

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Návrh elektroniky pro akumulátorovou baterii elektromobilu

Bc. Petr Hainc

Vedoucí: Ing. Vít Záhlava, CSc.

Obor: Elektronika

Studijní program: Elektronika a komunikace

Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hainc** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **456966**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh elektroniky pro akumulátorovou baterii elektromobilu

Název diplomové práce anglicky:

Design of Electronics for Electric Car Battery

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku řízení akumulátorové baterie elektromobilu.
2. Navrhněte zapojení akumulátorové baterie pro elektrické vozidlo kategorie Formula Student o celkovém maximálním napětí 600 V a energii přibližně 7 kWh.
3. Navrhněte řídicí elektroniku – řídicí jednotku a BMS (battery management system) - pro tuto baterii v souladu s aktuálními pravidly FSG.
4. Navrhněte schéma zapojení a desky plošných spojů daných zařízení, vyrobené DPS osadte a otestujte.
5. Otestujte elektroniku na reálné baterii.
6. Zhodnoťte navržené řešení.

Seznam doporučené literatury:

1. HOROWITZ, Paul. The art of electronics. Third edition. New York, NY: Cambridge University Press, [2015]. ISBN 978-0-521-80926-9.
2. ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN –technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
3. Katalogové listy součástek a aplikační poznámky výrobců

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vít Záhlava, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **17.09.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2022**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Vítu Záhlovovi, CSc. za věcné připomínky a vstřícnost při vypracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval všem současným i bývalým členům týmu eForce za jejich odhodlání a práci výrazně převyšující rámec běžného studia. Obrovský dík za cenné rady a dlouhodobou spolupráci patří jmenovitě těmto lidem - Ing. Patrik Bachan, Bc. Ondřej Šereda, Bc. Jan Sixta, Bc. Jan Mánek, Bc. Josef Med a Vojtěch Michal. Poděkování též patří Katedře elektrických pohonů a trakce a FEL ČVUT za to, že udržují takto skvělý projekt, jakým je právě studentská elektrická formule eForce.

Poděkování naleží také těmto firmám a institucím jež přispěly nemalou materiální podporou k výrobě hardwaru: Texas Instrumets, STMicroelectronics, Würth Elektronik, PragoBoard s.r.o., Omnitron s.r.o. a Laboratoře pro vývoj a realizaci na FEL ČVUT.

Na závěr děkuji své rodině za podporu během celého studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 20. května 2021

.....
Petr Hainc

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem vysokonapěťové akumulátorové baterie pro vůz kategorie Formula Student Electric. Dalším cílem je návrh kompletního elektronického systému pro řízení akumulátoru v souladu s pravidly Formula Student Germany 2020 v1.0.

V úvodní kapitole jsou popsány obecné principy návrhu bateriových systémů a jejich řízení. Dále je rozebrán výběr vhodného bateriového článku pro danou aplikaci včetně testování vzorků baterií a návrh jejich elektrické konfigurace.

Další části práce se zaměřují na praktický návrh hardwaru řídicí elektroniky a testování dílčích komponent. Konkrétně je to systém pro správu baterií (BMS), hlavní řídicí jednotka akumulátoru AMS a také DC/DC měnič z 600 V na 24 V.

Klíčová slova: Formula Student, baterie, elektronická řídicí jednotka, Battery Management System, BMS, DC/DC měnič, deska plošných spojů

Vedoucí: Ing. Vít Záhlava, CSc.
Katedra mikroelektroniky FEL ČVUT,
Technická 2,
166 27 Praha 6

Abstract

This diploma thesis deals with the design of a high-voltage battery for a Formula Student Electric car. Another aim is to design a complete electronic system for battery control by following the rules of Formula Student Germany 2020 v1.0.

The introductory chapter describes the general principles of battery systems design and control. Furthermore, selecting a suitable battery cell for a given application is discussed, including testing battery samples and designing their electrical configuration.

Other parts of the thesis focus on the practical design of control electronics hardware and testing of partial components. Specifically, it is a battery management system (BMS), an AMS battery's central control unit, and also a DC/DC converter from 600 V to 24 V.

Keywords: Formula Student, battery, electronic control unit, Battery Management System, BMS, DC/DC converter, printed circuit board

Obsah

| | | | |
|--|-----------|---|-----------|
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 1 | 8 Závěr | 47 |
| 1 Úvod | 3 | A Literatura | 49 |
| 1.1 Formula Student | 3 | B Měření baterií ve firmě Omnitron | 51 |
| 2 Obecně o akumulátorech pro elektromobily | 5 | C Schéma zapojení a layout měřicí desky BMS | 55 |
| 2.1 Bateriové systémy a jejich parametry | 6 | D Schéma zapojení a layout řídicí desky BMS | 61 |
| 2.2 Battery management system | 8 | E Schéma zapojení a layout jednotky AMS | 71 |
| 2.2.1 Balancování baterií | 8 | F Schéma zapojení a layout prototypu buck měniče | 83 |
| 2.2.2 Typy BMS | 9 | G Schéma zapojení a layout desky DC/DC měniče | 87 |
| 3 Výběr bateriových článků a návrh zapojení akumulátoru | 11 | | |
| 3.1 Kritéria výběru baterií | 11 | | |
| 3.2 Výběr vhodného článku a návrh zapojení | 12 | | |
| 3.3 Testování vzorků baterií Melasta | 14 | | |
| 3.3.1 Zatížení článku konstantním výkonem | 16 | | |
| 3.3.2 Dynamické zatížení článku dle průběhu pro endurance | 16 | | |
| 3.3.3 Střídavá zátěž a rekuperace | 18 | | |
| 3.3.4 Závěr testování | 19 | | |
| 4 Koncept řídicí elektroniky | 21 | | |
| 5 Systém pro správu baterií (BMS) | 25 | | |
| 5.1 Návrh a testování prototypu BMS | 25 | | |
| 5.2 Výroba BMS | 29 | | |
| 6 Řídicí jednotka AMS | 33 | | |
| 6.1 Specifikace funkcí jednotky AMS | 33 | | |
| 6.2 Návrh a testování jednotky AMS | 34 | | |
| 7 DC/DC měnič | 37 | | |
| 7.1 Výběr DC/DC měniče | 37 | | |
| 7.2 Návrh a testování prototypu buck měniče | 38 | | |
| 7.3 Návrh a testování kompletního DC/DC měniče | 43 | | |

Obrázky

| | |
|--|----|
| 1.1 Monopost FSE.08 na okruhu Yas Marina v Abu Dhabí. | 4 |
| 3.1 Cylindrický článek Sony VTC5A[9]. | 12 |
| 3.2 Měkký prizmatický článek zn. Melasta[10]. | 13 |
| 3.3 Měřicí pracoviště. | 14 |
| 3.4 Detail měřeného vzorku. | 15 |
| 3.5 Průběh celkového odebíraného a rekuperovaného výkonu pro jeden okruh. | 15 |
| 3.6 Vývoj teploty článku SLPB6843135 4 Ah při zatížení konstantním výkonem 140 W. | 16 |
| 3.7 Průběh výkonu odebíraného z článku SLPBA444124 6,35 Ah. ... | 17 |
| 3.8 Průběh napětí článku SLPBA444124 6,35 Ah při dynamickém zatěžování. | 17 |
| 3.9 Průběh proudu odebíraného z článku SLPBA444124 6,35 Ah při dynamickém zatěžování. | 17 |
| 3.10 Vývoj teploty článku SLPBA444124 6,35 Ah při dynamickém zatěžování. | 18 |
| 3.11 Průběh napětí na článku SLPBA444124 6,35 Ah při střídavé zátěži a rekuperaci. | 19 |
| 3.12 Vývoj teploty článku SLPBA444124 6,35 Ah při střídavé zátěži a rekuperaci. | 19 |
| 4.1 Hlídač izolačního stavu IR155-3203 [15]. | 21 |
| 4.2 Blokové schéma zapojení řídicí elektroniky. | 22 |
| 4.3 Red Cube konektor [11]. | 23 |
| 4.4 Trakční pojistka <i>Littelfuse L70QS100.V</i> [11]. | 23 |
| 4.5 Proudový převodník <i>LEM HO 100-S/SP30-0100</i> [13]. | 24 |
| 4.6 Výkonové relé <i>Littelfuse DCNLEV100-CA</i> [14]. | 24 |
| 5.1 3D render sestavy jednoho bateriového stacku včetně BMS. ... | 26 |
| 5.2 Řídicí deska sestavy BMS. | 26 |
| 5.3 Měřicí deska BMS s vyznačenými vstupy pro měření napětí baterií. . | 27 |
| 5.4 Detail umístění NTC termistoru pro měření teploty na negativním vývodu baterie. | 27 |
| 5.5 Pozice flexibilních NTC termistorů mezi články stacku. | 28 |
| 5.6 Detail ultrazvukového sváru čtveřice baterií. | 28 |
| 5.7 Testování prototypu BMS. | 29 |
| 5.8 Osazené panely s BMS. | 30 |
| 5.9 Testování BMS na stacku baterií Melasta. | 31 |
| 5.10 3D render sestavy kompletního akumulátorového boxu. | 32 |
| 6.1 Schéma bezpečnostního obvodu SDC. | 34 |
| 6.2 Blokové schéma zapojení jednotky AMS. | 35 |
| 6.3 Horní 3D pohled na DPS jednotky AMS (náhled bez součástek). | 36 |
| 6.4 Plně osazená jednotka AMS. ... | 36 |
| 7.1 Principiální schéma zapojení duálního multifázového <i>buck</i> měniče s čipem <i>LM5143</i> (převzato z [7]). . . | 39 |
| 7.2 Testovací prototyp <i>buck</i> měniče. . | 39 |
| 7.3 Průběhy vybraných napětí při testování měniče 1. | 40 |
| 7.4 Průběhy vybraných napětí při testování měniče 2. | 41 |
| 7.5 Měřicí pracoviště. | 41 |

| | |
|--|----|
| 7.6 Graf účinnosti testovaného měniče. | 42 |
| 7.7 Load regulation testovaného měniče. | 42 |
| 7.8 Line regulation testovaného měniče (při $I_{out} = 10 \text{ A}$). | 43 |
| 7.9 Deska DC/DC měniče horní pohled. | 44 |
| 7.10 Deska DC/DC měniče dolní pohled. | 44 |
| 7.11 Průběhy napětí na gatech tranzistorů (funkční pouze jeden kanál měniče). | 45 |
| | |
| B.1 Napětí na článku SLPBA444124 6,35 Ah při vybíjení konst. proudem 50 A. | 51 |
| B.2 Průběh teploty článku SLPBA444124 6,35 Ah při vybíjení konst. proudem 50 A. | 52 |
| B.3 Napětí na článku SLPBA444124 6,35 Ah při vybíjení konst. proudem 90 A. | 52 |
| B.4 Průběh teploty článku SLPBA444124 6,35 Ah při vybíjení konst. proudem 90 A. | 53 |

Tabulky

| | |
|--|----|
| 3.1 Parametry článku Sony VTC5A | 12 |
| 3.2 Parametry vzorků článků Melasta | 13 |
| 3.3 Parametry vybraného článku SLPBA942126 | 20 |
| 3.4 Parametry akumulátorové baterie s články SLPBA942126 | 20 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| Symbol | Význam (jednotka) |
|--------|-------------------|
|--------|-------------------|

| | |
|---|-------------------------------|
| C | kapacita baterie (Ah) |
| E | energie (J, Wh) |
| I | elektrický proud (A) |
| P | výkon/příkon (W) |
| R | elektrický odpor (Ω) |
| V | elektrické napětí (V) |

| Zkratka | Význam |
|---------|--------|
|---------|--------|

| | |
|--------|---|
| FS | Formula Student |
| FSG | Formula Student Germany |
| DC | Direct Current |
| NEDC | New European Driving Cycle |
| TS | Tractive System |
| LV | Low Voltage |
| AMS | Accumulator Management system |
| BMS | Battery Management system |
| IMD | Insulation Monitoring Device |
| SDC | Shutdown Circuit |
| CAN | Controller Area Network |
| UART | Universal Asynchronous Receiver and Transmitter |
| DPS | Deska Plošných Spojů |
| ADC | Analog to Digital Converter |
| LED | Light Emitting Diode |
| MOSFET | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| MCU | Microcontroller Unit |
| SMD | Surface Mount Device |
| SMT | Surface Mount Technology |
| THT | Through-hole technology |
| AIR | Accumulator Insulation Relay |
| NTC | Negative Temperature Coefficient |
| LDO | Low-dropout regulator |

Kapitola 1

Úvod

eForce FEE Prague Formula je tým fungující pod záštitou FEL ČVUT, který se účastní celosvětové soutěže pro studenty technických univerzit Formula Student (kategorie Electric), je složený převážně ze studentů elektrotechnické a strojní fakulty ČVUT v Praze. Úkol této soutěže spočívá v tom, každý rok postavit nový závodní monopost vlastního návrhu a konstrukce a ten následně prezentovat na mezinárodních závodech. Členem týmu jsem již čtvrtým rokem a pro nově vznikající desátý monopost FSE.10 je mým úkolem navrhnout akumulátorovou baterii vozu po elektrické stránce.

Členění této práce je následující - v úvodní kapitole jsou popsány obecné principy a pravidla návrhu bateriových systémů a jejich řízení. Tyto jsou konfrontovány se specifickými požadavky pro použití ve voze typu Formula Student. Další kapitola se věnuje výběru vhodných bateriových článků pro danou aplikaci, testování vzorků baterií a návrhu elektrické konfigurace celé akumulátorové baterie.

V následujících kapitolách je rozebráno elektronické řízení navrženého akumulátoru nejprve z pohledu celého systému, poté dle jednotlivých komponent. Tato část práce pojednává o praktickém návrhu systému pro správu baterií (BMS), hlavní řídicí jednotky AMS a DC/DC měniče pro napájení nízkonapěťových systémů vozu. V přílohách práce lze nalézt kompletní schémata a náhledy layoutů DPS všech navržených zařízení.

Cílem této práce je navrhnout a vyrobit kompletní akumulátorovou baterii a hardware její řídicí elektroniky, jež bude schopná efektivně a spolehlivě pohánět monopost FSE.10 v nadcházející závodní sezóně.

1.1 Formula Student

Pro čtenářovu lepší představu o podobě soutěže Formula Student a jejích závodech zařazují tuto krátkou podkapitolu. Soutěž Formula Student vznikla v 80. letech minulého století v USA, hlavní motivací pro její vznik byl požadavek průmyslu na absolventy technických oborů, kteří již mají zkušenosti s prací na reálných projektech. Postupem času se do soutěže zapojovaly univerzity z celého světa a Formula Student se tak stala největší inženýrskou studentskou soutěží na světě. K původním formulím se spalovacím motorem se v roce 2010 přidala kategorie elektrických monopostů (do stejného roku se datuje i vznik týmu eForce) a před pár lety i kategorie plně autonomních vozů.

Formula Student není motorsportem v pravém smyslu slova, je to inženýrská soutěž, proto závody sestávají kromě dynamických disciplín také ze statických. Mezi statické disciplíny patří:

- **Engineering design report** - technická prezentace návrhu vozu a obhajoba použitých konstrukčních řešení před odborníky z praxe
- **Cost report** - nákladová studie výroby monopostu
- **Business plan** - prezentace fiktivního podnikatelského záměru potenciálním investorům

Dynamické disciplíny se v rámci bezpečnosti konají na polygonech, kde trať je vyznačena pomocí kuželů, řadí se sem:

- **Akcelerace** - akcelerace na 75 metrů s pevným startem
- **Skid Pad** - jízda na trati ve tvaru čísla 8, testuje boční zrychlení vozu
- **Autokros** - krátký okruhový závod, kvalifikace pro endurance
- **Endurance & Efficiency** - vytrvalostní okruhový závod na 22 km, po dojetí závodu se hodnotí množství spotřebované energie vůči celkovému času

V kontextu této práce je nejdůležitější dynamická disciplína endurance, jež klade největší požadavky na akumulátorovou baterii. Z jejích specifik je třeba vycházet při návrhu.



Obrázek 1.1: Monopost FSE.08 na okruhu Yas Marina v Abu Dhabí.

Kapitola 2

Obecně o akumulátorech pro elektromobily

Baterie jsou ve vozidlech různých typů využívány už více než 100 let ¹, masivní rozvoj elektromobility ale zažíváme až v posledních dekadách. Z toho plyne stále rostoucí důraz na vývoj, parametry a životnost baterií jakožto jedné z nejdůležitějších komponent elektrických vozidel [2].

Elektromobily jsou obecně považovány za neekologičtější způsob silniční dopravy [2], o tomto tvrzení lze jistě polemizovat. Elektrické závodní vozy si rozhodně nekladou za cíl být ekologickou variantou motorsportu, spíše se snaží upřednostnit výhody elektrického pohonu oproti klasickému spalovacímu motoru. Stavba jednoúčelového závodního prototypu klade na akumulátorovou baterii rozdílné požadavky než klasické komerční elektromobily pro každodenní provoz, nicméně základní rysy mají obě tyto kategorie společné. V této kapitole bude popsán právě tento společný základ, který bude dán do kontrastu se specifiky vozů Formula Student (dále jen FS).

Lithiové baterie jsou v současnosti v elektromobilech jednoznačně nejpoužívanější díky jejich velké hustotě energie, velké výkonové hustotě, vysokému napětí, nízkému samovybití a dlouhému cyklu životnosti. Chování lithiových baterií je silně ovlivněno jejich pracovním prostředím (zejména teplotou v různých ročních obdobích), zatížením při vybíjení a nabíjení, obzvláště pak při prudké akceleraci či rekuperaci brzdné energie. Z těchto vlivů plyne potřeba sofistikovaných elektronických systémů pro řízení akumulátorových baterií, tzv. Battery Management System (BMS). Účelem BMS je udržet baterie v optimálních mezích napětí, proudu a teplot a tím pozitivně ovlivňovat jejich výkon a životnost [2].

V počáteční fázi návrhu akumulátorové baterie pro elektromobil je nutné si stanovit požadavky na výkon a energii, které bude akumulátor dodávat. Tři obecné parametry, podle kterých se toto posuzuje jsou:

■ Dojezd na jedno nabití

Dojezd vozu při plně nabitém akumulátoru je samozřejmě závislý na mnoha faktorech a podléhá hodnocení dle různých metodik. Lze ho třeba určit na základě konstantní rychlosti na rovné silnici nebo podle typu jízdního cyklu ve městě či

¹Historicky první elektromobil pánů Stratingha a Beckera vznikl v Holandsku již v roce 1835, to je asi o 50 let dříve než první automobil se spalovacím motorem [1].

typu chemie, pro Li-ion baterie je v rozmezí 3,6 - 3,8 V [2]. Celkové nominální napětí akumulátoru se vypočítá jako:

$$V_{Anom} = N_s \cdot V_{Bnom}, \quad (2.1)$$

kde V_{Anom} je celkové nominální napětí akumulátoru (V), V_{Bnom} je nominální napětí jednoho článku (V) a N_s je počet sériově zapojených článků.

Charakteristický výkon je poměr mezi jmenovitým výkonem (W), který lze dodat a hmotností bateriového článku (kg). Výkonová hustota je poměr mezi jmenovitým výkonem (W), který lze dodat a objemem bateriového článku (l). Oba tyto parametry ukazují jak rychle je baterie schopná dodat nezbytnou energii do zátěže nebo kolik energie lze dodat za určitý čas. Z aktuálně používaných typů baterií mají Li-ion tyto dva parametry nejvyšší [2].

Charakteristická energie je poměr mezi množstvím energie (Wh) uložené v baterii a hmotností bateriového článku (kg). Hustota energie je poměr mezi množstvím energie (Wh) uložené v baterii a objemem bateriového článku (l). Li-ion baterie opět mají v těchto dvou parametrech nejlepší hodnoty, hodnoty jejich charakteristické energie dosahují k 200 Wh/kg a hustoty energie k 600 Wh/l [2]. Celkovou nominální energii akumulátorové baterie vypočítáme jako:

$$E_{Anom} = N_{tot} \cdot E_{Bnom}, \quad (2.2)$$

kde E_{Anom} nominální energie akumulátoru (Wh), E_{Bnom} je nominální energie jednoho článku (Wh) a N_{tot} je celkový počet článků v akumulátoru. Nominální energie jednoho článku se vypočítá jako:

$$E_{Bnom} = V_{Bnom} \cdot C_{Bnom}, \quad (2.3)$$

kde V_{Bnom} je nominální napětí článku (V) a C_{Bnom} je nominální kapacita článku (Ah).

Životní cyklus baterie je počet cyklů nabití-vybití, které je baterie schopná dosáhnout než se přiblíží konci svojí užitečné životnosti. V elektromobilech je konec životnosti definován jako pokles kapacity na 80 % původní kapacity. Životní cyklus ovlivňuje hlavně teplota baterie, vybíjecí profil a hloubka vybití. Obecně lze říci, že baterie mají delší životnost je-li hloubka jejich vybití malá. Například Li-ion baterie mají obvykle okolo 2000 životních cyklů při nízkých vybíjecích a nabíjecích proudech, pokojové teplotě a hloubce vybití 100 %, jejich životní cyklus lze prodloužit až na 20 000 cyklů sníží-li se hloubka vybití na 20 až 40 % [2].

Komerční elektromobily mají poměrně velký zástavbový prostor pro baterie a jejich cílem je zvyšování dojezdu a životnosti, hmotnost baterií též není příliš rozhodující. Ve vozu Formula Student se zjednodušeně řečeno snažíme do co nejmenšího prostoru a hmotnosti dostat co nejvíce energie uložené v bateriích, ty zároveň musí být schopné plnit náročné požadavky na výkon pro pohon závodního prototypu. Životnost baterií je ve FS nepříliš důležitým parametrem při návrhu akumulátoru, počet vybíjecích cyklů za jednu sezónu je cca 50.

■ 2.2.2 Typy BMS

Battery management systémy lze dle způsobu jejich realizace rozdělit do dvou kategorií:

■ Centralizovaný BMS

Centralizovaný BMS sestává z jedné měřicí (resp. řídicí) desky, která monitoruje všechny baterie systému. To vyžaduje velké množství kabeláže od baterií k této desce. Centralizovaný BMS je ekonomická architektura, která je vhodná zejména pro systémy s malým počtem bateriových článků [2].

■ Distribuovaný BMS

Distribuovaný BMS kombinuje několik měřících desek a jednu řídicí desku. Měřicí desky monitorují jednotlivé články a jsou vzájemně propojeny sériovou komunikací. Distribuovaná architektura BMS je oproti centralizované jednodušší na instalaci do bateriového systému o velkém počtu článků, její nevýhodou je vyšší cena [2].

Kapitola 3

Výběr bateriových článků a návrh zapojení akumulátoru

Pravidla soutěže Formula Student umožňují použití libovolných typů baterií či superkapacitorů s výjimkou bateriových článků na bázi roztavených solí a tepelných baterií. Použití palivových článků je též zakázáno [3].

Pohon elektrického závodního vozu klade velmi vysoké nároky na parametry a kvalitu bateriových článků. Vzhledem k faktu, že tato práce nemá za cíl porovnávat parametry jednotlivých typů chemie baterií vyjdeme z rozboru popsáném v [4]. Z této analýzy plyne, že pro potřeby elektrického motorsportu jsou vhodné téměř výhradně lithiové baterie. Baterie na bázi lithia jsou v současnosti nejrozvinutější technologií pro elektrochemické ukládání energie, velký podíl na jejich masivní produkci a využití má současný trend elektromobility.

3.1 Kritéria výběru baterií

Při výběru baterií pro danou aplikaci byl kladen důraz především na tyto parametry:

- **Nominální kapacita článku**

Kapacita článku udává množství elektrického náboje, který je schopný dodat při vybíjení, v praxi se udává v jednotkách Ah (nebo mAh). S kapacitou je spojená energie článku, která je dle pravidel FSG [3] definována jako:

$$E_B = V_{Bmax} \cdot C_{Bnom}, \quad (3.1)$$

kde V_{Bmax} je maximální napětí článku (V) a C_{Bnom} je nominální kapacita článku (Ah).

- **Poměr energie článku a jeho hmotnosti (charakteristická energie)**

Pro účely elektrické formule by měl být tento poměr velmi vysoký (cca 200 Wh/kg).

- **Vnitřní odpor**

Vnitřní odpor lithiových baterií se většinou pohybuje v rozmezí jednotek až desítek mΩ. Na jeho velikosti bude záviset oteplení baterie, které dle pravidel FSG [3] nesmí překročit 60 °C.

■ **Parametr C pro vybíjení**

Tento parametr popisuje schopnost baterie dodávat velký proud při malém úbytku napětí s ohledem na jeho nominální kapacitu. Např. baterie o nominální kapacitě 4 Ah, která může dle specifikace dodávat proud 40 A má 10 C.

■ **Parametr C pro nabíjení**

Analogické měřítko výše uvedenému pro opačný směr proudu, tedy nabíjení baterie - závisí na něm schopnost rekuperace energie.

■ **3.2 Výběr vhodného článku a návrh zapojení**

Od roku 2015 byly v týmu eForce pro stavbu akumulátorů používány cylindrické Li-ion baterie od firmy Sony (dnes Murata) s označením VTC5, později VTC5A. Tyto články byly zapojeny v akumulátoru o celkové energii cca 8,1 kWh a maximálním napětí 400 V. I přes veškerou snahu konstruktérů se za několik sezón nepodařilo zefektivnit jejich chlazení natolik, aby umožňovalo efektivní rekuperaci energie a tedy i možnost snížení celkové energie a hmotnosti daného akumulátoru. Parametry článku Sony VTC5A jsou uvedeny v následující tabulce.

| Sony VTC5A | |
|--------------------------|-----------|
| Nominální kapacita | 2,6 Ah |
| Charakteristická energie | 198 Wh/kg |
| Vnitřní odpor | 10,3 mΩ |
| C vybíjení | 11 C |
| C nabíjení | 1 C |

Tabulka 3.1: Parametry článku Sony VTC5A



Obrázek 3.1: Cylindrický článek Sony VTC5A[9].

Na četná doporučení konkurenčních týmů Formula Student bylo týmem rozhodnuto o výběru nových článků z portfolia čínské firmy Melasta. Výrobce Melasta se specializuje zejména na vývoj a výrobu měkkých prizmatických polymerových Li-ion baterií, tzv. „pouch cell“.



Obrázek 3.2: Měkký prizmatický článek zn. Melasta[10].

Již při výběru bateriových článků je nutné znát celkovou konfiguraci akumulátorové baterie, její maximální napětí, požadavek na odebíraný/rekuperovaný proud a celkovou energii. Dle pravidel FSG [3] je maximální možné napětí mezi dvěma body obvodu $600 V_{DC}$, maximální možný odebíraný výkon z akumulátoru je 80 kW. Z důvodu menšího proudového přetěžování trakčních měničů značky Lenze bylo rozhodnuto o zvýšení maximálního trakčního napětí právě na 600 V (z dřívějších 400 V). Prvotní odhad celkové energie akumulátoru ukazuje k číslu 6 až 7 kWh.

Výše uvedeným specifikacím odpovídá elektrická konfigurace se 144 články sériově a 2 nebo 3 paralelně (v závislosti na kapacitě). Vzhledem k nulové předchozí zkušenosti s tímto typem baterií bylo rozhodnuto o objednání vzorků a jejich otestování, byly vybrány tyto typy:

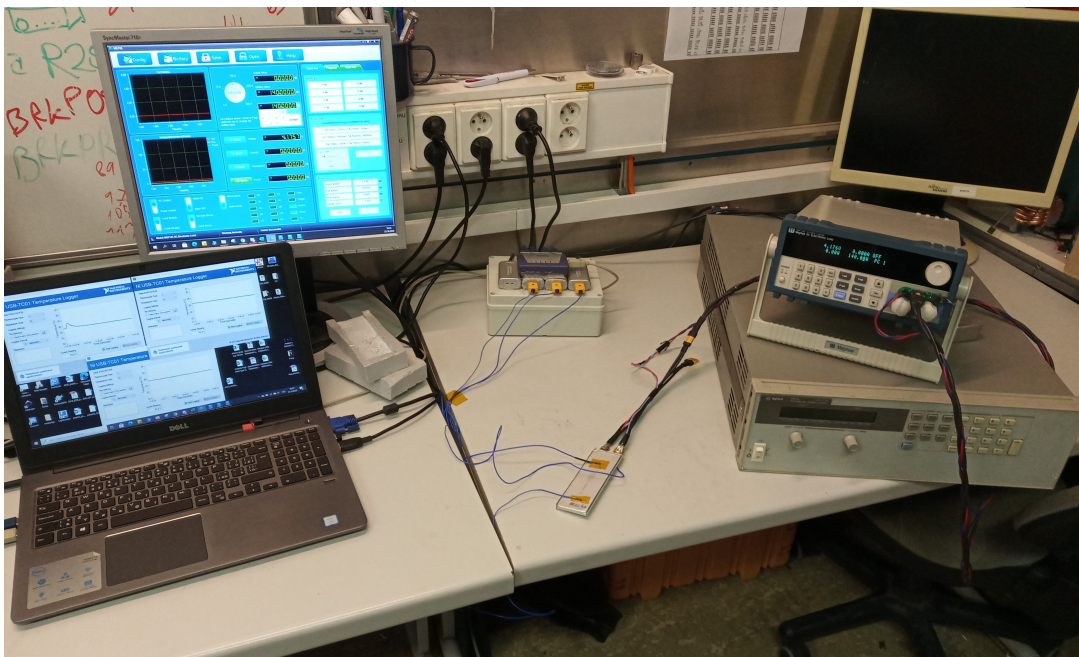
| Označení článku | SLPBA444124 | SLPB6843135 |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Možná el. konfigurace | 144s2p | 144s3p |
| Celková energie v dané konfiguraci | 6,77 kWh | 6,22 kWh |
| Nominální kapacita | 6,35 Ah | 4 Ah |
| Charakteristická energie | 190 Wh/kg | 178 Wh/kg |
| Vnitřní odpor | 1,2 mΩ | 1,5 mΩ |
| C vybíjení | 20 C | 20 C |
| C nabíjení (dlouhodobě/krátkodobě) | 2 C/4 C | 2 C/4 C |

Tabulka 3.2: Parametry vzorků článků Melasta

3.3 Testování vzorků baterií Melasta

Účelem testování vzorků baterií je nasimulovat jednomu článku prostředí a podmínky stejné jako budou v při vytrvalostním závodě endurance. Měření by mělo především ukázat, zda baterie dokáže dodat potřebné množství energie a neoteplí se při daném zatížení na více než 60 °C. Při měření byly využity tyto přístroje:

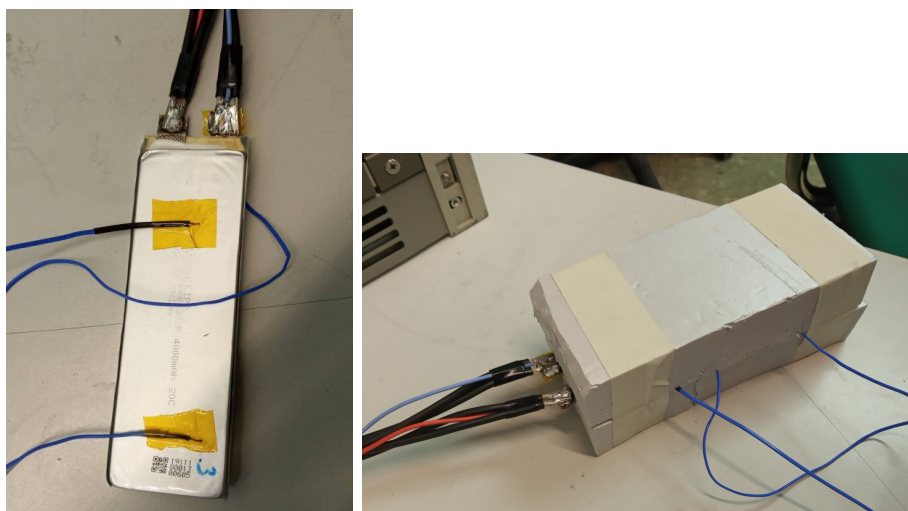
- programovatelná elektronická zátěž **Maynuo M9712C (0-60A/0-150V/300W)**
- laboratorní zdroj **Agilent 6673A (0-35V, 0-60A)**
- převodník **National instruments GPIB-USB-HS**
- 3 x teplotní převodník **National instruments USB-TC01**
- 3 x termočlánek typu **K**



Obrázek 3.3: Měřicí pracoviště.

Teplota testovaného článku byla měřena na 3 místech na jeho těle (viz obrázek 3.4):

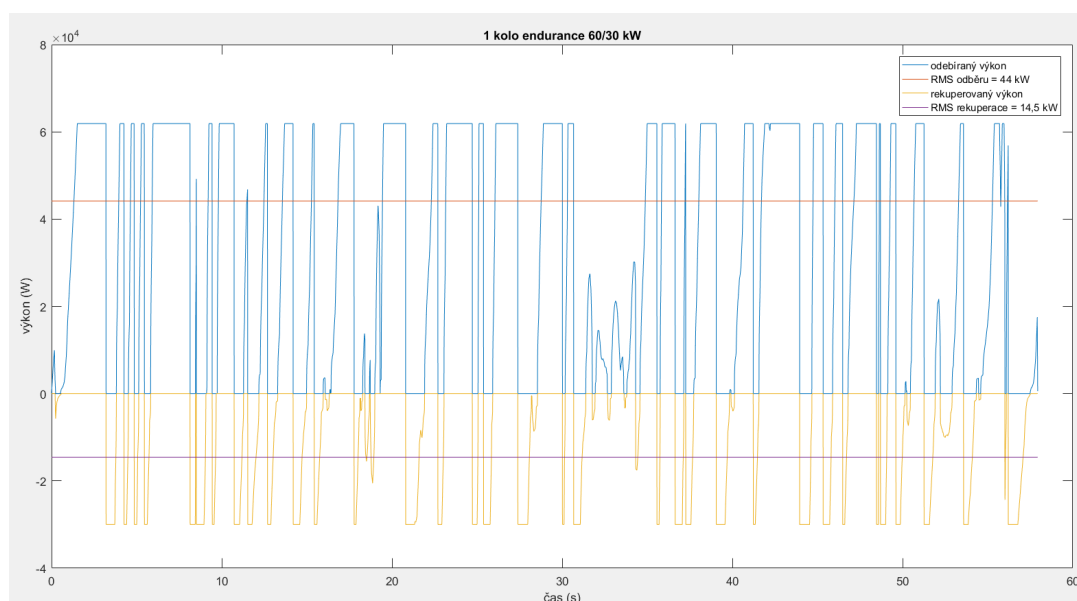
- v dolní polovině (v legendách grafů označeno jako „dole“)
- v horní polovině (v legendách grafů označeno jako „nahore“)
- na záporném vývodu (v legendách grafů označeno jako „záp. vývod“)



Obrázek 3.4: Detail měřeného vzorku.

Aby bylo článku co možná nejvěrněji simulováno prostředí v boxu akumulátoru formule, kde jsou baterky uloženy těsně vedle sebe a neproudí kolem nich vzduch, byl článek uzavřen do boxu z extrudovaného polystyrenu.

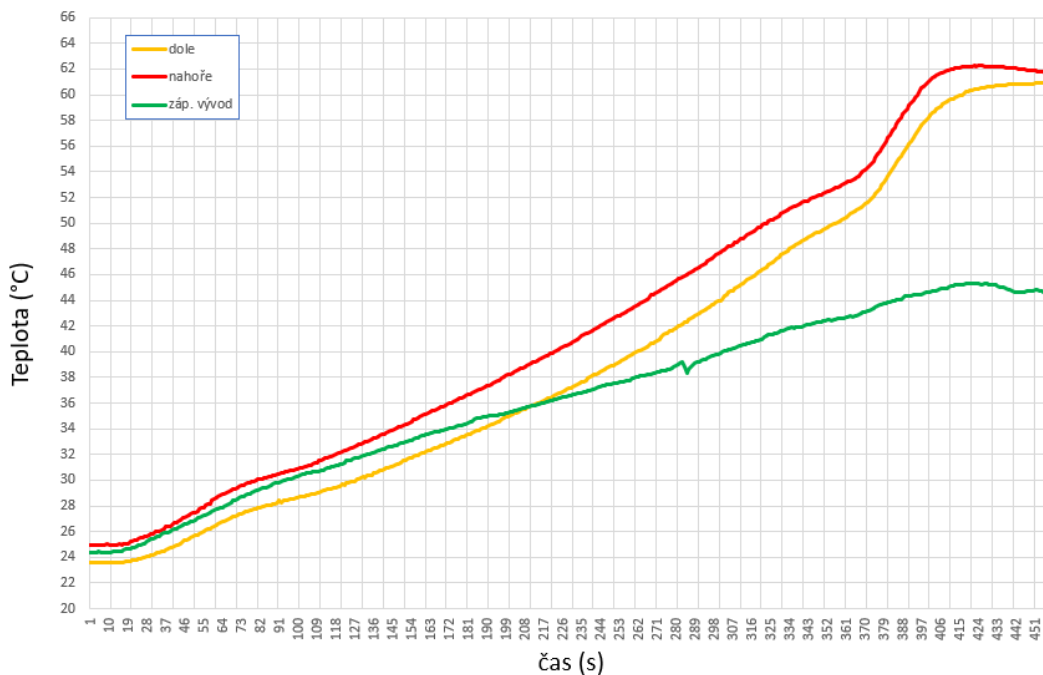
Jak bylo zmíněno, cílem tohoto měření je vystavit baterii stejné zátěži, která bude při závodu endurance. Pro vytrvalostní závod endurance je třeba snížit výkonový limit z povolených 80 kW na nižší hodnotu úměrnou délce a náročnosti závodu. Po konzultaci s týmovým specialistou na jízdní dynamiku byla tato hodnota stanovena na limit 60 kW pro celkový odebíraný výkon z akumulátoru a 30 kW pro rekuperovaný výkon. Na základě těchto hodnot byla vytvořena laptime simulace pro jeden okruh disciplíny endurance na závodech Formula Student Czech Republic. Průběh výkonu je zobrazen obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Průběh celkového odebíraného a rekuperovaného výkonu pro jeden okruh.

3.3.1 Zatížení článku konstantním výkonem

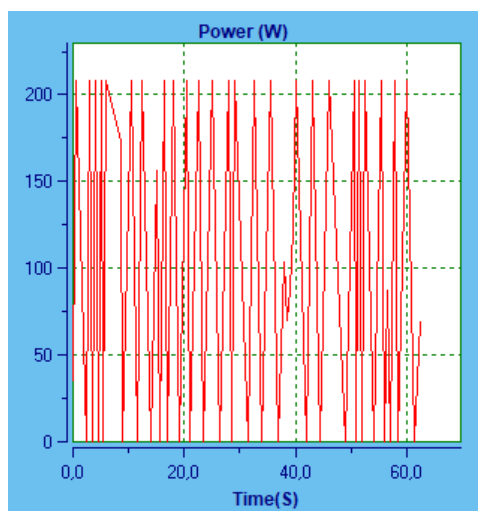
Účelem tohoto měření bylo ověření funkčnosti testovacího zařízení, k dispozici jsou pouze data měřených teploty, kde měření na záporném vývodu baterie je zkruseno tím, že vývody jsou ve volném prostoru, teplo tedy mohlo lépe sálat do okolí. V dalších měřeních byl tento nedostatek kompenzován uzavřením testovaného vzorku do dalšího boxu. Článek byl zatížen konstantním výkonem 140 W, což odpovídá při kapacitě článku 4 Ah a konfiguraci 144s3p odběru 60 kW z celého akumulátoru.



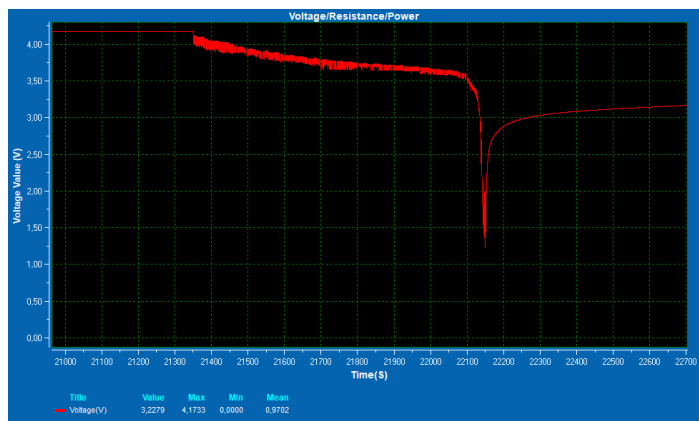
Obrázek 3.6: Vývoj teploty článku SLPB6843135 4 Ah při zatížení konstantním výkonem 140 W.

3.3.2 Dynamické zatížení článku dle průběhu pro endurance

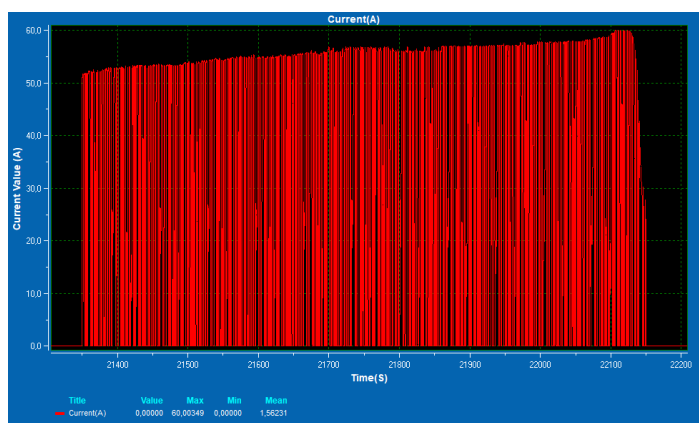
Druhé měření se věnovalo zatěžování článku SLPBA444124 o kapacitě 6,35 Ah průběhem odebraného výkonu, který odpovídá výsledku laptime simulace pro celý akumulátor (viz obrázek 3.5). Pro konfiguraci 144s2p odpovídá odebraný výkon v přepočtu na jeden článek přibližně průběhu na obrázku 3.7. Délka testu byla cca 13 minut, s tímto nastavením (tedy bez rekuperace) by bylo možné absolvovat přibližně 13 kol závodu endurance na FS Czech.



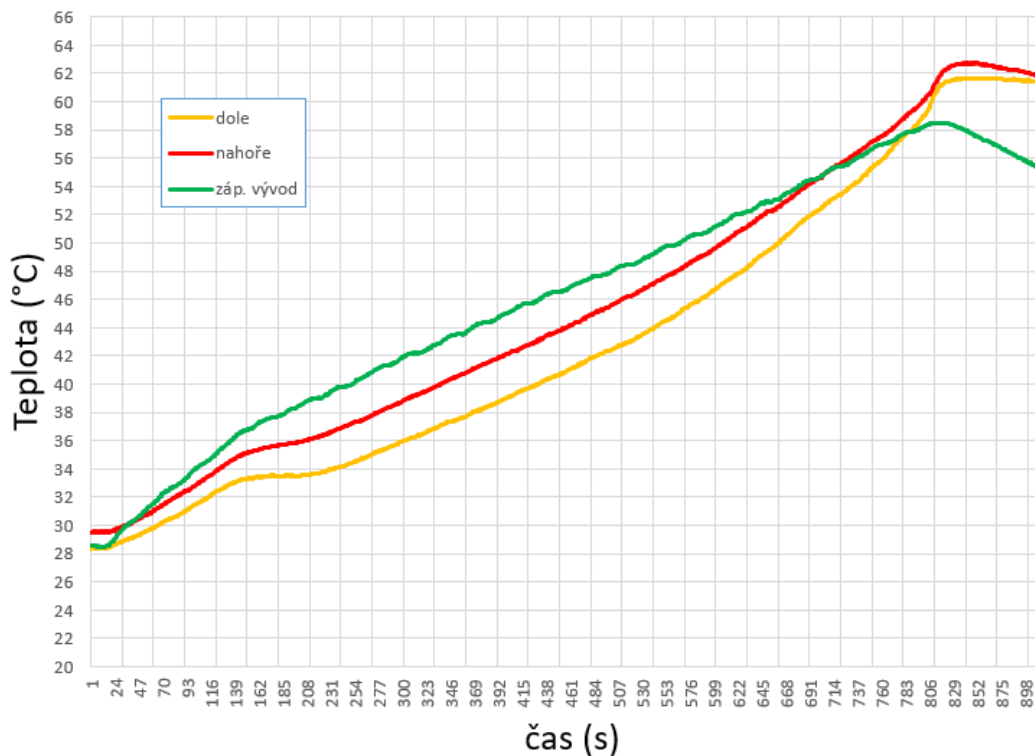
Obrázek 3.7: Průběh výkonu odebíraného z článku SLPBA444124 6,35 Ah.



Obrázek 3.8: Průběh napětí článku SLPBA444124 6,35 Ah při dynamickém zatěžování.



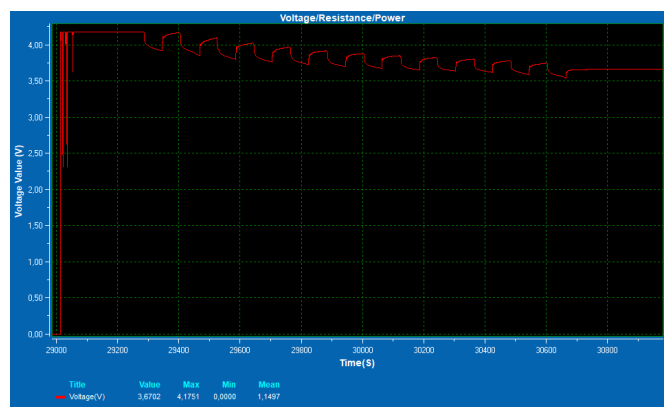
Obrázek 3.9: Průběh proudu odebíraného z článku SLPBA444124 6,35 Ah při dynamickém zatěžování.



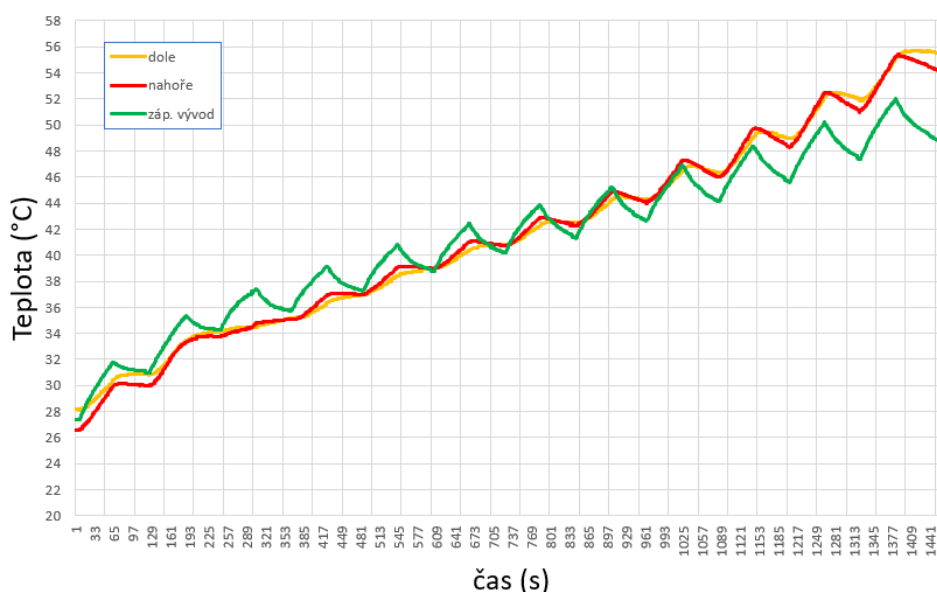
Obrázek 3.10: Vývoj teploty článku SLPBA444124 6,35 Ah při dynamickém zatěžování.

3.3.3 Střídavá zátěž a rekuperace

Nejlepším testem by bylo plynulé střídání zátěže a rekuperace dle průběhu vycházejícího z laptime simulace (obr. 3.5). Bohužel z důvodu nedostatku času a zkušeností s automatizací měření se nepodařilo optimálně naprogramovat přístroje. Proto byl tento test zjednodušen tak, že vypočtené střední hodnoty odebíraného (44 kW) a rekuperovaného výkonu (14,5 kW) po přepočtu na hodnoty pro jeden článek v konfiguraci 144s2p (tj. zátěž cca 150 W) byly střídavě po jedné minutě aplikovány na testovaný vzorek. RMS hodnota rekuperovaného výkonu byla upravena na 15,2 kW, což odpovídá proudu 12,7 A na jeden článek - tedy přetížení 2 C, které je dle katalogového listu možné provozovat trvale. Test trval 23 minut bez přestávky, měl by tedy odpovídat celému závodu endurance.



Obrázek 3.11: Průběh napětí na článku SLPBA444124 6,35 Ah při střídavé zátěži a rekuperaci.



Obrázek 3.12: Vývoj teploty článku SLPBA444124 6,35 Ah při střídavé zátěži a rekuperaci.

3.3.4 Závěr testování

Při prvních testech byl lehce znepokojivý rychlý propad napětí článku už od cca 3,5 V (dle katalogového listu je nejnižší přípustné napětí 3,0 V). Při porovnání s průběhy napětí změřenými při testování stejných článků ve firmě Omnitron (viz příloha B - obrázek B.1 a B.3) si tyto odpovídají.

I přes nedokonalost metodiky prováděných měření je zřejmé, že se díky němu podařilo ilustrovat chování baterií Melasta při provozu formule. Pro účely FS je rozhodující teplota na záporném vývodu baterie, kde ji bude snímat BMS. Teplota na tomto místě při všech testech nepřekročila 60 °C, dokonce při simulované rekuperaci (2 C na článek) znatelně klesala. Z měření plyne, že baterie Melasta lze použít v novém monopostu FSE.10.

Po optimalizaci laptime simulace bylo zjištěno, že bude třeba o 10 % zvýšit celkovou energii akumulátoru než bylo původně odhadováno. Proto musely být oproti testovacím vzorkům vybrány články s větší nominální kapacitou, konkrétně SLPBA942126 o kapacitě 7 Ah. Parametry tohoto článku jsou podobné jako u testovaných vzorků, neboť se jedná baterie ze stejné řady (viz následující tabulka 3.3). Parametry celé akumulátorové baterie postavené z těchto článků pak shrnuje tabulka 3.4.

| Označení článku | SLPBA942126 |
|------------------------------------|-------------|
| Nominální kapacita | 7 Ah |
| Charakteristická energie | 202 Wh/kg |
| Vnitřní odpor | 1,3 mΩ |
| C vybíjení | 15 C |
| C nabíjení (dlouhodobě/krátkodobě) | 2 C/4 C |

Tabulka 3.3: Parametry vybraného článku SLPBA942126

| Označení článku | SLPBA942126 |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Elektrická konfigurace | 144s2p |
| Počet stacků (jejich el. konfigurace) | 9 (16s2p) |
| Celková energie | 7,46 kWh |
| Maximální napětí | 600 V (4,17 V na článek) |
| Nominální napětí | 532 V (3,7 V na článek) |
| Minimální napětí | 432 V (3,0 V na článek) |
| Odhad vnitřního odporu | 220 mΩ |
| Odhad max. zkratového proudu | 2,7 kA |
| Odhad celkové hmotnosti | 49 kg |

Tabulka 3.4: Parametry akumulátorové baterie s články SLPBA942126

Kapitola 4

Koncept řídicí elektroniky

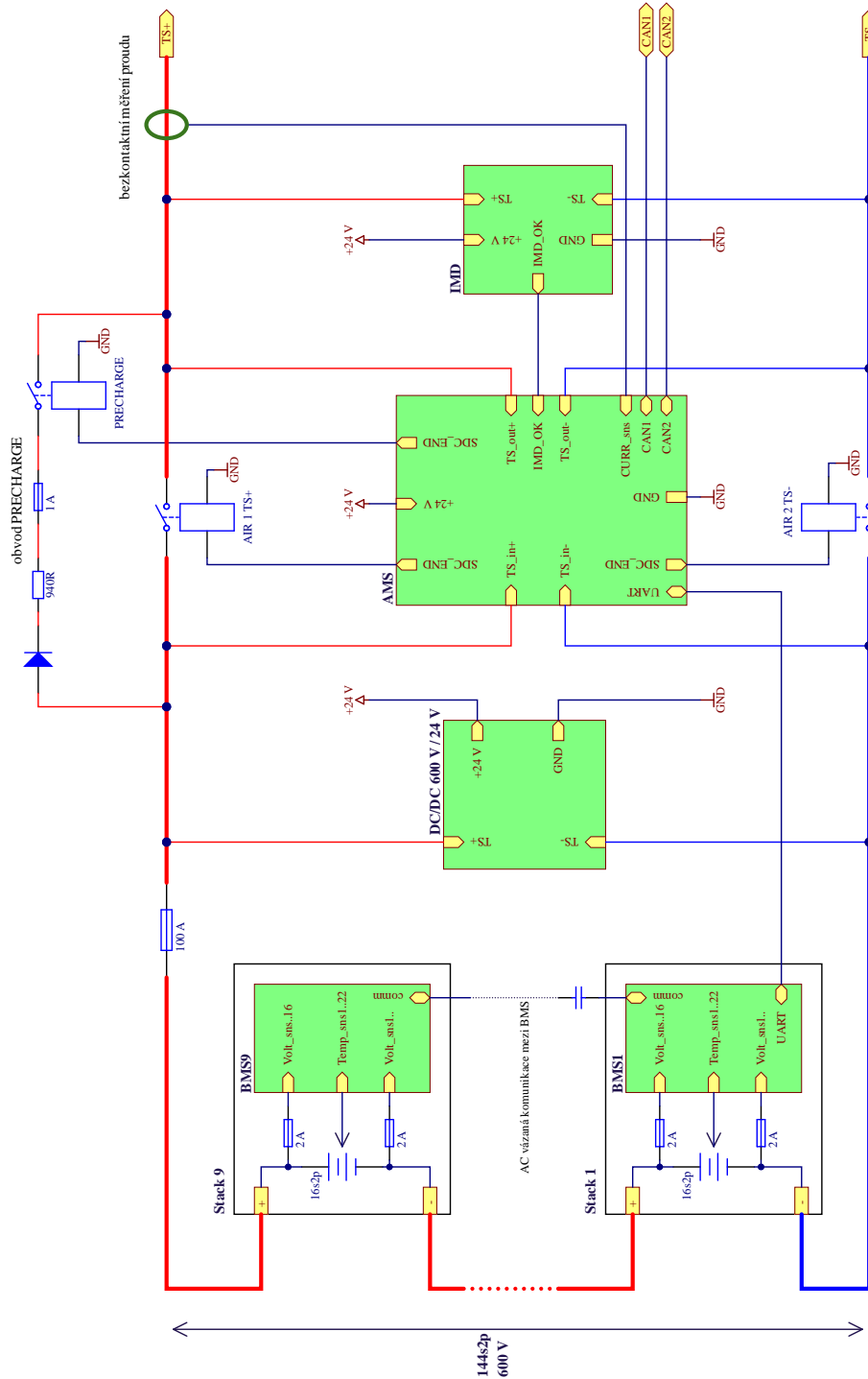
Jak je již zmíněno výše - základním a nezbytným elektronickým systémem pro správu akumulátorové baterie je BMS. V blokovém schématu na obrázku 4.2 je naznačeno 9 bateriových stacků každý se svou BMS, jedná se o distribuovaný BMS, kde jednotlivé měřicí desky podléhají řídicí jednotce AMS (Accumulator Management System). Jednotka AMS komunikuje s řetězcem BMS, zpracovává data a ty dále přeposílá na sběrnici CAN pro využití ostatními jednotkami vozu.

Další součástí akumulátorového boxu je DC/DC měnič z 600 V na 24 V pro napájení všech nízkonapěťových systémů vozu. Dle pravidel FSG [3] musí každý akumulátor obsahovat tzv. obvod *precharge* jehož funkce je blíže popsána v podkapitole 6.1. Pravidla též předepisují použití hlídače izolačního stavu, tzv. IMD (Insulation Monitoring Device) a to konkrétně typu *Bender A-ISOMETER® iso-F1 IR155-3203*. IMD měří izolační odpor mezi vysoko a nízkonapěťovým obvodem, klesne-li izolační odpor pod nastavenou hodnotu (pro 600 V akumulátor je tato hodnota minimálně 300 k Ω) IMD prostřednictvím jednotky AMS odpojí akumulátor.



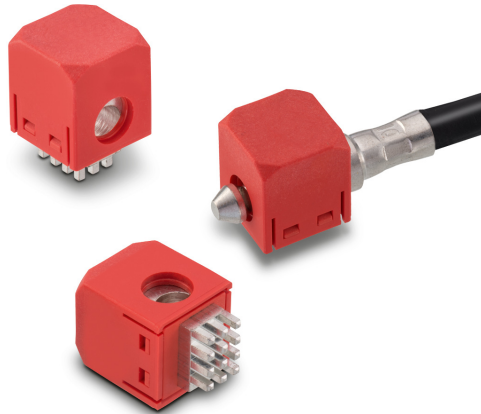
Obrázek 4.1: Hlídač izolačního stavu IR155-3203 [15].

V blokovém schématu je tučnou čarou vyznačena hlavní proudová cesta, k ní se váže několik dalších komponent nezbytných pro bezpečný provoz akumulátoru, tyto součásti jsou popsány níže v této kapitole.



Obrázek 4.2: Blokové schéma zapojení řídicí elektroniky.

Každý bateriový stack má konektor pro svůj kladný a záporný pól (tzv. *maintenance plug*), které je při práci na akumulátoru vždy nezbytné rozpojit. Je vyžadováno aby odpojení *maintenance plugu* bylo možné provést bez použití nářadí a jeho povrch musí být elektricky izolován. Pro tento účel byly vybrány konektory typu *press fit* Red Cube výrobce Würth Elektronik.



Obrázek 4.3: Red Cube konektor [11].

Další důležitou součástí je trakční pojistka, která je nejslabším místem hlavní proudové cesty (všechny ostatní části musí mít stejnou nebo větší proudovou zatížitelnost). Byla vybrána pojistka o jmenovitém proudu 100 A a jmenovitém napětí 700 V_{DC} značky *Littelfuse L70QS100.V*, pojistku lze krátkodobě proudově přetěžovat, důležité je, že hodnota RMS odebíraného proudu při vytrvalostní disciplíně endurance bude menší než 100 A (dle laptime simulace cca 80 A).



Obrázek 4.4: Trakční pojistka *Littelfuse L70QS100.V* [11].

Měření proudu akumulátoru je velmi důležitý údaj pro nastavení výkonového omezovače vozu a také pro výpočet stavu nabití akumulátoru. Proud je potřeba měřit v rozsahu ± 200 A, k tomu účelu byl vybrán bezkontaktní proudový převodník *HO 100-S/SP30-0100* od firmy LEM.



Obrázek 4.5: Proudový převodník *LEM HO 100-S/SP30-0100*[13].

Trakční napětí je od výstupního konektoru akumulátorového boxu odděleno dvěma výkonovými relé (pro kladný i záporný pól), tzv. AIRy (Accumulator Insulation Relay). AIRy musí být v případě poruchy či zkratu schopné rozepnout i pod zátěží násobně větším proudem než při běžném užívání, opět je vhodné aby zvládali i krátkodobé proudové přetěžování. Dalším kritériem výběru byla přítomnost pomocného kontaktu pro měření aktuálního mechanického stavu relé. Jako AIRy budou použity relé *Littelfuse DCNLEV100-CA*.



Obrázek 4.6: Výkonové relé *Littelfuse DCNLEV100-CA*[14].

Kapitola 5

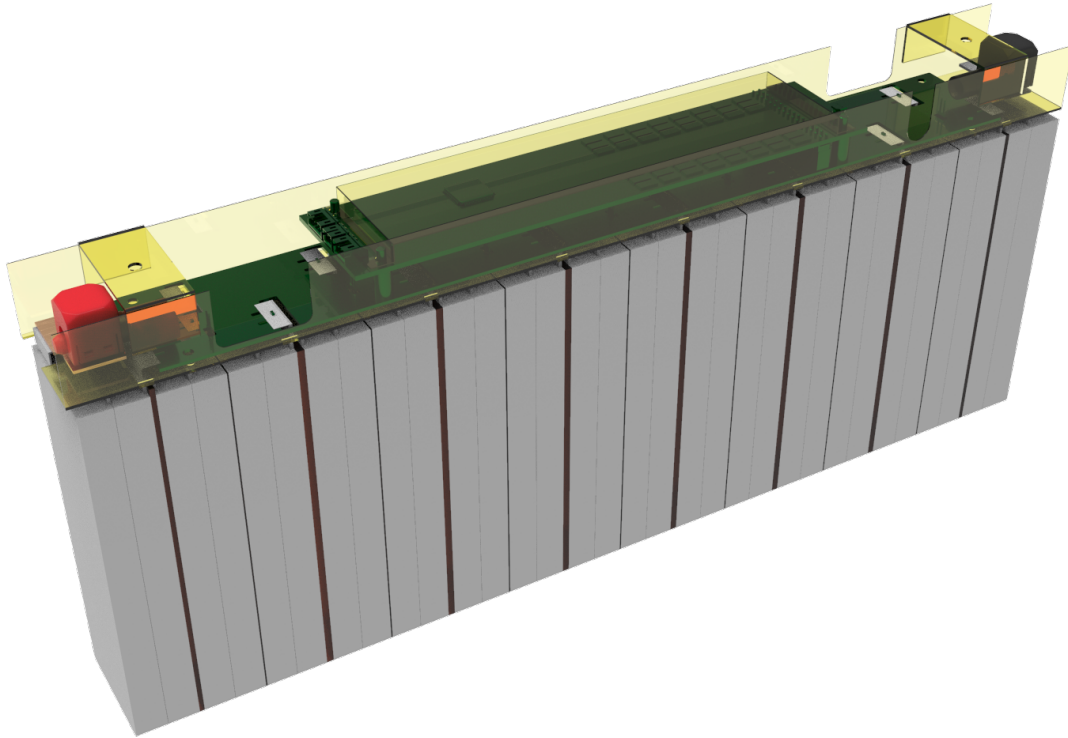
System pro správu baterií (BMS)

Koncept BMS používaných v týmu eForce pochází z monopostu FSE.07 z roku 2018, kdy byl poprvé použit řídicí čip *bq76PL455A-Q1* výrobce Texas Instruments (o tomto systému pojednává bakalářská práce [4]). Tento systém byl v generaci FSE.08/09 výrazně modifikován, pro generaci FSE.10 se tedy jedná již o třetí iteraci BMS založeného na tomto řídicím chipu.

Konkrétně se jedná o distribuovaný BMS, kdy každý bateriový stack má vlastní elektronickou jednotku jež měří napětí a teploty článků a je schopná jejich pasivního napětového balancování. Jednotlivé BMS jsou vzájemně propojeny řetězovou sériovou komunikací (tzv. *daisy chain*), BMS umístěna na stacku s nejnižším potenciálem je propojena pomocí izolované sběrnice UART s řídicí jednotkou AMS. Jednotka AMS je masterem pro řetězec BMS, které jsou přes komunikační protokol také konfigurovány. Jednotlivé BMS posílají jednotce AMS data o napětích a teplotách baterií, ta je následně vyhodnocuje dle svých řídicích algoritmů a také je předává na sběrnici CAN ke zpracování dalšími řídicími jednotkami vozu a uložení v dataloggeru pro následnou analýzu jízdních dat.

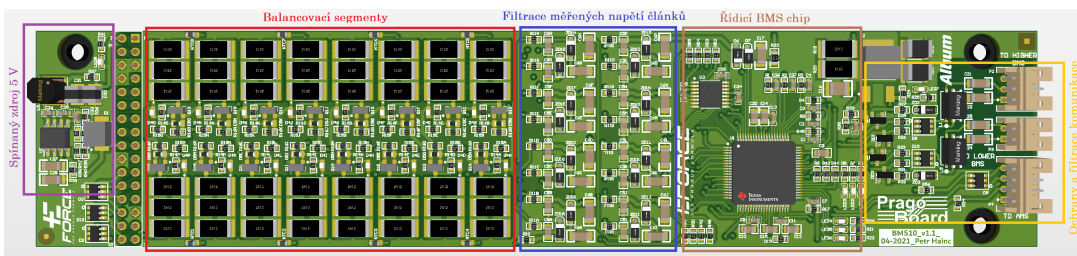
5.1 Návrh a testování prototypu BMS

Fyzická podoba BMS je vždy velmi závislá na typu baterií (cylindrické nebo prizmatické) a geometrii jejich mechanické zástavby v jednotlivých modulech. Navrhovaný BMS bude složen ze dvou desek plošných spojů pro každý stack baterií, spodní měřicí deska umožňuje přímé připojení k bateriím a obsahuje pouze pojistky pro ochranu měřících vstupů napětí článků a teplotní senzory typu NTC pro měření teploty na záporných terminálech baterií. Dále jsou zde multiplexory pro přepínání měřených teplot a operační zesilovače ve funkci bufferu napětové signálu z NTC. Horní řídicí deska obsahuje BMS čip *bq76PL455A-Q1*, do kterého je přivedeno všech 16 napětí z měřených článků a 8 multiplexovaných signálů měření teplot, dále jsou zde spínané segmenty se třemi balancovacími rezistory paralelně pro každý článek, spínaný zdroj na 5 V pro napájení NTC termistorů a také část pro sériovou komunikaci mezi dalšími BMS (viz obrázek 5.2).



Obrázek 5.1: 3D render sestavy jednoho bateriového stacku včetně BMS.

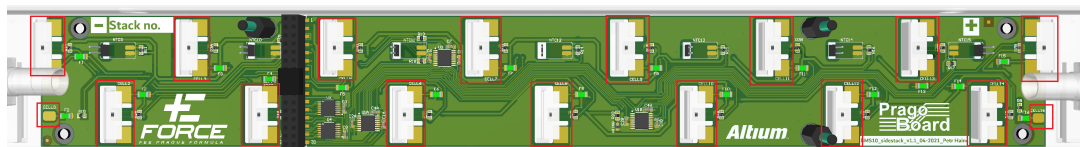
Dle pravidel FSG musí za provozu i nabíjení akumulátoru BMS kontinuálně měřit napětí všech bateriových článků (resp. všech paralelních n-tic), teploty alespoň 30 % všech lithiových baterií v rovnoměrném rozložení v celém akumulátoru a také odebíraný (resp. dodávaný) proud. Frekvence měření libovolné teploty článku by měla být minimálně 1 Hz, pro měření proudu a napětí článků je stanovena frekvence alespoň 2 Hz. Teplotní senzory musí být v přímém kontaktu s negativním terminálem baterie, případně do vzdálenosti 10 mm od propojovací plechu hlavní proudové cesty. Teplota nesmí přesáhnout hranici 60 °C nebo hodnotu udávanou výrobcem baterie, je-li nižší [3].



Obrázek 5.2: Řídicí deska sestavy BMS.

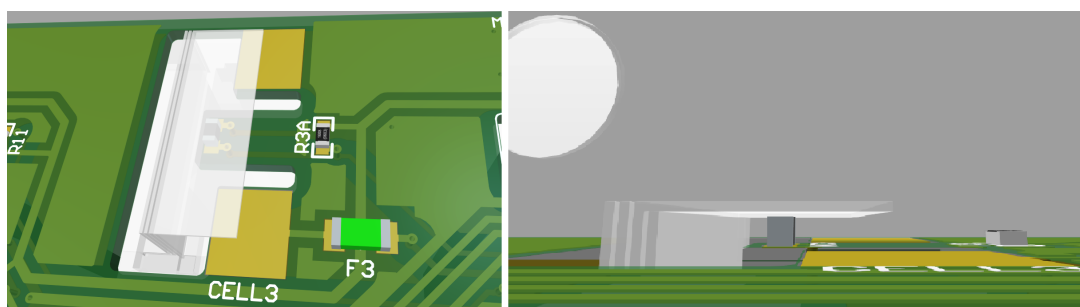
Měření napětí článků je na měřicí desce BMS řešeno tak, že konce páskových vývodů baterií jsou provléknuty skrz výřezy v DPS a připájeny (viz červeně vyznačené části na obrázku 5.3). Vzájemné propojení baterií je realizováno bez přídavných propojovacích

plechů, pouze vzájemně ultrazvukově svařenými vývody baterií (viz obrázek 5.6), hlavní proudová cesta je tedy umístěna pod ohybem, který je připájen k DPS. Napětí krajních baterií (nejvyšší a nejnižší potenciál segmentu) je na desku přivedeno drátovým propojem od silového konektoru stacku. Každý napěťový vstup je chráněn proti zkratu SMD pojistkou, měřená napětí jsou dále vyvedena na kolíkovou lištu jež propojuje měřicí a řídicí desku BMS. Citlivost měření napětí jednotlivých článků je 1 mV.



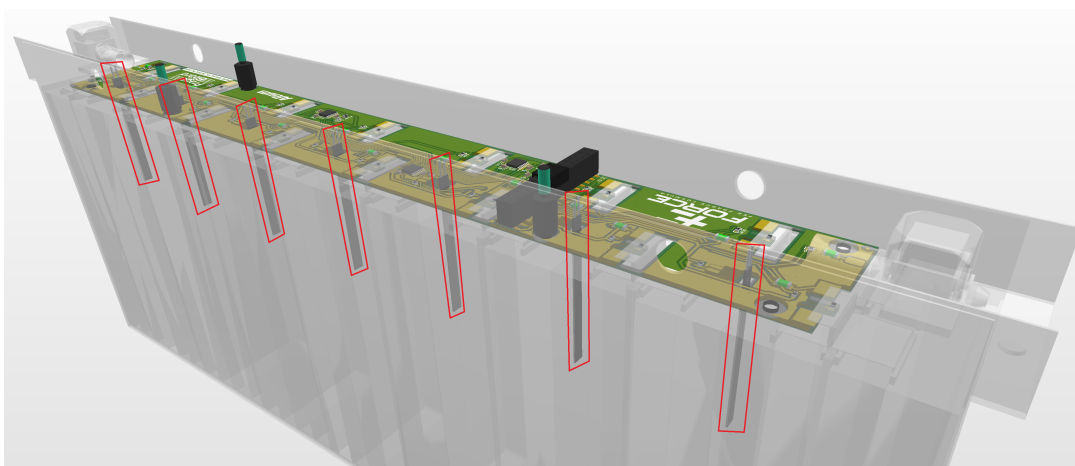
Obrázek 5.3: Měřicí deska BMS s vyznačenými vstupy pro měření napětí baterií.

Měření teplot na negativním vývodu baterií je realizováno SMD NTC termistorem umístěným na stejných pozicích jako vstupy k měření napětí (detail umístění je na obrázku 5.4) na pružném poloostrovu DPS přímo pod ohybem vývodu baterií. Elektrická izolace NTC senzoru a měděného terminálu baterie bude řešena pomocí teplovodivé plastické podložky. Teplota je měřena na 15 pozicích z celkového počtu 32 bateriových článků v jednom stacku, tj. na 46 % z celkového počtu článků, tím je splněno pravidlo o minimálním počtu měřených teplot baterií v akumulátoru. Maximální odchylka měření teploty je v daném rozsahu $0 \text{ až } 60 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$.



Obrázek 5.4: Detail umístění NTC termistoru pro měření teploty na negativním vývodu baterie.

Během testování baterií popsaném v podkapitole 3.3 se při vybíjecích testech ukázalo, že baterie se více zahřívají na těle článku než na negativním vývodu. Z toho důvodu byly do konceptu BMS přidány další, tenké flexibilní, NTC termistory na 7 pozic přímo mezi články ve stacku (viz obrázek. 5.5)



Obrázek 5.5: Pozice flexibilních NTC termistorů mezi články stacku.

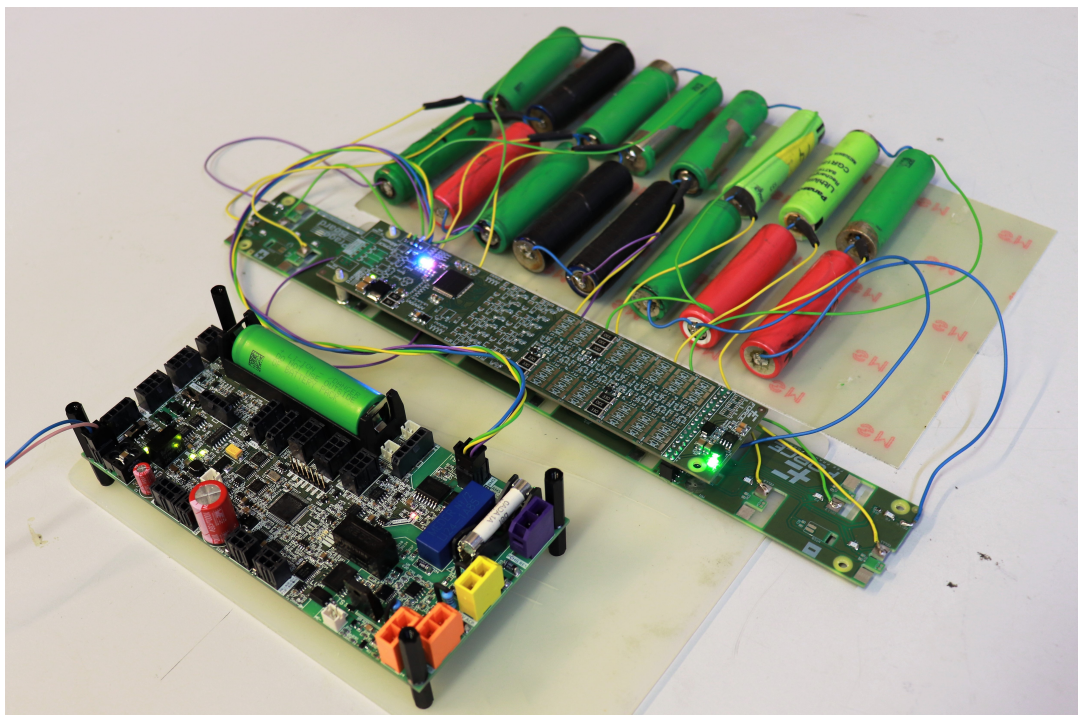


Obrázek 5.6: Detail ultrazvukového sváru čtveřice baterií.

Vzhledem k tomu, že bateriových stacků je v celém akumulátoru 9 a je nutné vyrobit i několik rezervních kusů BMS, jedná se v podstatě o malosériovou výrobu. V takových případech je více než vhodné vyrobit nejprve prototyp, ten otestovat zda funguje podle očekávání, zapracovat případné změny a až poté vyrobit požadovaný počet kusů. Pro ověření funkčnosti a mechanické kompatibility byly vyrobeny 2 kusy měřicích desek BMS a stejný počet řídicích desek.

DPS byly částečně osazeny a připojeny k testovacímu stacku cylindrických baterií v konfiguraci 16s1p. Testování proběhlo spolu s jednotkou AMS, která musí BMS nejprve „probudit“ ze stavu, kdy je vypnutá a nevybílí baterie. Jednotka AMS poté

nakonfiguruje řídicí BMS chip tak, aby jí posílal měřená data, ty jsou následně přeposílány na sběrnici CAN. Ve firmwaru jednotky AMS je též implementován algoritmus, který spíná balancování jednotlivých článků na základě rozdílu jejich napětí a to pouze v případě, když indikuje připojení akumulátoru k nabíječce.



Obrázek 5.7: Testování prototypu BMS.

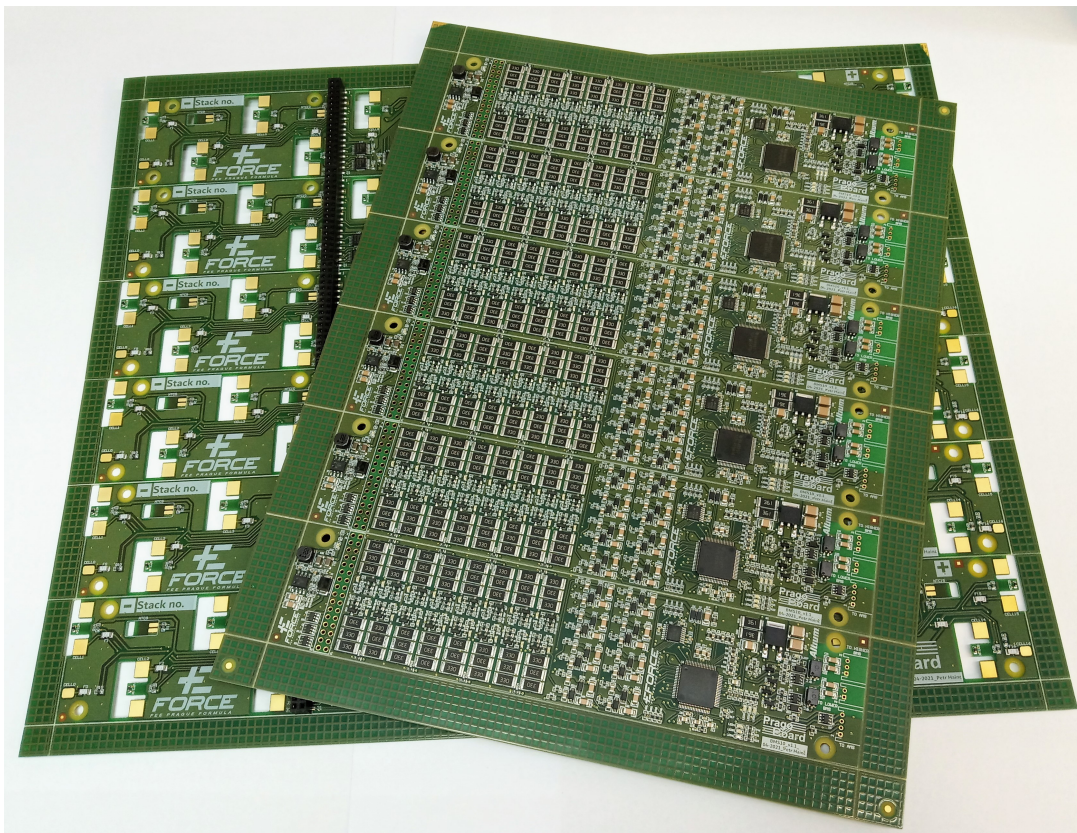
5.2 Výroba BMS

Oproti prototypu BMS byl změněn typ konektorů z přímých na úhlové a původní kovové pájecí distanční sloupky nahradily plastové. Další úpravy se týkaly drobných změn v layoutu DPS, zejména s ohledem na strojní osazení a pájení. Dominantním způsobem pájení SMD součástek je v současnosti tzv. přetavení, to spočívá v nanesení pájecí pasty na pájecí plošky, do ní osazovací automat umístí součástky a celá deska se součástkami se vloží do přetavovací pece, kde dojde ke změně skupenství pájky. S tímto procesem jsou spojené některé nežádoucí vlivy, které lze eliminovat právě správným layoutem DPS. Příkladem takového jevu je zvedání součástek (též označováno jako „Manhattan effect“ nebo „tombstoning“), k jeho omezení je třeba dbát na symetrii odvodu tepla z pájecích plošek při přetavení [5].

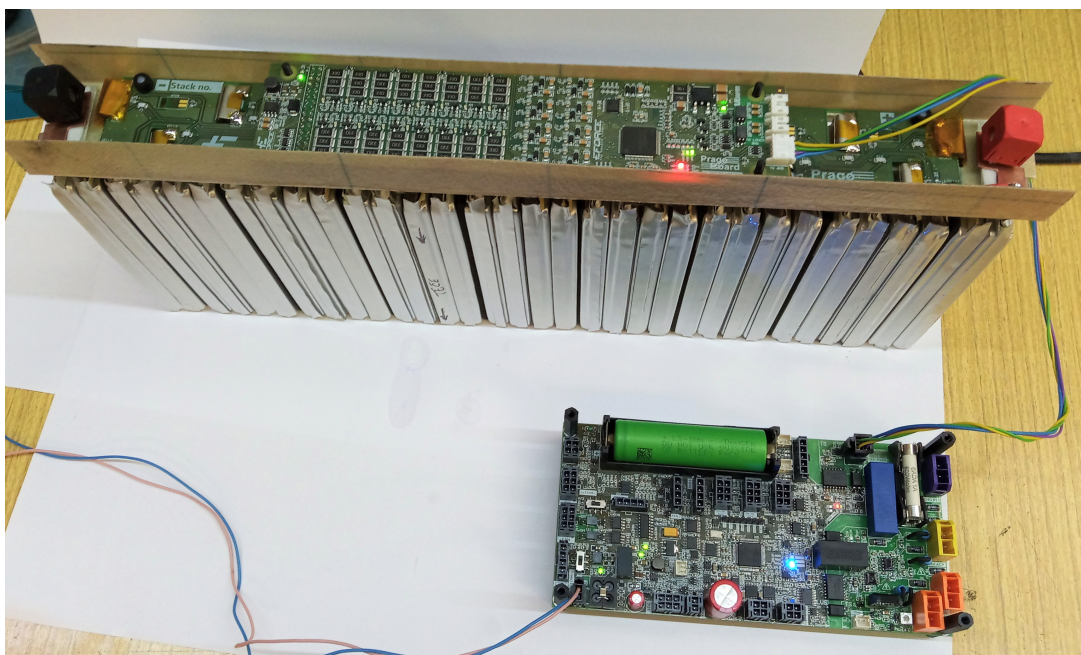
Při výrobě většího počtu kusů DPS je také vhodné jednotlivé desky seskupit na panel, aby bylo možné strojně osadit a pájet více desek najednou. Tyto kroky návrhu je vždy dobré konzultovat s firmou, která bude DPS vyrábět a také s pracovištěm, které je bude osazovat a panelizaci tak přizpůsobit jejich technologickým možnostem. Pro nanesení pájecí pasty je také nutné nechat vyrobit laserem vyřezanou nerezovou šablonu odpovídající panelu s DPS.

V případě BMS byly pro oba typy desek vytvořeny panely se 6 kusy daných DPS, vyrobeny a osazeny byly 2 panely od každého typu, tj. celkem 12 kompletních kusů BMS. Oddělení jednotlivých DPS na panelu je řešeno pomocí drážkování, po osazení je panel rozlámán na příslušné desky (osazené panely BMS jsou na obrázku 5.8). Jedna z vyrobených BMS byla osazena na testovací stack svařených baterií Melasta a spolu s jednotkou AMS opět ověřena funkčnost systému (viz obr. 5.9).

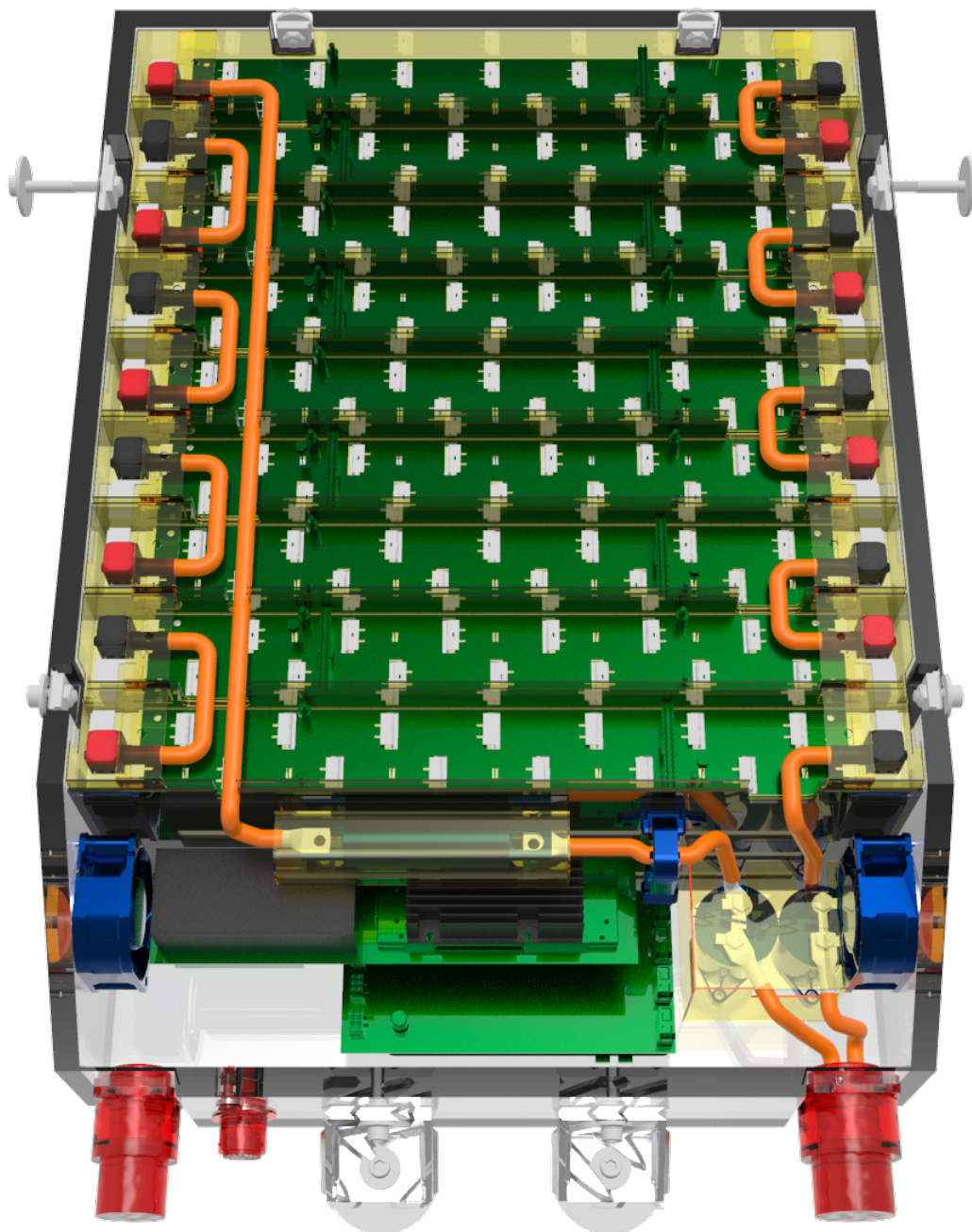
Na obrázku 5.10 lze vidět kompletní mechanickou zástavbu akumulátorového boxu. Většinu jeho prostoru zaplňuje 9 sériově propojených stacků baterií, každý stack je uložen v laminovaném obalu z nehořlavých skelných vláken, stacky jsou vzájemně odděleny přepážkami ze stejného materiálu. V přední šikmé části akumulátorového boxu se nachází zbytek řídicí elektroniky, úplně dole je IMD, nad ním jednotka AMS a nahoře deska DC/DC měniče jejíž chlazení zajišťují dva ventilátory na stranách boxu. Hlavní proudová cesta je ve 3D modelu znázorněna silovým vodičem oranžové barvy, obsahuje trakční pojistku, proudový senzor a v pravém dolním rohu je přerušena AIRy, ze kterých pokračuje do výstupního vysokonapětového konektoru.



Obrázek 5.8: Osazené panely s BMS.



Obrázek 5.9: Testování BMS na stacku baterií Melasta.



Obrázek 5.10: 3D render sestavy kompletního akumulátorového boxu.

Kapitola 6

Řídicí jednotka AMS

AMS (Accumulator Management System) je hlavní elektronická řídicí jednotka akumulátorové baterie monopostu eForce FSE.10. Kombinuje nízko i vysokonapěťovou část a zajišťuje bezpečnostní funkce vyžadované pravidly soutěže a další funkce vyplývající z požadavků na koncept celého vozu. Jejich bližším popisem se zabývá následující podkapitola.

6.1 Specifikace funkcí jednotky AMS

- **Ovládání hlavních akumulátorových relé, tzv. AIRů (Accumulator Insulation Relay)**

AIRy oddělují kladný a záporný pól baterie od výstupního konektoru akumulátorového boxu, jednotka AMS se stará o jejich ovládání. Součástí je také nezávislé snímání mechanického stavu těchto relé (pro případ kdy by kontakty zůstaly „svažené“ vlivem elektrického oblouku).

- **Implementace obvodu Precharge**

Precharge obvod je nezbytnou součástí všech aplikací s kapacitní zátěží. Obvod sestává z výkonových rezistorů a relé, které při startovací sekvenci vozu na okamžik přemostí AIRy a definovaně nabijí vstupní kapacity trakčních měničů, až poté sepnou AIRy. Tím se omezí proudové nárazy při spínání AIRů.

- **Obsluha ochranného obvodu SDC (Shutdown circuit)**

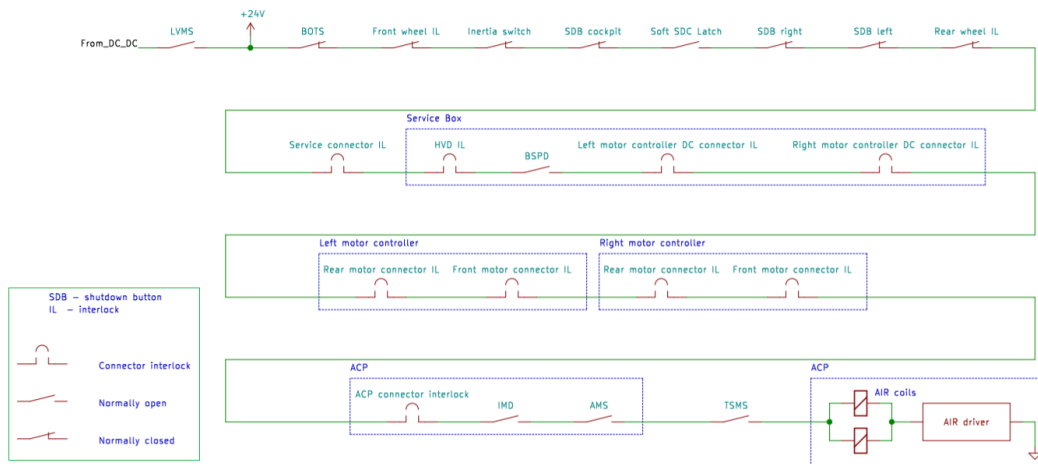
SDC je sériové spojení různých bezpečnostních prvků, které prochází celým vozem. Na svém konci SDC přímo napájí AIRy, pokud dojde k jeho přerušení vlivem poruchy nebo zásahem obsluhy, akumulátor se okamžitě odpojí od zbytku vozu (schéma SDC vozu FSE.10 je na obrázku 6.1).

- **Detekce vysokého napětí na výstupu z akumulátorového boxu**

Pro zajištění co největší bezpečnosti je nezbytné nezávisle detekovat přítomnost vysokého napětí na vnější straně AIRů.

■ Měření proudu a napětí

Měření napětí akumulátoru na vnitřní i vnější straně AIRů, měření proudu odebraného (resp. dodávaného) z akumulátoru.



Obrázek 6.1: Schéma bezpečnostního obvodu SDC.

■ Komunikace

Dvě izolované sběrnice CAN pro komunikaci s ostatními jednotkami ve voze a jedno izolované rozhraní UART pro komunikaci s BMS. Dále implementace sběrnice I^2C pro komunikaci s modulem DC/DC měniče.

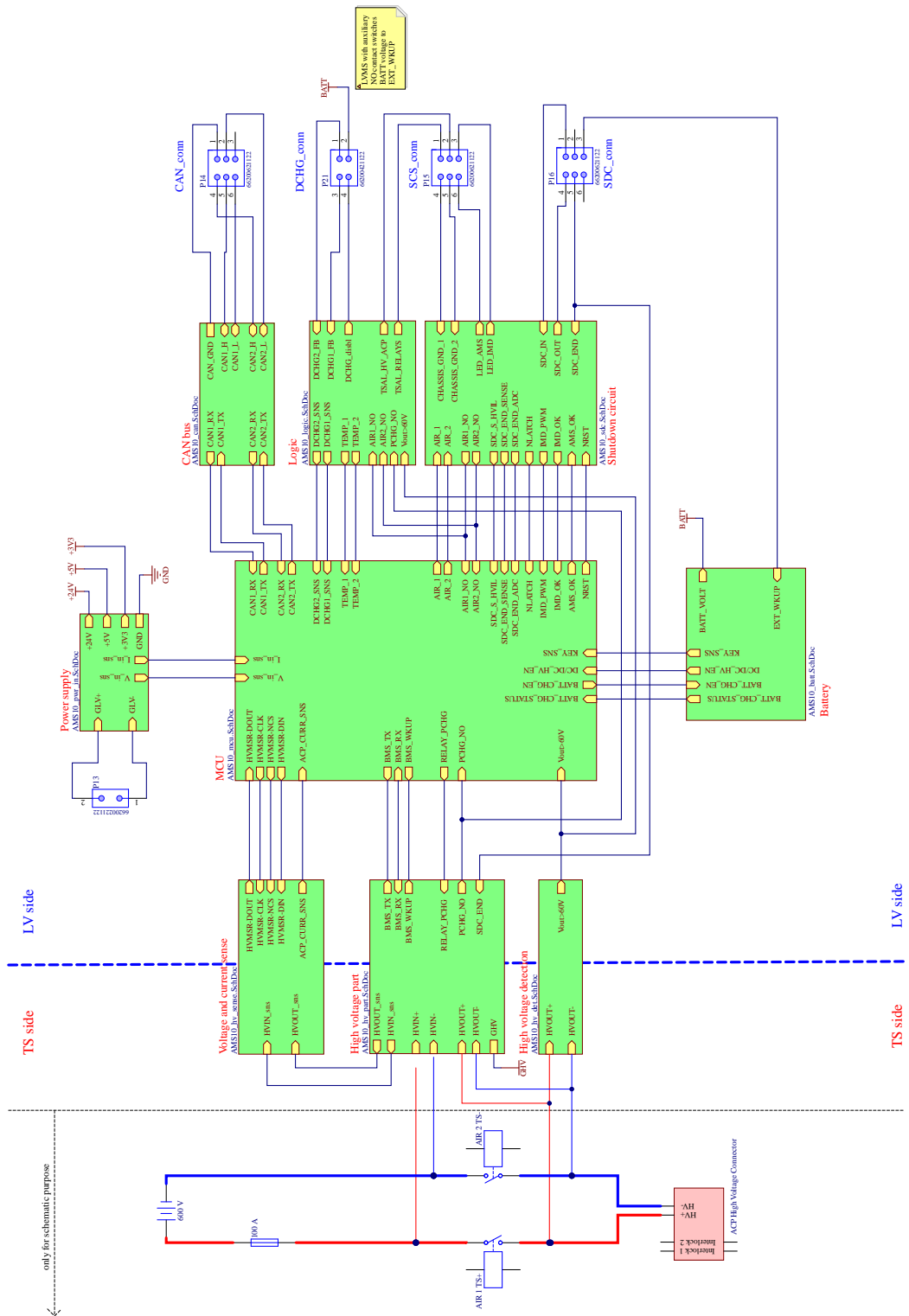
■ Implementace pomocného zdroje energie pro zapnutí DC/DC měniče

DC/DC měnič je připojen k trakčnímu napětí na vnitřní straně AIRů pro jeho odpojení od vysokého napětí je použit spínací tranzistor. Jednotka AMS implementuje pomocný zdroj energie, který tento tranzistor sepne v okamžiku otočení klíčkem vozu, díky tomu se zapne DC/DC měnič a spustí se nízkonapěťový systém.

■ 6.2 Návrh a testování jednotky AMS

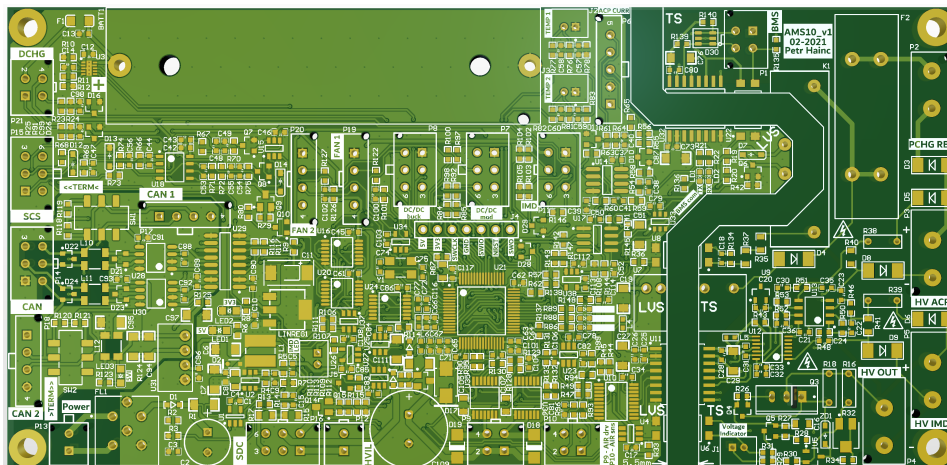
V blokovém schématu jednotky AMS na obr. 6.2 je v levé části naznačena vysokonapěťová část, kde příslušné bloky realizují měření trakčního napětí (rozlišení 150 mV) a zpracování signálu z proudového senzoru (rozlišení 0,2 A). V bloku *High voltage detection* je pomocí jednoduchého komparátoru s hysterezí realizována nezávislá detekce vysokého napětí na výstupním konektoru, která je napájena přímo z detekovaného napětí.

Na pravé straně schématu se nachází části pro komunikaci a různé vstupně výstupní obvody pro ovládací signály dalších jednotek vozu. Spodní blok *Battery* implementuje jednu $LiFePo_4$ baterii včetně jejího nabíjení, která slouží jako pomocný zdroj energie pro zapnutí DC/DC měniče. Pro napájení obvodů jednotky AMS je použito tří napěťových úrovní - 24 V, 5 V a 3,3 V. O veškeré řízení se stará 32-bitový mikrokontrolér STM32F105.



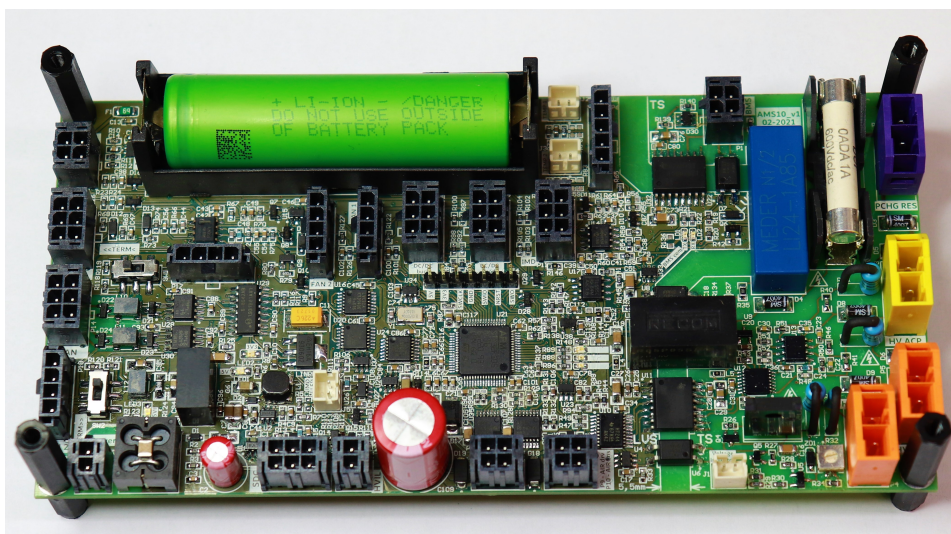
Obrázek 6.2: Blokové schéma zapojení jednotky AMS.

Jednotka AMS je čtyřvrstvá DPS, má dvě signálové, jednu napájecí a jednu zemní vrstvu a je rozdělena na dvě části. Vpravo se nachází vysokonapěťová část, v levé části nízkonapěťová, obě části jsou vzájemně odděleny zřetelnou, 5,5 mm širokou, izolační bariérou, ve které nejsou vedeny žádné spoje. Při návrhu desky byl největší důraz kladen na dodržení dostatečných izolačních vzdáleností v oblastech, kde se vyskytuje trakční napětí 600 V, na výběr vhodných součástek, které jdou přes izolační bariéru a na správnou galvanickou izolaci obou částí. Všechny desky plošných spojů byly navrženy v programu Altium Designer verze 21.



Obrázek 6.3: Horní 3D pohled na DPS jednotky AMS (náhled bez součástek).

Deska plošných spojů byla kompletně ručně osazena, důležitým krokem bylo nanesení ochranného laku po osazení všech SMT součástek ve vysokonapěťové části (aby se lak dostal i pod velké THT součástky). Při osazování byla průběžně prováděna optická kontrola pájených spojů a testovány jednotlivé funkční bloky. Všechny základní funkcionality fungují dle předpokladů.



Obrázek 6.4: Plně osazená jednotka AMS.

Kapitola 7

DC/DC měnič

Způsoby napájení nízkonapětového systému ve voze Formula Student jsou dle pravidel FSG [3] dva, resp. tři. Lze použít separátní nízkonapětovou baterii o dostatečné kapacitě nebo galvanicky oddělený DC/DC měnič z napětí TS (Tractive System) na LV (Low Voltage), přípustná je i kombinace obou těchto řešení.

V monopostech týmu eForce byla po několik posledních sezón využívána právě kombinace výše zmíněných možností. LV baterie obstarávala napájení nízkonapětových systémů do doby než naběhl DC/DC měnič, který následně veškeré LV napájení převzal. Výhodou tohoto řešení byla redundance napájecích zdrojů, kdy v případě výpadku DC/DC konvertoru byla baterie schopná po omezenou dobu napájet veškeré systémy. Nevýhodou byla větší složitost systému napájení ze dvou zdrojů a nezanedbatelná hmotnost LV baterie a jejího řízení.

Pro monopost FSE.10 bylo rozhodnuto o použití pouze DC/DC měniče pro veškeré LV napájení ¹. DC/DC měnič by měl odpovídat této specifikaci:

- Vstupní napětí: 432 V až 600 V (vychází z minimálního a maximálního napětí akumulátoru)
- Výstupní napětí: regulovaných 24 V
- Výkon: 600 W nebo více
- Měření výstupního proudu
- Malé rozměry a hmotnost

7.1 Výběr DC/DC měniče

Najít na trhu komerční řešení pro výše uvedené požadavky se ukázalo jako poměrně nelehký úkol. Jediným modulem, který by se dal pro danou aplikaci použít je *Vicor BCM4414BG0F4440C10* [6], kromě vysoké ceny je jeho jedinou nevýhodou, že má

¹Stejně jako v prvním autonomním monopostu DV.01, který vznikl přestavbou úspěšného elektrického monopostu FSE.07 z roku 2018.

pevný poměr mezi vstupním a výstupním napětím (1:16), napětí na výstupu tedy není regulované na určitou hodnotu.

Dalším řešením by mohlo být použití několika menších modulů DC/DC měniče zapojených paralelně, výhodou by byly menší nároky na rozsah vstupního napětí a výkon jednoho modulu. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost přesně vyrovnaného rozdělení odebíraného proudu do paralelních větví, jinak by hrozilo nerovnoměrné vybíjení bateriových stacků akumulátoru. Pro tuto aplikaci by byly vhodné moduly *Vicor V150B28E250BL2* zapojené tři paralelně, vstup jednoho modulu by byl připojen na tři stacky v sérii.

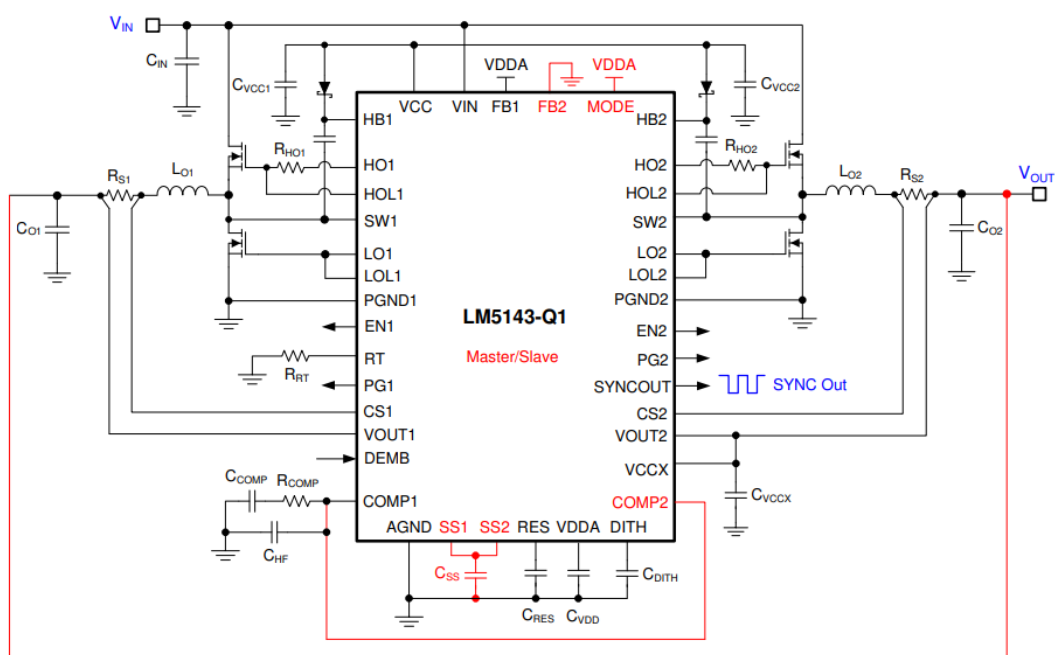
Poslední možností je návrh vlastního izolovaného DC/DC měniče na míru dle výše uvedených parametrů. To by bylo z inženýrského pohledu zajímavou výzvou, nicméně je to úkol poměrně složitý a svým rozsahem by sám vydal na celou další diplomovou práci.

Vzhledem k zjištění, že moduly *Vicor V150B28E250BL2* nespĺňují izolační napětí, které je určeno pravidly FSG [3] jako alespoň trojnásobek maximálního trakčního napětí bylo rozhodnuto o použití neregulovaného modulu *Vicor BCM4414BG0F4440C10*. Na jeho výstup bude zařazen další DC/DC měnič topologie *buck* vlastního návrhu, který upraví výstupní napětí na regulovaných 24 V. Požadavek na výkon této napájecí kaskády je stanoven na 600 W pro trvalý odběr a cca 1000 W krátkodobě.

7.2 Návrh a testování prototypu buck měniče

Testovací prototyp vznikl za účelem otestování funkčnosti *buck* měniče založeného na řídicím čipu *LM5143* [7] od výrobce Texas Instruments. Tento měnič by měl být v produkční verzi zařazen za izolovaný modul DC/DC měniče *Vicor BCM4414BG0F4440C10* a tedy napájet kompletní nízkonapěťový systém nového monopostu FSE.10.

Topologie obvodu je duální multifázový synchronní *buck* měnič, je navržen pro vstupní napětí 27 - 37,5 V (odpovídá max. a min. trakčnímu napětí v poměru 1:16), výstupní napětí je regulovaných 24 V. Tato topologie je vhodná pro měniče s proudem 25 A a více, kde by při klasické jednofázové architektuře mohla být výkonová ztráta značným problémem. V případě použité topologie se jedná v podstatě o dva *buck* měniče zapojené paralelně jež jsou vzájemně fázově posunuty o 180°. Výhodou tohoto zapojení je redukce proudového zvlnění na vstupu a výstupu a snížení výkonové ztráty na spínacích tranzistorech a cívce na polovinu [8].



Obrázek 7.1: Principiální schéma zapojení duálního multifázového buck měniče s čipem LM5143 (převzato z [7]).



Obrázek 7.2: Testovací prototyp buck měniče.

Měnič by měl být schopný dodávat proud 25 A kontinuálně a až 40 A krátkodobě, nadproudová ochrana je nastavená na 45 A. DPS též obsahuje lineární regulátor (LDO) na 5 V pro napájení řídicího čipu.

Při prvním testování bylo cílem ověřit, zda navržený měnič funguje a jakou má účinnost. Prozatím byla na desku osazena polovina vstupních a výstupních kapacit,

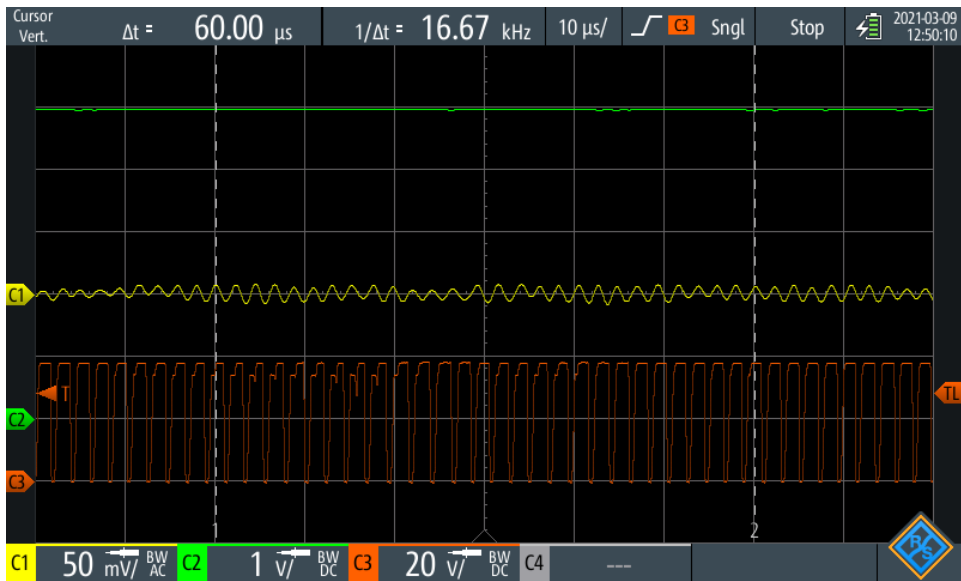
měření proběhlo bez namontovaného chladiče. K dispozici byl maximální vstupní výkon 300 W, jako zátěž byla použita elektronická zátěž *Rigol DL3031*, která dle dokumentace zvládne až 350 W.

Při tomto testu byla změřena účinnost okolo 90 %, což je uspokojivá hodnota, nicméně očekávaná hodnota účinnosti je okolo 95 %. Výstupní zvlnění při zátěži 1 A bylo cca 200 mV_{pp}. Při důkladnějším měření osciloskopem (viz obrázek 7.3) bylo zjištěno, že výstupní zvlnění periodicky kolísá (žlutý průběh), s ním jsou korelované propady napětí 5 V lineárního regulátoru o cca 1 V (zelený průběh). Červený průběh zobrazuje spínání MOSFETu v high-side jednoho kanálu měniče, zdá se, že LDO nedokáže spolehlivě napájet řídicí čip (ten dle laboratorního zdroje odebírá cca 70 mA při 5 V, LDO má max. proud 150 mA, je ale možné, že gate drivery mají při spínání větší špičkový odběr, který resetuje LDO).



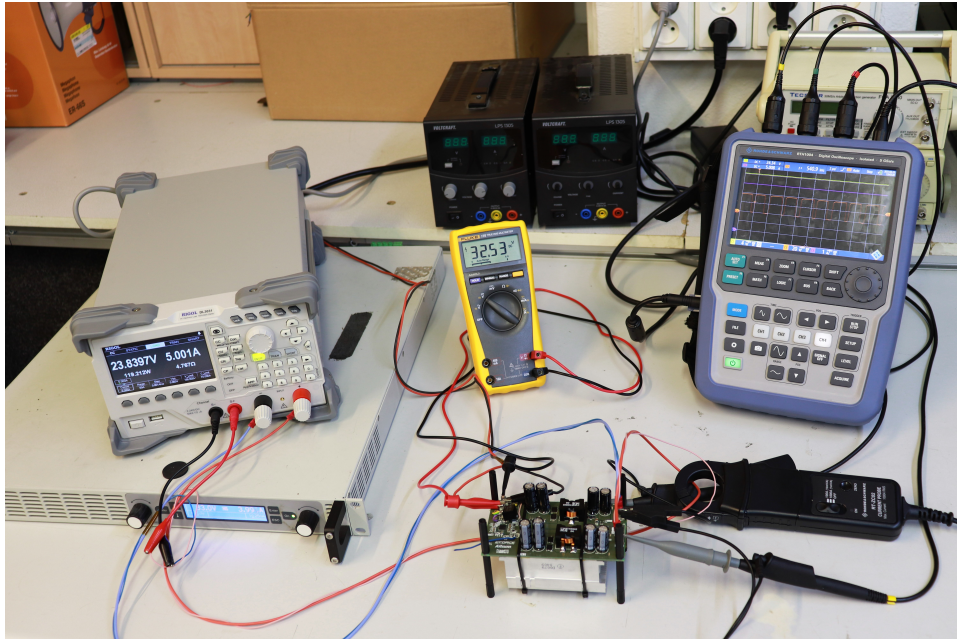
Obrázek 7.3: Průběhy vybraných napětí při testování měniče 1.

Pro druhé testování měniče byly doosazeny zbývající vstupní a výstupní elektrolytické kondenzátory a namontován provizorní chladič zespod desky. Problém s lineárním regulátorem byl vyřešen jeho výměnou za modul se spínaným zdrojem (obdobné průběhy jako výše zobrazené jsou na obrázku 7.4).



Obrázek 7.4: Průběhy vybraných napětí při testování měniče 2.

Jako vstupní zdroj tentokrát posloužil laboratorní zdroj *Elektro Automatik PS9500-20*, který zvládne dodat plný napěťový vstupní rozsah a proud až 20 A. El. zátěž zůstává stejná jako v předchozím testu, napětí na vstupu měniče bylo měřeno multimetrem *Fluke 175*. Napětí na vstupu i výstupu byla měřena přímo na kontaktech plošného spoje (multimetrem na vstupu a měřícími svorkami el. zátěže na výstupu), díky tomu nebylo měření ovlivněno úbytkem napětí na nedostatečně dimenzovaných vodičích. Následující měření probíhala do maximální zátěže 18 A (el. zátěž pracovala až do 430 W).

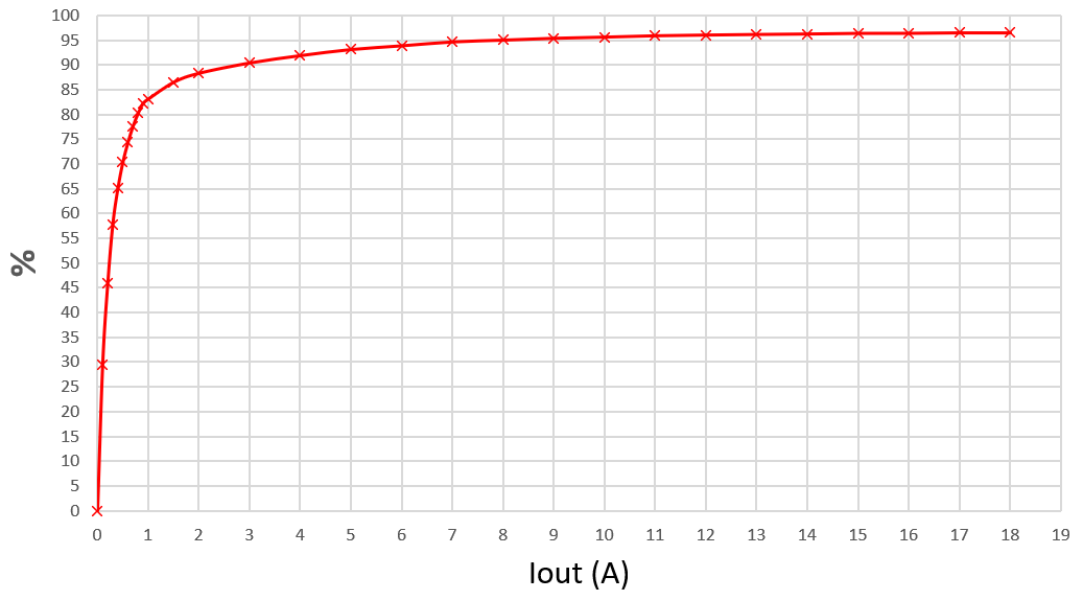


Obrázek 7.5: Měřící pracoviště.

Účinnost se spočítá jako poměr výstupního výkonu a vstupního příkonu měniče:

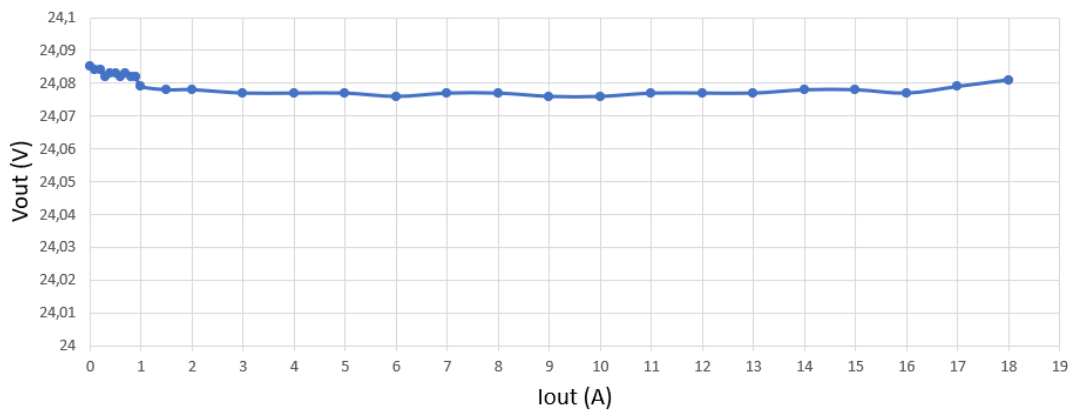
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\%, \quad (7.1)$$

Změřená účinnost se pohybovala okolo 95 % při zátěži 7 A a více (viz obrázek 7.6). Taková účinnost je více než uspokojivá a odpovídá teoretickým předpokladům.



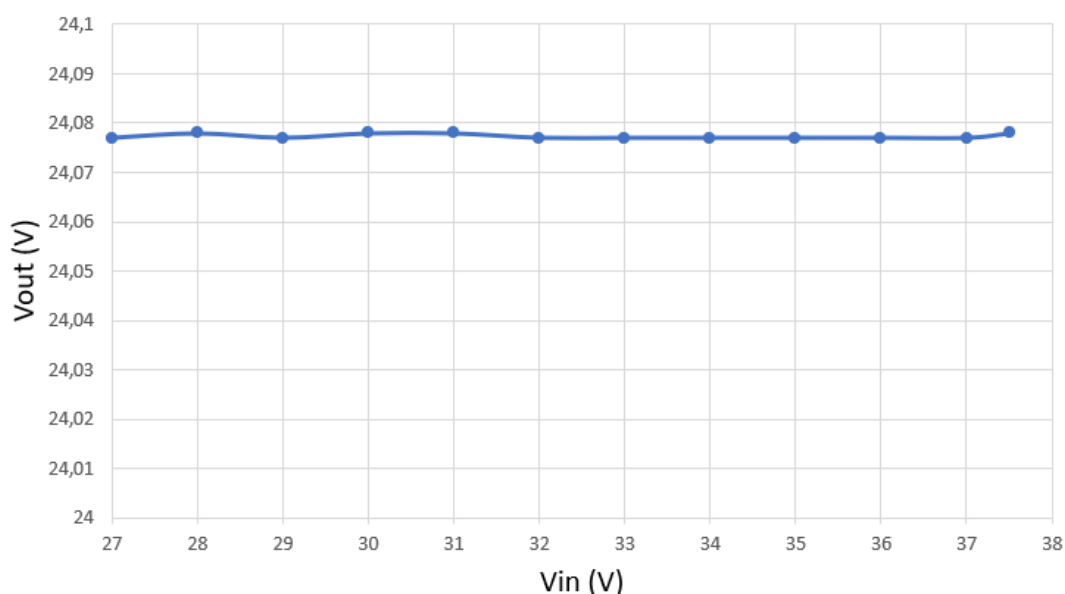
Obrázek 7.6: Graf účinnosti testovaného měniče.

Parametr *load regulation* udává schopnost udržovat konstantní výstupní napětí pro různé zátěže, v celém měřeném rozsahu zátěže bylo napětí konstantní:



Obrázek 7.7: Load regulation testovaného měniče.

Dalším měřeným parametrem je *line regulation*, který udává stabilitu výstupního napětí při změně vstupního napětí měniče. Pro celý vstupní rozsah bylo výstupní napětí opět konstantní:



Obrázek 7.8: Line regulation testovaného měniče (při $I_{out} = 10$ A).

I při zatížení větším než 10 A bylo výstupní napětí zvládnutelné do $50 mV_{pp}$. Pokus o změření odezvy výstupního napětí na skokovou změnu zátěže se nezdařil. Důvodem takto dobré stability výstupního napětí je pravděpodobně vliv velké (možná až předimenzované) výstupní kapacity měniče. Teplota při zátěži 10 A byla na high-side MOSFETu okolo 80°C , na chladiči 45°C a na řídicím čipu 35°C . Při max. zatížení 18 A byla teplota horního MOSFETu 102°C (měřeno kontaktně termočlánekem na pouzdrech součástek).

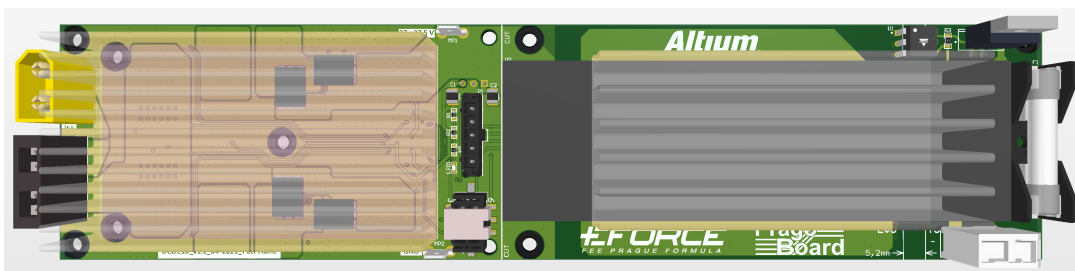
Měření potvrzuje, že použití tohoto *buck* měniče je možné v produkční verzi. Vzhledem k velkému ztrátovému výkonu na spínacích tranzistorech by bylo vhodné najít jiné s ještě menším odporem v sepnutém stavu (R_{DSon}), příp. lepší možnosti chlazení. Dále je třeba se zamyslet nad rozumným snížením vstupní kapacity, modul *Vicor BCM4414BG0F4440C10*, který mu bude předřazen má omezenou výstupní kapacitu na $470 \mu\text{F}$. Další otázkou je elektromagnetická kompatibilita měniče, měření vyzařování sondou blízkého pole a spektrálním analyzátozem by rozhodně bylo zajímavé.

7.3 Návrh a testování kompletního DC/DC měniče

V produkční verzi DC/DC měniče pro monopost FSE.10 bude izolovaný modul *Vicor BCM4414BG0F4440C10* následovaný, oproti testovacímu prototypu mírně upraveným, *buck* měničem vlastního návrhu. Tuto DPS bude třeba co nejvíce zmenšit, aby bylo možné ji jednoduše zastavět do akumulátorového boxu monopostu.

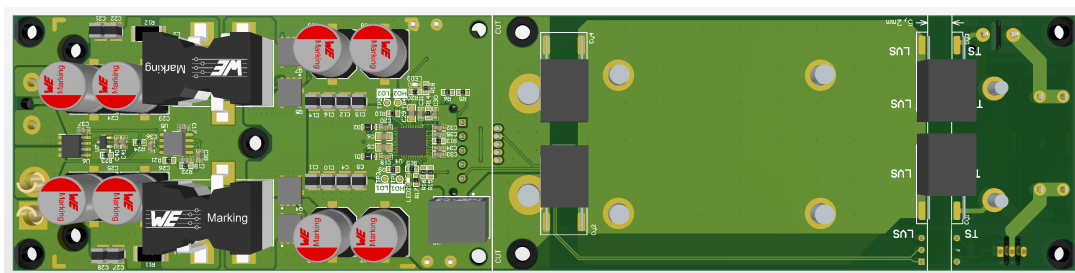
Čtyřvrstvá DPS je koncipovaná jako oboustranně osazená deska, kde na horní straně se nachází modul *Vicor* a jedna sada spínacích tranzistorů *buck* měniče. Toto rozložení vychází ze způsobu zástavby desky v akumulátorovém boxu, kde bude díky ventilátorům cirkulovat vzduch přes chladiče v příčném směru. Na horní straně desky se též nachází

vstupní a výstupní silový konektor a také konektory pro komunikaci s jednotkou AMS. Vstup je jištěn pojistkou o hodnotě 3 A, výstup poté pojistkou o hodnotě 40 A. Na vysokonapěťovém vstupu se dále nachází spínací MOSFET tranzistor s galvanicky odděleným ovládacím signálem pomocí fotovoltaického optočlenu jež na vstup modulu Vicor připojuje trakční napětí akumulátoru. Středem DPS je v potisku naznačena čára, podle které je v budoucnu možné rozdělit desku na dvě části a využít tak část s buck měničem jako modul v jiných aplikacích.



Obrázek 7.9: Deska DC/DC měniče horní pohled.

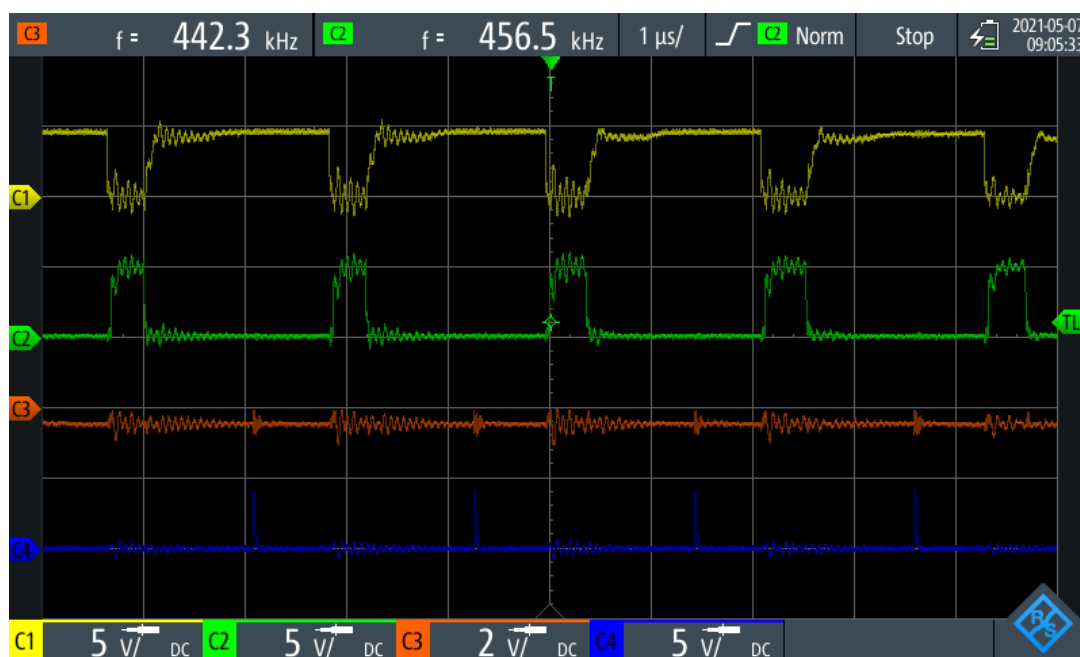
Na dolní straně DPS jsou umístěny bezpečnostní kondenzátory pro potlačení rušení, dále se zde nachází většina součástek duálního *buck* měniče. Oproti testovacímu prototypu jsou zde vstupní a výstupní kondenzátory o menší hodnotě a v jiném pouzdře (aby byly zhruba stejně vysoké jako cívky). Výstup je doplněn průchozím senzorem proudu na bázi Hallova efektu. Na DPS lze osadit dvě různé sady tranzistorů, buď NTMFS5C612NL - stejně jako na testovacím prototypu, které se chladí přes DPS a chladič je umístěn na druhé straně desky. Nebo tranzistory IRF7749L1TRPBF, na které lze přímo připojit chladič a díky tomu snížit tepelný odpor mezi jejich pouzdrem a chladičem.



Obrázek 7.10: Deska DC/DC měniče dolní pohled.

Na vyrobenou desku byly nejprve osazeny součástky buck měniče s tranzistorem IRF7749L1TRPBF. Během testování této části zařízení bylo zjištěno poněkud nedeterministické chování, kdy měnič nedokázal regulovat výstupní napětí na požadovanou hodnotu při běhu na prázdko. Měření osciloskopem ukázalo, že v této situaci po připojení napájení tranzistory na cca 30 ms spínají, poté je řídicí čip spínat přestane. Při startu měniče s již zatíženým výstupem obvykle napětí na výstupu dosáhlo žádaných 24 V, nicméně dle osciloskopu se v některých případech spustil pouze jeden kanál měniče (viz obrázek 7.11; C1 a C3 jsou spínací napětí tranzistoru v high-side, C2 a C4

pro low-side). Tento jev byl pozorován nahodile a nekorespondoval s žádnými jinými událostmi.



Obrázek 7.11: Průběhy napětí na gatech tranzistorů (funkční pouze jeden kanál měniče).

Takovéto chování by mohlo ukazovat buď na nějaký špatně připájený pin řídicího čipu nebo na problém s rušením vlivem neoptimálního layoutu DPS. Po osazení druhého kusu stejné desky a důkladné kontrole všech pájených spojů problémy přetrvávaly. Během dalšího měření bylo zjištěno kolísání střídavých průběhů gateových napětí, které pravděpodobně způsobuje nestabilita zpětné vazby regulátoru vlivem kapacitně vázaného rušení v oblasti DPS s řídicím čipem. Laděním hodnot součástek pro kompenzaci zpětnovazební smyčky a snížením impedance na pinu COMP, na který je vyveden výstup transkonduktančního chybového zesilovače regulátoru, se kolísání střídavých spínacích signálů nepatrně zmenšilo. Díky tomu měnič začal regulovat výstupní napětí i při běhu naprázdno, nicméně problém s náhodnými výpadky jednoho kanálu se nezlepšil.

Kvůli těmto překážkám nebylo možné provést měření na celém DC/DC měniči včetně vysokonapěťového modulu Vicor. Zajímavé je, že na testovacím prototypu se stejným zapojením a velmi podobným layoutu DPS se tyto problémy nijak neprojeví. Uvedené nedostatky je třeba dále analyzovat a pravděpodobně bude nezbytné přepracovat layout stávající DPS.

Kapitola 8

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout akumulátorovou baterii a její řídicí elektroniku pro elektrický vůz typu Formula Student. Dle požadovaných parametrů a výsledků testování vzorků byl vybrán vhodný bateriový článek. Dále byla navržena elektrické konfigurace celé akumulátorové baterie a koncept elektronického řídicího systému.

Podářilo se navrhnout, vyrobit a otestovat prototyp BMS a následně vyrobit malou řadu těchto BMS. Dále byla realizována řídicí jednotka AMS, která byla též otestována s pozitivním výsledkem. Předmětem další analýzy a práce bude muset být DC/DC měnič, který na testovacím prototypu fungoval bezproblémově, nicméně v produkční verzi byly zjištěny nedostatky popsané v podkapitole 7.3.

Vzhledem ke stíženým podmínkám uplynulého roku bohužel nebylo možné vyrobit kompletní akumulátorovou baterii včas a otestovat systém jako celek. Testovány byly všechny dílčí části - funkčnost BMS spolu s jednotkou AMS byla ověřena na zkušebních bateriových modulech. Přítomnost vysokého trakčního napětí byla při testech emulována pomocí vysokonapěťového laboratorního zdroje. Po dokončení výroby monopostu FSE.10 bude akumulátorová baterie otestována v praxi. Správnost navrženého řešení naplno prověří nasazení vozu na závodních tratích v nadcházející sezóně.

Tato práce ukázala implementaci, pro tým eForce, nového typu bateriových článků a systému řízení akumulátorové baterie, naplno zhodnotit dosažené výsledky bude možné až po závodní sezóně vozu FSE.10. V případě úspěchu budou moci být části této práce dále rozvíjeny v budoucích monopostech týmu.

Příloha A

Literatura

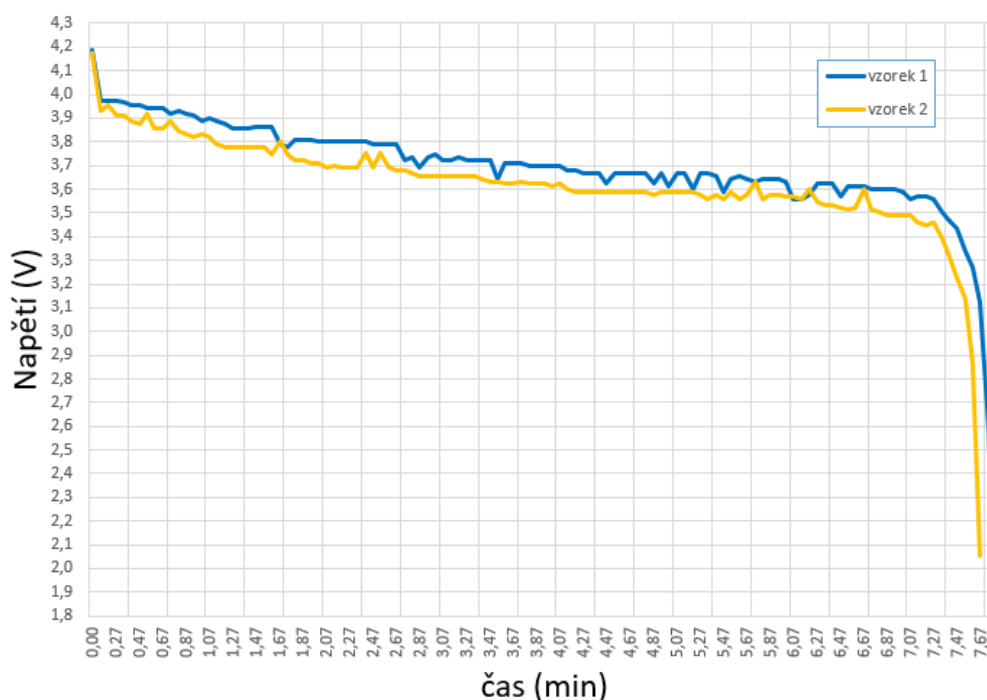
- [1] Eniwiki, *Elektromobily: Historie elektromobilu* [online, cit. 2021-05-04]
Dostupné z: <https://www.eniwiki.cz/wiki/Elektromobily>
- [2] XIONG, Rui; SHEN, Weixiang. *Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN 978-1-119-48164-5.
- [3] Formula Student Germany Rules 2020 v1.0 [online, cit. 2021-04-21]
Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [4] MÁNEK, Jan. *Návrh systému pro správu baterií (BMS) pro elektrickou formuli*. 2018, FEL ČVUT, Praha, Bakalářská práce
- [5] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [6] Vicor, *BCM4414BG0F4440C10*, katalogový list [online, cit. 2021-04-24]
Dostupné z: http://www.vicorpower.com/documents/datasheets/ds_BCM4414xG0F4440yzz.pdf
- [7] Texas Instruments, *LM5143-Q1*, katalogový list [online, cit. 2021-05-17]
Dostupné z: <https://www.ti.com/product/LM5143-Q1>
- [8] BABA, David. *Benefits of a multiphase buck converter*, Texas instruments, odborný článek [online, cit. 2021-05-17]
Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/slyt449/slyt449.pdf?ts=1621245035759&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [9] obr. 3.1 převzat z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.vaporism.cz/user/shop/big/8541_akumulator-18650-li-ion-2600-mah-sony-us18650vtc5a.jpg?5fd76a75
- [10] obr. 3.2 převzat z: <https://melasta.com/web/userfiles/product/4-600.jpg>
- [11] obr. 4.3 převzat z: https://www.we-online.com/catalog/en/WP-PLUG_DIRECT_PLUG

- [12] obr. 4.3 převzat z: <https://media.digikey.com/Photos/Littelfuse%20Photos/L70QS150.V.jpg>
- [13] obr. 4.5 převzat z: <https://media.digikey.com/Photos/LEM%20Photos/H0-S-Series.jpg>
- [14] obr. 4.6 převzat z: https://cz.mouser.com/images/littelfuse/lrg/dcnev150-m_SPL.jpg
- [15] obr. 4.1 převzat z: https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/img/foto/IR155_01_WEB.jpg

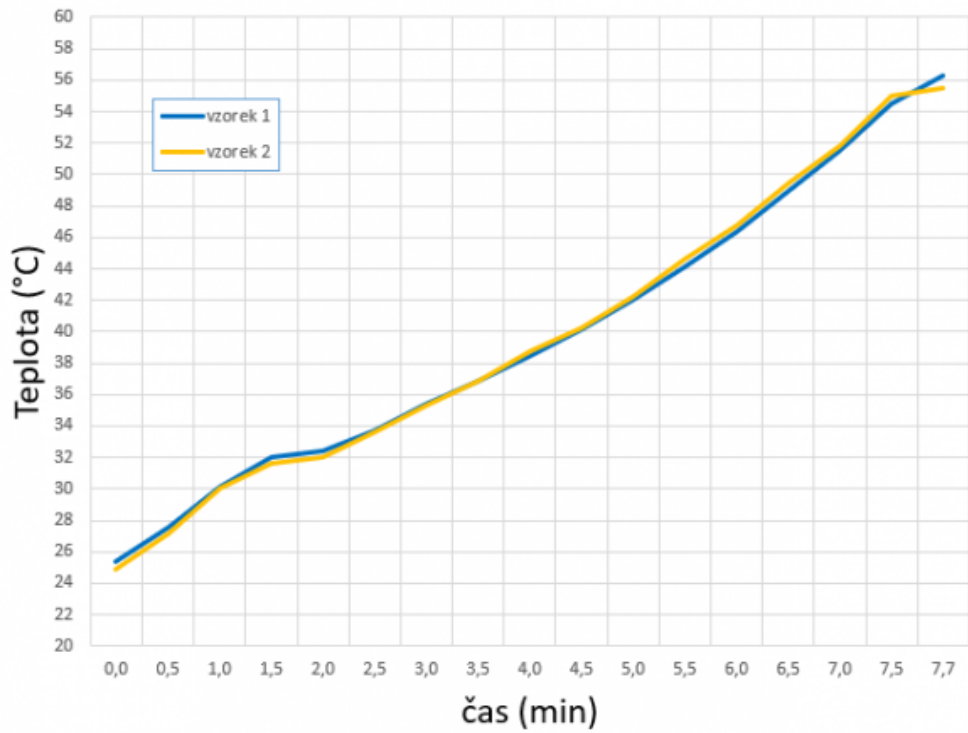
Příloha B

Měření baterií ve firmě Omnitron

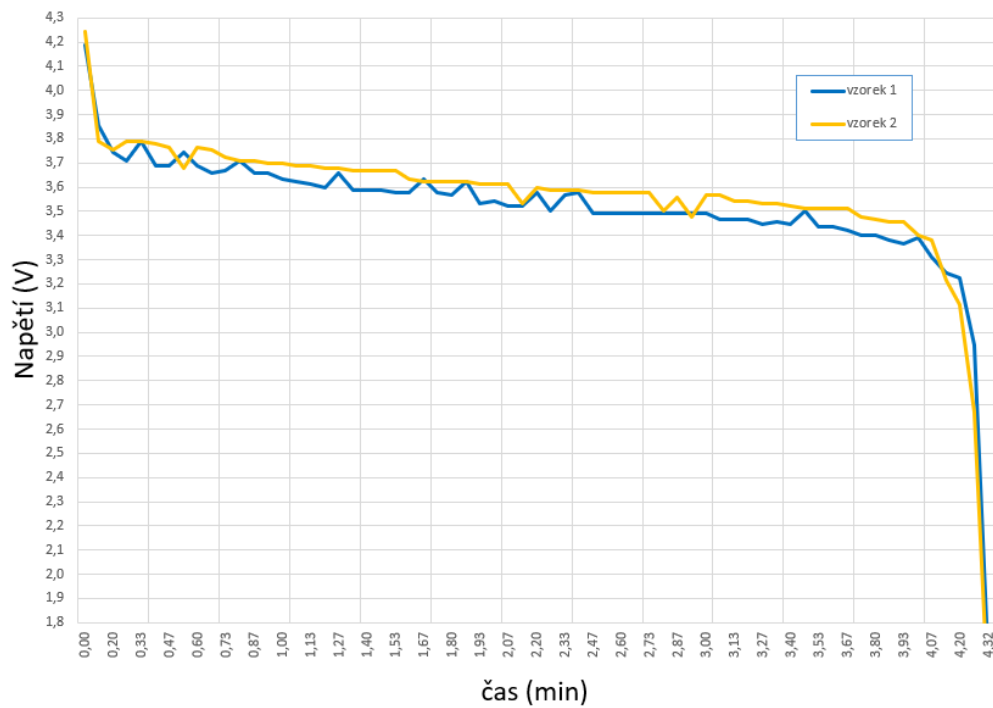
Úplně první vybíjecí testy vzorků baterií Melasta (konstantním proudem 50 A a 90 A) byly provedeny ve firmě Omnitron. Při těchto měřeních byla ověřena výrobcem udávaná kapacita a vnitřní odpor, ten byl dokonce změřen menší než udává katalogový list - cca 0,8 mOhm pro článek SLPBA444124 6,35 Ah a cca 1 mOhm pro článek SLPB6843135 4 Ah. Pro referenci jsou zde vykresleny grafy napětí a teplot.



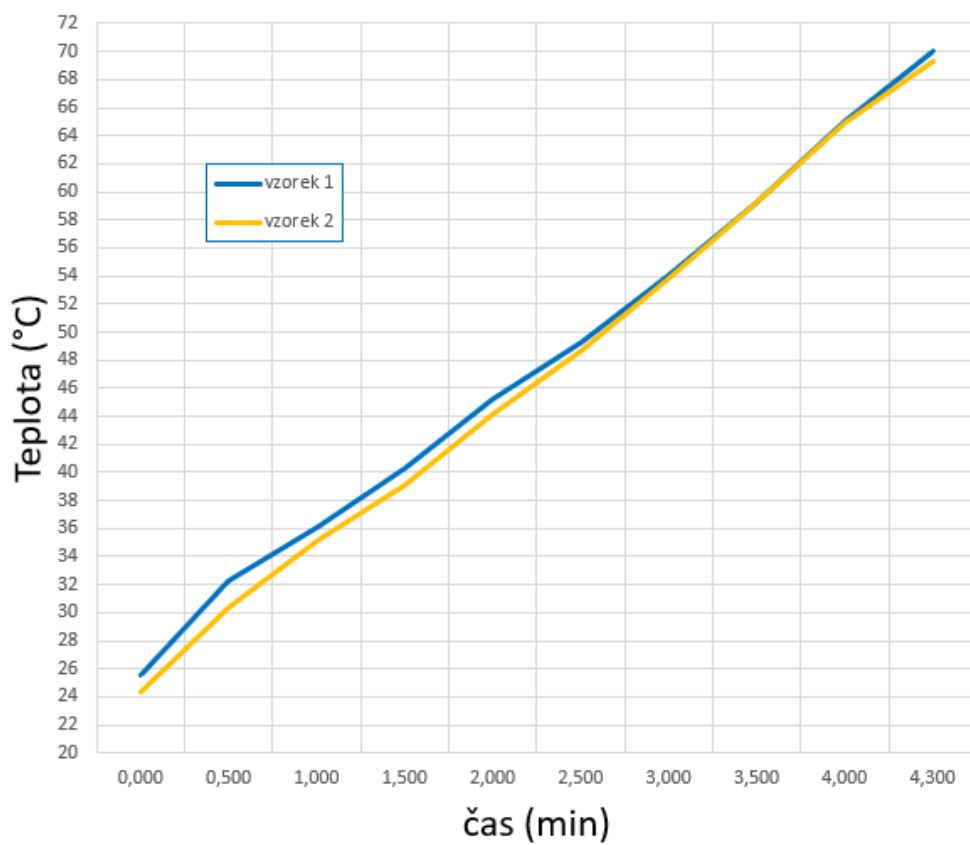
Obrázek B.1: Napětí na článku SLPBA444124 6,35 Ah při vybíjení konst. proudem 50 A.



Obrázek B.2: Průběh teploty článku SLPBA444124 6,35 Ah při vybíjení konst. proudem 50 A.



Obrázek B.3: Napětí na článku SLPBA444124 6,35 Ah při vybíjení konst. proudem 90 A.



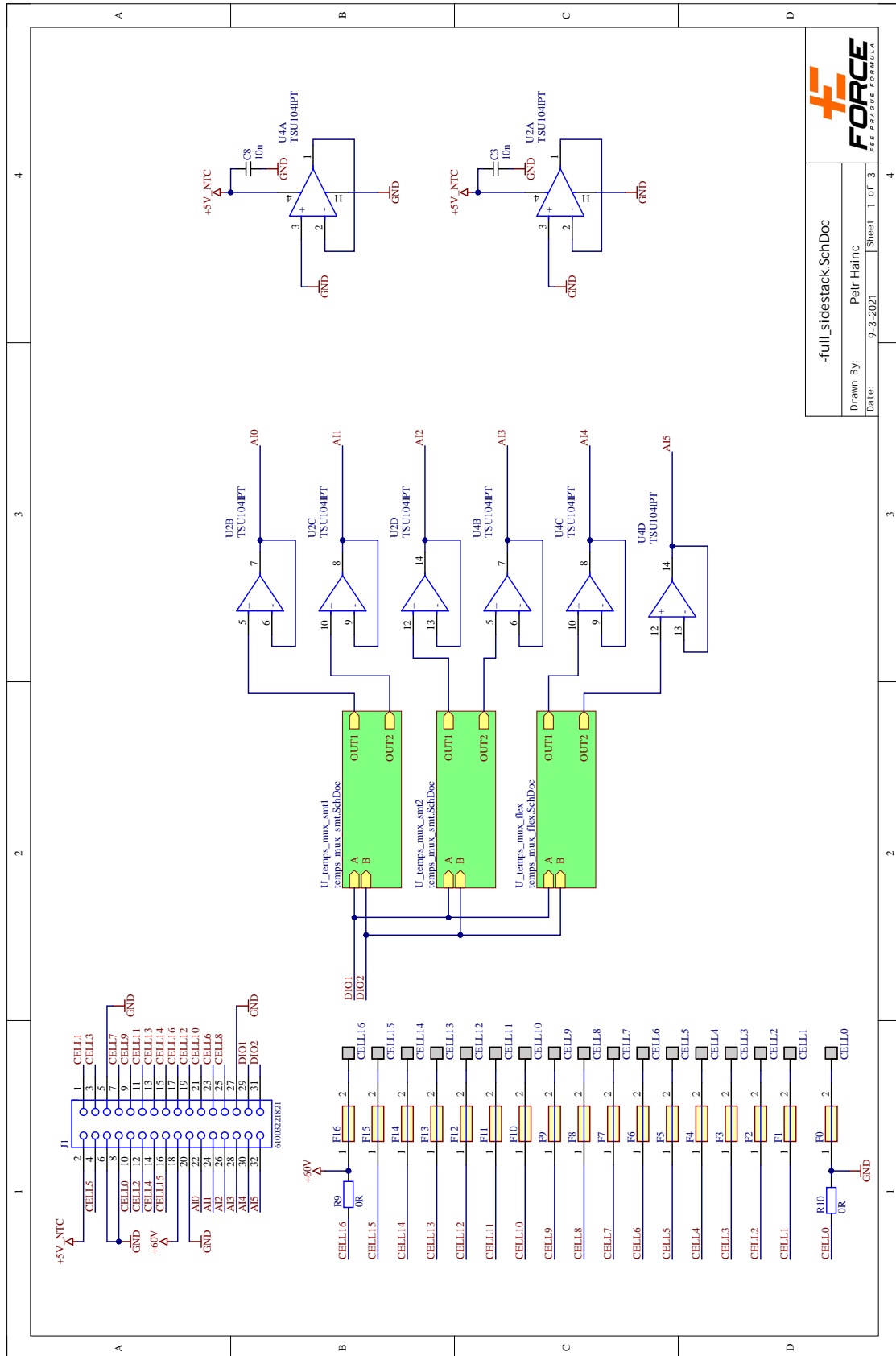
Obrázek B.4: Průběh teploty článku SLPBA444124 6,35 Ah při vybíjení konst. proudem 90 A.



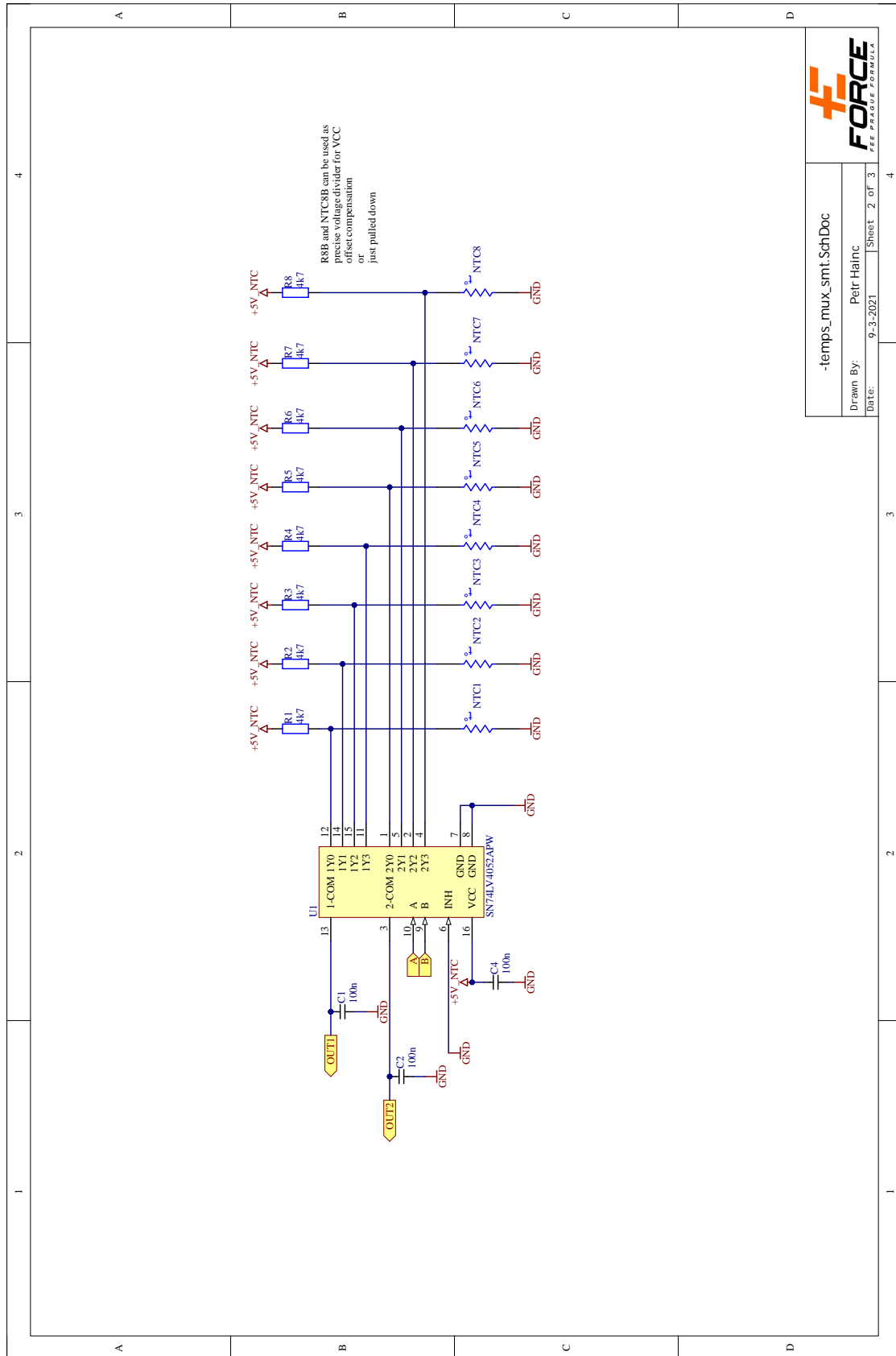
Příloha C

Schéma zapojení a layout měřicí desky BMS

C. Schéma zapojení a layout měřicí desky BMS

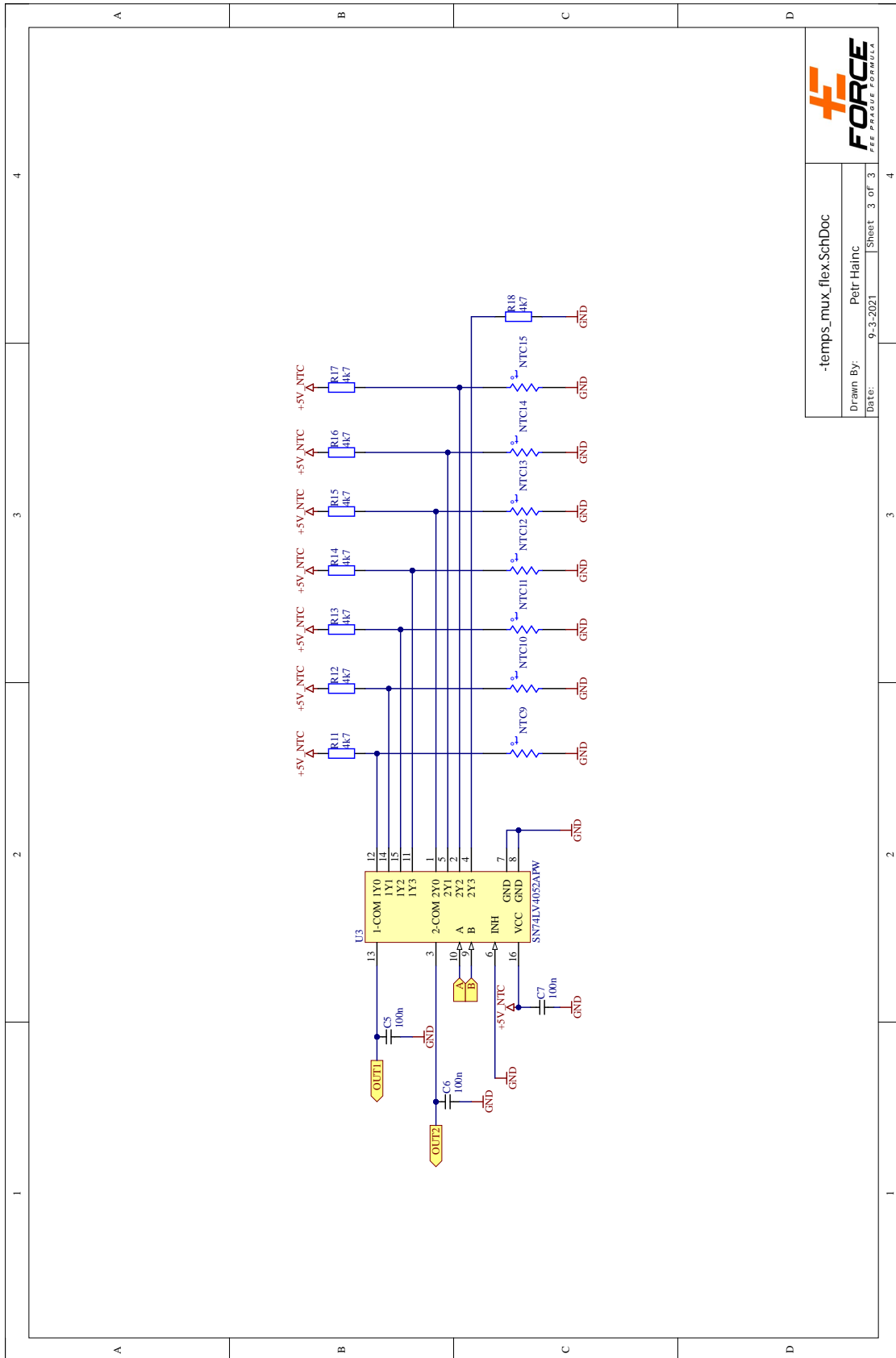


-full_sidestack.SchDoc
 Drawn By: Petr Hainc
 Date: 9-3-2021 Sheet 1 of 3

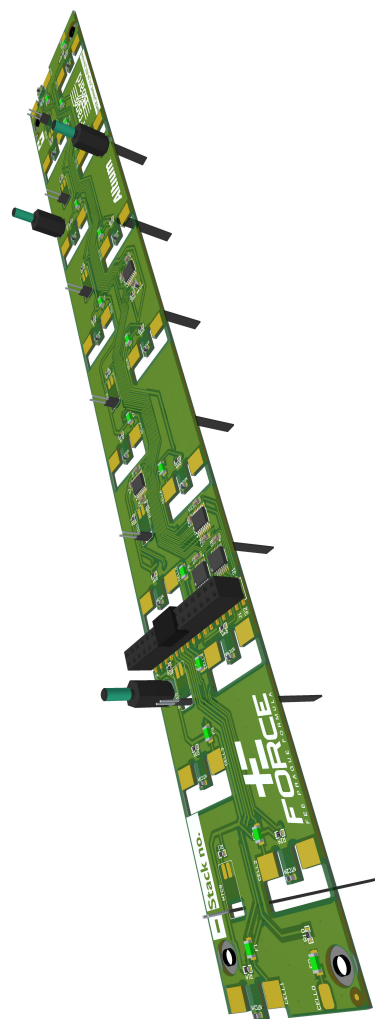
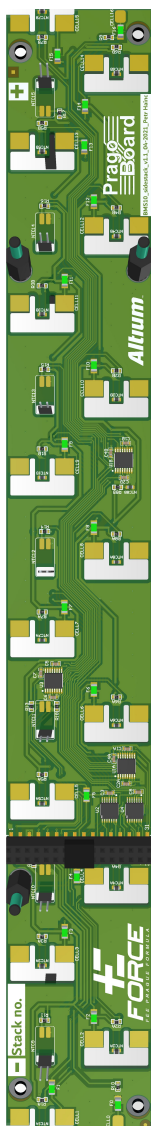


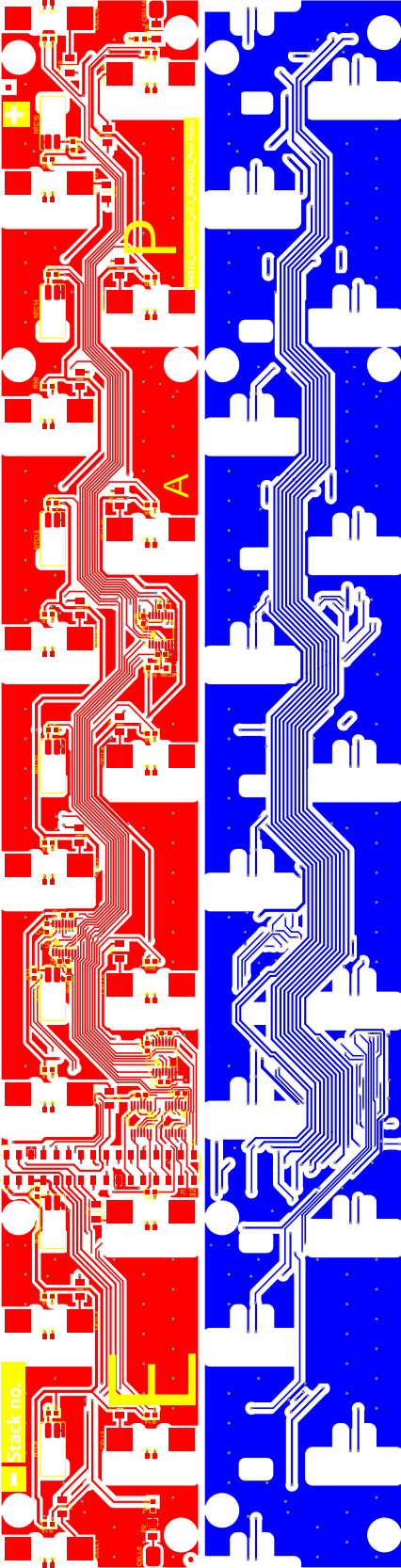
-temps_mux_smt.SchDoc
 Drawn By: Petr Hainc
 Date: 9-3-2021 Sheet 2 of 3

C. Schéma zapojení a layout měřicí desky BMS



| | |
|------------------------|------------|
| -temps_mux_flex.SchDoc | |
| Drawn By: | Petr Hainc |
| Date: | 9-3-2021 |
| Sheet 3 of 3 | |



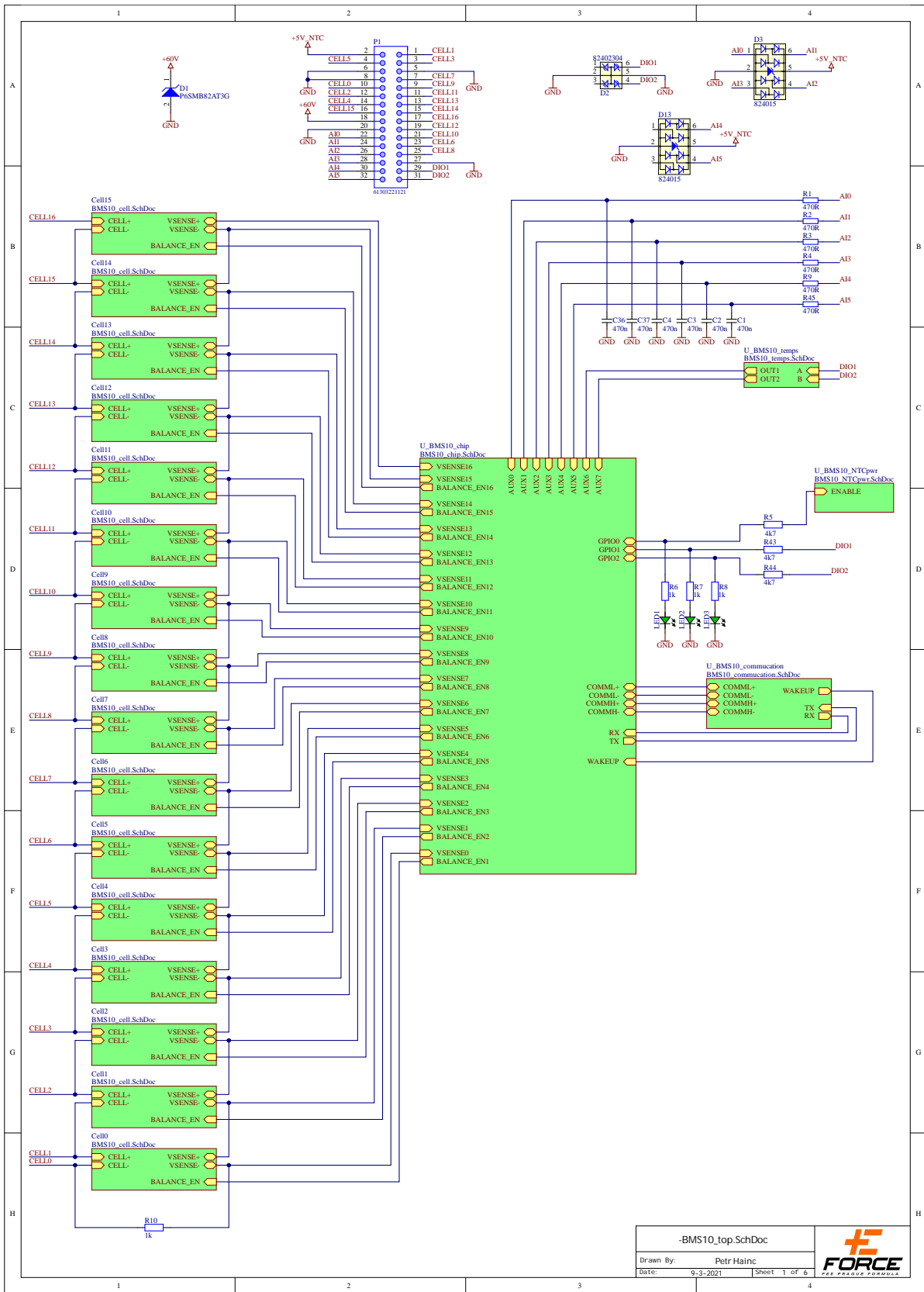




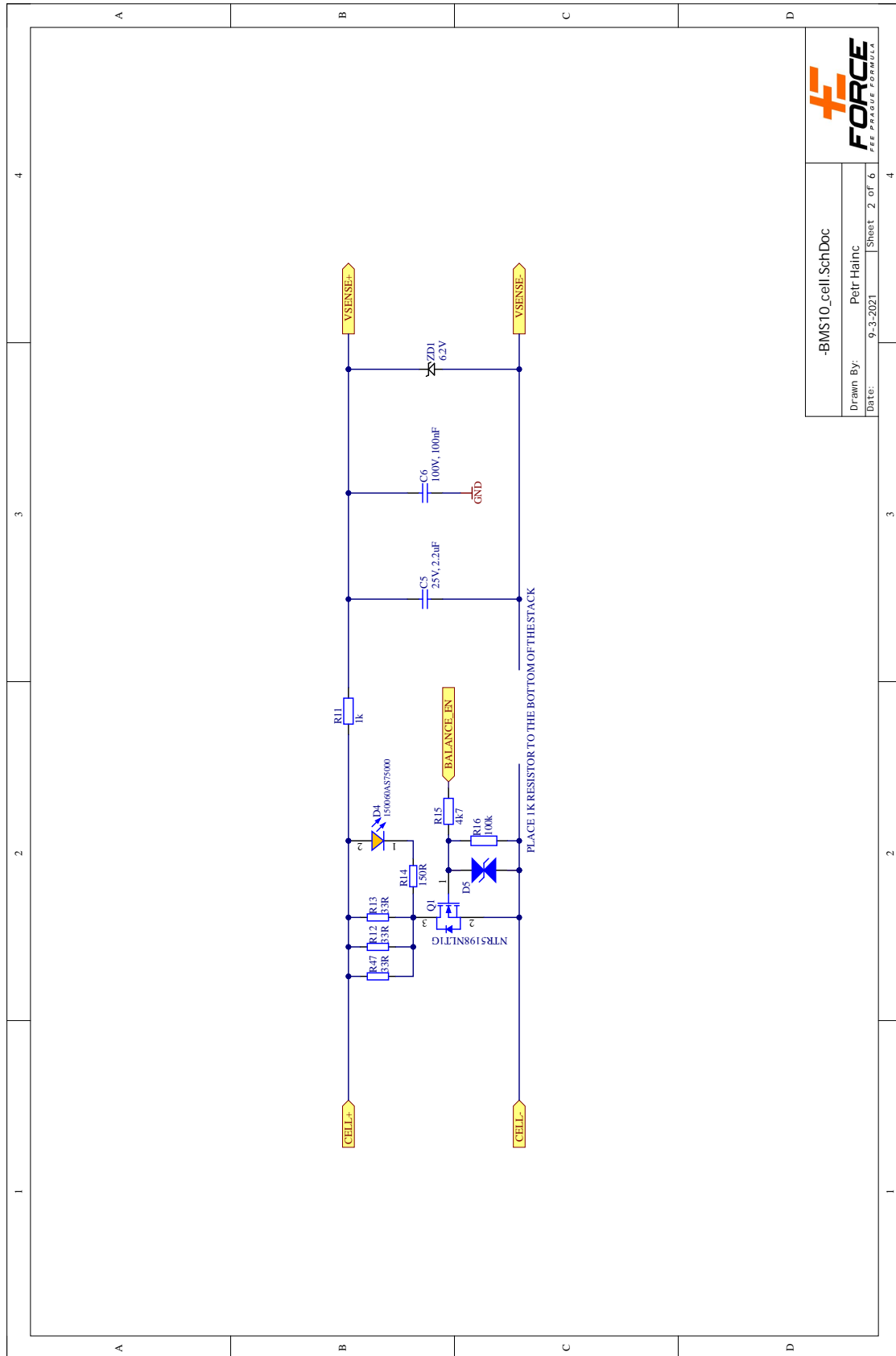
Příloha D

Schéma zapojení a layout řídicí desky BMS

D. Schéma zapojení a layout řídicí desky BMS



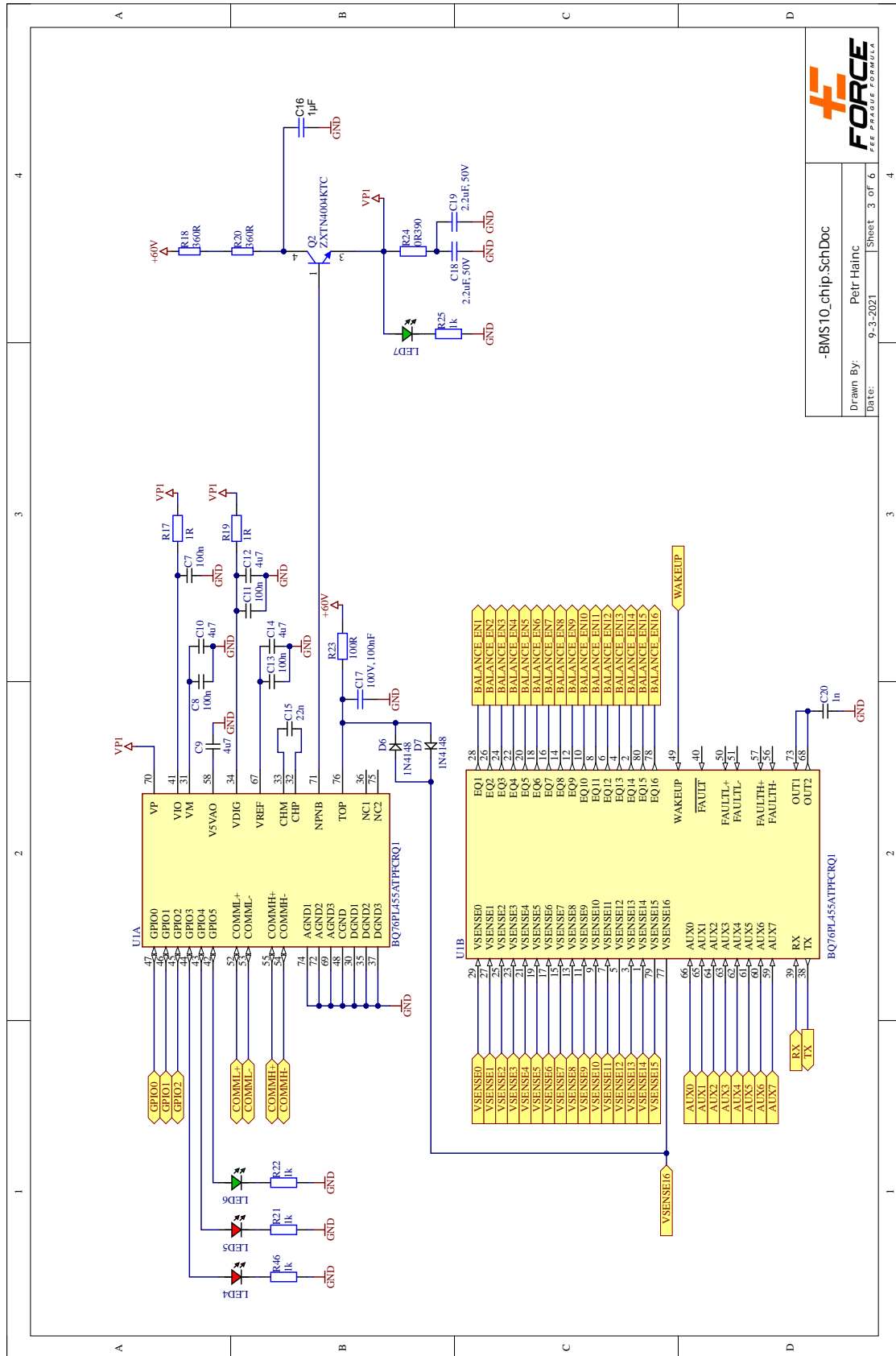
| | | |
|-------------------|------------|--|
| -BMS10_top.SchDoc | | |
| Drawn By: | Petr Hainc | |
| Date: | 9-3-2021 | |

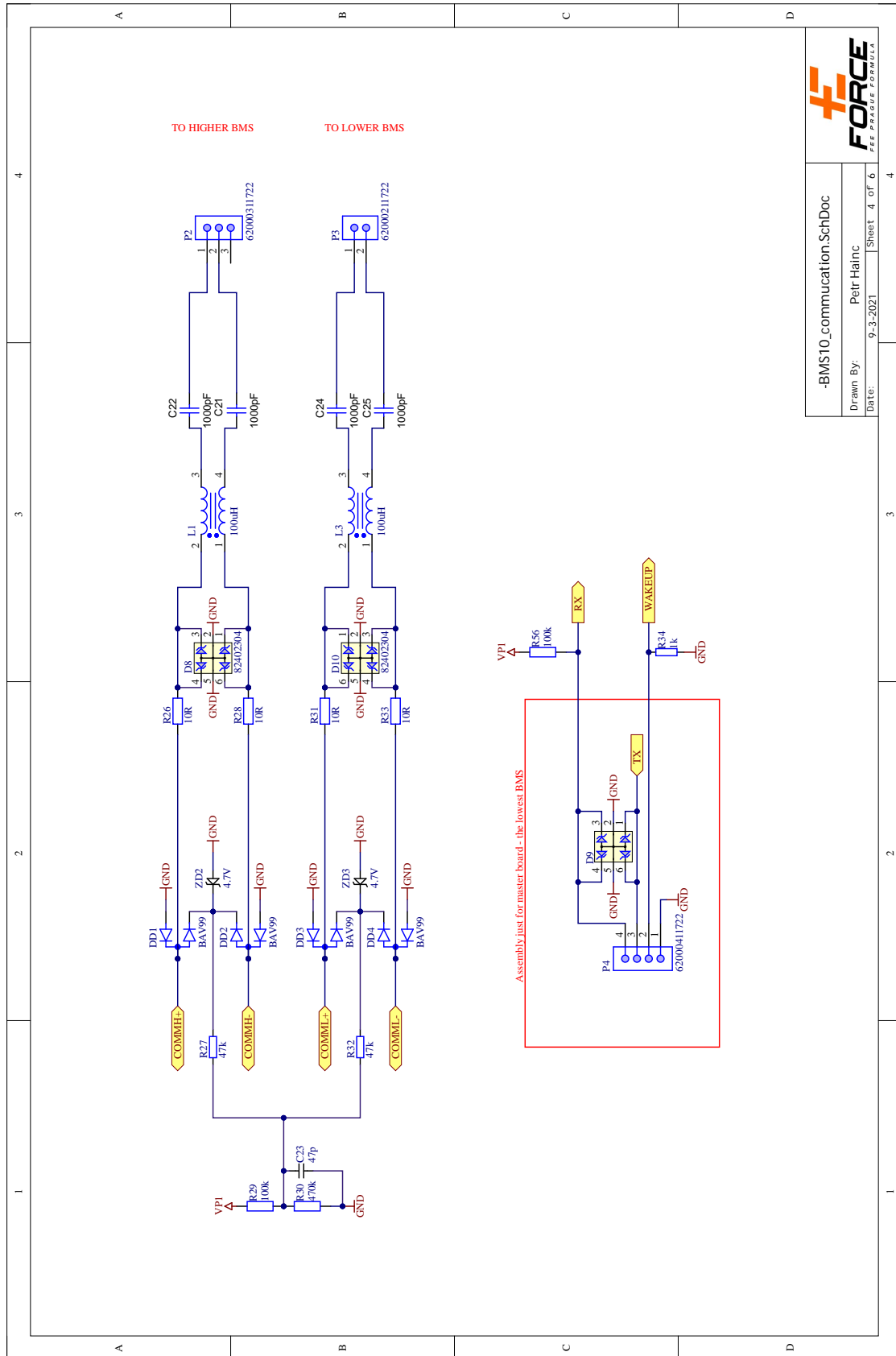


-BMS10_cell.SchDoc
 Drawn By: Petr Hainc
 Date: 9-3-2021

Sheet 2 of 6

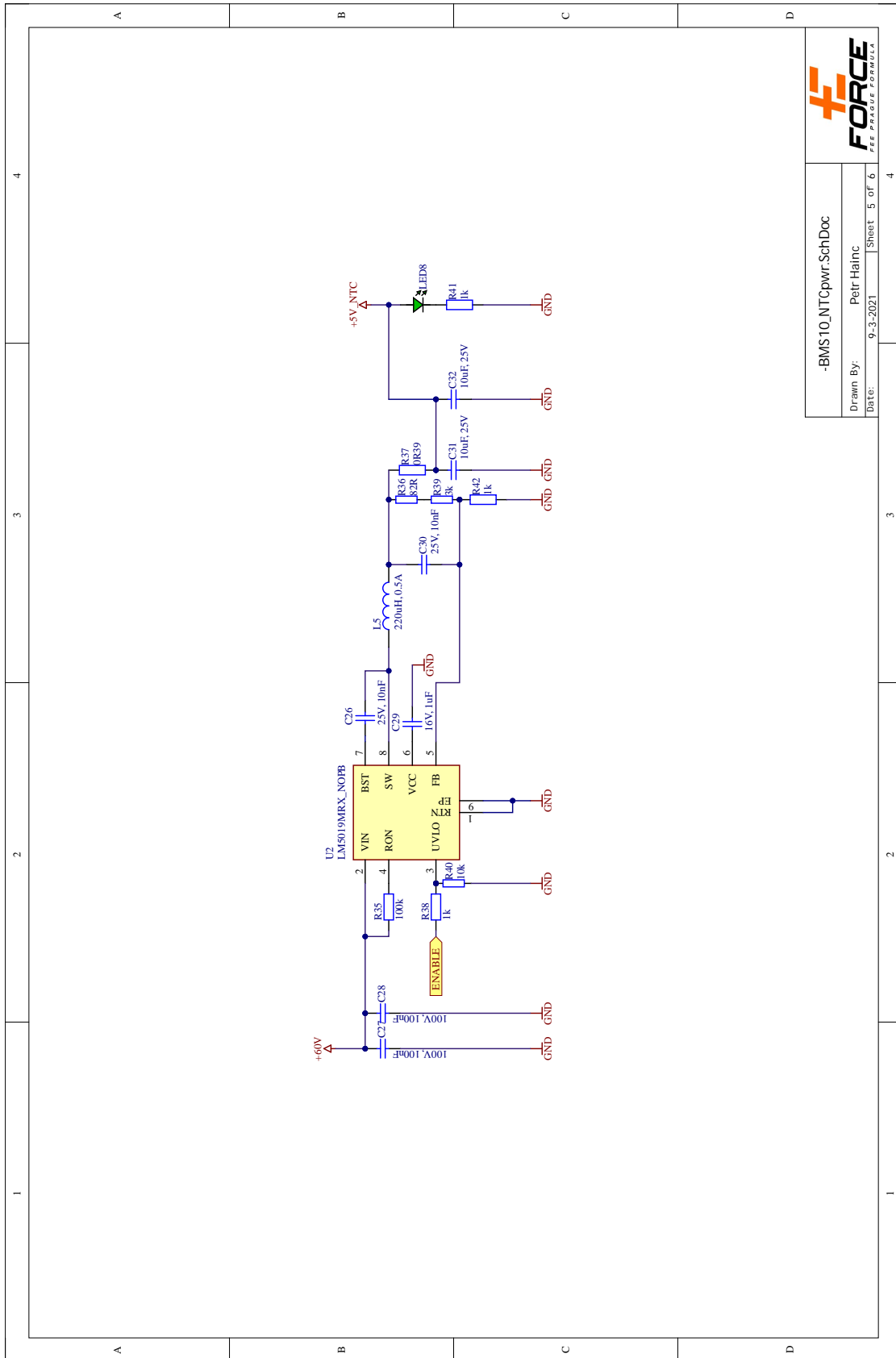
D. Schéma zapojení a layout řídicí desky BMS



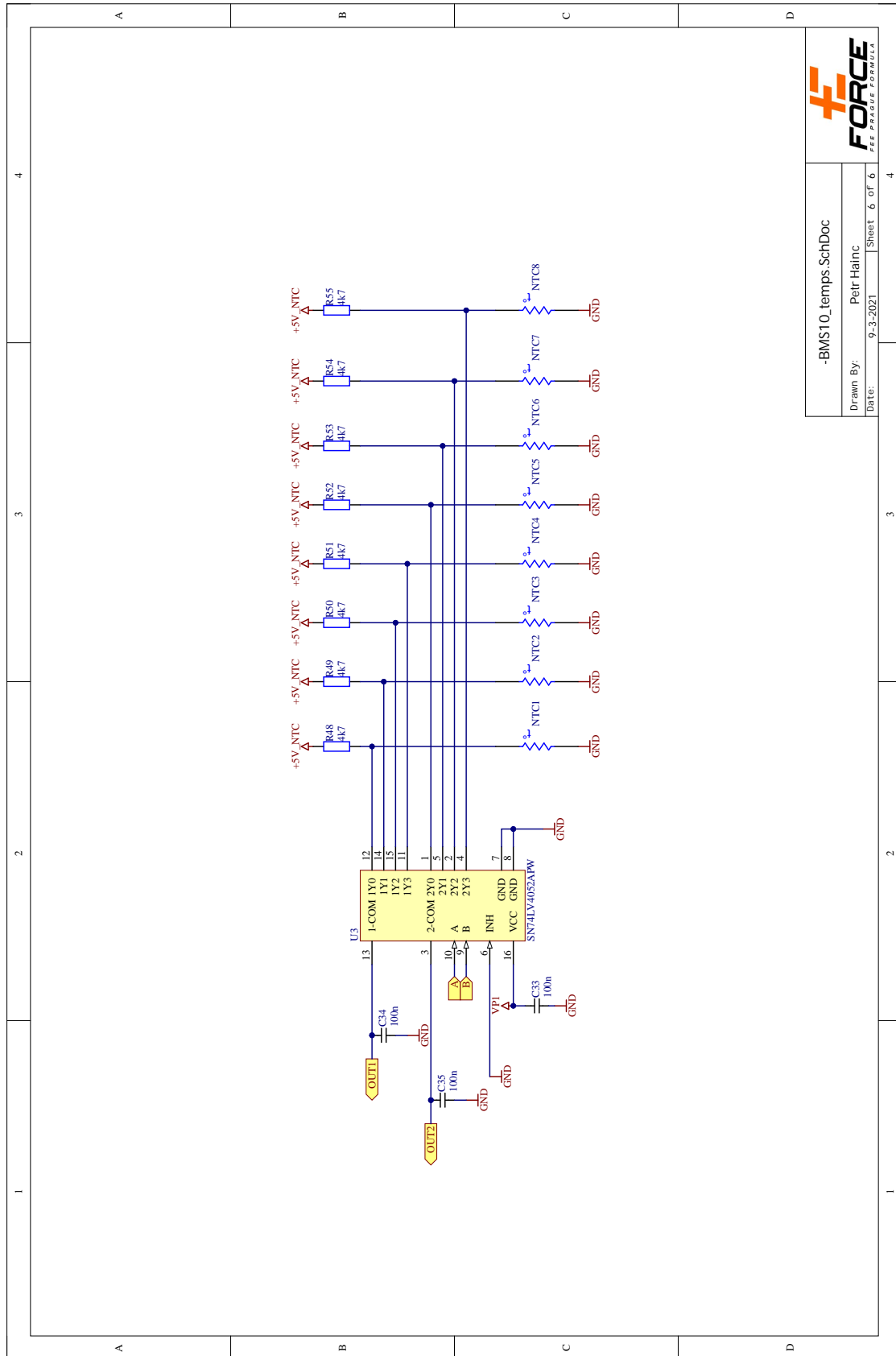


-BMS10_communication_SchDoc
 Drawn By: Petr Hainc
 Date: 9-3-2021 Sheet 4 of 6

D. Schéma zapojení a layout řídicí desky BMS



-BMS10_INTGpwr.SchDoc
 Drawn By: Petr Hainc
 Date: 9-3-2021 Sheet 5 of 6

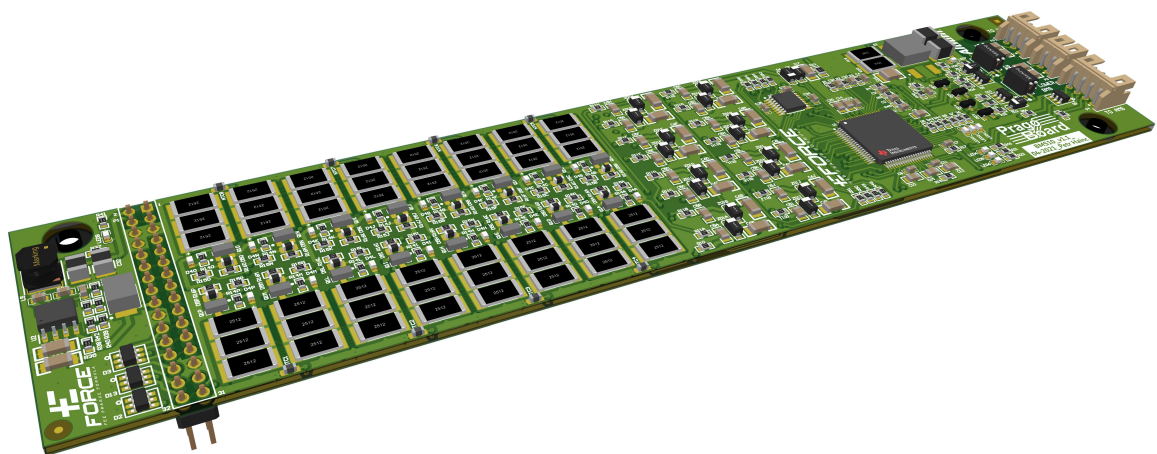
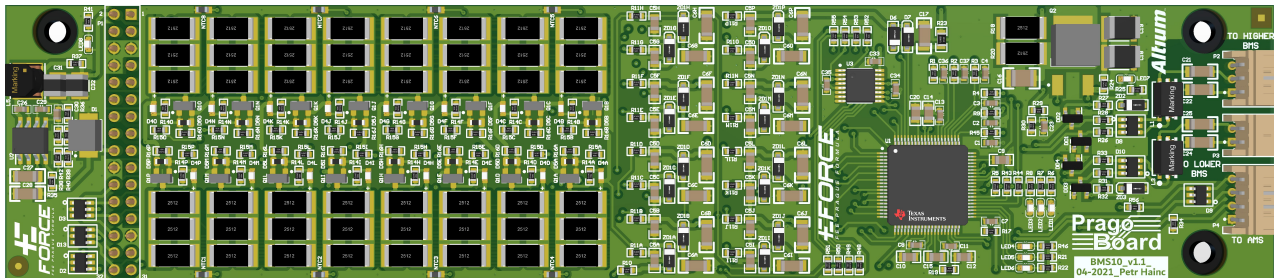


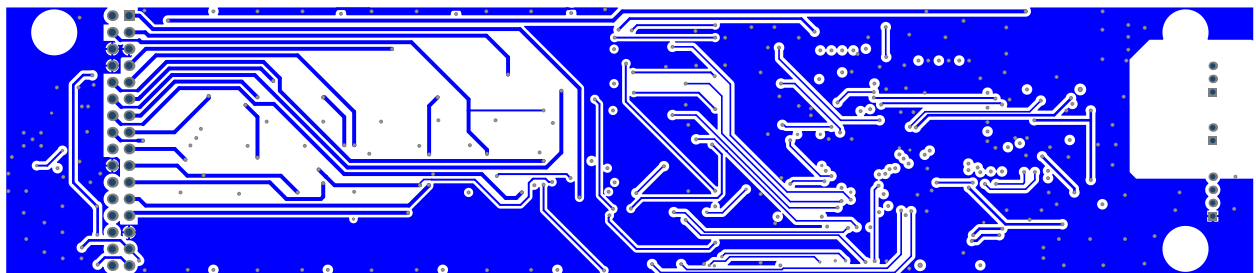
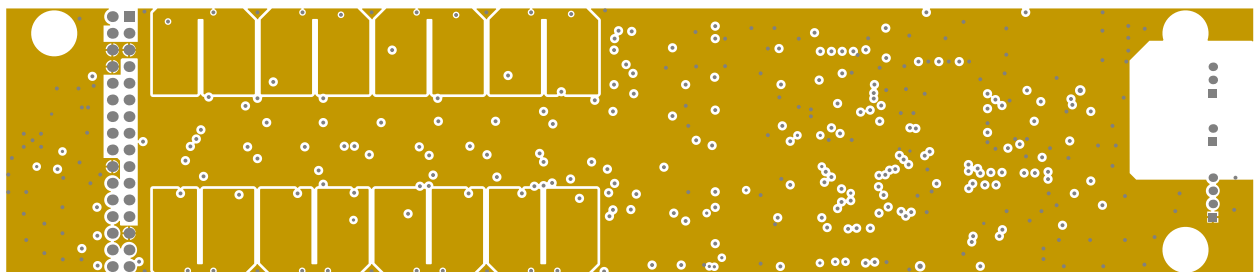
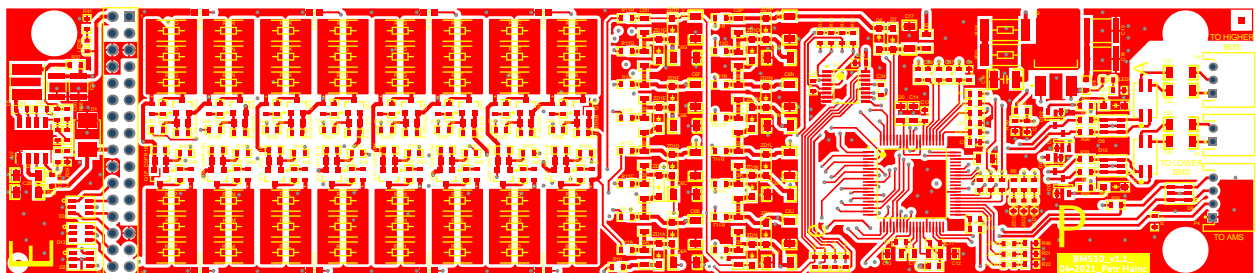
-BMS10_temps.SchDoc

Drawn By: Petr Háinc

Date: 9-3-2021 Sheet 6 of 6

D. Schéma zapojení a layout řídicí desky BMS



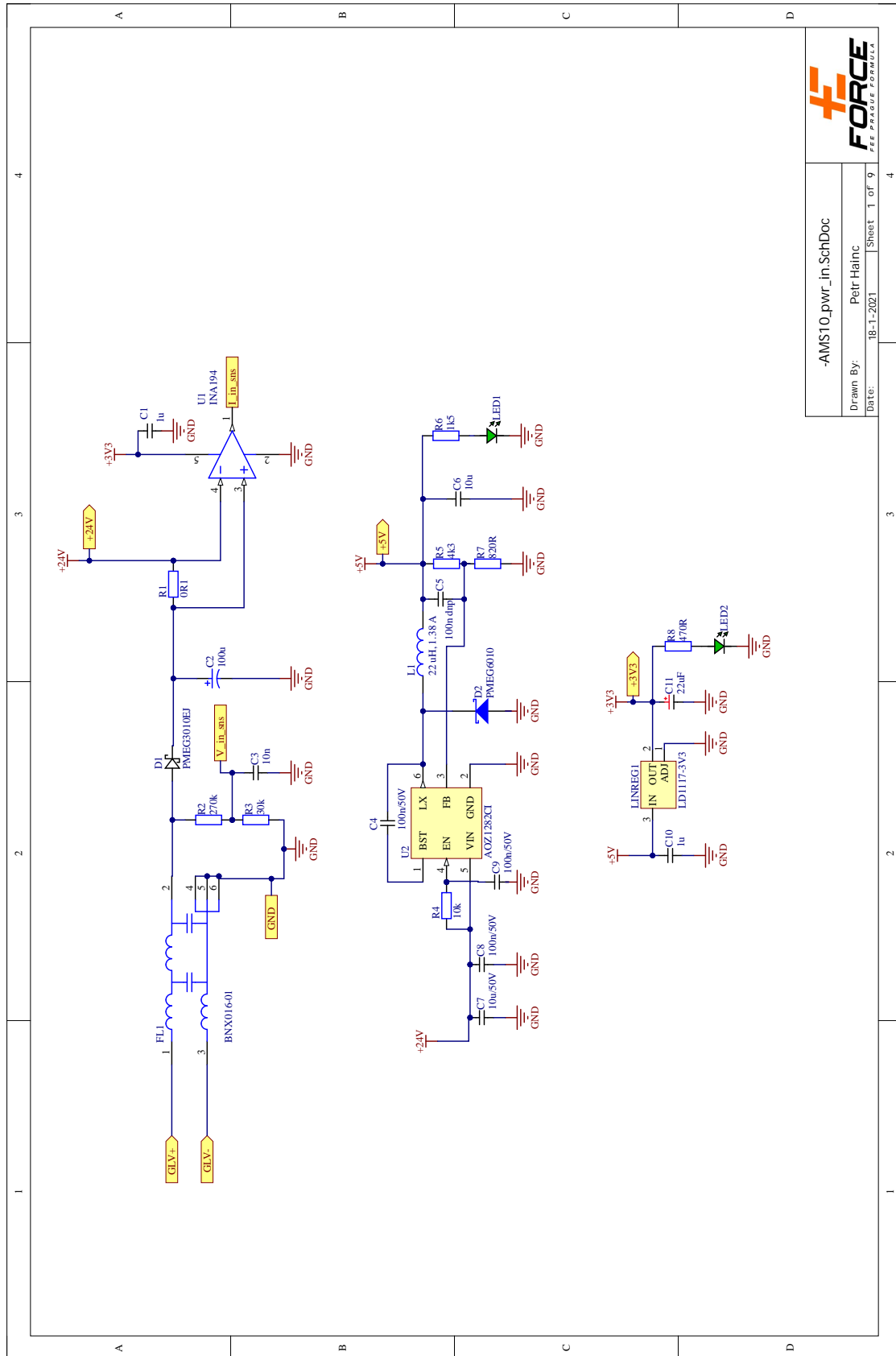


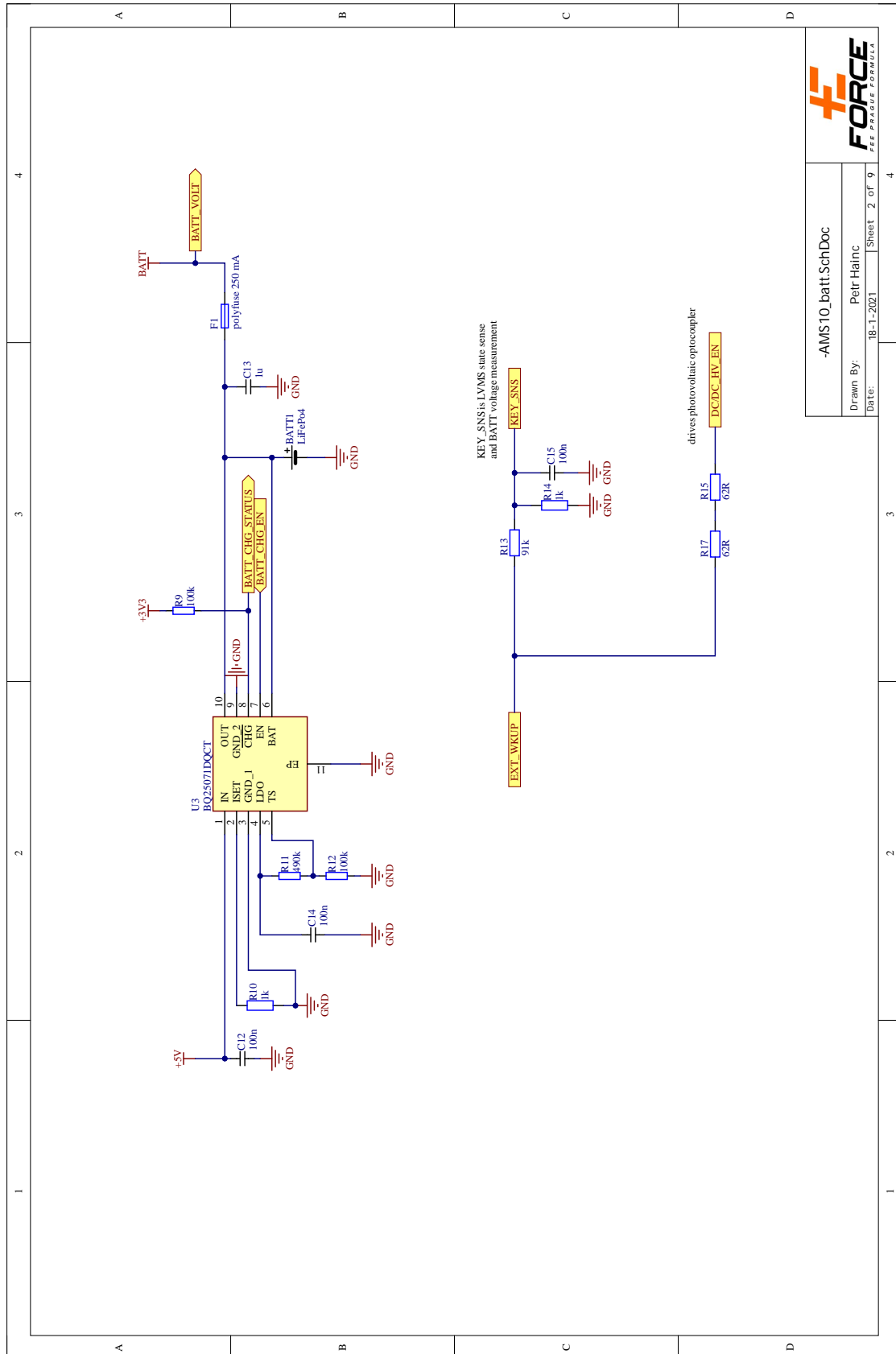


Příloha E

Schéma zapojení a layout jednotky AMS

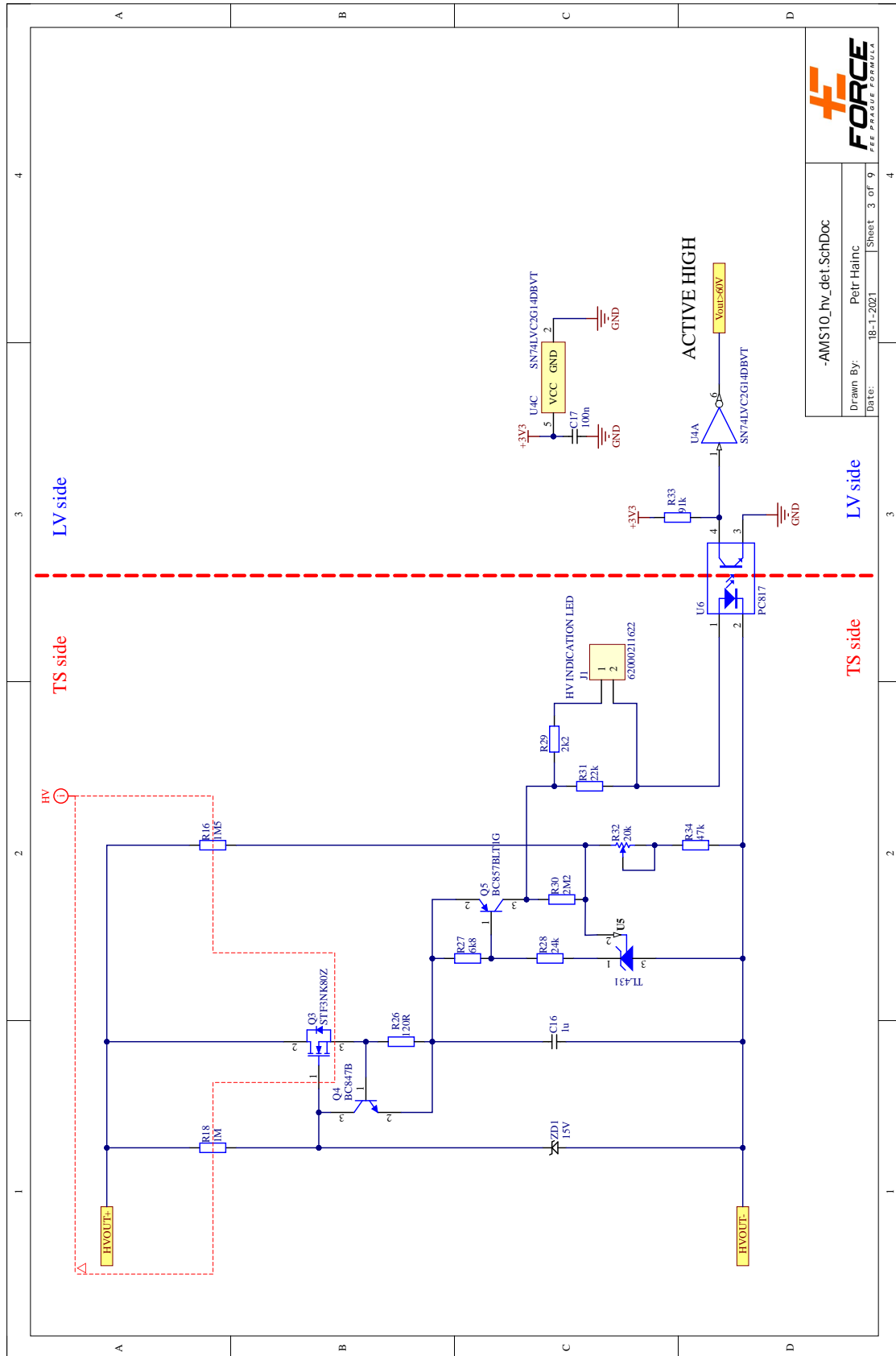
E. Schéma zapojení a layout jednotky AMS



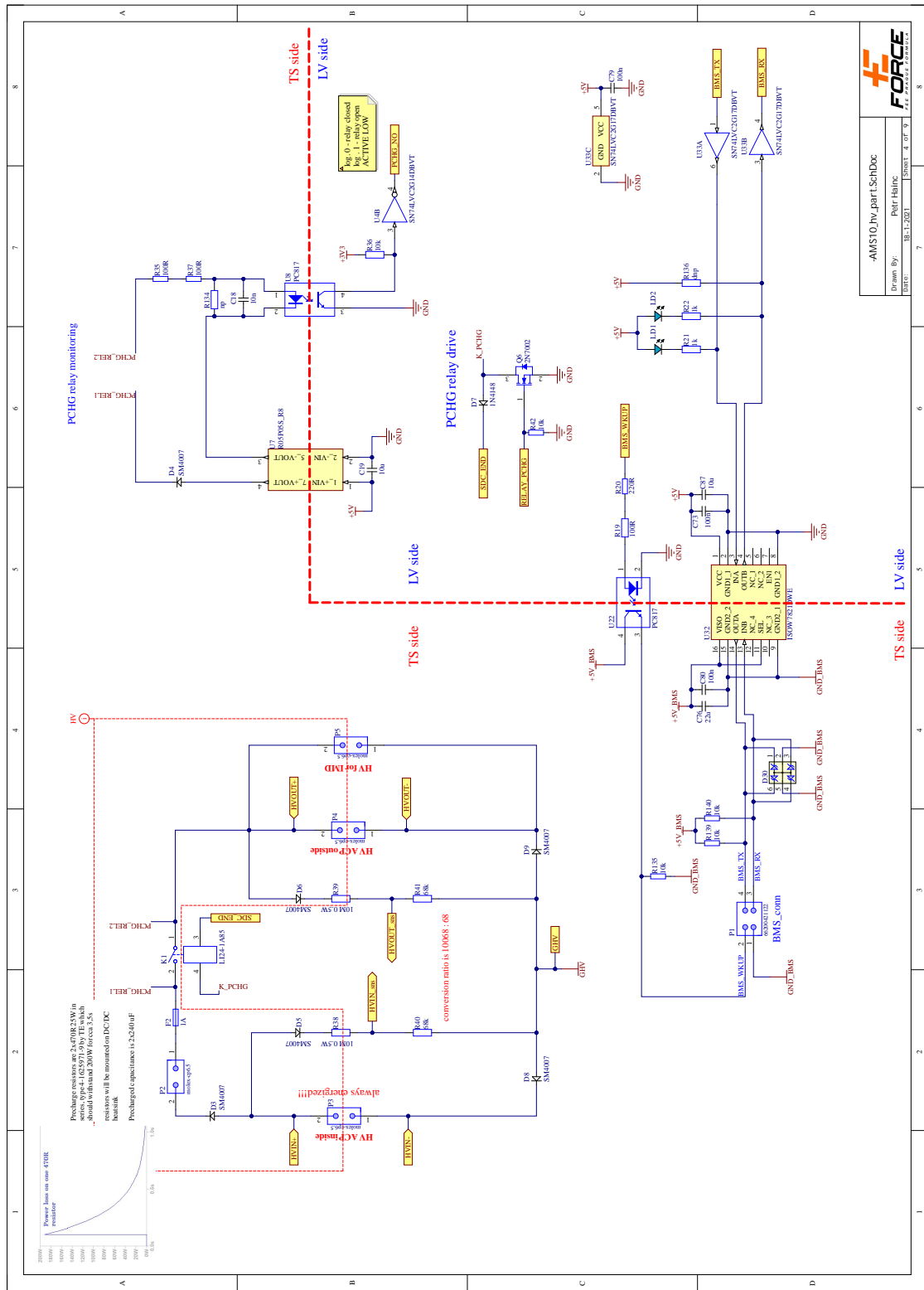


| | |
|--------------------|------------|
| -AMS10_batt.SchDoc | |
| Drawn By: | Petr Hainc |
| Date: | 18-1-2021 |
| Sheet 2 of 9 | |

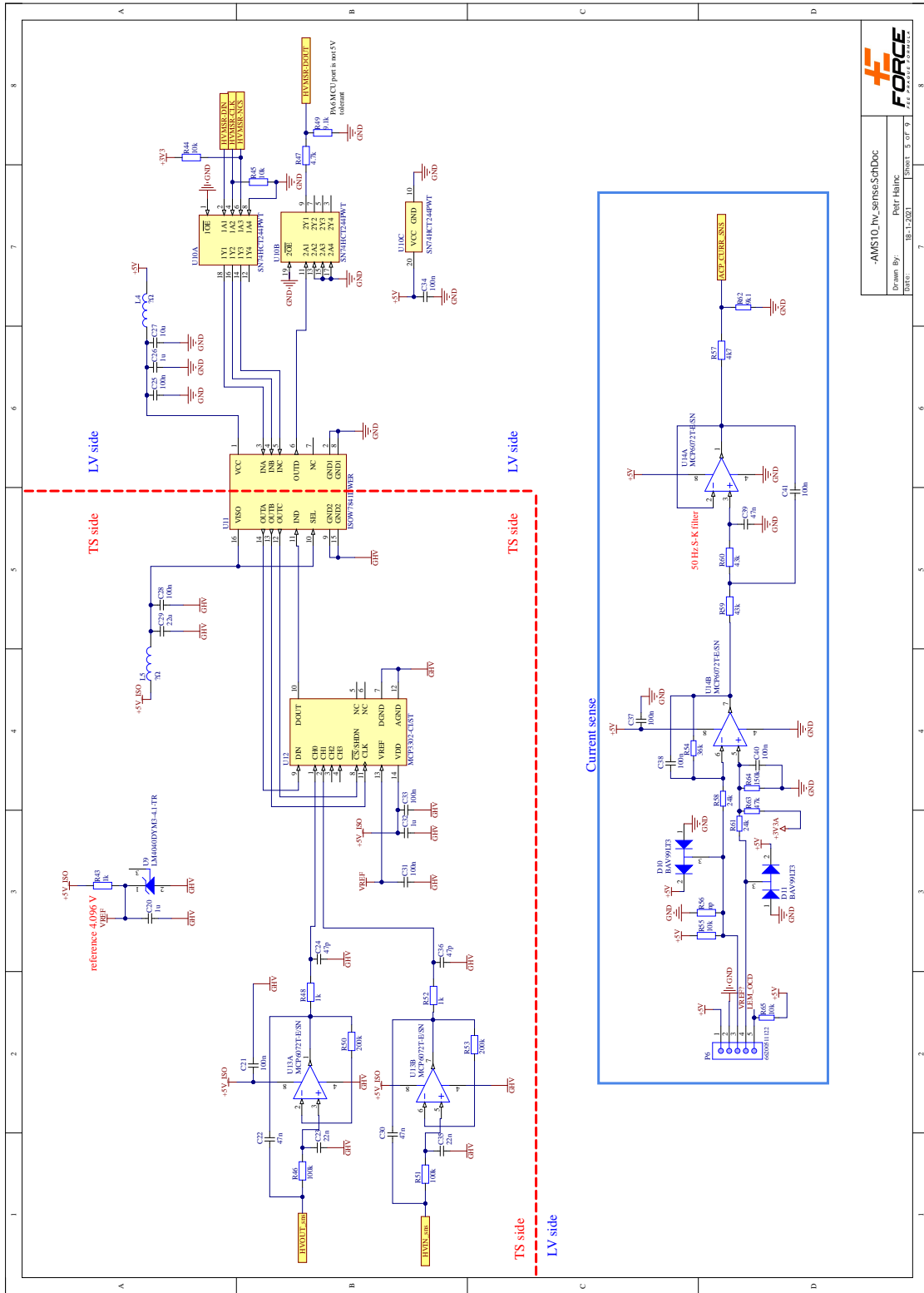
E. Schéma zapojení a layout jednotky AMS




-AMS10_hv_det.SchDoc
 Drawn By: Petr Hainc
 Date: 18-1-2021 Sheet 3 of 9



E. Schéma zapojení a layout jednotky AMS

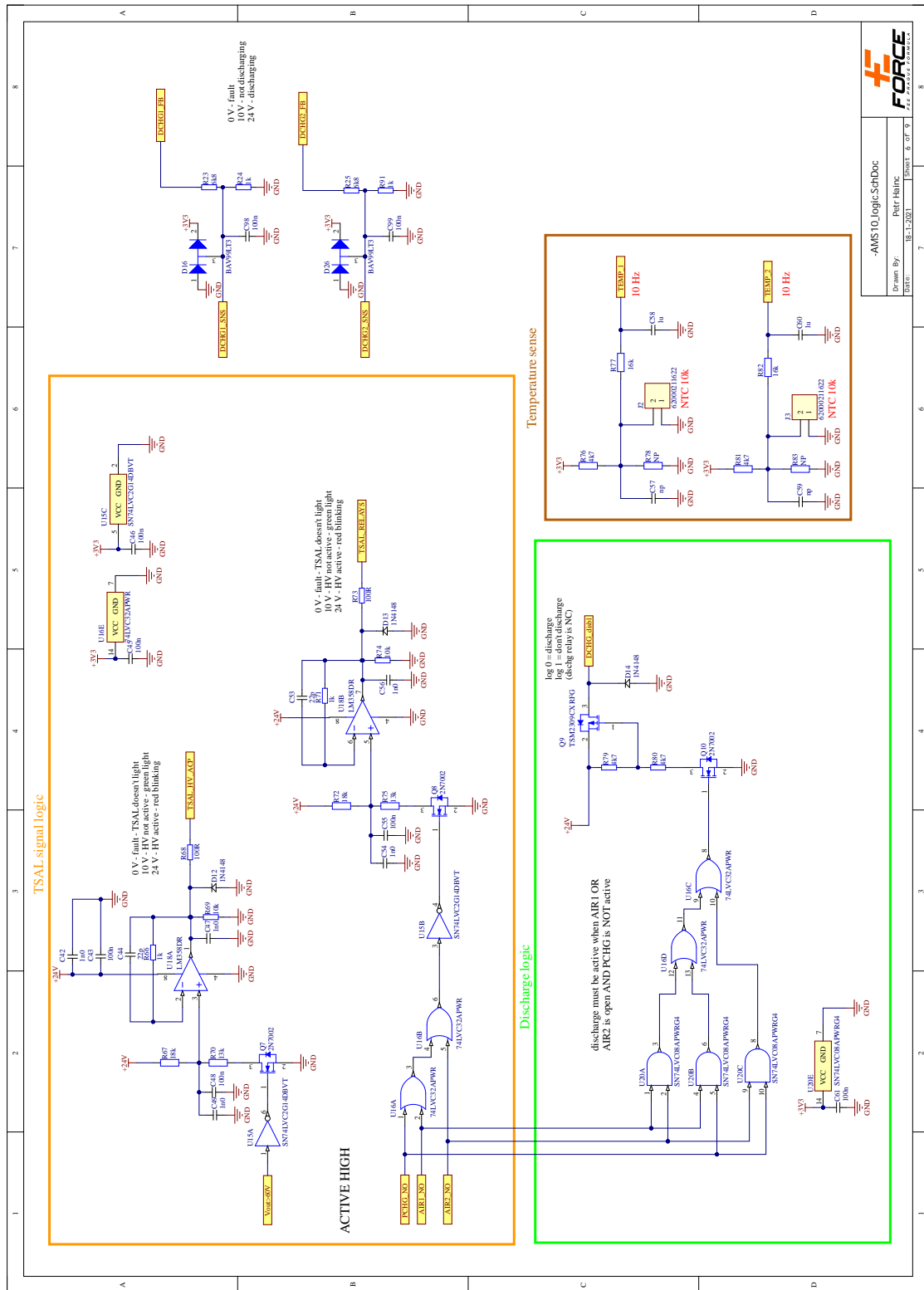




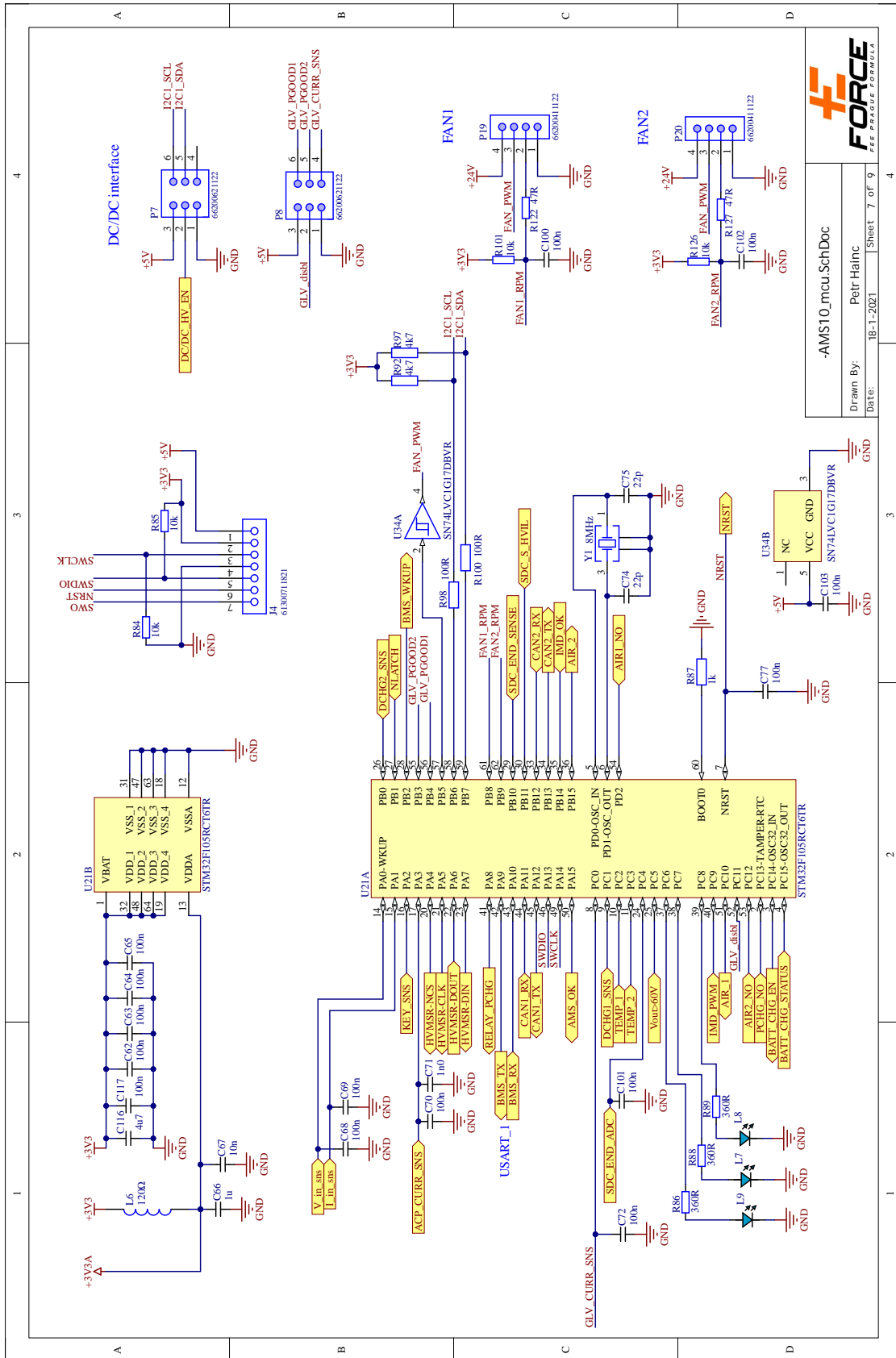
 -AM510_hv_senseSchDoc

 Drawn By: Petr Hájek

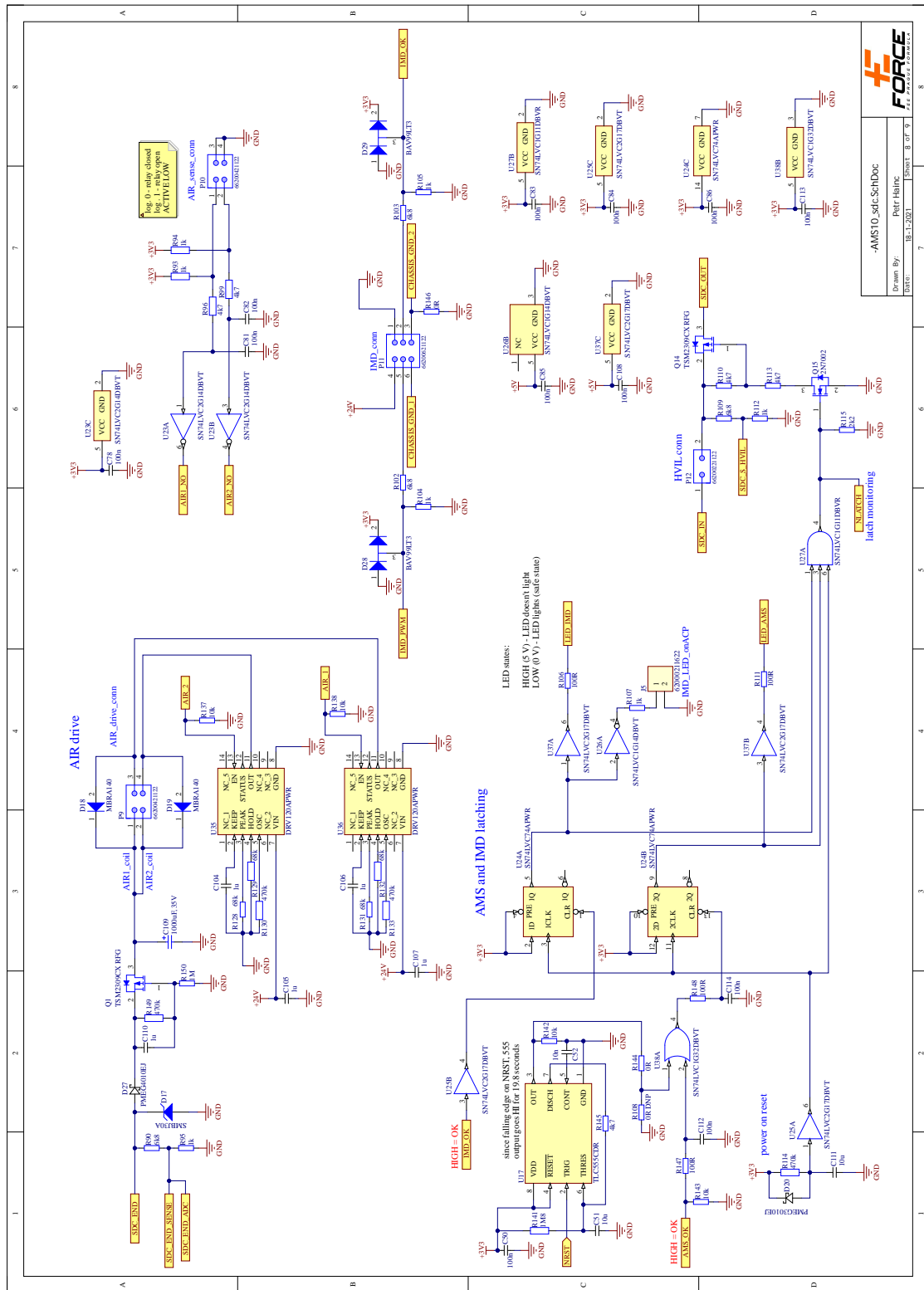
 Date: 18-1-2021 Sheet: 5 of 9



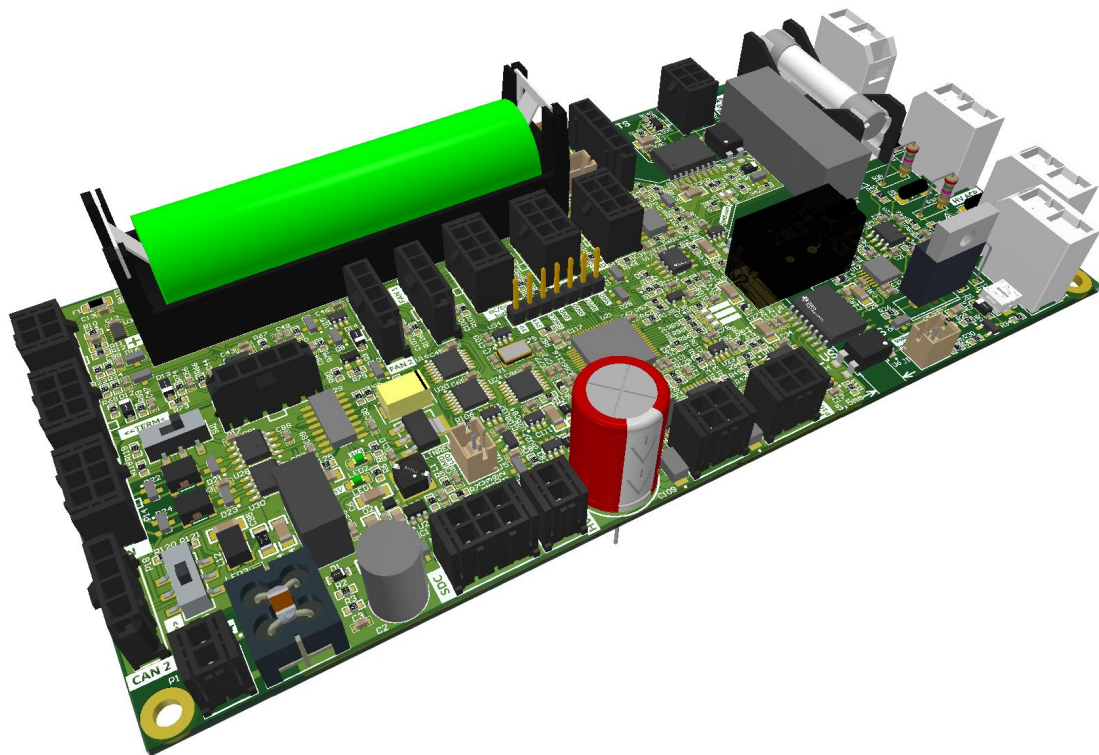
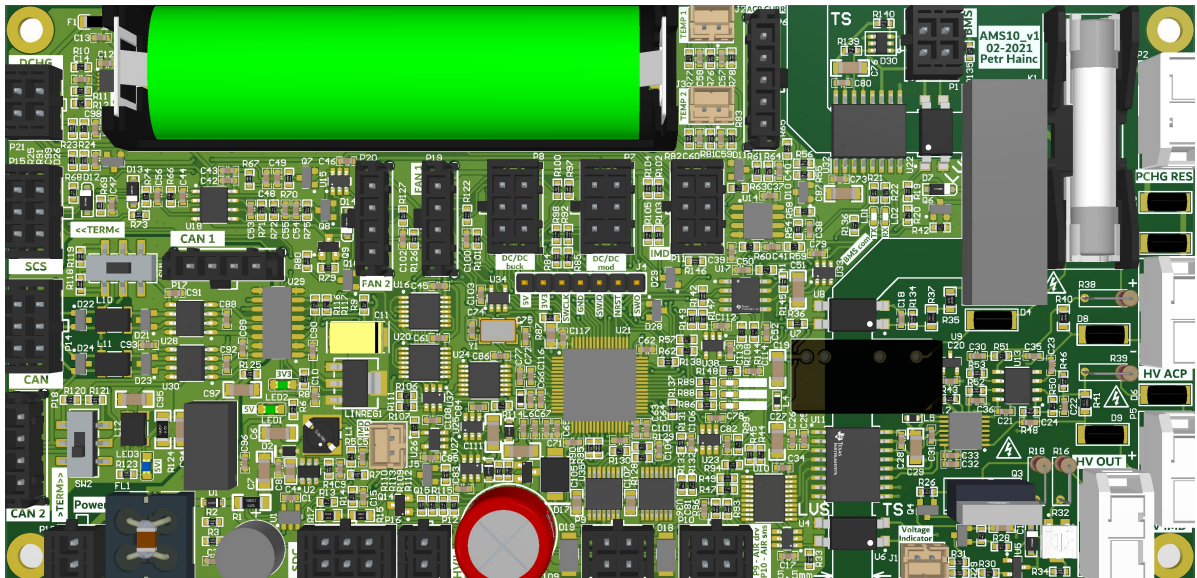
E. Schéma zapojení a layout jednotky AMS



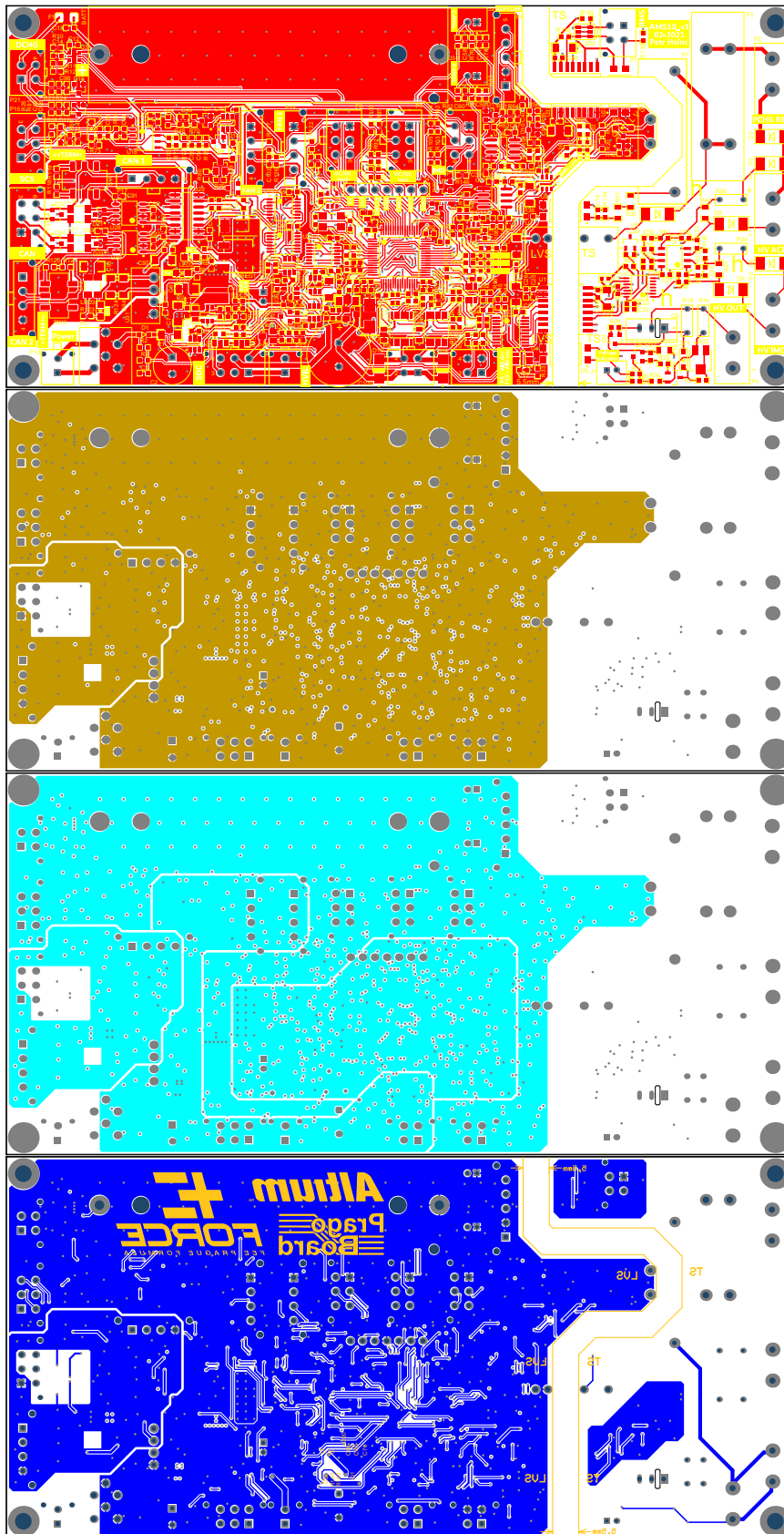
-AMSTIO_mcu_SchDoc
 Drawn By: Petr Hainc
 Date: 18-1-2021 Sheet 7 of 9



Drawn By: Petr Hájek
 Date: 18-1-2021
 Sheet: 8 of 9
FORCE
 PTE, s.r.o. s ústředím v Praze



E. Schéma zapojení a layout jednotky AMS

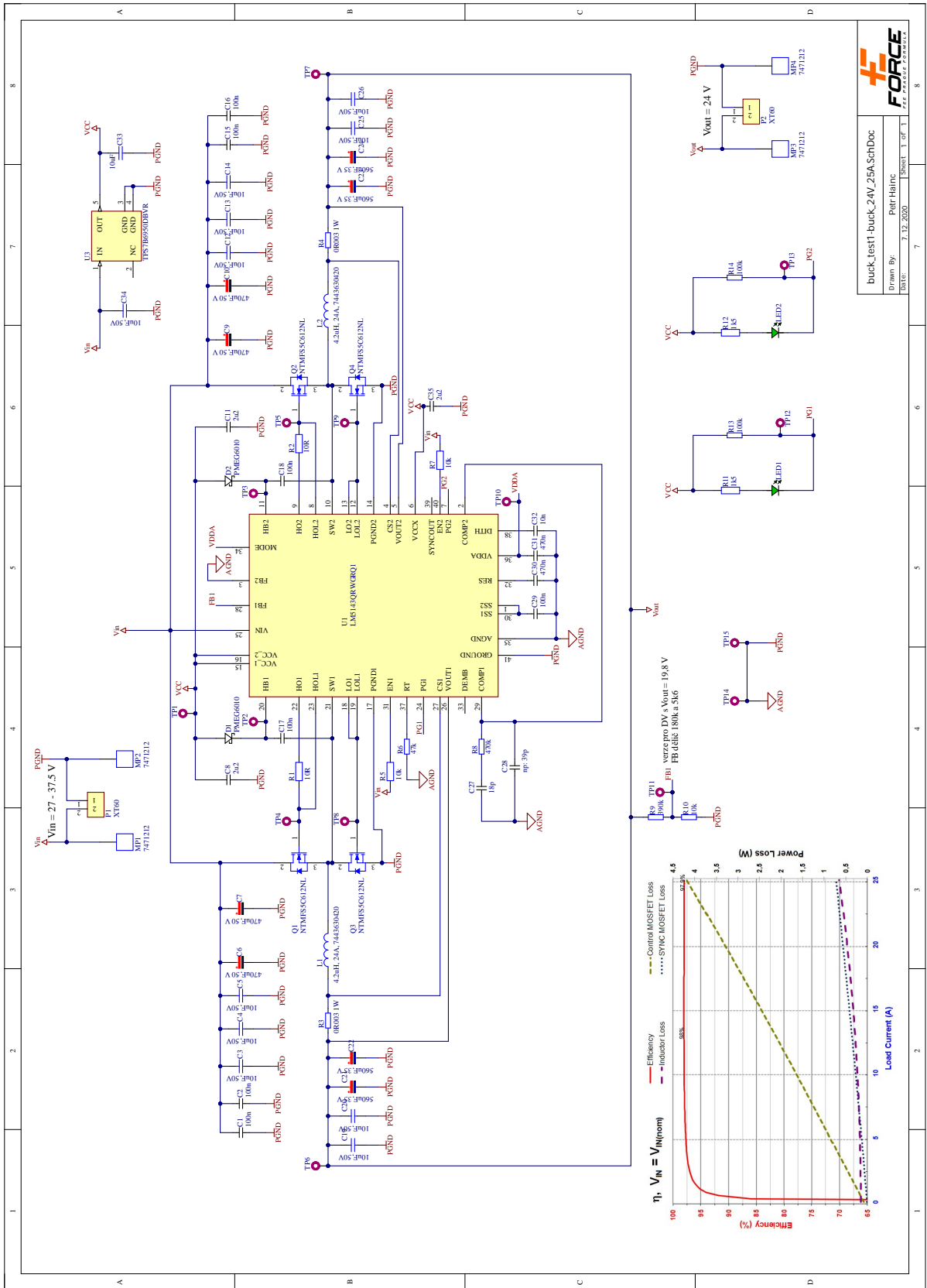


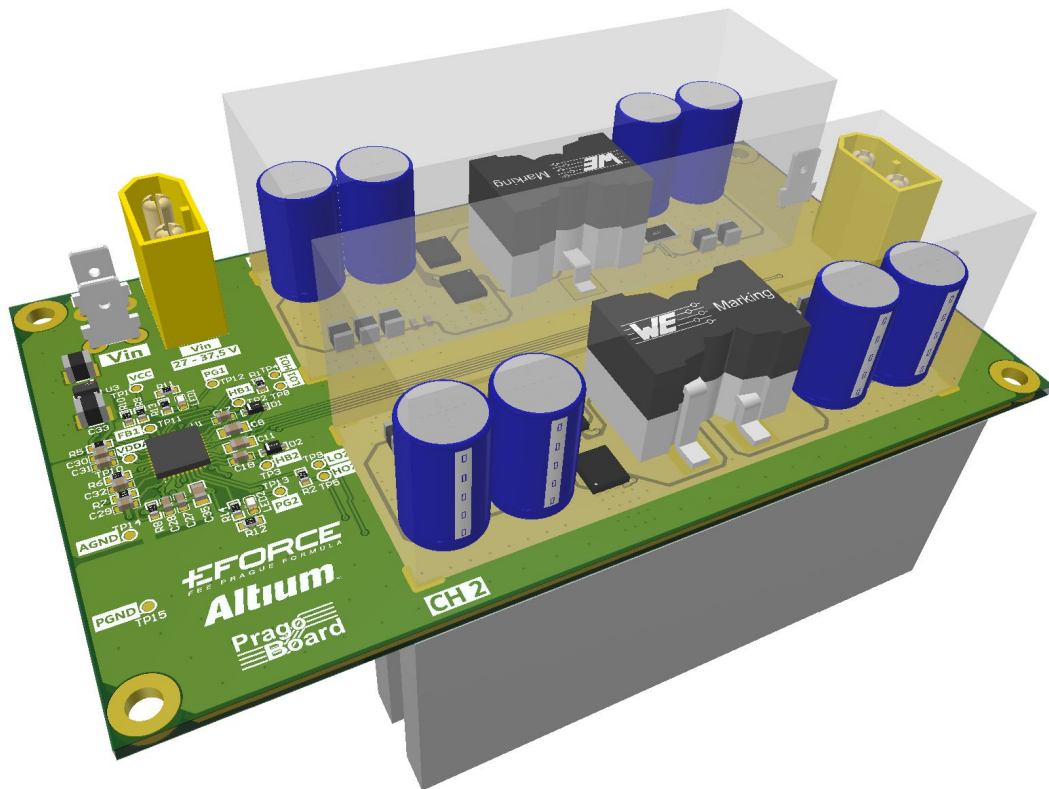
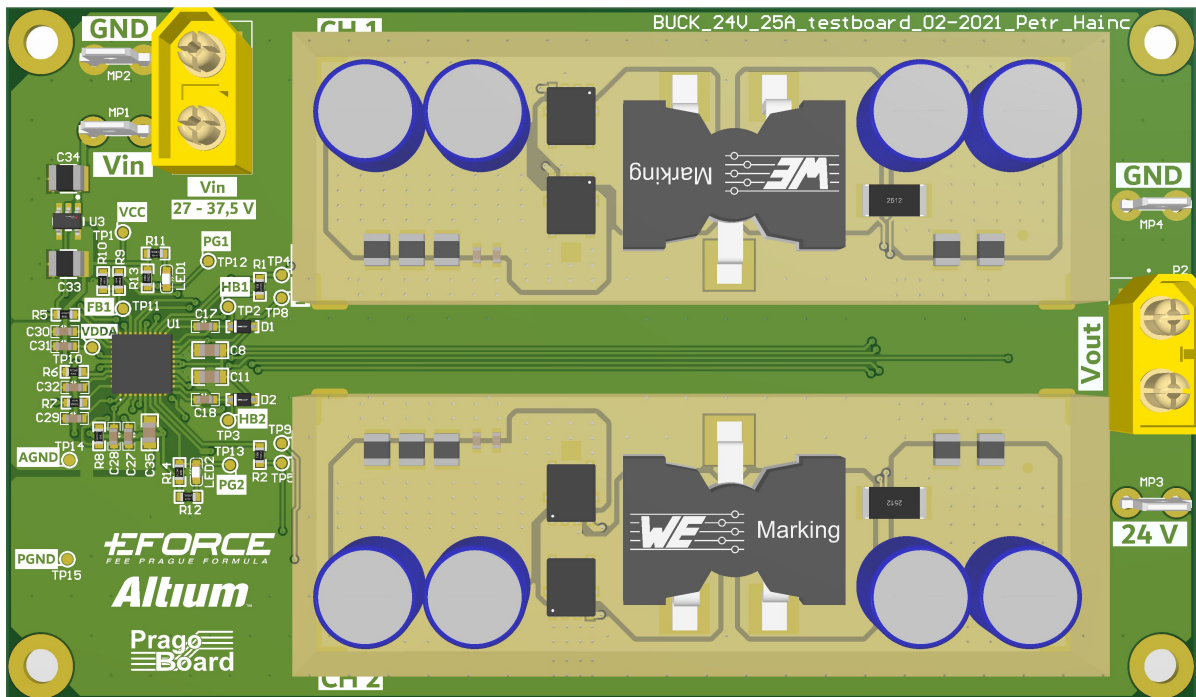


Příloha F

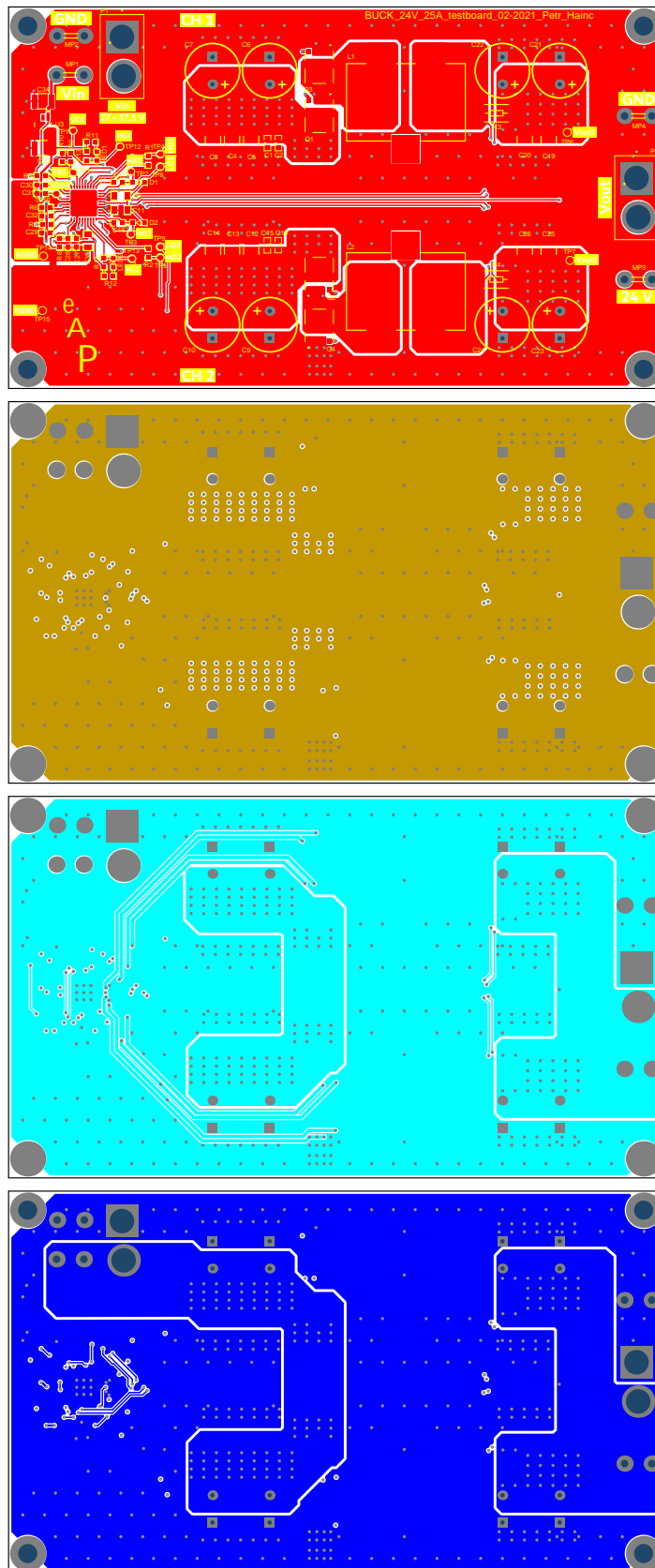
Schéma zapojení a layout prototypu buck měniče

F. Schéma zapojení a layout prototypu buck měniče





F. Schéma zapojení a layout prototypu buck měniče

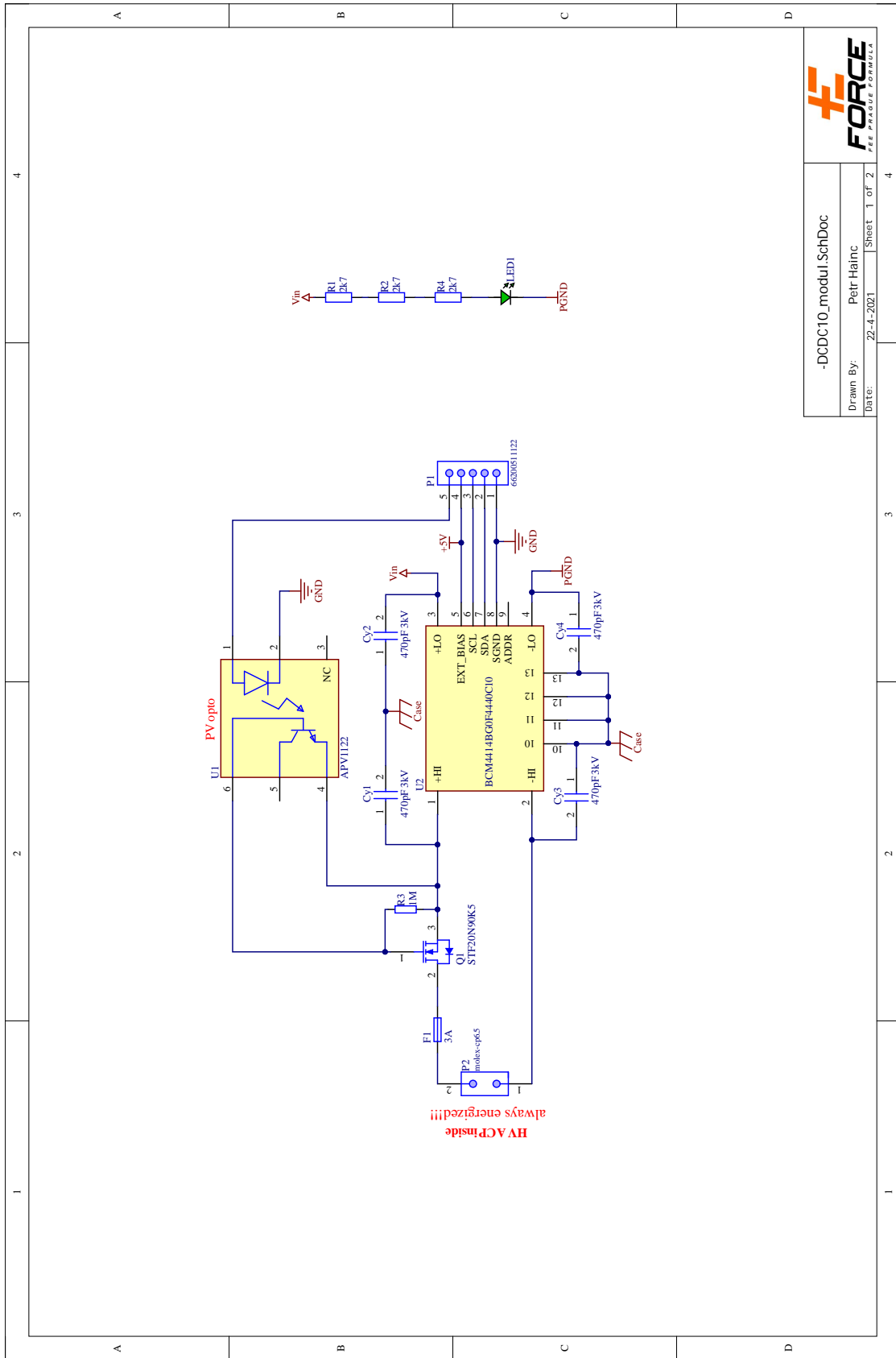


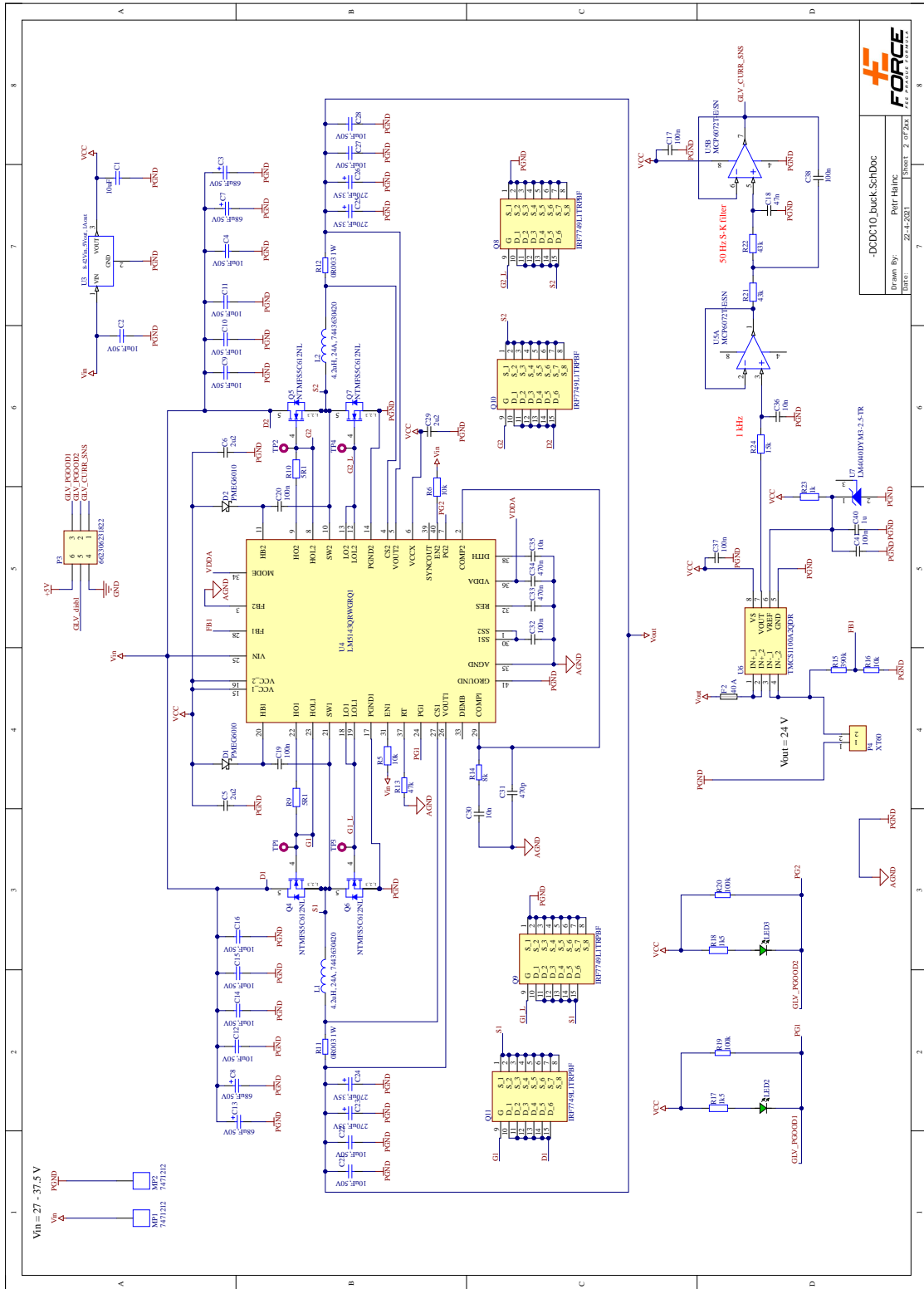


Příloha G

Schéma zapojení a layout desky DC/DC měniče

G. Schéma zapojení a layout desky DC/DC měniče





FORCE
 Petr Hájek
 -DC/DC buck-SchDoc
 Datum: 22.4.2021 | Sheet: 2 of 2X1

G. Schéma zapojení a layout desky DC/DC měniče

