BMS, IMD, časti logiky TSAL a ventilátory.
- EV 5.4.8 Každý TS akumulátor musí mať výrazný indikátor, voltmeter alebo červenú LED diódu viditeľnú aj v jasnom slnečnom svetle, ktoré svieti, keď sa napätie 60 V DC alebo polovica maximálneho TS napätia (čokoľvek je menšie) nachádza na strane AIR pripojenej k zvyšku auta.
- EV 5.6.2 AIRy musia otvoriť oba póly TS Akumulátoru. Ak sú otvorené, mimo akumulátoru nesmie byť prítomné žiadne TS napätie. Zvyšok TS obvodu auta sa v tomto prípade považuje za galvanicky oddelený od TS Akumulátora.
- EV 5.6.3 AIRy musia byť mechanické relé v prevedení „normally open“ (t.j. bez napájania sú kontakty odpojené).
- EV 5.7.1 Musí byť implementovaný obvod, ktorý zaistí prednabitie (pre-charge) pomocných kondenzátorov aspoň na 95% napätia TS akumulátora pred tým, ako sa zapne ďalšie AIR. Tým pádom musí byť implementovaný obvod na meranie tohoto napätia.
- EV 5.8.1 Každý TS akumulátor musí byť monitorovaný vždy, pokiaľ je aktívny LVS alebo ak sa akumulátor nabíja.
- EV 5.8.2 BMS musí nepretržite monitorovať všetky napätia článkov, prúd TS, teploty teplotne kritických článkov a pre lítiové batérie teploty aspoň 30 % všetkých článkov, rovnomerne distribuované v akumulátore/akumulátoroch.
- EV 5.8.3 Teplota článku musí byť meraná na zápornej elektróde daného článku alebo menej ako 10mm vzdialená od zápornej elektródy, v kontakte s vysokoprúdovým bus-barom. Jeden senzor môže merať viacero článkov, ak pre všetky z nich splňa tieto podmienky.
- EV 5.8.4 Maximálna teplota článku je 60 °C alebo limit v technickom liste článku, čokoľvek je menšie.

- EV 5.8.5 Na závodoch môže byť do akumulátora organizátormi počas previerky nainštalovaný nezávislý senzor teploty. Toto zariadenie bude umiestnené na najteplejší záporný terminál priamo alebo maximálne 30 mm od neho na bus-bare.
- EV 5.8.6 BMS musí vypnúť TS, ak je kritické napätie, teplota alebo prúd (podľa technického listu výrobcu batérie) merané po dobu dlhšiu ako 500 ms pre napätia a prúdy a 1 s pre teploty. Do úvahy musí byť braná presnosť merania, šum a vzorkovacia frekvencia.
- EV 5.8.8 V kokpíte musí byť červená kontrolka, ktorá je jasne vidieť zvnútra aj mimo kokpitu, aj v jasnom svetle. Musí byť jasne označená písmenami „AMS“ (Accumulator Management System - synonymum BMS). Musí svietiť, ak BMS spôsobí otvorenie vypínacieho obvodu. Musí ostať svietiť, pokiaľ táto chyba nie je manuálne reštartovaná. Tento signál je klasifikovaný ako SCS (Safety Critical Signal - signál kritický pre bezpečnosť) (pravidlo T 11.9).
- EV 5.8.9 BMS signály sú klasifikované ako SCS.
- EV 5.8.10 Musí byť možné individuálne odpojiť senzor prúdu, teplotný senzor a kábel (ak sa používa) pre monitorovanie napätia článku pre účel technickej inšpekcie.
- EV 5.8.11 BMS musí byť schopný merať a zobrazovať všetky merané hodnoty, napríklad pripojením notebooku ku BMS.
- T 11.9.2 Každá z nasledovných chýb na SCS musí spôsobiť prechod do bezpečného stavu všetkých pripojených systémov: Chyby signálov prenášaných po kábli spôsobené odpojením a skratom na zem, chyby analógových senzorov prenášané káblom skratované na napájacie napätie, chyby senzorov používaných v programovateľných zariadeniach kontrolované správnosťou rozsahu hodnoty a chyby digitálnych systémov korupciou dát (napr. kontrolným súčtom) a straty, resp. oneskorenie dát (napr. kontrolovaním času na správu).